

Proračun elektromagnetnih prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama

Verzija 2.1

Milan Savić

Beograd

1. Decembar 2025

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Katedra za Elektroenergetske sisteme

Autor: Dr. Milan Savić

profesor Elektrotehničkog fakulteta penziji

Redovni član Akademije inženjerskih nauka Srbije (AINS)

Recenzent: Dr. Mladen Banjanin,

Vanredni profesor na Elektrotehničkom fakultetu

Univerziteta u Istočnom Sarajevu.

ISBN-978-86-908568-0-0

Beograd 2025

Sadržaj

I	Teorijski opis metoda i modela	7
1	Proračuni prelaznih procesa	8
2	Mreže sa koncentrisanim parametrima	11
3	Mreže sa raspoređenim parametrima	42
4	Trofazna transformacija	127
5	Mešovite mreže	149
6	Parametri atmosferskih pražnjenja	177
7	Modelovanje elemenata	194
8	Rizik kvara usled atmosferskih prenapona	306
9	Indukovani prenaponi	368
10	Šeme za proračun atmosferskih prenapona	385
11	Analiza ugroženosti trofaznih vodova	390

12 Energija oslobođena u odvodniku prenapona	399
II Primeri proračuna prelaznih procesa	5
A Zaštitno uže na vodovima srednjeg napona	6
B Udar u gromobransku instalaciju objekta	12
C Zaštita stubnih transformatorskih stanica	31
D Zaštita transformatora pri HE	43
E Prenaponi pri intermitentnom zemljospoju	51
F Prenaponska zaštita objekata niskog napona	64
G Kvarovi usled upotrebe Is Limitera	85
H Požar usled indukovanih prenapona	98
I Uticaj jonizacije tla	106
J Analiza proboja u postrojenju elektrofiltra	119
K Zaštita instalacija u tunelima	130
L Analiza rizika preskoka na 110 kV vodovima sa linijskim odvodnicima prenapona	161
M Modelovanje udarnog naponskog generatora	166

N Razvoj delila za udarne napone**178**

Predgovor

Ovaj rukopis nastao je na osnovu predavanja na redovnim studijama iz predmeta Tehnika visokog napona 1 (prenaponi i koordinacija izolacije u elektroenergetskim mrežama), manjim delom Tehnika visokog napona 2 (izolacija u tehnici visokog napona, visokonaponski ispitni uređaji za laboratorije za visoki napon i visokonaponska merenja), predmeta Visokonaponska oprema (fizika sklopnih operacija u elektroenergetskim mrežama), predavanja na magistarskim, kasnije master studijama i predavanja na doktorskim studijama iz predmeta Prelazni procesi u elektroenergetskim sistemima.

Rukopis je i rezultat sopstvenog razvoja računarskih programa za proračun sklopnih i atmosferskih prenapona od 1974, kao specijalizovanih softvera, u doba kada su ovakvi proračuni bili na početku razvoja. U međuvremenu su razvijani u svetu različiti akademski i komercijalni programi za rešavanje prelaznih režima u različitim oblastima elektrotehnike. Neki od tih programa su korišćeni za rešavanje problema iz prakse koji su opisani u ovom rukopisu. Program "Grom" za proračun atmosferskih prenapona i procenu rizika kvara izolacije u statističkom pristupu koordinacije izolacije i "Komut" za proračun sklopnih prenapona su razvijani na Fakultetu i korišćeni za sopstvene potrebe i edukaciju studenata.

Za rešavanje praktičnih problema i studija koji su opisani u primerima, pored sopstvenih programa razvijenih na Fakultetu, korišćeni su programi "AtpDraw" kao grafički predprocesor programa EMTP-atp (Elektromagnetic Transient Program -Alternative Transient Program) [26], zatim "MatLab" [29] sa alatom "SimPowerSystems" i drugim alatima, kao i program "DigSilent PowerFactory" (Digital Simulation and Network Calculation), [114].

Rukopis je podeljen na dva dela. Prvi deo čine osnovna teorijska objašnjenja do sekcije 3.8 odnosno strane 119, kao i poglavlje 6, koja se izučavaju na osnovnim studijama. U ostalom delu se obrađuju naprednija modelovanja pojedinih elemenata elektroenergetskih sistema, parametri atmosferskih pražnjenja, kao i objašnjenja primenjenih računskih metoda za simulaciju prelaznih režima.

Drugi deo čine odabrani primeri iz prakse u kojima su rešavani problemi za različite naručioce. Zahvaljujući primeni računarskih programa, kao i eksperimentalnim istraživa-

njima, urađen je veći broj studija, projekata i ekspertiza za domaće i inostrane naručioce. Istraživanja su rađena najviše u oblasti koordinacije izolacije i izboru prenaponske zaštite, kao i ekspertize u slučajevima havarija.

Namena ovoga rukopisa je da pomogne studentima i inženjerima da sagledaju načine rešavanja konkretnih inženjerskih problema korišćenjem numeričkih simulacija prelaznih režima. Osim toga, rukopis može da pomogne razumevanju nekih principa modelovanja koji se koriste kod savremenih programa za modelovanje prelaznih procesa.

Doprinos u ovoj oblasti dao je veći broj diplomaca, studenata magistarskih studija, kasnije master studija i doktoranata.

Ovom prilikom želim da zahvalim svima koji su pomogli razvoju ove oblasti kroz svoje studentske ili završne radove, kao i kolegama sa kojima sam sarađivao na rešavanju različitih praktičnih problema.

Doprinos praktičnim rezultatima u realizaciji projekata i studija koji su navedeni u primerima, kao i naučnim istraživanjima čiji su rezultati opisani u rukopisu i citirani u referencama, dale su sledeće kolege:

- Dr. Tomislav Rajić, docent na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Jovan Mikulović, redovni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Mladen Banjanin, vanredni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu.
- Dr. Mileta Žarković, vanredni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.
- Dr. Zlatan Stojković redovni prof. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Eksperimentalna istraživanja koja su opisana, izvršena su zahvaljujući velikom znanju i veštini Ratka Kovačića, dipl. ing, spoljašnjeg saradnika.

Posebno zahvaljujem kolegama Tomislavu Rajiću, docentu na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu i Mladenu Banjaninu, vanrednom prof. na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, na veoma korisnim savetima i primedbama.

Molim čitaoce koji imaju pitanja ili sugestije da se obrate autoru na email adresu: savic_ms@eunet.rs ili savic_ms@etf.rs.

Autor, Beograd 2025

Deo I

Teorijski opis metoda i modela

Poglavlje 1

Proračuni prelaznih procesa

Danas je razvijen veliki broj različitih programa za proračune brzih elektromagnetnih prelaznih procesa u električnim mrežama, a neki su specijalizovani za elektroenergetske mreže.

Svi prelazni procesi u elektroenergetskim mrežama se mogu podeliti na tri grupe:

1. Veoma brzi elektromagnetni prelazni režimi usled atmosferskih pražnjenja,
2. Prelazni režimi nastali radom sklopnih aparata, koji se mogu po frekvencijama podeliti na dve podgrupe:
 - Ultra brzi prelazni režimi u oklopljenim i gasom SF₆ izolovanim postrojenjima (GIS) usled operacija rastavljača, sa frekvencijama i preko 100 MHz,
 - Sklopni prenaponi u mrežama usled rada prekidača, sa frekvencijama od nekoliko stotina do 10 MHz.
3. Spori elektromehanički prelazni režimi, koji neće biti predmet ovog rukopisa.

Po načinu modelovanja svi elementi se mogu podeliti u dve grupe:

- Elementi predstavljeni raspoređenim parametrima,
- Elementi predstavljeni koncentrisanim parametrima.

Pri rešavanju prelaznih procesa usled atmosferskih prenapona se se mogu svi elementi predstaviti sa raspoređenim parametrima, stim što se neki elementi koji su po

svojoj prirodi sa koncentrisanim parametrima ekvivalentiraju kratkim vodovima. Takav je slučaj sa indukivitetima i kapacitetima. Koncentrisani omski otpori se ekvivalentiraju beskonačno dugim vodovima.

Pri proračunu sklopnih prenapona se mogu elementi koji su po svojoj prirodi sa raspoređenim parametrima ekvivalentirati koncentrisanim parametrima. Na primer vodovi se mogu ekvivalentirati sa više Π ili Γ četvorokrajnika, mada se time gubi na tačnosti. Stoga je dobro koristiti modele vodova kao elemente sa raspoređenim parametrima, a ostale elemente sa koncentrisanim parametrima.

Prilikom modelovanja prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama nailazi se na problem nelinearnih elemenata. Postoje dve vrste nelinearnosti, ilustrovane sa tipičnim primerima:

- Amplitudno nelinearni elementi
 1. nelinearni otpornici odvodnika prenapona.
 2. Pojava korone na vodovima.
 3. Nelinearna karakteristika magnećenja transformatora,
- Frekvencijski zavisni nelinearni elementi (kod nadzemnih vodova frekvencijski zavistan povratni put kroz zemlju, kao i površinski efekat kod faznih provodnika nadzemnih vodova i kablova).

Pored nelinearnosti bitna je nestacionarnost elemenata. Pod nestacionarnošću se podrazumeva promena karakteristika nekog elementa u toku vremena. Jedan od elemenata koji je nestacionaran je prekidač, koji u toku vremena menja položaj svojih kontakata.

U ovom rukopisu će biti date osnovne koncepcije proračuna atmosferskih prenapona, sa posebnim naglaskom na statistički prilaz koordinaciji izolacije vodova i postrojenja.

U slučaju proračuna atmosferskih prenapona se po pravilu koriste jednopolne šeme. Kod modelovanja nadzemnih vodova se modeluje najviši fazni provodnik i zaštitno uže iznad njega. Na primer, ako razmatramo slučaj udara groma u zaštitno uže ispred postrojenja, tada povratni preskok nastaje prema najvišem faznom provodniku, a u slučaju horizontalnog rasporeda provodnika preskok nastaje na fazi koja je najbliža metalnoj konstrukciji stuba. U slučaju srednjenaponskih ili niskonaponskih vodova može se pretpostaviti da dolazi do preskoka na mestu udara između faza. Nadalje se prostiranje talasa događa po toj fazi ka objektu koji se analizira. To znači da nema potrebe da se analiziraju procesi na drugim fazama.

Jedini izuzetak je statistička analiza broja preskoka na visokonaponskim vodovima kod koje želimo da napravimo razliku između broja jednopolnih kvarova koje isključuje

sistem brzog automatskom ponovnog uključenja (APU) i višefaznih kvarova koje prekidač isključuje trolejno i čeka naredbu za ponovno uključenje.

Takođe će biti dati osnovni principi proračuna sklopnih prenapona, koji su zajednički za većinu programa koji se danas koriste. U rukopisu su dati generalni principi metoda proračuna, koji olakšavaju razumevanje rada pojedinih programa.

Poglavlje 2

Mreže sa koncentrisanim parametrima

2.1 Definicije elemenata sa koncentrisanim parametrima

Osnovni elementi električnih kola koji se predstavljaju koncentrisanim parametrima mogu se podeliti na dve grupe:

- Aktivni elementi
- Pasivni elementi

Aktivni elementi električnih kola su izvori, koji se mogu podeliti na dva tipa:

- Naponski izvori
- Strujni izvori

U električnim šemama se izvori mogu definišati na dva načina:

- idealni izvori, a unutrašnje impedanse izvora se dodaju kao eksterni pasivni elementi.
- realni izvori, koji u sebi sadrže impedansu grane.

2.1.1 Pasivni elementi

Pasivni elementi koji će biti razmatrani pri obrazovanju jednačina stanja električnog kola su:

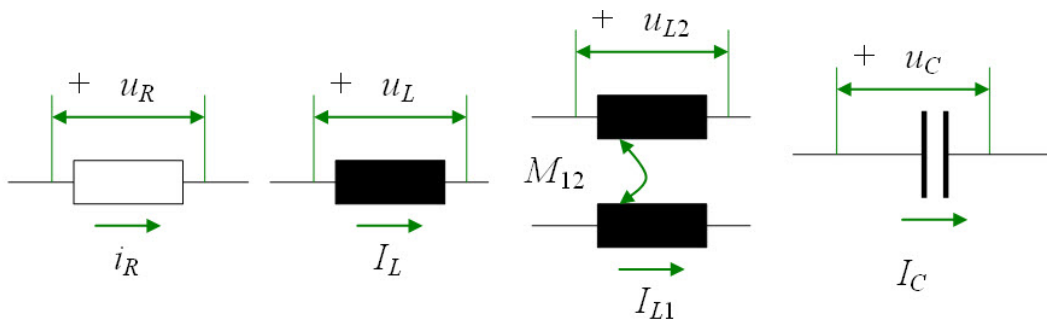
- Rezistivni elementi (otpornici), čija je osnovna karakteristika otpornost R ili recipročna vrednost G ,
- Induktivni elemenat (kalem), čija je osnovna karakteristika induktivnost L ,
- Spregnuti induktivni elementi (kalemovi), čija je osnovna karakteristika induktivnost sprege L_{12} ,
- Kapacitivni elementi (kondenzatori), čija je osnovna karakteristika kapacitivnost C .

Induktiviteti mogu da budu sopstveni induktiviteti grane ili međusobni induktiviteti dve grane.

Osnovne veze između trenutnih električnih veličina na različitim elementima kola date su sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}
 u_R(t) &= R \cdot i(t) \\
 i_R(t) &= G \cdot u(t) \\
 u_{L1}(t) &= L_1 \cdot \frac{di(t)}{dt} \\
 u_{L2}(t) &= M_{12} \cdot \frac{di_{L1}(t)}{dt} \\
 i_C(t) &= C \cdot \frac{du(t)}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Orijentacije napona i struja na pojedinim elementima prikazane su na slici 2.1.

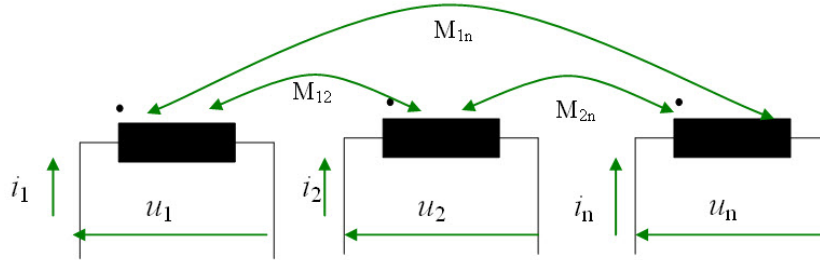


Slika 2.1: Naponi i struje na pojedinim elementima

Uoliko imamo n magnetno spregnutih kaleмова, koji nisu u galvanskoj vezi, tada se trenutni naponi na krajevima kaleмова i struje kroz kalemove prikazati sledećim matričnim izrazom.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & \pm M_{12} & \pm M_{13} & \dots & \pm M_{1n} \\ \pm M_{12} & L_{12} & \pm M_{23} & \dots & \pm M_{2n} \\ & & & \dots & \\ \pm M_{n1} & \pm M_{n2} & \pm M_{3n} & \dots & L_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_n}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Na slici 2.2 prikazana je magnetska sprega n kalemova. Crna tačka pored simbola za kalem označava orijentaciju motanja, od koje zavisi predznak za vrednosti međusobnog induktiviteta u izrazu 2.2. Ako se smerovi struja isti za dva kola i smerovi namotavanja se poklapaju, tada se nalazi znak $+$ uz vrednost međusobnog induktiviteta.



Slika 2.2: Definicija magnetno spregnutih kalemova sa oznakama smerova

Da li će otpornik biti predstavljen kao R ili G elemenat zavisi isključivo od prirode susednih elemenata. Kada je moguće, treba se držati sledećih pravila:

- Otpornik vezan na red sa induktivnim kalemom se deklariše kao R elemenat,
- Otpornik vezan paralelno sa kondenzatorom se deklariše kao G elemenat,

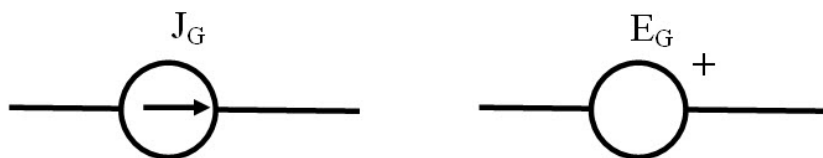
U ostalim slučajevima se vrši transformacija ekvivalentne šeme prema sledećim pravilima:

- Otpornik na red sa drugim otpornikom se ekvivalentira jednim ekvivalentnim otpornikom,
- Otpornik vezan paralelno sa induktivnim kalemom se transformiše u ekvivalentnu rednu vezu,
- Otpornik vezan na red sa kondenzatorom se transformiše u ekvivalentnu paralelnu vezu.

Po pravilu su ovakvi slučajevi u elektroenergetskim mrežama retki.

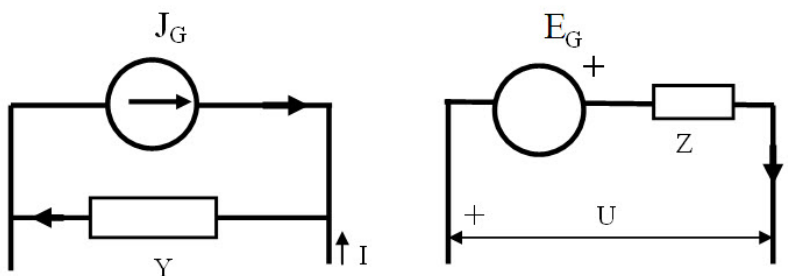
2.1.2 Aktivni elementi

Aktivni elementi su naponski i strujni izvori. Na slici 2.3 levo prikazan je idealan strujni izvor (amplituda i vremenski tok struje su nezavisni od električnog kola u koje je izvor uključen). Na slici 2.3 desno prikazan je naponski izvor kod koga amplituda i vremenski tok napona ne zavise od struje koju izvor daje.



Slika 2.3: Idealni strujni izvor (levo) i idealni naponski izvor (desno)

Realni električni izvori prikazani su na slici 2.4:



Slika 2.4: Realni strujni (levo) i naponski izvor (desno)

Oznake i jednačine koje opisuju električne veličine date su velikim slovima. Smatraćemo da se radi o operatorskim veličinama (zavisne od Laplasovog operatora $\mathbf{p}$ ili od kružne učestanosti ω).

Izraz koji definiše odnose električnih veličina kod grane sa strujnim izvorom, sa odabranim smerovima grana, ima oblik:

$$I(p) = Y(p) \cdot U(p) - J_G(p) \quad (2.3)$$

Izraz koji definiše odnose električnih veličina kod grane sa naponskim izvorom, sa odabranim smerovima grana, ima oblik:

$$U(p) = Z(p) \cdot I(p) - E_G(p) \quad (2.4)$$

2.1.3 Nelinearni i nestacionarni elementi

Nelinearni elementi

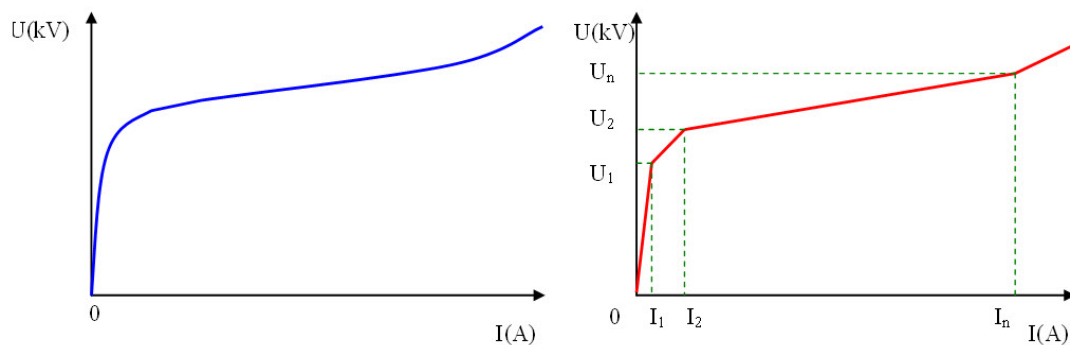
Nelinearni elementi sa koncentrisanim parametrima su elementi čija vrednost nekog parametra zavisi od napona ili struje na elementu. Najčešće primenjivani nelinearni elementi su:

- Odvodnici prenapona sa nelinearnim otpornicima (varistorima),
- Nelinearna karakteristika magnećenja transformatora.

Jedna od podela modelovanja nelinearnih elemenata se može prikazati na sledeća dva načina.

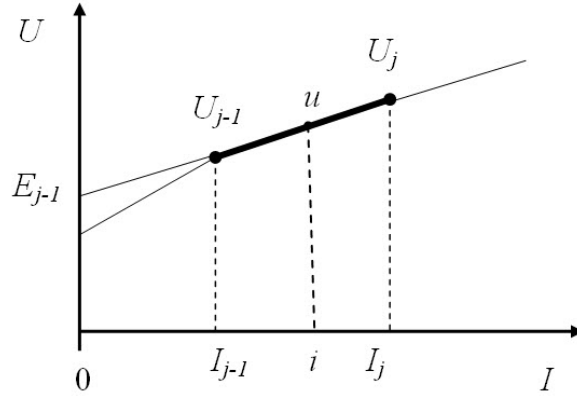
- kontinualno modelovanje nelinearne karakteristike,
- linearno-segmentno modelovanje nelinearne karakteristike.

Na slici 2.5 prikazana je predhodna podela modelovanja za slučaj odvodnika prenapona.

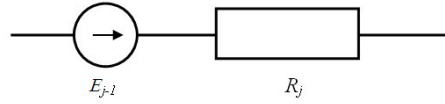


Slika 2.5: Modelovanje nelinearnih elemenata sa skoncentrisanim parametrima za slučaj odvodnika prenapona (levo: kontinualni model nelinearnosti, desno: linearno-segmentni model nelinearnosti)

Prednost kontinualnog modelovanja je veća tačnost modelovanja, a prednost linearno-segmentnog modelovanja je izbegavanje iterativnog rešavanja, veća brzina proračuna i stabilnost numeričkog rešavanja. Na slici 2.6 prikazan je princip određivanja napona kod linearno segmentnog modela.



Slika 2.6: Linearno-segmentno model nelinearnog otpornika

Slika 2.7: Model nelinearne grane na segmentu j karakteristike odvodnika

Za slučaj kada je napon na otporniku između vrednosti U_{j-1} i U_j , grana sa otpornikom se modeluje kao redna veza idealnog naponskog izvora elektromotorne sile E_{j-1} i otpornika, kao na slici 2.7.

Dinamička otpornost grane sa otpornikom za segment j se može izračunati iz sledećeg izraza:

$$R_j = \frac{\partial U}{\partial I} = \frac{U_j - U_{j-1}}{I_j - I_{j-1}} \quad (2.5)$$

Napon na grani za segment j se izračunava iz izraza:

$$u = E_{j-1} + R_j \cdot i \quad (2.6)$$

gde je struja i određena predhodno na segmentu između I_{j-1} i I_j . Na identičan način se može odrediti struja kroz otpornik ako je poznat napon, odnosno:

$$i = I_{j-1} + \frac{u}{R_j} \quad (2.7)$$

Oznake u i i se odnose na trenutne vrednosti napona i struja na grani sa nelinearnim otpornikom za odgovarajući segment.

Nestacionarni elementi

Nestacionarni elementi su oni elementi koji menjaju vrednost u toku vremena. Kao najvažniji nestacionaran element biće opisan prekidač. Pod prekidačem će se podrazumevati svi uređaji koji mogu da uključuju ili prekidaju struju. To mogu biti:

1. mehanički prekidači,
2. sklopke,
3. rastavljači,
4. osigurači.
5. iskrišta i drugo.

Modeli svih prekidača se dele na sledeće dve grupe:

- idealni prekidači,
- realni prekidači.

Pod idealnim prekidačem podrazumeva se elemenat koji u grani mreže menja impedansu od nule do vrlo velike vrednosti. Grana sa idealnim prekidačem može biti sa omskim otpornikom, koji menja vrednost od vrlo male do vrlo velike vrednosti, ili kombinacija induktivnog kalema i omske otpornosti. Pri tome impedansa grane ima samo dve vrednosti koje odgovaraju otvorenim i zatvorenim kontaktima.

Drugi način modelovanja će detaljnije biti prikazan na ovom mestu. Po ovom modelu se grana sa idealnim prekidačem (koja može biti u obliku otpornika, induktivnog kalema ili kombinacije), prekida i ponovo uspostavlja. Svaka promena stanja prekidača menja konfiguraciju kola.

Model realnog prekidača u sebi sadrži nelinearnu i nestacionarnu otpornost luka, koja zavisi od struje i brzine promene struje kroz luk, a obuhvata termodinamičke procese u luku čije je modelovanje veoma složeno. Po svojoj strukturi modeli realnih prekidača se dele na dva tipa:

- modelovanje fizičkih procesa u luku,
- model crne kutije, koji daje matematičke modele koji najbolje simuliraju izmerene rezultate prilikom laboratorijskih ispitivanja prekidača u laboratorijama velike snage.

2.2 Omov zakon u matričnom obliku

U slučaju mreže u kojoj ima veći broj grana sa naponskim izvorima može se napisati Omov zakon u matričnom obliku u sledećoj formi:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(p) & Z_{12}(p) & \dots & Z_{1n}(p) \\ Z_{21}(p) & Z_{22}(p) & \dots & Z_{2n}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1}(p) & Z_{n2}(p) & \dots & Z_{nn}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(p) \\ I_2(p) \\ \dots \\ I_n(p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

U izrazu 2.8 vandijagonalni elementi Z_{ij} uvažavaju međusobno induktivno dejstvo grana i i j . Ukoliko nema međusobnog dejstva, tada je taj deo matrice dijagonalan.

U skraćenom obliku izraz 2.8 se može napisati u matričnoj formi.

$$[U(p)] = [Z(p)][I(p)] - [E_G(p)] \quad (2.9)$$

gde su:

$$\begin{aligned} [E_G(p)] &= \text{vektor elektromotornih sila u svim granama u operatorskom domenu,} \\ [U(p)] &= \text{vektor napona na svim granama u operatorskom domenu,} \\ [I(p)] &= \text{vektor struja kroz sve grane u operatorskom domenu,} \\ [Z(p)] &= \text{matrica operatorskih impedansi.} \end{aligned}$$

Umesto u operatorskom domenu, matrični izrazi za Omov zakom mogu se pisati i za vremenski domen, ali bi u tom slučaju vektori napona i elektromotornih sila bili dati kao trenutne vrednosti, a struje bi bile date u obliku trenutnih vrednosti ili izvoda trenutnih vrednosti u zavisnosti od prirode impedanse grane kroz koju se struja posmatra. Zbog jednostavnosti i generalnog pristupa na ovom mestu se koristi operatorski račun, koji će kasnije biti zamenjen vremenskim domenom.

U slučaju mreže u kojoj ima veći broj grana sa strujnim izvorima može se napisati Omov zakon u matričnom obliku u sledećoj formi:

$$[I(p)] = [Y(p)][U(p)] - [J_G(p)] \quad (2.10)$$

gde su:

$$\begin{aligned} [J_G(p)] &- \text{vektor struja idealnih strujnih izvora u svim granama u operatorskom domenu,} \\ [Y(p)] &- \text{matrica operatorskih admitansi.} \end{aligned}$$

2.3 Definicije grafova električne mreže

Pri objašnjavanju modela stanja električne mreže korišćeni su sledeći pojmovi:

Graf električne mreže se sastoji iz skupa čvorova i orijentisanih grana. Krajeve svake grane čine čvorovi.

Subgraf električne mreže predstavlja podskup grana i čvorova te mreže. Svaki čvor grafa može pripadati jednoj ili više grana.

Stepen čvora predstavlja broj grana koje se stiču u čvor.

Graf je povezan ako se može doći do svakog čvora idući samo po granama grafa.

Snop predstavlja skup grana grafa koje treba ukloniti (prekinuti) da bi se graf raspao na dva nepovezana subgrafa. Uvek se orijentiše prema nekoj izabranoj grani snopa od jednog subgrafa ka drugom.

Kontura grafa predstavlja subgraf koji ima osobinu da su svi njegovi čvorovi stepena 2. Uvek se orijentiše prema nekoj izabranoj grani konture.

Stablo povezanog grafa predstavlja subgraf koji ima osobine da je povezan, da obuhvata sve čvorove grafa i da ne obrazuje konturu.

Ko-stablo predstavlja subgraf sastavljen od elemenata koji ne pripadaju stablu (komplement stabla). Grane ko-stabla nazivaju se spojnicama.

Potpunu informaciju o povezanosti grana i čvorova električne mreže dobijamo iz osnovnih incidentnih matrica.

Osnovne incidentne matrice su matrice koje nose punu informaciju o grafu, a minimalnog su oblika. Rang osnovnih incidentnih matrica jednak je broju vrsta.

U daljem izlaganju će se koristiti incidentne matrice nezavisnih čvorova, osnovnih snopova i osnovnih kontura.

2.4 Incidentne matrice

2.4.1 Matrica čvorova

Kod matrice čvorova $[A_a]$ kolone odgovaraju pojedinim granama, a vrste pojedinim čvorovima. Elementi matrice su $+1$ ako je grana incidentna čvoru i orijentisana od čvora,

-1 ako je grana incidentna čvoru i orijentisana ka čvoru, a 0 ako nije incidentna čvoru. Matrica čvorova ima c vrsta i b kolona, ako je c broj čvorova, a b broj grana.

2.4.2 Matrica snopova

Pod snopom (presekom) se podrazumeva skup od jedne ili više grana, čijim presecanjem se graf raspada na dva subgrafa. Stoga za svaki snop važi prvi Kirhofov zakon da je suma struja u granama koje čine snop jednaka nuli. Ako to nije ispunjeno, to bi značilo da postoji još neka grana kroz koju be se zatvarala struja, a to bi bilo suprotno definiciji snopa kao skupa grana čijim presecanje se graf raspada na dva subgrafa. Smatramo da je snop uopštenje pojma čvora.

Kod matrice snopova $[Q_a]$ kolone odgovaraju pojedinim granama, a vrste pojedinim snopovima. Elementi matrice su $+1$ ako je grana incidentna snopu i orijentacija se poklapa sa orijentacijom snopa, -1 ako je grana incidentna snopu i orijentisana suprotno od orijentacije snopa, a 0 ako nije incidentna snopu. Matrica snopova ima θ vrsta i b kolona, ako je θ broj snopova, a b broj grana.

2.4.3 Matrica kontura

Kod matrica kontura $[B_a]$ kolone odgovaraju pojedinim granama, a vrste pojedinim konturama. Elementi matrice su $+1$ ako se grana nalazi u konturi i ako se poklapaju orijentacije grane i konture; -1 ako se grana nalazi u konturi, ali su suprotnih orijentacija; 0 ako se grana ne nalazi u konturi. Matrica konture sadrži b kolona i μ vrsta gde je b broj grana, a μ broj kontura grafa.

2.5 Osnovne incidentne matrice

Osnovne incidentne matrice su matrice koje nose punu informaciju o grafu, a minimalnog su oblika. Rang osnovnih incidentnih matrica jednak je broju vrsta.

2.5.1 Matrica osnovnih snopova

Matrica osnovnih snopova $[Q_f]$ se dobija na taj način što se prvo za posmatrani graf odredi jedno stablo. Pod osnovnim snopom se podrazumeva snop koji sadrži samo po jednu granu stabla, a sve ostale grane su grane ko-stabla. Orijetacija snopa se slaže

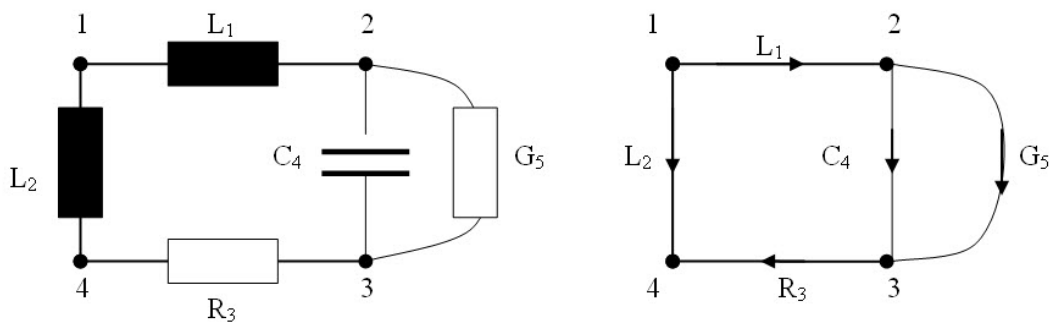
sa orijentacijom grane stabla koja definiše osnovni snop. Broj osnovnih snopova je n . Matrica snopova u kojoj su izbrisane sve vrste koje ne odgovaraju osnovnim snopovima naziva se matricom osnovnih snopova.

2.5.2 Matrica osnovnih kontura

Matrica osnovnih kontura $[B_f]$ se dobija na taj način što se za posmatrani graf odredi jedno stablo. Pod osnovnim konturama grafa se podrazumevaju konture koje sadrže samo po jednu granu ko-stabla, a sve ostale grane su grane stabla. Grana ko-stabla definiše konturu i prema njoj se orijentišemo. Broj osnovnih kontura je $m = b - n$, gde je n broj nezavisnih čvorova, odnosno broj grana stabla, a b ukupan broj grana grafa. Matrica kontura u kojoj su izbrisane sve vrste koje ne odgovaraju osnovnim konturama naziva se matricom osnovnih kontura.

2.5.3 Primer proizvoljne mreže i odgovarajućih incidentnih matrica

Na slici 2.8 prikazana je proizvoljna pasivna mreža sa 5 grana i odgovarajući graf mreže. Čvorovi su obeleženi brojevima, a grane oznakama elemenata grane i brojem u indeksu.



Slika 2.8: Primer pasivne mreže sa 5 grana (levo) i odgovarajući graf mreže (desno)

Izabrane su grane koje čine stablo L_1 , L_2 i R_3 , koje su nacrtane podebljano. Grane ko-stabla čine C_4 i G_5 . Ukupan broj čvorova mreže je $c = 4$, a ukupan broj grana je $b = 5$.

Matrica čvorova ima sledeći oblik:

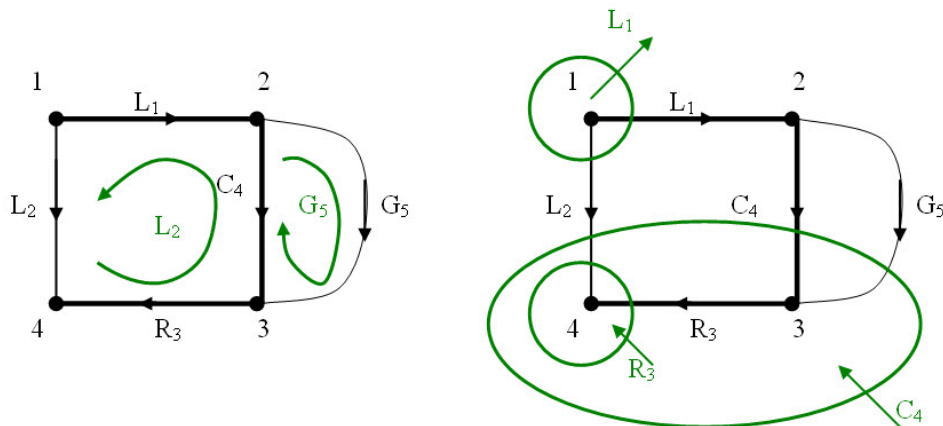
$$[A] = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & R_3 & C_4 & G_5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.11)$$

Iznad matrice čvorova označene su grane koje definišu kolone, a sa leve strane ispisani su brojevi čvorova koji definišu vrstu.

Matrica nezavisnih čvorova se dobija kada se bilo koji čvor mreže proglasi referentnim čvorom. U slučaju kada se čvor 3 proglasi referentnim čvorom, u matrici nezavisnih čvorova se briše vrsta koja odgovara referentnom čvoru. U tom slučaju matrica nezavisnih čvorova ima sledeći oblik:

$$[A_f] = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & R_3 & C_4 & G_5 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.12)$$

Na slici 2.9 definisane su grane koje definišu stablo (grane L_1 , C_4 i R_3) kojima pripadaju svi čvorovi, a ne formiraju konturu. Takođe su definisane spojnice (grane koje definišu konture). Na slici 2.9 levo grane L_2 i G_5 svojim smerovima definišu smer konture. Snopove čini skup grana čijim bi presecanjem se graf raspao na dva nezavisna subgrafa. Snopove čine po jedna grana stabla, koja definiše orijentaciju snopa, a ostale grane su spojnice. Na slici 2.9 desno, grana L_1 definiše snop koji čine grane L_1 i L_2 i odvaja čvor 1 od ostatka mreže. Snop koji čine grane L_2 , C_4 i G_5 , koji je definisan granom C_4 deli mrežu na dve nezavisne mreže. Snop koji čine grane L_2 , R_3 odvaja čvor 3 od ostatka mreže.



Slika 2.9: Primer definisanja stabla, nezavisnih kontura i osnovnih snopova

Osnovne konture obeležene su istom oznakom kao grane ko-stabla koja definiše konturu. Pored svake vrste sa leve strane matrice, napisana je oznaka grane koja definiše konturu. Matrica osnovnih kontura ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} B_f \end{bmatrix} = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & R_3 & C_4 & G_5 \\ L_2 & \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.13)$$

Osnovni snopovi označeni su granama stabla koje obeležavaju odgovarajuće vrste koje odgovaraju snopovima. Oznake su napisane sa leve strane incidentne matrice. Matrica osnovnih snopova ima sledeći oblik:

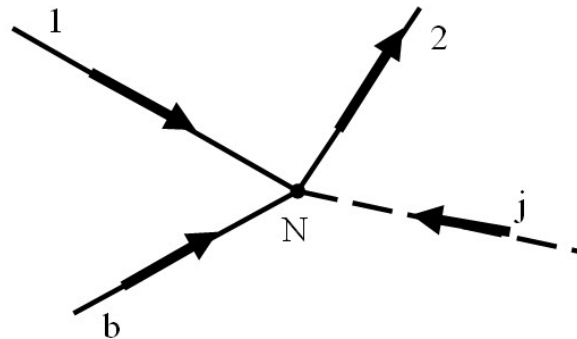
$$\begin{bmatrix} Q_f \end{bmatrix} = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & R_3 & C_4 & G_5 \\ L_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.14)$$

2.5.4 Kirhofovi zakoni u matričnom obliku

I Kirhofov zakon u matričnom obliku za mrežu sa koncentrisanim parametrima se može pisati za nezavisne čvorove ili za osnovne snopove. Drugi Kirhofov zakon se piše za osnovne konture. Na ovaj način zapisani Kirhofovi zakoni čine sistem linearnih jednačina.

Prvi Kirhofov zakon za nezavisne čvorove

Posmatrajmo čvor N koji nije referentni čvor neke mreže.



Slika 2.10: I Kirhofov zakon za čvor N

Prvi Kirhofov zakon za čvor N ima sledeći oblik:

$$\sum_{j=1}^b a_{Nj} \cdot i_{Nj} = 0 \quad (2.15)$$

gde su:

i_{Nj} - struje u grani j vezanoj za čvor N ,

b - ukupan broj grana mreže,

a_{Nj} - elemenat matrice incidencija čvorova $[A]$ koji ima vrednost $+1$ ako je grana j incidentna čvoru N i orijentisana od čvora, -1 ako je grana j incidentna čvoru N i orijentisana ka čvoru, a 0 ako nije incidentna čvoru.

Članovi matrice a_{Nj} predstavljaju elemente vrste N matrice čvorova $[A]$. Prvi Kirhofov zakon za svih c čvorova se može napisati u matričnom obliku:

$$[A_f] \cdot [i] = [0] \quad (2.16)$$

gde su:

$[i]$ - vektor struja svih grana,

$[A_f]$ - matrica nezavisnih čvorova, sa brojem vrsta c i brojem kolona b ,

$[0]$ - vektor reda c , čiji su svi elementi 0 ,

c - broj čvorova mreže,

b - broj grana mreže.

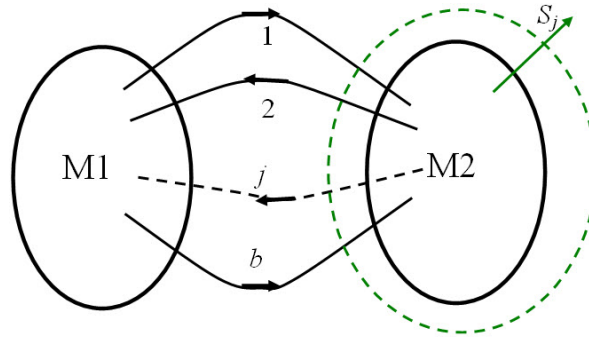
Elementi vektora $[i]$ se po redosledu slažu sa kolonama matrice $[A_f]$.

Prvi Kirhofov zakon za osnovne snopove

Prvi Kirhofov zakon o kontinuitetu struja ilustrovan je na primeru snopa koji je uopštenje pojma čvora u I Kirhovovom zakonu. Na slici 2.11 prikazan je snop koji se sastoji od grana $1, 2, \dots, j, \dots, b$, čijem presecanjem se graf mreže raspada na subgrafove M_1 i M_2 .

Grane koje pripadaju snopu su jedine grane koje su spojene sa podmrežama M_1 , odnosno M_2 , pa mora suma struja na tim granama da bude jednaka nuli, jer ne postoji ni jedna dodatna grana po kojoj bi se struje zatvarale. Zbog toga se može napisati opšti oblik prvog Kirhofovog zakona za snop S_j .

$$\sum_{j=1}^b q_{j,S_j} \cdot i_{j,S_j} = 0 \quad (2.17)$$



Slika 2.11: Ilustracija I Kirhofovog zakona za jedan snop

Koeficijenti q_{j,S_j} ($j = 1, 2, \dots, b$) označavaju elemente matrice incidencije koji imaju vrednosti $+1$ ako je grana incidentna snopu S_j i orijentacija se poklapa sa orijentacijom snopa, -1 ako je grana incidentna snopu S_j i orijentisana suprotno od orijentacije snopa, a 0 ako nije incidentna snopu. Ako se posmatra svih n osnovnih snopova, prvi Kirhofov zakon za osnovne snopove glasi:

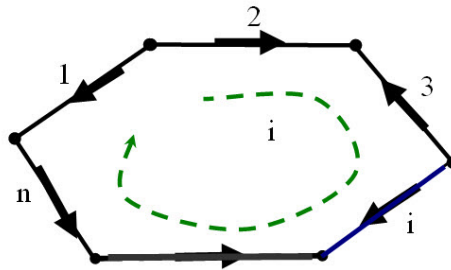
$$[Q_f] \cdot [I] = [0] \quad (2.18)$$

gde je $[Q_f]$ - matrica osnovnih snopova.

Za čvorove i snopove važi zakon kontinuiteta, tako da se smatra da je snop uopštenje čvora. Elementi vektora struja $[I]$ se po redosledu slažu sa kolonama matrice $[Q_f]$.

Drugi Kirhofov zakon za osnovne konture

Na slici 2.12 prikazana je jedna kontura čija je jedina grana koja pripada ko-stablu i , dok sve ostale grane pripadaju stablu. Zbog toga je kontura obeležena istom oznakom kao grana koja je definiše, odnosno i .

Slika 2.12: Jedna kontura sa n grana za koju se definiše II Kirhofov zakon

Drugi Kirhofov zakon za konturu i ima sledeći oblik:

$$\sum_{j=1}^b b_{ij} \cdot u_{ij} = 0 \quad (2.19)$$

Koeficijent b_{ij} za granu j i konturu i ima vrednost $+1$ ako se grana j nalazi u konturi i i ako se poklapaju orijentacije grane i konture; -1 ako se grana j nalazi u konturi i , ali su suprotnih orijentacija; 0 ako se grana ne nalazi u konturi i .

Koeficijenti b_{ij} , ($j = 1, 2, \dots, b$) su elementi jedne vrste koja odgovara konturi i matrice kontura. Ako se posmatra svih m osnovnih kontura, drugi Kirhofov zakon se može pisati u matričnom obliku:

$$[B_f] \cdot [U] = [0] \quad (2.20)$$

Elementi vektora $[U]$ se po redosledu slažu sa kolonama matrice $[B_f]$.

2.5.5 Veze grana stabla i ko-stabla u incidentnim matricama

Uveden je indeks 1 za grane stabla u kolonama matrica incidencija, a indeks 2 za grane ko-stabla, pa je redosled kolona preuređen tako da prve kolone budu za grane stabla, a zatim dolaze grane ko-stabla. U matrici osnovnih snopova postoji samo jedna grana stabla koja je incidentna snopu, sve ostale su grane ko-stabla. Vrste u matrici osnovnih snopova odgovaraju pojedinim snopovima. Zbog toga prvih n kolona koji odgovara granama stabla i n vrsta koje odgovaraju snopovima definisanih granama stabla čine jediničnu submatricu I_n kvadratnog oblika reda n .

Sada se može matrica snopova pisati u sledećem obliku:

$$[Q_f] = [I_n | Q_{12}] \quad (2.21)$$

$[Q_{12}]$ je submatrica osnovnih snopova čije kolone odgovaraju granama ko-stabla.

Ako se promeni redosled pisanja kolona matrice osnovnih kontura, tada se ona može napisati u sledećem obliku:

$$[B_f] = [B_{11} | I_m] \quad (2.22)$$

$[B_{11}]$ je submatrica osnovnih kontura čije kolone odgovaraju granama stabla.

$[I_m]$ je jedinična submatrica m -tog reda osnovnih kontura čije kolone odgovaraju granama ko-stabla, koje definišu osnovne konture.

Postoji sledeća zakonitost:

$$[Q_{12}] = -[B_{11}]^t \quad (2.23)$$

gde je $[B_{11}]^t$ transponovana matrica $[B_{11}]$.

Na osnovu relacije 2.21 može se prvi Kirhofov zakon 2.18 pisati u sledećem obliku:

$$[I_n|Q_{12}] \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [0] \quad (2.24)$$

gde je $[I_n]$ - jedinična matrica reda n ,

$[I_1]$ i $[I_2]$ su struje granama stabla i ko-stabla.

Na osnovu relacije 2.22 može se drugi Kirhofov zakon pisati u obliku:

$$[B_{11}|I_m] \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [0] \quad (2.25)$$

Iz 2.24 dobija se veza između struja grana stabla na osnovu struja u granama ko-stabla.

$$[I_1] = -[Q_{12}] \cdot [I_2] \quad (2.26)$$

Na isti način se iz 2.25 dobija veza između napona grana ko-stabla na osnovu napona na granama stabla.

$$[U_2] = [Q_{12}]^t \cdot [U_1] \quad (2.27)$$

Oba Kirhofova zakona se mogu pisati u zajedničkoj formi:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Q_{12} \\ -B_{11} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

2.5.6 Normalno stablo

Formiranje normalnog stabla predstavlja prvu fazu u formiranju jednačina stanja električne mreže, koje predstavljaju minimalan sistem diferencijalnih jednačina prvog reda koje omogućavaju jednostavno numeričko rešavanje. Pod normalnim stablom se podrazumeva stablo koje sadrži maksimalan broj kapacitivnih i minimalan broj induktivnih grana.

Cilj formiranja normalnog stabla je da u jednačinama stanja figuriraju samo naponi na kondenzatorima koji pripadaju stablu i struje na kalemovima koje pripadaju ko-stablu. Na taj način se postiže minimalan oblik jednačina stanja.

Uvedimo oznake za stabla pojedinih subgrafova: $T_{\overline{el_1}, el_2}$ -stablo u mreži sastavljenoj od elemenata el_2 , dok su elementi $\overline{el_1}$ kratko spojeni, a ostali uklonjeni. Formiranje normalnog stabla vrši se u 4 koraka:

I korak: Formiranje stabla T_C (stablo u mreži koja sadrži samo kapacitivne grane, dok su sve ostale grane prekinute).

II korak: Formiranje stabla $T_{\overline{C}, G}$ (stablo u mreži koja sadrži samo provodnosti, dok su grane sa kapacitivnostima kratko spojene, a ostale grane prekinute). Skup grana ovog stabla predstavlja prazan skup zbog toga što su G elementi uvek u kapacitivnim konturama (odnosno paralelni kondenzatrima), koji se ovom prilikom kratko spajaju.

III korak: formiranje stabla $T_{\overline{C}, \overline{G}, R}$ (stablo u mreži sastavljenoj od otpornosti, dok su kapacitivnosti i provodnosti kratko spojene, a ostali elementi prekinuti).

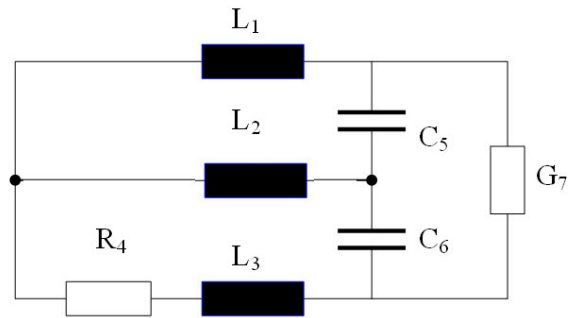
IV korak: Formiranje stabla $T_{\overline{C}, \overline{G}, \overline{R}, L}$ (stablo u mreži u kojoj su svi elementi osim induktivnosti kratko spojeni). Normalno stablo predstavlja uniju ovih stabala:

$$T = T_C \cup T_{\overline{C}, G} \cup T_{\overline{C}, \overline{G}, R} \cup T_{\overline{C}, \overline{G}, \overline{R}, L} \quad (2.29)$$

2.5.7 Primer određivanja normalnog stabla

Na slici 2.13 prikazana je proizvoljna mreža za koju se određuje normalno stablo.

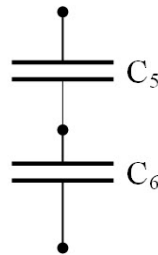
Normalno stablo će se formirati korak po korak.



Slika 2.13: Električna mreža za koje se određuje normalno stablo

I korak

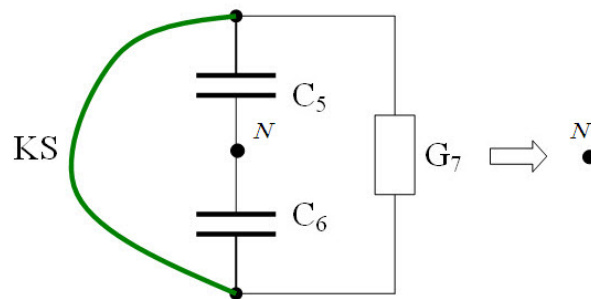
U prvom koraku se formira mreža koju čini deo stabla od kapacitivnih grana T_C , dok su ostale grane uklonjenje. Skica ovog stabla data je na slici 2.14.

Slika 2.14: Mreža koju čini deo stabla od kapacitivnih grana T_C , dok su ostale grane uklonjenje**II korak**

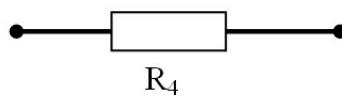
Formiranje stabla $T_{\overline{CG}}$ koji predstavlja prazan skup, jer su kapacitivnosti kratko spojene. Na slici 2.15 ilustrovan je II korak formiranja normalnog stabla iz koga se vodi da ni jedna grana ne može da se pridruži normalnom stablu. Od cele mreže preostaje samo zajednička tačka N bez ijedne grane.

III korak

Formiranje stabla $T_{\overline{CGR}}$ koji predstavlja stablo u mreži koja se sastoji od otpornika, dok su kondenzatori i omske provodnosti kratko spojene. kao na slici 2.16.



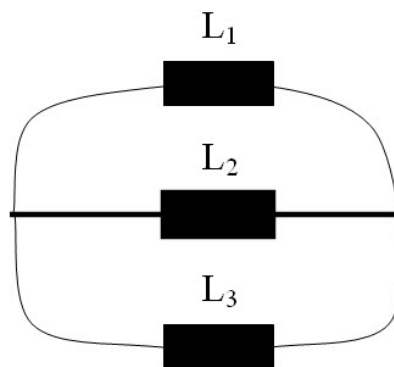
Slika 2.15: Ilustracija II koraka formiranja normalnog stabla, koji praktično nema doprinos



Slika 2.16: Formiranje stabla u mreži sa otpornicima

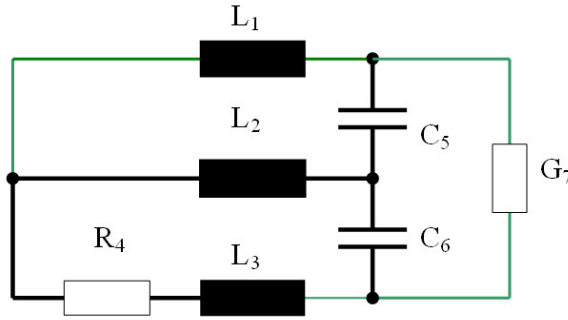
IV korak

Formiranje stabla u mreži u kojoj su svi elementi osim induktivnih kalemova kratko spojeni $T_{\overline{CGR}L}$ kao na slici 2.17.



Slika 2.17: Formiranje stabla u mreži sa kalemovima

Konačan izgled normalnog stabla, koje je označeno podebljanim linijama, dat je na slici 2.18.



Slika 2.18: Kompletna mreža sa normalnim stablom nacrtanim podebljanim crnim linijama

2.6 Jednačine stanja

2.6.1 Definicija jednačine stanja

Jedan od pristupa modelovanju mreže u prelaznom periodu je pretstavljjanje elemenata mreža šemama sa koncentrisanim parametrima. Matematički model mreža u prelaznom režimu može se opisati sistemom diferencijalnih jednačina stanja.

Pod sistemom diferencijalnih jednačina stanja se podrazumeva sistem diferencijalnih jednačina prvog reda napisanih tako da su svi izvodi promenljivih sa leve strane, a promenljive na desnoj strani. Promenljive čiji izvodi figuriraju u diferencijalnim jednačinama se nazivaju promenljivim stanja. Ostale promenljive se nazivaju algebarskim promenljivim. Ovakav sistem diferencijalnih jednačina naziva se normalizovanim sistemom diferencijalnih jednačina.

U opštem slučaju sistem diferencijalnih jednačina u normalnom obliku ima sledeću formu:

$$[x'] = [M] \cdot [x] + [F(t)] \quad (2.30)$$

$$[y] = [N] \cdot [x] + [G(t)] \quad (2.31)$$

gde su:

$[x]$, $[x']$ – vektori promenljivih stanja i njihovi izvodi po vremenu,

$[y]$ – algebarske promenljive, promenljive čiji izvodi ne figurišu u diferencijalnim jednačinama,

$[M]$, $[N]$ – kvadratne matrice koeficijenata. U slučaju da ovi koeficijenti nisu konstante, već su funkcije nekih promenljivih, sistem jednačina stanja je nelinearan. To su slučajevi nelinearne karakteristike magnećenja transformatora, nelinearnih otpora

odvodnika prenapona, nelinearnog otpora luka i drugi slučajevi. U slučaju da dolazi do promene vrednosti elemenata u vremenu, to se naziva nestacionarnim sistemom.

$[F(t)], [G(t)]$ – vektori funkcija izvora.

2.6.2 Diferencijalne jednačine stanja električne mreže

Rešavanjem jednačina stanja dobijaju se sve promenljive u mreži, za razliku od klasičnog postupka kada se cela mreža rešava po jednoj promenljivoj. Jednačine stanja predstavljaju sistem od n diferencijalnih jednačina prvog reda, dok bi se klasičnim postupkom sistem sveo na jednu jednačinu n -tog reda. Pored jednostavnog rešavanja na računaru prednost ovog postupka je što se istovremeno može izračunati više promenljivih stanja. U opštem slučaju jednačine dinamičke ravnoteže imaju sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} du_1/dt \\ di_2/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Jednačine stanja električne mreže imaju sledeći opšti oblik nakon izdvajanja izvoda električnih veličina na levu stranu:

$$\begin{bmatrix} du_1/dt \\ di_2/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ - \begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \right\} \quad (2.33)$$

Oznake u gornjem izrazu imaju sledeće značenje:

$[C]$ –kvadratna matrica kapacitivnosti snopova,

$[L]$ –kvadratna matrica induktivnosti kontura,

$[G]$ –kvadratna matrica provodnosti snopova,

$[K]$ –matrica veza izmedju električnih veličina snopova i kontura,

$[K]^t$ –transponovana matrica $[K]$,

$[u_1]$ –vektor napona na kapacitivnim grana stabla,

$[i_2]$ –vektor struja kroz induktivne grane ko-stabla,

$[I_c]$ –vektor struja ekvivalentnih strujnih izvora priključenih u kapacitivne snopove,

$[E_L]$ –vektor elektromotornih sila ekvivalentnih naponskih izvora u induktivnim konturama.

Matrica kapacitivnosti snopova se dobija na sledeći način:

$$[C] = [C_1] + [Q_{c_1, c_2 g_2}][C_2][Q_{c_1, c_2 g_2}]^t \quad (2.34)$$

gde su:

$[C_1]$ —dijagonalna matrica čiji su elementi na dijagonali kapacitivnosti u granama normalnog stabla,

$[C_2]$ —dijagonalna matrica čiji su elementi na dijagonali kapacitivnosti u granama ko-stabla,

$[Q_{c_1, c_2 g_2}]$ —submatrica osnovnih snopova definisana kapacitivnim granama stabla čije kolone odgovaraju kapacitivnostima ili provodnostima grana ko-stabla.

Matrica provodnosti snopova definiše se na sledeći način:

$$[G] = [Q_{c_1, c_2 g_2}][G_2][Q_{c_1, c_2 g_2}]^t \quad (2.35)$$

gde je $[G_2]$ dijagonalna matrica čiji su elementi na dijagonali provodnosti grana ko-stabla.

Matrica induktivnosti kontura dobija se na sledeći način:

$$[L] = \begin{bmatrix} B_{L_2, L_1} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} \\ L_{21} & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{L_2, L_1}^t \\ I \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

gde su:

$[L_1]$ —kvadratna matrica čiji su elementi na dijagonali sopstvene induktivnosti pojedinih grana stabla, a elementi van glavne dijagonale međusobne induktivnosti pojedinih grana stabla,

$[L_2]$ —kvadratna matrica čiji su elementi na dijagonali sopstvene induktivnosti pojedinih grana ko-stabla, a elementi van glavne dijagonale međusobne induktivnosti pojedinih grana ko-stabla,

$[L_{12}]$ —pravougaona matrica čiji su elementi međusobne induktivnosti grana stabla i grana ko-stabla,

$[L_{21}] = [L_{12}]^t$ —pravougaona matrica čiji su elementi međusobne induktivnosti grana ko-stabla i grana stabla,

$[I]$ —jedinična matrica,

$[B_{L_2, L_1}]$ —submatrica osnovnih kontura definisana induktivnostima grana ko-stabla čije kolone odgovaraju induktivnostima u granama stabla.

Matrica otpornosti induktivnih kontura dobija se na isti način kao što se dobija matrica induktivnosti $[L]$, jer se svakoj induktivnoj grani pridružuje odgovarajuća otpornost, odnosno:

$$[R] = [B_{L_2, L_1} \quad I] \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{L_2, L_1}^t \\ I \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

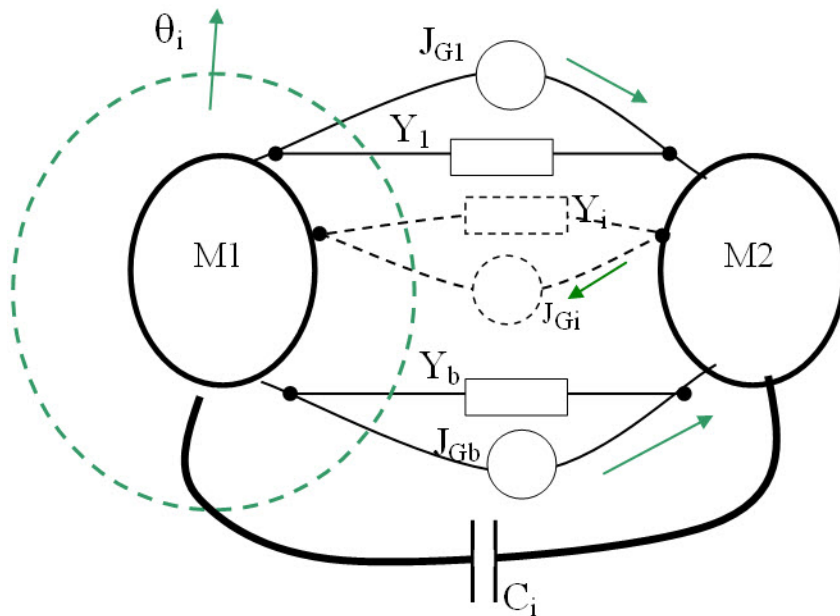
gde su:

$[R_1]$ —dijagonalna matrica čiji su elementi na dijagonali otpornosti u odgovarajućim induktivnim grana stabla.

$[R_2]$ —dijagonalna matrica čiji su elementi na dijagonali otpornosti pojedinih induktivnih grana ko-stabla.

Matrica veza je $[K] = [Q_{c_1, L_2}]$ je submatrica osnovnih snopova definisana kapacitivnim granama stabla čije kolone odgovaraju induktivnostima u granama ko-stabla.

Vektor struja strujnih izvora kapacitivnih snopova I_c se može direktno izračunati kao suma struja svih strujnih izvora priključenih u dati snop definisan kapacitivnom granom C_i , kao na slici 2.19.



Slika 2.19: Određivanje ekvivalentnog strujnog izvora jednog snopa

Znak "+" uz struju izvora u sumi dolazi ako je orijentacija strujnog izvora suprotna orijentaciji snopa, a u suprotnom je predznak struje "-". Za jedan snop se struja ekviva-

lentnog strujnog izvora dobija iz izraza:

$$I_{\theta_c} = \sum_{i=1}^b \pm J_{G_i} \quad (2.38)$$

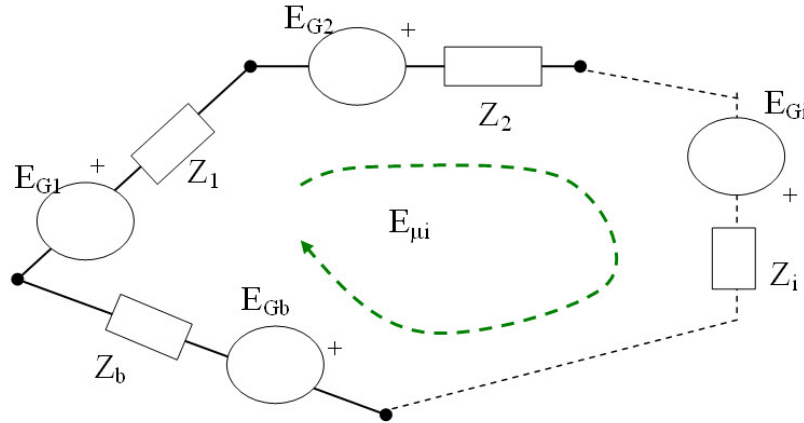
gde su:

I_{θ_c} —struja ekvivalentnog strujnog izvora u odgovarajućem snopu θ_c ,

J_{G_i} —struja strujnog izvora G_i u grani i koja pripada snopu θ_c .

Postupak se ponavlja za sve snopove.

Vektor elektromotornih sila naponskih izvora se dobija kao algebarska suma svih elektromotornih sila u posmatranoj konturi, kao na slici 2.20.



Slika 2.20: Dobijanje ekvivalentnog naponskog izvora konture

Znak "+" u sumi dolazi kada je orijentacija naponskog izvora u skladu sa orijentacijom konture, u suprotnom je predznak "-". Za jednu konturu se elektromotorna sila ekvivalentnog naponskog izvora dobija iz izraza:

$$E_{\mu L} = \sum_{i=1}^b \pm E_{G_i} \quad (2.39)$$

gde su:

$E_{\mu L}$ —ekvivalentna elektromotorna sila konture μ_L ,

E_{G_i} —elektromotorna sila naponskog izvora u grani i koji pripada snopu μ_L . Postupak se ponavlja za sve snopove.

U jednačinama stanja figuriraju kao promenljive samo naponi na kapacitivnostima stabla i struje kroz induktivnosti ko-stabla.

Matrice kapacitivnosti snopova i induktivnosti kontura uvek su nesingularne i pozitivno definitne matrice, sem kada postoje idealno spregnute induktivnosti. Kako se idealna sprega međusobnih induktivnosti fizički ne može ostvariti, matrica induktivnosti je uvek nesingularna. Zbog toga se uvek može izvršiti inverzija matrica induktivnosti kontura i kapacitivnosti snopova, tako da na levoj strani diferencijalnih jednačina stanja 2.33 na strani 32 figuriraju samo izvodi promenljivih stanja, a na desnoj same promenljive stanja.

Broj promenljivih stanja jedne električne mreže jednak je zbiru broja kondenzatora u granama normalnog stabla i broja induktivnih grana ko-stabla. U slučaju da postoje induktivni snopovi ili kapacitivne konture, broj promenljivih stanja se smanjuje za broj osnovnih kontura definisanih kapacitivnostima i broj osnovnih snopova definisanih induktivnostima. Ovo su slučajevi tzv. topološke degeneracije modela stanja.

Radi uprošćenja jednačina stanja redno vezana induktivnost i otpornost tretiraju se kao jedna grana. Pri formiranju matrica incidencija takva grana se tretira kao grana sa induktivnošću. Kada se formira matrica $[R]$, jednostavno se prepisuju na odgovarajućim mestima elementi $R_1, R_2, \dots, R_k$ kao što su napisani elementi $L_1, L_2, \dots, L_k$ u matrici $[L]$. Na mestima gde u matrici $[L]$ figurišu međusobne induktivnosti u matrici $[R]$ su nule.

Prilikom formiranja izraza 2.33 uvedena je pretpostavka da ne postoji ni jedna grana ko-stabla definisana omskim otpornikom. Elektroenergetske mreže imaju neke tipične karakteristike elemenata. Jedna od karakteristika je da se izuzetno retko može sresti idealan otpornik bez induktiviteta, što značajno olakšava formiranje jednačina stanja električne mreže.

Rešavanjem jednačina stanja se dobijaju naponi na kondenzatorima u granama stabla $[U_{C1}]$ i struje u granama ko-stabla $[I_{L2}]$. Algebarske promenljive su naponi na kondenzatorima u granama ko-stabla $[U_{C2}]$ i struje u granama stabla $[I_{L1}]$. Ove veličine se dobijaju iz sledećih matričnih relacija.

$$[i_1] = [B_{L2, L1}]^T \cdot [i_2] \quad (2.40)$$

i

$$[u_2] = [Q_{C1, C2}]^T \cdot [u_1] \quad (2.41)$$

Promenljive stanja u_1 i i_2 koje se dobijaju rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina 2.33 zajedno sa dopunskim algebarskim jednačinama 2.40 i 2.41 čine pun sistem jednačina koji daje sve potrebne električne promenljive.

Primena opisanog postupka formiranja matričnog sistema jednačina stanja se može vrlo lako automatizovati pod sledećim uslovima:

- U mreži ne postoje otporničke grane koje se ne mogu redno vezati sa induktivnom granom ili paralelno vezati sa kapacitivnom granom.
- U mreži ne postoji ni jedan kondenzator koji se nalazi u normalnom stablu, koji nije vezan prema zemlji. To obezbeđuje da je zemlja referentna tačka kola.
- Svakoј induktivnoj grani se može pridodati otpornička grana i svakoј kapacitivnoj grani se može pridodati paralelna grana sa provodnošću.

Formiranja modela se vrši na bazi incidentnih matrica snopova i kontura i dijagonalnih matrica kapacitivnih i iduktivnih elemenata.

2.6.3 Opšti oblik trofaznog modela stanja

Za trofaznu mrežu se može formirati opšti trofazni oblik modela stanja uzimajući u obzir i moguće postojanje elemenata sa izolovanom neutralnom tačkom. U neutralnu tačku se mogu postaviti kondenzatori čiji kapaciteti odgovaraju nultim komponentama kapaciteta namotaja u slučaju transformatora ili motora, koje su za j -ti element obeležene kao C_{Z_j} .

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\begin{matrix} C_{Z_1} & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & C_{Z_j} \end{matrix}} & & & 0 \\ & \boxed{\begin{matrix} C_F & -C_M & -C_M \\ -C_M & C_F & -C_M \\ -C_M & -C_M & C_F \end{matrix}} & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & \boxed{\begin{matrix} L_F & L_M & L_M \\ L_M & L_F & L_M \\ L_M & L_M & L_F \end{matrix}} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Matricu definisanu izrazom 2.42 nazivamo matricom kapaciteta i induktiviteta i skraćeno označavamo kao:

$$[M_{LC}] = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Matrica $[M_{LC}]$ je po svom obliku kvazidijagonalna, odnosno sastoji se od kvadratnih simetričnih submatrica koje su na glavnoj dijagonali.

Prvi blok elemenata C_{Z_1} do C_{Z_j} predstavlja dijagonalni deo matrice sa elementima koji odgovaraju kapacitivnostima smeštenim u neutralnim tačkama transformatora ili drugih elemenata. Najčešće je broj kapacitivnosti u zvezdištima mali (1 ili 2). Ove kapacitivnosti su monofazne, jer su postavljene između neutralne tačke i zemlje, stoga ne postoje vandijagonalni elementi. Vrednost ovih kondenzatora se usvaja na osnovu nulte kapacitivnosti namotaja transformatora. Ove kapacitivnosti su važne jer se na njima izračunava napon u zvezdištu i u slučaju potrebe primenjuje odvodnik prenapona.

Dijagonalni kvadratni blokovi ostalih elemenata su uvek simetrični. Prvi niz kvadratnih blokova čine matrice kapacitivnih elemenata dimenzija 3×3 . Drugi niz kvadratnih blokova čine matrice induktivnih elemenata, takođe dimenzija 3×3 .

Matrica proporcionalnih elemenata ima oblik:

$$\begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\begin{matrix} G_{Z_1} & 0 \\ 0 & \dots & G_{Z_j} \end{matrix}} & 0 & \boxed{\begin{matrix} 1 & \dots & 0 \\ \dots & & \\ 0 & \dots & 1 \end{matrix}} \\ 0 & \boxed{\begin{matrix} G_F & -G_M & -G_M \\ -G_M & G_F & -G_M \\ -G_M & -G_M & G_F \end{matrix}} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ \boxed{\begin{matrix} 1 & \dots & 0 \\ \dots & & \\ 0 & \dots & 1 \end{matrix}} & 0 & \boxed{\begin{matrix} R_F & 0 & 0 \\ 0 & R_F & 0 \\ 0 & 0 & R_F \end{matrix}} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Svi izvori se mogu podeliti na realne generatore reprezentovane svojim elektromotornim silama (ems) koji će u vremenskom domenu biti obeleženi sa $e(t)$, i naponskim i strujnim izvorima koji služe za kompenzaciju delova kola koji su predstavljeni raspoređenim parametrima. Pri rešavanju prelaznih režima usled sklopnih operacija u trofaznim kolima, svaki realni generator koji pripada grani i se reprezentuje svojom trofaznom ems sledećeg oblika:

$$[e_i(t)] = \begin{bmatrix} e_{iA}(t) \\ e_{iB}(t) \\ e_{iC}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{Mi} \cos(\omega t - \varphi) \\ E_{Mi} \cos(\omega t - \varphi - 120^\circ) \\ E_{Mi} \cos(\omega t - \varphi - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Oznake u izrazu 2.45 imaju sledeće značenje:

$e_i(t)$ - vektor trenutnih faznih ems za generator br. i ,

e_{iF} - trenutne fazne vrednosti ems generatora i za faze $F = A, B, C$,

E_{Mi} - temene fazne vrednosti ems generatora koje se po pravilu podešavaju tako da u stacionarnom stanju u mreži maksimalni fazni naponi budu što bliži maksimalnim radnim naponima mreže izraženim preko temenih faznih vrednosti, odnosno:

$$U_{fm} = U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.46)$$

U_m - maksimalni radni napon mreže izražen preko efektivne linijske vrednosti, kao što je to uobičajeno,

U_{fm} - maksimalni radni napon mreže izražen preko temene fazne vrednosti, što se koristi u proračunima prelaznih procesa,

φ - početna faza ems, od koje zavisi visina prenapona u trenutku komutacije.

2.7 Rešavanje jednačina stanja

U najopštijem slučaju numeričko rešavanje jednačine stanja koje su date izrazom 2.30 na strani 31 može se izvršiti sledećim postupkom [27]:

$$[x(t)] = [x(t - \Delta t)] + \int_{u=t-\Delta t}^{u=t} \{[M] \cdot [x(u)] + [F(u)]\} \cdot du \quad (2.47)$$

gde oznake imaju sledeće značenje:

$$[M] = - \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

U vektoru $[E_L]$ figurišu između ostalih i elektromotorne sile realnih generatora opisanih izrazom 2.45 na strani 38.

2.7.1 Trapezno pravilo

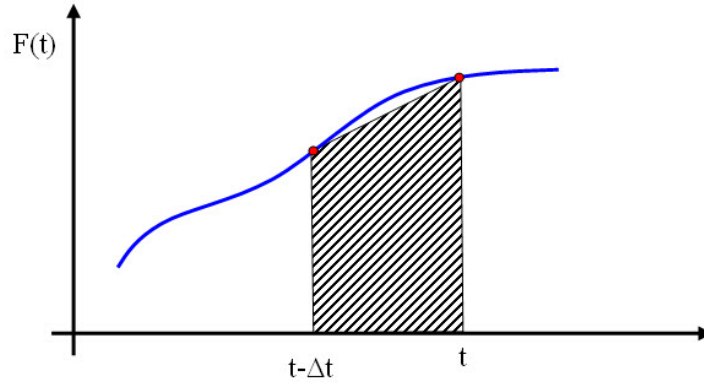
Ako se izvrši linearna interpolacija promenljivih stanja $[x]$ i $[F]$ na intervalu $t - \Delta t$ i t , dobija se izraz:

$$[x(t)] = [x(t - \Delta t)] + \frac{\Delta t}{2} \cdot [M] \cdot \{[x(t - \Delta t)] + [x(t)]\} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \{[F(t - \Delta t)] + [F(t)]\} \quad (2.50)$$

Sa druge strane se jednačina 2.50 može posle diskretizacije vremena sa korakom Δt napisati u sledećem obliku:

$$\frac{[x(t)] - [x(t - \Delta t)]}{\Delta t} = [M] \frac{[x(t)] + [x(t - \Delta t)]}{2} + \frac{[F(t)] + [F(t - \Delta t)]}{2} \quad (2.51)$$

U izrazu 2.51 korišćeno je trapezno pravilo, koje je ilustrovano na primeru funkcije izvora na slici 2.21.



Slika 2.21: Primena trapeznog pravila za numeričko rešavanje diferencijalnih jednačina

Linearnom interpolacijom se dobija šrafirana površina ispod krive koja odgovara integralu funkcije $F(t)$ na vremenskom segmentu Δt ,

Nakon prebacivanja vektora promenljivih stanja $[x(t)]$ sa desne na levu stranu i $[x(t - \Delta t)]$ sa leve na desnu stranu se dobija:

$$\left([I] - \frac{\Delta t}{2} [M] \right) [x(t)] = \left([I] + \frac{\Delta t}{2} [M] \right) [x(t - \Delta t)] + \frac{\Delta t}{2} \cdot ([F(t - \Delta t)] + [F(t)]) \quad (2.52)$$

gde oznaka $[I]$ označava jediničnu matricu čiji je red jednak broju promenljivih stanja, odnosno:

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Dok se korak proračuna ne menja niti se menja konfiguracija kola, matrica $[M]$ ostaje konstantna, tako da se i matrica $([I] - [M] \cdot \Delta t/2)$ ne menja. Stoga se može jednom izvršiti inverzija matrice $([I] - [M] \cdot \Delta t/2)$ i zatim rešavati prelazni proces na osnovu sledeće relacije:

$$[x(t)] = [x(t - \Delta t)] + \left([I] - [M] \cdot \frac{\Delta t}{2} \right)^{-1} \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{[F(t)] - [F(t - \Delta t)]}{2} \quad (2.54)$$

2.7.2 Metoda Runge-Kuta 4. reda

Metoda Runge-Kuta služi za rešavanje diferencijalnih jednačina pomoću koraka u sredini intervala kako bi se smanjile numeričke greške. Najpoznatija i najčešće korištena je metoda Runge-Kutta četvrtog reda. Postupak rešavanja diferencijalne jednačine dat je izrazom:

$$[x(t)] = [x(t - \Delta t)] + \frac{1}{6} \times [K_1 + 2(K_2 + K_3) + K_4] \quad (2.55)$$

gde su:

- $[x(t)]$ - vektor promenljivih stanja u trenutku t ,
- Δt - korak integraljenja

Ostale oznake date su u sledećoj listi:

$$\begin{aligned} [K_1] &= \Delta t \cdot [M] \cdot [x(t - \Delta t)] + \Delta t \cdot [F(t - \Delta t)] \\ [x(t - \frac{\Delta t}{2})] &= [x(t - \Delta t) + \frac{K_1}{2}] \\ [K_2] &= \Delta t \cdot [M] \cdot [x(t - \frac{\Delta t}{2})] + \Delta t \cdot [F(t - \frac{\Delta t}{2})] \\ [x(t - \frac{\Delta t}{2})] &= [x(t - \Delta t)] + [\frac{K_2}{2}] \\ [K_3] &= \Delta t \cdot [M] \cdot [x(t - \frac{\Delta t}{2})] + \Delta t \cdot [F(t - \frac{\Delta t}{2})] \\ [x(t)] &= [x(t - \Delta t)] + [K_3] \\ [K_4] &= \Delta t \cdot [M] \cdot [x(t)] + \Delta t \cdot [F(t)] \end{aligned}$$

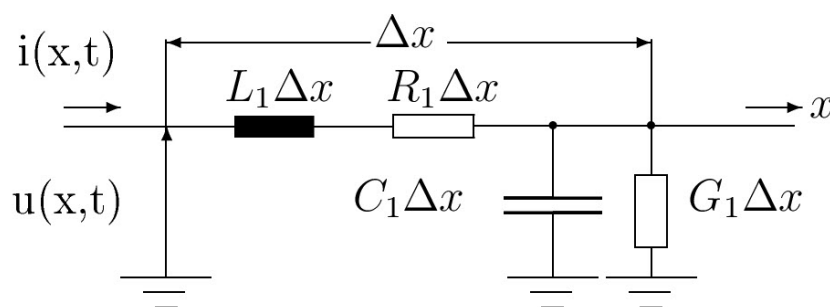
Poglavlje 3

Mreže sa raspoređenim parametrima

Pri proučavanju brzih elektromagnetnih prelaznih procesa nadzemni vodovi se predstavljaju kao elementi sa raspodeljenim parametrima. Kod analize prenapona nastalih na vodovima usled atmosferskih pražnjenja dovoljno je posmatrati monofazni vod iznad ravne homogene površine zemlje. Na ovaj način analiza postaje znatno jednostavnija, a tačnost analize u tehnički dozvoljenim granicama.

3.1 Jednačine telegrafičara

Na slici 3.1 prikazana je elementarna deonica monofaznog voda dužine Δx iznad ravne idealno provodne zemlje.



Slika 3.1: Monofazni idealan vod iznad ravne idealno provodne zemlje

Oznake na slici 3.1 imaju sledeće značenje:

Δx —Dužina elementarne deonice nadzemnog voda,

L_1 –Induktivnost po jedinici dužine voda,

R_1 –Podužna otpornost voda usled omskih gubitaka,

C_1 –Podužna kapacitivnost voda prema zemlji,

G_1 –Podužna odvodnost voda usled nesavršene izolacije,

$u(x, t)$ –Trenutna vrednost napona u trenutku t na posmatranom mestu x ,

$i(x, t)$ –Trenutna vrednost struje u trenutku t na posmatranom mestu x .

Pretpostavljeno je da su svi podužni elementi voda konstantni. U realnosti induktivnost i otpornost voda zavise od učestanosti struje koja protiče kroz vod zbog uticaja površinskog efekta na provodniku i na povratnom putu kroz zemlju. Podužna kapacitivnost voda povećava se sa naponom usled korone, a podužna odvodnost voda se može menjati u vrlo širokim granicama u zavisnosti od atmosferskih uslova, zaprljanosti izolacije i visine napona usled uticaja korone.

Na osnovu slike 3.1 može se napisati diferencijalna jednačina za podužni pad napona na elementarnoj deonici voda:

$$-\Delta u(x, t) = L_1 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \Delta x + R_1 i(x, t) \Delta x \quad (3.1)$$

Priraštaj struje na elementarnoj deonici dužine Δx voda je:

$$-\Delta i(x, t) = C_1 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \Delta x + G_1 u(x, t) \Delta x \quad (3.2)$$

Ukoliko se izrazi 3.1 i 3.2 podele sa Δx i odredi granična vrednost izraza kada $\Delta x \rightarrow 0$, dobija se:

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = L_1 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R_1 i(x, t) \quad (3.3)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C_1 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + G_1 u(x, t) \quad (3.4)$$

Ako se na izraze 3.3 i 3.4 primeni Laplasova transformacija, dobija se sledeći sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina u operatorskom domenu za slučaj nultih početnih uslova:

$$-\frac{\partial U(x, p)}{\partial x} = (L_1 p + R_1) I(x, p) \quad (3.5)$$

$$-\frac{\partial I(x, p)}{\partial x} = (C_1 p + G_1)U(x, p) \quad (3.6)$$

gde su:

p -Laplasov operator,

$U(x, p)$ -Laplasova transformacija napona $u(x, t)$ na mestu x u trenutku t ,

$I(x, p)$ -Laplasova transformacija struje $i(x, t)$ na mestu x u trenutku t .

Ponovnim diferenciranjem izraza 3.5 po x i zamenom u 3.6 dobija se jedna parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda po $U(x, p)$. Na sličan način, diferenciranjem jednačine 3.6 po x i zamenom u 3.5, dobija se jedna parcijalna diferencijalna jednačina po $I(x, p)$:

$$\frac{\partial^2 U(x, p)}{\partial x^2} = (L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)U(x, p) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, p)}{\partial x^2} = (L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)I(x, p) \quad (3.8)$$

Gornje linearne parcijalne diferencijalne jednačine drugog reda poznate su kao **parcijalne diferencijalne jednačine telegrafičara**. One se mogu napisati u opštoj formi u sledećem obliku:

$$\frac{\partial^2 Y(x, p)}{\partial x^2} = \gamma^2(p)Y(x, p) \quad (3.9)$$

U izrazu 3.9 oznake imaju sledeće značenje:

$Y(x, p)$ – električna veličina (napon ili struja) u Laplasovom domenu na mestu x ,

$\gamma(p) = \sqrt{(L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)}$ – koeficijent prostiranja talasa.

Rešenje parcijalnih diferencijalnih jednačina telegrafičara za napone u Laplasovom domenu predstavlja zbir dve eksponencijalne funkcije, odnosno:

$$U(x, p) = F_1(p)e^{\gamma(p)x} + F_2(p)e^{-\gamma(p)x} \quad (3.10)$$

Rešenje jednačina telegrafičara za struju u Laplasovom domenu može se dobiti zamenom relacije 3.10 u 3.5:

$$-\gamma(p) [F_1(p)e^{\gamma(p)x} - F_2(p)e^{-\gamma(p)x}] = (L_1 p + R_1)I(x, p) \quad (3.11)$$

Pošto je:

$$\frac{L_1 p + R_1}{\gamma(p)} = \sqrt{\frac{L_1 p + R_1}{C_1 p + G_1}} = Z_c \quad (3.12)$$

rešenje za struju se može napisati u sledećem obliku:

$$I(x, p) = \frac{-F_1(p)e^{\gamma(p)x} + F_2(p)e^{-\gamma(p)x}}{Z_c} \quad (3.13)$$

Oznake u izrazima 3.10 i 3.13 imaju sledeće značenje:

$F_1(p)$ i $F_2(p)$ su koeficijenti koji zavise od graničnih uslova za početak i kraj voda,

Z_c -karakteristična ili talasna impedansa voda:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1 p + R_1}{C_1 p + G_1}} \quad (3.14)$$

Rešenja jednačina 3.10 i 3.13 u vremenskom domenu mogu se jednostavno izraziti u analitičkom obliku samo za dva slučaja. To su:

1. Slučaj **idealnog voda** (vod bez gubitaka), kod koga je ispunjen uslov da je $R_1 = 0$ i $G_1 = 0$,
2. Slučaj voda za koji je ispunjen sledeći uslov:

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{G_1}{C_1} \quad (3.15)$$

Uslov dat izrazom 3.15 naziva se **Hevisajdovim uslovom**. U svim ostalim slučajevima dobijanje vremenske promene napona i struja zahteva komplikovan analitički aparat.

3.1.1 Rešenje jednačina telegrafičara za idealan vod

U slučaju idealnog voda, kod koga su zanemareni svi podužni i otočni gubici, koeficijent prostiranja ima sledeći oblik:

$$\gamma(p) = p\sqrt{L_1 C_1} \quad (3.16)$$

ili

$$\gamma(p) = \frac{p}{v} \quad (3.17)$$

gde je:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

v –brzina prostiranja elektromagnetskih talasa u vazduhu, koja je kod nadzemnih vodova vrlo bliska brzini svetlosti u vakuumu, odnosno:

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ (m/s)} \quad (3.18)$$

Kod kablova je brzina prostiranja manja zbog veće dielektričke konstante materijala i obično se usvaja da ima vrednost oko polovine brzine svetlosti.

Kod idealnih višefaznih vodova se kapaciteti i induktiviteti određuju na osnovu matrice geometrijskih parametara vodova $[G]$:

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{12} & G_{22} & G_{23} \\ G_{13} & G_{23} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

gde su:

$$G_{ii} = \ln \frac{2h}{R} \quad (3.20)$$

$$G_{ij} = \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (3.21)$$

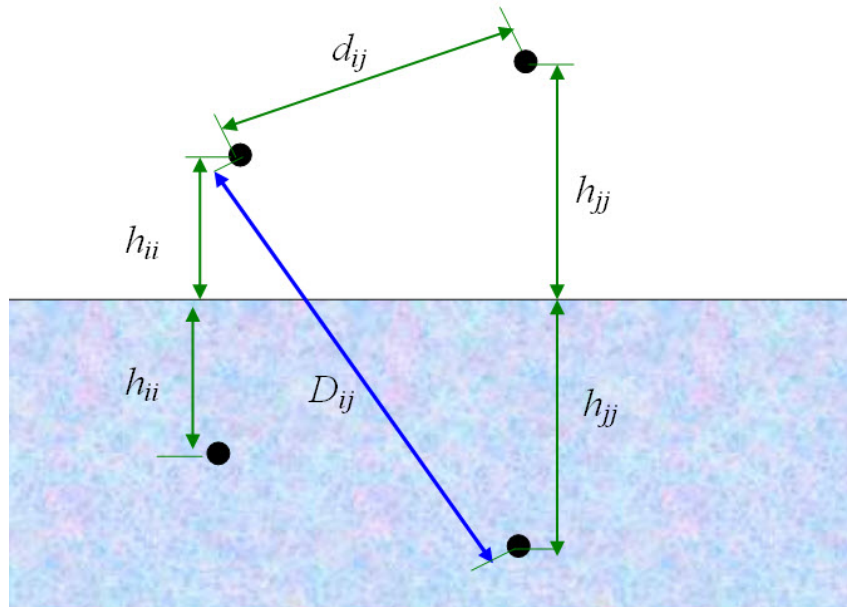
h – visina vešanja provodnika iznad zemlje (m),

R – poluprečnik provodnika (m),

d_{ij} – rastojanje faza i i j u vazduhu iznad ravne površine zemlje (m),

D_{ij} – rastojanje faze i u vazduhu i lika faze j u odnosu na površinu zemlje kao ravan ogledanja (m).

Parametri trofaznog sistema izračunavaju se na bazi poluprečnika provodnika ili ekvivalentnog prečnika provodnika kod provodnika u snopu, visina faznih provodnika i rastojanja između faza. Po metodi ogledanja uvode se fiktivni provodnici unutar zemlje



Slika 3.2: Visine faznih provodnika i rastojanja između faza i likova provodnika po metodi ogledanja

čiji je položaj određen kao liku u ogledalu u odnosu na površinu zemlje u odnosu na stvarni položaj provodnika.

Podužna kapacitivnost horizontalnog faznog provodnika iznad ravne provodne površine zemlje može se izraziti preko dielektričke konstante i geometrijskih parametara:

$$C_{ii} = \frac{2\pi\varepsilon}{G_{ii}} \quad \left(\frac{F}{m}\right) \quad (3.22)$$

gde je i redni broj faznog provodnika.

U slučaju kada se razmatraju višefazni vodovi, određuje se međufazna kapacitivnost između provodnika različitih faza pomoću izraza:

$$C_{ij} = \frac{2\pi\varepsilon}{G_{ij}} \quad \left(\frac{F}{m}\right) \quad (3.23)$$

U izrazima 3.22 i 3.23 oznake imaju sledeće značenje:

ε —dielektrička konstanta vazduha koja je praktično jednaka dielektričkoj konstanti vakuuma. Brojna vrednost dielektričke konstante vakuuma je:

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \quad \left(\frac{F}{m}\right) \quad (3.24)$$

Podužna induktivnost horizontalnog provodnika iznad idealno provodne zemlje je:

$$L_1 = 2\pi \cdot \mu_0 \cdot G_{ii} \quad \left(\frac{H}{m}\right) \quad (3.25)$$

gde je:

μ_0 –magnetski permeabilitet vazduha, koji je praktično jednak permeabilitetu vakuuma, čija je vrednost:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad \left(\frac{H}{m}\right)$$

Međufazna induktivnost u slučaju višefaznog sistema iznad idealno provodne zemlje je:

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} G_{ij} \quad \left(\frac{H}{m}\right) \quad (3.26)$$

Na ovom mestu će biti proučavano samo prostiranje po monofaznom vodu sa jednom fazom iznad idealno provodne zemlje i povratnim putem kroz zemlju. U tom slučaju podužna induktivnost ima vrednosr L_1 , a kapacitivnost C_1 .

Nakon smenjivanja podužne fazne induktivnosti L_1 i kapacitivnosti C_1 u izraz za brzinu prostiranja, dobija se njena brojna vrednost:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)$$

U slučaju idealnog voda rešenja jednačina telegrafičara u Laplasovom domenu imaju sledeći oblik:

$$U(x, p) = F_1(p, x)e^{px/v} + F_2(p, x)e^{-px/v} \quad (3.27)$$

$$I(x, p) = \frac{-F_1(p, x)e^{px/v} + F_2(p, x)e^{-px/v}}{Z_c} \quad (3.28)$$

gde je:

Z_c –karakteristična impedansa idealnog voda, koja ne zavisi od operatora p i ima prirodu omskog otpora.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (3.29)$$

Kod idealnog nadzemnog voda se karakteristična impedansa može približno izračunati na osnovu sledećeg izraza:

$$Z_c = 60 \ln \frac{2h}{R} \quad (\Omega)$$

Vrednost karakteristične impedanse kreće se od 310Ω do 500Ω za nadzemne vodove i od 10Ω do 80Ω za kablove, u zavisnosti od primenjenog dielektrika.

Inverzijom Laplasove transformacije izraza 3.27 i 3.28 dobija se vremenska promena napona i struja u zavisnosti od mesta posmatranja x na vodu kao:

$$u(x, t) = f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)h\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (3.30)$$

$$i(x, t) = \frac{-f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)h\left(t - \frac{x}{v}\right)}{Z_c} \quad (3.31)$$

U gornjim izrazima oznake imaju sledeće značenje:

$h(t)$ – Jedinična Hevisajdova (odskočna) funkcija definisana kao:

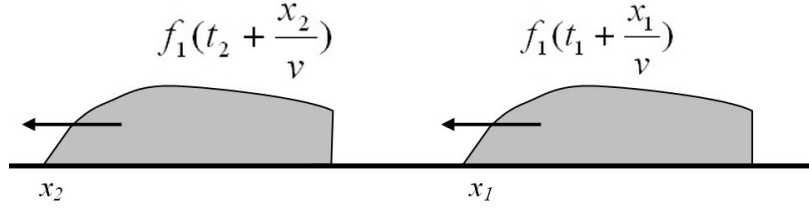
$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{za } t \geq 0 \\ 0 & \text{za } t < 0 \end{cases}$$

$f_1(t)$, $f_2(t)$ –inverzne Laplasove transformacije funkcija $F_1(p)$ i $F_2(p)$.

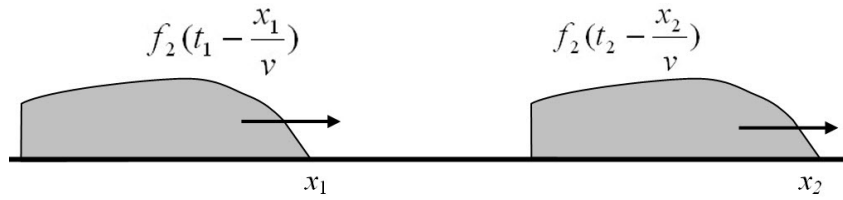
Izrazi 3.30 i 3.31 predstavljaju zbirove dva talasa koji se prostiru po vodu u suprotnim smerovima. Ako se posmatra samo prvi član izraza $f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)$, tada se može uočiti da on ima konstantnu vrednost za konstantan argument $t + \frac{x}{v}$. Da bi argument bio konstantan, sa porastom vremena t potrebno je da koordinata x opada brzinom v . To znači da prvi član ima konstantnu vrednost ako se talas prostorno pomera brzinom v u pravcu koji odgovara opadanju x koordinate. Ovaj talas nazivamo **inverznim talasom** jer se prostire u pravcu suprotnom od pozitivne orijentacije x ose.

Posmatrajući izraze 3.30 i 3.31 može se uočiti da su vremenski oblici naponskih i strujnih talasa isti, tako da se strujni talas dobija jednostavnim deljenjem naponskog talasa karakterističnom impedansom. Na slici 3.3 ilustrovano je prostiranje inverznog talasa duž voda.

Na sličan način funkcija $f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)$ predstavlja talas koji se prostire u pravcu koji odgovara porastu x koordinate. Funkcija $f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)$ ne menja vrednost za konstantnu vrednost argumenta $t - \frac{x}{v}$. To znači da sa porastom vremena t mora i koordinata x



Slika 3.3: Prostiranje inverznog talasa duž voda



Slika 3.4: Prostiranje direktnog talasa duž voda

da raste brzinom v . Ovaj talas nazivamo **direktnim talasom** jer se prostire u pravcu koji se poklapa sa pozitivnom orijentacijom x -ose. Na slici 3.4 ilustrovano je prostiranje direktnog talasa duž voda.

Važno je uočiti da u slučaju idealnog voda talasi pri prostiranju ne menjaju ni amplitudu ni oblik.

3.1.2 Rešenje jednačina telegrafičara za vod na kome je ispunjen Hevisajdov uslov

U slučaju voda kod koga je ispunjen Hevisajdov uslov dat izrazom 3.15 na strani 45, koeficijent prostiranja može da se napiše u sledećem obliku:

$$\gamma(p) = \sqrt{L_1 C_1} \left(p + \frac{R_1}{L_1} \right) = \frac{p}{v} + \delta \quad (3.32)$$

gde je δ koeficijent prigušenja:

$$\delta = \frac{R_1}{Z_c} \quad (3.33)$$

U ovom slučaju putujući naponski i strujni talasi mogu se u Laplasovom domenu prikazati sledećim izrazom:

$$U(x, p) = F_1(p) e^{\frac{p}{v} x} e^{\delta x} + F_2(p) e^{-\frac{p}{v} x} e^{-\delta x} \quad (3.34)$$

$$I(x, p) = \frac{-F_1(p)e^{\frac{p}{v}x}e^{\delta x} + F_2(p)e^{-\frac{p}{v}x}e^{-\delta x}}{Z_c} \quad (3.35)$$

Karakteristična impedansa voda za koji je ispunjen Hevisajdov uslov ima identičan oblik kao u slučaju idealnog voda, kao u izrazu 3.29 na strani 49.

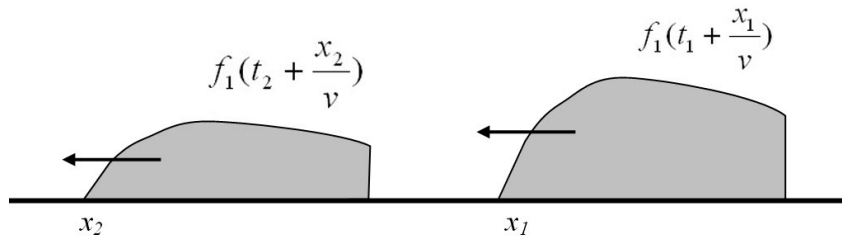
Inverzijom Laplasove transformacije izraza 3.34 i 3.35 dobija se sledeća vremenska promena napona na vodu u zavisnosti od prostorne koordinate x :

$$u(x, t) = f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)e^{\delta x}h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)e^{-\delta x}h\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (3.36)$$

$$i(x, t) = \frac{-f_1\left(t + \frac{x}{v}\right)e^{\delta x}h\left(t + \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{v}\right)e^{-\delta x}h\left(t - \frac{x}{v}\right)}{Z_c} \quad (3.37)$$

U slučaju voda kod koga je ispunjen Hevisajdov uslov, rešenje jednačina telegrafičara predstavlja zbir dva talasa koja se prostiru po vodu u različitim smerovima. Svaki od tih talasa se pri prostiranju smanjuje po amplitudi, ali ne menja oblik. Inverzni talas se smanjuje jer se prostire u pravcu smanjenja koordinate x , pa i eksponencijalni član $e^{\delta x}$ zbog toga opada. Direktni talas se prostire u pravcu povećanja koordinate x , pa zbog toga eksponencijalni član $e^{-\delta x}$ opada. Promena amplitude uz zadržavanje konstantnog oblika talasa naziva se **prigušivanjem** talasa pri prostiranju.

Putujući talasi na vodu na kome je ispunjen Hevisajdov uslov prikazani su na slikama 3.5 i 3.6. U slučaju voda kod koga je ispunjen Hevisajdov uslov naponski i strujni talasi imaju identične vremenske oblike.

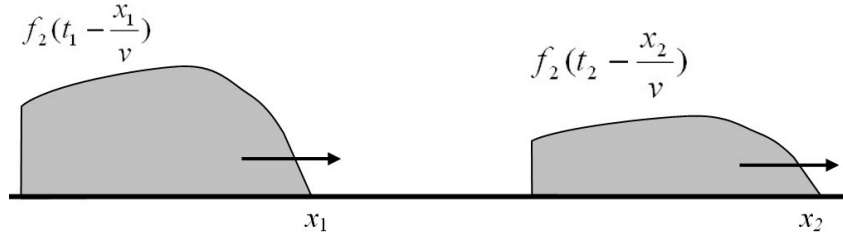


Slika 3.5: Inverzni putujući talas na vodu sa zadovoljenim Hevisajdovim uslovom

3.1.3 Rešenje jednačina telegrafičara za realan vod

Kod realnih vodova je ispunjen uslov:

$$R_1 > 0 \quad (3.38)$$



Slika 3.6: Direktni putujući talas na vodu sa zadovoljenim Hevisajdovim uslovom

$$G_1 > 0 \quad (3.39)$$

$$\frac{R_1}{L_1} \neq \frac{G_1}{C_1} \quad (3.40)$$

Podužna odvodnost je promenljiva veličina koja zavisi od atmosferskih uslova i stanja površine izolatora, pa se može dogoditi da ova veličina menja vrednost u relativno širokim granicama. Kod voda sa gubicima kod koga nije ispunjen Hevisajdov uslov, karakteristična impedansa zavisi od Laplasovog operatora p , što znači da su napon i struja različitih talasnih oblika. Koeficijent prostiranja realnog voda ima sledeći oblik:

$$\gamma(p) = \sqrt{(L_1 p + R_1)(C_1 p + G_1)} \quad (3.41)$$

što dovodi do promene vremenskog oblika talasa pri prostiranju. Pojava promene vremenskog oblika pri prostiranju naziva se **izobličenjem** talasa.

U Laplasovom domenu rešenja jednačina telegrafičara u slučaju realnog voda prema [3] imaju oblik dat izrazom 3.10, pri čemu se koeficijent prostiranja može prikazati u sledećem obliku:

$$\gamma(p) = \frac{1}{v} \sqrt{(p + \delta' + \beta)(p + \delta' - \beta)} \quad (3.42)$$

gde su:

$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – brzina prostiranja,

$\delta' = \frac{1}{2}(\frac{R_1}{L_1} + \frac{G_1}{C_1})$ – modifikovani koeficijent prigušenja talasa,

$\beta = \frac{1}{2}(\frac{R_1}{L_1} - \frac{G_1}{C_1})$ – koeficijent izobličenja talasa.

U slučaju kada je Hevisajdov uslov ispunjen koeficijent izobličenja talasa postaje jednak nuli.

Posle prelaska u vremenski domen, nakon inverzije Laplasove transformacije, može se uočiti da talas ne samo da menja svoju amplitudu pri prostiranju, već mu se menja i oblik.

Na promenu oblika talasa pri prostiranju deluje više faktora. To su:

1. Kod realnih vodova izobličenje talasa usled prostiranja zbog postojanja koeficijenta izobličenja.
2. Kod vodova iznad zemlje konačne provodnosti pojavljuje se površinski efekat na povratnom putu kroz zemlju koji dovodi do izobličenja talasa. Ovaj tip izobličenja naziva se frekvencijskom zavisnošću povratnog puta kroz zemlju. Takođe se u mnogo manjoj meri pojavljuje površinski efekat na samim provodnicima voda.
3. Pri prostiranju visokonaponskih talasa dolazi do pojave impulsne korone, koja dovodi do izobličenja talasa zbog nelinearnih parametara voda.

Pri analizi atmosferskih prenapona na elektroenergetskim objektima dominantan uticaj na izobličenje talasa ima korona. Ostali uticaji su znatno manje izraženi, jer se ceo talasni proces koji utiče na visinu prenapona odvija na prostoru od nekoliko stotina metara u blizini i unutar visokonaponskih postrojenja. Pražnjenja nastala na većim razdaljinama po pravilu usled prigušenja talasa nisu opasna za izolaciju postrojenja.

Kao poseban slučaj može se tretirati **vod sa malim gubicima** kod koga su R_1 i G_1 mali. Koeficijent prostiranja dat izrazom 3.42 se kod takvog voda može izraziti u modifikovanom obliku:

$$\gamma(p) = \frac{1}{v} \sqrt{(p + \delta')^2 - \beta^2} \quad (3.43)$$

odnosno

$$\gamma(p) = \frac{p + \delta'}{v} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{(p + \delta')^2}} \quad (3.44)$$

Ako se koren iz izraza 3.44 razvije u stepeni red, dobija se:

$$\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{(p + \delta')^2}} \approx 1 - \frac{\beta^2}{2(p + \delta')^2} + \dots \quad (3.45)$$

Kod talasnih procesa pri atmosferskim prenaponima operator p ima veliku vrednost zbog visoke učestanosti prelaznog procesa, pa se dobija aproksimativni izraz za koeficijent prostiranja za slučaj voda sa malim gubicima zanemarenjem svih članova stepenog reda iz izraza 3.45 osim prvog, pa izraz 3.44 postaje:

$$\gamma(p) \approx \frac{p + \delta'}{v} \quad (3.46)$$

Uvodjenjem koeficijenta prigušenja umesto modifikovanog koeficijenta prigušenja dobija se identičan izraz za koeficijent prostiranja talasa u slučaju voda sa malim gubicima i u slučaju voda kod koga je ispunjen Hevisajdov uslov:

$$\gamma(p) = \frac{p}{v} + \delta \quad (3.47)$$

gde je:

$$\delta = \frac{\delta'}{v} \quad (3.48)$$

Koeficijent prigušenja u slučaju voda sa malim gubicima ima oblik:

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{Z_c} + G_1 Z_c \right) \quad (3.49)$$

gde je karakteristična impedansa voda sa malim gubicima:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1 p + R_1}{C_1 p + G_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \sqrt{\frac{p + \delta' + \beta}{p + \delta' - \beta}} \quad (3.50)$$

Ako se izvrše elementarne transformacije izraza 3.50 prema [3] dobija se:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \sqrt{\frac{1 + (\delta' + \beta)/p}{1 + (\delta' - \beta)/p}} \quad (3.51)$$

Razvojem u stepeni red kvadratnog korena iz izraza 3.51 dobija se:

$$\begin{aligned} Z_c &\approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} [1 + (\delta' + \beta)/2p + \dots] [1 - (\delta' - \beta)/2p + \dots] \\ &\approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} [1 - \beta/p - (\delta'^2 - \beta^2)/4p^2 + \dots] \approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Na ovaj način je pokazano da karakteristična impedansa voda sa malim gubicima ima približno isti oblik kao i kod voda kod koga je ispunjen Hevisajdov uslov u slučaju razmatranja visokofrekventnih pojava kojima odgovara velika vrednost Laplasovog operatora p .

Rešenja jednačina telegrafičara za vod sa malim gubicima se mogu napisati u vremenskom domenu u istom obliku kao i kod voda sa ispunjenim Hevisajdovim uslovom, što je dato izrazima 3.36 i 3.37 na strani 51.

3.2 Putujući talasi

3.2.1 Definicija putujućih talasa

Pri proučavanju brzih elektromagnetnih prelaznih procesa nadzemni vodovi se predstavljaju kao elementi sa raspodeljenim parametrima. Kod analize prenapona nastalih na

vodovima usled atmosferskih pražnjenja najčešće je dovoljno posmatrati monofazni vod iznad ravne homogene površine zemlje. Na ovaj način analiza postaje znatno jednostavnija, a tačnost analize je u tehnički dozvoljenim granicama. U slučaju analize atmosferskih prenapona se može smatrati da se trenutna vrednost radnog napona na vodu može zanemariti u odnosu na visinu prenapona, pa su u početnom trenutku $t = 0$ svi početni uslovi za napone i struje na vodu jednaki nuli. Ovo važi za sve vodove čiji je nazivni napon niži ili jednak 400 kV.

Rešavanjem jednačina telegrafičara idealnog voda dobija se rešenje po kome se režim na vodu može prikazati kao zbir dva naponska, odnosno strujna talasa koji se prostiru u suprotnim smerovima. U daljem tekstu će biti uvedene sledeće oznake:

$U_d(t) = f_2(t - \frac{x}{v})h(t - \frac{x}{v})$ – direktni naponski talas, koji se prostire u smeru porasta x koordinate brzinom v koja je za nadzemne vodove bliska brzini svetlosti. Sa konstantnu vrednost argumenta funkcije f_2 , odnosno za $(t - \frac{x}{v}) = \text{const}$ funkcija f_2 ostaje konstantna.

$U_i(t) = f_1(t + \frac{x}{v})h(t + \frac{x}{v})$ – inverzni naponski talas, koji se prostire u smeru smanjivanja x koordinate brzinom v koja je za nadzemne vodove bliska brzini svetlosti. Sa konstantnu vrednost argumenta funkcije f_1 , odnosno za $(t + \frac{x}{v}) = \text{const}$ funkcija f_1 ostaje konstantna.

$I_d(t) = \frac{f_2(t - \frac{x}{v})}{Z_c}h(t - \frac{x}{v})$ – direktni strujni talas,

$I_i(t) = -\frac{f_1(t + \frac{x}{v})}{Z_c}h(t + \frac{x}{v})$ – inverzni strujni talas.

U gornjim izrazima $h(t)$ je Hevisajdova odskočna funkcija koju definišemo na sledeći način:

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{za } t \geq 0 \\ 0 & \text{za } t < 0 \end{cases}$$

Strujni talasi se dobijaju jednostavnim deljenjem naponskih talasa karakterističnom impedansom voda po kome se prostiru, odnosno:

$$I_d(t) = \frac{U_d(t)}{Z_c} \quad (3.53)$$

$$I_i(t) = -\frac{U_i(t)}{Z_c} \quad (3.54)$$

Ukupan napon u proizvoljnoj tački x na vodu dobija se sabiranjem direktnog i inverznog talasa:

$$U(t) = U_d(t) + U_i(t) \quad (3.55)$$

Ukupna struja u proizvoljnoj tački sa orijentacijom u direktnom smeru (smer porasta x koordinate), dobija se na osnovu izraza:

$$I(t) = I_d(t) + I_i(t) \quad (3.56)$$

ili

$$I = -\frac{U_i(t)}{Z_c} + \frac{U_d(t)}{Z_c} \quad (3.57)$$

Može se uočiti da inverzna komponenta struje ima suprotan predznak u odnosu na direktnu komponentu, pri istom polaritetu napona. Razlog za suprotan polaritet inverzne komponente struje je suprotan smer prostiranja talasa u odnosu na unapred odabran pozitivan smer za struju koji se poklapa sa pravcem porasta x ose.

Ukoliko se posmatra vrlo dugačak vod po kome se prostire samo direktna komponenta napona, tada je ulazna impedansa voda posmatrana iz proizvoljne tačke x u direktnom smeru jednaka karakterističnoj impedansi voda jer je:

$$Z_{ul} = \frac{U_d(t)}{I_d(t)} = Z_c \quad (3.58)$$

Na sličan način se može pokazati da je u slučaju dugačkog voda po kome se prostire samo inverzna komponenta napona, ulazna impedansa posmatrana iz proizvoljne tačke x u inverznom smeru jednaka karakterističnoj impedansi voda, odnosno:

$$Z_{ul} = \frac{U_i(t)}{-I_i(t)} = Z_c \quad (3.59)$$

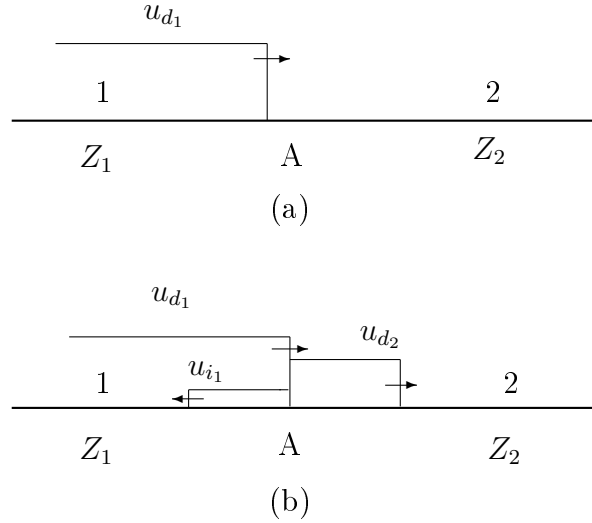
Pri određivanju ulazne impedanse voda u inverznom smeru izabran je smer struje u pravcu posmatranja ulazne impedanse, koji je suprotan pozitivnoj orijentaciji voda, pa struja ima negativan predznak. Kada se izračuna, dobija se pozitivna vrednost za ulaznu impedansu.

Na osnovu gornjeg razmatranja može se zaključiti da ulazna impedansa voda kod koga postoji samo jedna komponenta napona i struje, ima vrednost koja je jednaka karakterističnoj impedansi voda i ne zavisi od dužine voda. Ovaj zaključak važi samo za neograničeno dugačke vodove ili vodove konačne dužine do trenutka dok ne stigne odbijena komponenta napona sa drugog kraja voda.

3.2.2 Koeficijenti prelamanja i odbijanja

U realnim elektroenergetskim mrežama postoje mesta nehomogenosti na vodovima. To su čvorne tačke u kojima se sučeljava više vodova, tačke u kojima se menja karakteristična impedansa voda usled prelaska sa vazdušnog na kablovski vod ili obrnuto, ili tačke u kojima su priključeni drugi elementi.

Na slici 3.7 prikazana su dva idealna voda karakterističnih impedansi Z_1 i Z_2 koja se sučeljavaju u tački A . Po vodu 1 nailazi direktni naponski talas U_{d1} , koji je zbog jednostavnosti predstavljen odskočnom funkcijom.



Slika 3.7: Prelamanje i odbijanje talasa u tački nehomogenosti

Električne veličine na vodu 1, odnosno 2, označene su odgovarajućim indeksima. Po vodu 1 prostire se strujni talas:

$$I_{d1} = U_{d1}/Z_1 \quad (3.60)$$

Rezultantni napon u nekoj tački na vodu 1 je:

$$U_1 = U_{d1} + U_{i1} \quad (3.61)$$

Rezultantna struja po vodu 1 sa smerom ka tački A je:

$$I_1 = I_{d1} + I_{i1} \quad (3.62)$$

Ako se pretpostavi da na vodu 2 postoje samo talasi nastali prelamanjem u tački A , tada se ukupan napon u nekoj tački na vodu 2 može izraziti na osnovu samo direktne komponente napona na vodu 2, jer je inverzna komponenta $U_{i2} = 0$, odnosno:

$$U_2 = U_{d2} \quad (3.63)$$

Na isti način se i struja na vodu 2 može izračunati samo na osnovu direktne komponente struje po vodu 2, odnosno:

$$I_2 = I_{d2} \quad (3.64)$$

Tačka A je zajednička za oba voda, pa se po zakonu kontinuiteta naponi i struje neposredno levo, odnosno desno od tačke A ne mogu razlikovati. Iz izraza 3.61 i 3.63 se mogu izjednačiti naponi u tački A , a iz izraza 3.62 i 3.64 struje u tački A , koje su računane u njenoj neposrednoj blizini sa leve, odnosno desne strane. Ako se pri tome vodi računa o

odnosima između pojedinih komponenti napona i struja koji su dati izrazima 3.53 i 3.54, dobija se sledeći sistem linearnih jednačina:

$$U_{d_1} + U_{i_1} = U_{d_2} \quad (3.65)$$

$$\frac{U_{d_1}}{Z_1} - \frac{U_{i_1}}{Z_1} = \frac{U_{d_2}}{Z_2} \quad (3.66)$$

U sistemu od dve jednačine sa dve nepoznate (jednačine 3.65 i 3.66) poznata je samo komponenta U_{d_1} , dok su ostale veličine nepoznate, i potrebno ih je odrediti. Posle izračunavanja se dobija:

$$U_{d_2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{d_1} \quad (3.67)$$

$$U_{i_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{d_1} \quad (3.68)$$

Nepoznate struje se mogu odrediti zamenom izraza 3.53 i 3.54 u 3.67 i 3.68, odnosno:

$$I_{d_2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} I_{d_1} \quad (3.69)$$

$$I_{i_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} I_{d_1} \quad (3.70)$$

Direktna komponenta napona prelomljena u tački A koja se prostire po vodu 2 može se izraziti na sledeći način:

$$U_{d_2} = \alpha_{1A} U_{d_1} \quad (3.71)$$

gde je:

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.72)$$

α_{1A} – koeficijent prelamanja za naponski talas koji se prostire po vodu 1 ka tački A .

Inverzna komponenta napona po vodu 1 koja se odbila od tačke A može se izraziti na sledeći način:

$$U_{i_1} = \beta_{1A} U_{d_1} \quad (3.73)$$

gde je:

$$\beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.74)$$

β_{1A} – koeficijent odbijanja ili koeficijent refleksije za naponski talas koji nailazi po vodu 1 ka tački A .

Direktna komponenta struje prelomljena u tački A koja se prostire po vodu 2 može se izraziti na sledeći način:

$$I_{d_2} = \alpha_{i1_A} I_{d_1} \quad (3.75)$$

gde je:

$$\alpha_{i1_A} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.76)$$

α_{i1_A} – koeficijent prelamanja za strujni talas koji nailazi po vodu 1 ka tački A .

Inverzna komponenta struje po vodu 1 koja se odbila od tačke A može se izraziti na sledeći način:

$$I_{i_1} = \beta_{i1_A} I_{d_1} \quad (3.77)$$

gde je:

$$\beta_{i1_A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.78)$$

β_{i1_A} – koeficijent odbijanja ili koeficijent refleksije za strujni talas koji nailazi po vodu 1 ka tački A .

Koeficijenti prelamanja i odbijanja za struje obeleženi su indeksom i za razliku od koeficijenta prelamanja i odbijanja za napone.

Između koeficijenata prelamanja i odbijanja za napone postoji sledeća zavisnost:

$$\alpha_{1_A} - \beta_{1_A} = 1 \quad (3.79)$$

Na isti način postoji i veza između koeficijenata prelamanja i odbijanja za struje:

$$\alpha_{i1_A} - \beta_{i1_A} = 1 \quad (3.80)$$

3.2.3 Posebni slučajevi prelamanja i odbijanja talasa

Otvoren vod

U slučaju nailaska talasa na otvoren kraj voda može se zamisliti da se nadalje nastavlja vod beskonačno velike karakteristične impedanse. Koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 1 nailazi u tačku A u kojoj je vod otvoren dobija se na sledeći način:

$$\alpha_{1_A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 2 \quad (3.81)$$

Koeficijent odbijanja za talas koji po vodu 1 dolazi ka tački A ima sledeću vrednost:

$$\beta_{1A} = \lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1 \quad (3.82)$$

Na isti način se dobijaju i koeficijenti prelamanja i odbijanja za struje.

$$\alpha_{i1A} = 0 \quad \beta_{i1A} = -1 \quad (3.83)$$

Nakon nailaska naponskog talasa na kraj voda javlja se reflektovana komponenta napona koja ima vrednost:

$$U_{i1} = U_{d1} \quad (3.84)$$

Ukupan napon u tački A ima vrednost:

$$U_A = U_{d1} + U_{i1} = 2U_{d1} \quad (3.85)$$

Ukupan napon na vodu 1, koji se dobija kao zbir direktne i inverzne komponente napona, se udvostručava. Udvostručavanje napona se prvo pojavljuje na otvorenom kraju voda, da bi se zatim sa vraćanjem inverzne komponente napona duž voda postepeno pomerao udvostručeni naponski talas unazad.

Po vodu 1 se pojavljuje inverzna komponenta struje suprotnog predznaka od direktnog strujnog talasa, odnosno:

$$I_{i1} = -I_{d1} \quad (3.86)$$

Ukupna struja u tački A dobija se sabiranjem komponentnih struja, odnosno:

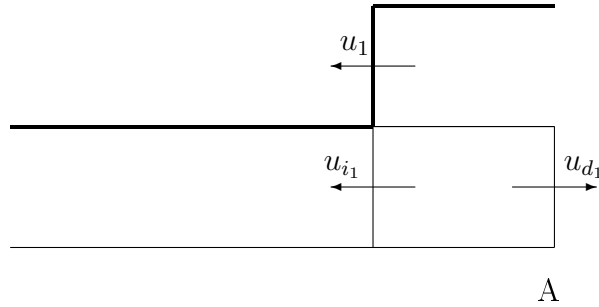
$$I_A = I_{d1} + I_{i1} = 0 \quad (3.87)$$

Nakon pojave inverznog talasa koji se odbio od kraja voda ukupna struja na vodu 1 koja je zbir direktne i inverzne komponente struje postepeno se poništava.

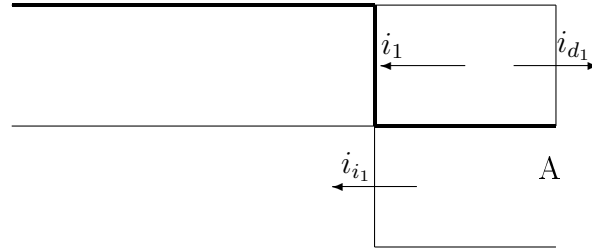
Na slici 3.8 prikazano je prostiranje direktnog naponskog talasa ka otvorenom kraju voda u_{d1} , inverznog naponskog talasa odbijenog od kraja voda u_{i1} , kao i ukupnog napona u_1 koji se dobija njihovom superpozicijom. Ukupan napon jednak je upadnom talasu do trenutka nailaska na otvoren kraj voda, a posle toga je jednak zbiru upadnog i reflektovanog talasa.

Na slici 3.9 prikazano je prostiranje direktnog strujnog talasa ka otvorenom kraju voda i_{d1} , inverznog strujnog talasa odbijenog od kraja voda i_{i1} , kao i ukupne struje i_1 koja se dobija njihovom superpozicijom. Ukupna struja jednaka je upadnom talasu do trenutka nailaska na otvoren kraj voda, a posle toga ukupna struja postaje jednaka nuli.

Udvostručavanje napona na otvorenom kraju voda može se protumačiti pretvaranjem elektromagnetske energije na elementarnim induktivnostima u elektrostatičku energiju na elementarnim kapacitivnostima, prema slici 3.10.



Slika 3.8: Prostorna raspodela direktnog, inverznog i ukupnog napona posle dolaska na otvoren kraj voda



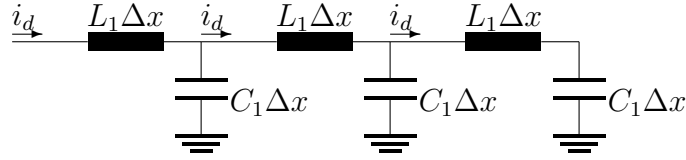
Slika 3.9: Prostorna raspodela direktne, inverzne i ukupne struje na otvorenom kraju voda

Prostiranje talasa po vodu se može objasniti proticanjem struje i_d kroz elementarnu induktivnost $L_1\Delta x$, koja puni elementarnu kapacitivnost $C_1\Delta x$. Čim se pojavi napon na kapacitivnosti $C_1\Delta x$, pojavljuje se i razlika potencijala između krajeva sledeće elementarne induktivnosti $L_1\Delta x$, izazivajući proticanje struje koja puni elementarnu kapacitivnost u sledećoj sekciji. Elektromagnetna energija na elementarnoj induktivnosti ima vrednost $\frac{1}{2}L_1i_d^2$, a elektrostatika energija na elementarnoj kapacitivnosti $\frac{1}{2}C_1u_d^2$. U bilo kojoj tački voda bez diskontinuiteta ove dve energije su međusobno jednake. Ovo se može dokazati zamenom direktnog strujnog talasa količnikom direktnog naponskog talasa i karakteristične impedanse voda u relaciju za elektromagnetsku energiju na elementarnoj induktivnosti:

$$\frac{1}{2}L_1i_d^2 = \frac{1}{2}L_1\left(\frac{u_d}{Z_c}\right)^2 = \frac{1}{2}L_1\frac{u_d^2}{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{1}{2}C_1u_d^2 \quad (3.88)$$

Na ovaj način naponski i strujni talas se prostiru prema kraju voda izazivajući proticanje struje kroz elementarne induktivnosti i puneći elementarne kapacitivnosti.

U trenutku kada talas stigne do kraja voda, puni se poslednja elementarna kapacitivnost $C_1\Delta x$. Ova kapacitivnost se ne može prazniti kroz narednu sekciju, već se kompletna elektromagnetska energija elementarne induktivnosti pretvara u elektrostatika energiju, izazivajući porast napona na kraju voda do dvostruke vrednosti. Zbog toga prestaje proticanje struje kroz elementarnu induktivnost, izazivajući dodatno punjenje elementarne



Slika 3.10: Tumačenje totalne refleksije talasa zakonom o održanju energije

kapacitivnosti iz prethodne sekcije do dvostruke vrednosti napona. Na ovaj način se postepeno struja kroz elementarne induktivnosti ukida, idući sa desna na levo, a napon na elementarnim kapacitivnostima udvostručuje.

Vod uzemljen na jednom kraju (kratko spojen vod)

Sistem koji se sastoji od voda koji je na svom kraju uzemljen može se modelovati pomoću voda konačne karakteristične impedanse Z_1 koji se nastavlja na vod karakteristične impedanse $Z_2 = 0$.

Koeficijenti prelamanja i odbijanja za talase napona i struja u ovom slučaju imaju vrednosti:

$$\begin{aligned} \alpha_{1A} &= 0 & \beta_{1A} &= -1 \\ \alpha_{i1A} &= 2 & \beta_{i1A} &= 1 \end{aligned} \quad (3.89)$$

Nakon nailaska naponskog talasa na kraj voda javlja se reflektovana komponenta napona suprotnog polariteta koja poništava upadni talas:

$$U_{i1} = -U_{d1} \quad (3.90)$$

Ukupan napon na vodu 1 koji se dobija kao zbir direktne i inverzne komponente napona postaje jednak nuli:

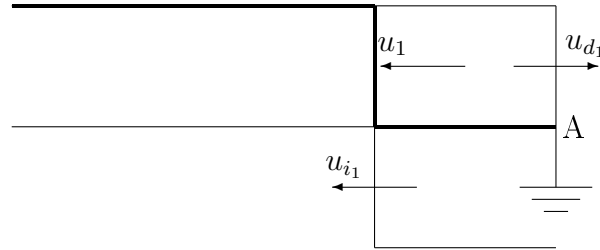
$$U_A = U_{d1} + U_{i1} = 0 \quad (3.91)$$

Poništavanje napona duž voda 1 odvija se postepeno sa napredovanjem inverzne komponente napona unazad od uzemljenog kraja voda.

Na sl. 3.11 prikazana je prostorna raspodela direktnog i inverznog naponskog talasa i ukupnog napona na vodu 1 posle nailaska na uzemljeni kraj voda.

Na vodu 1 se pojavljuje odbijena komponenta struje iste amplitude i polariteta kao i direktna komponenta struje, odnosno:

$$I_{i1} = I_{d1} \quad (3.92)$$

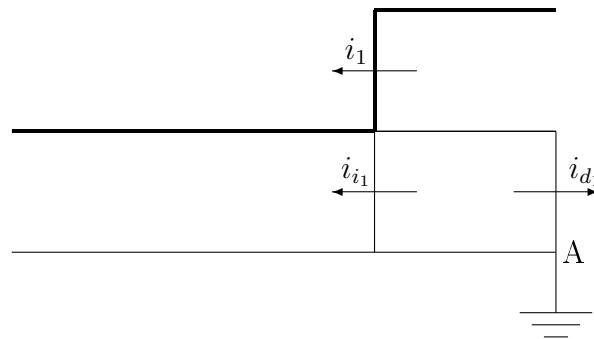


Slika 3.11: Prostorna raspodela direktnog, inverznog i ukupnog naponskog talasa nakon nailaska talasa na uzemljen kraj voda

Ukupna struja na vodu 1 dobija se superpozicijom direktne i inverzne komponente struje:

$$I_A = I_{d1} + I_{i1} = 2I_{d1} \quad (3.93)$$

Posle superpozicije se dobija dvostruka vrednost struje na vodu 1 zbog dejstva odbijene inverzne komponente struje. Na slici 3.12 prikazana je prostorna raspodela direktnog i inverznog strujnog talasa i ukupne struje posle refleksije od kraja voda.

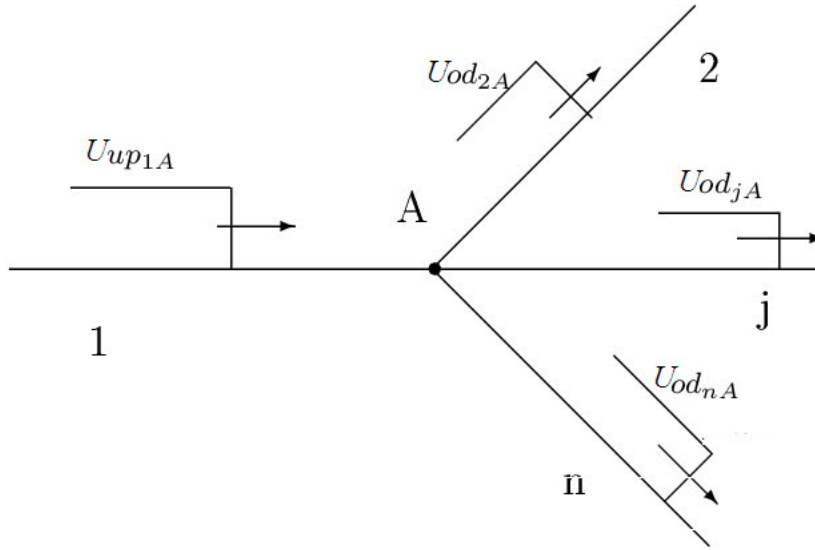


Slika 3.12: Prostorna raspodela direktnog, inverznog i ukupnog strujnog talasa nakon nailaska na uzemljen kraj voda

Udvostručavanje struje na uzemljenom kraju voda može se protumačiti pretvaranjem elektrostatičke energije na elementarnim kapacitivnostima u elektromagnetnu energiju na elementarnim induktivnostima analogno procesu kod otvorenog voda.

Nailazak talasa na više vodova

U slučaju kada prenaponski talas nailazi po jednom vodu u čvornu tačku A u kojoj je priključeno još $n - 1$ vodova, dolazi do prelamanja talasa, tako da se po svakom od vodova prostire identičan prelomljeni naponski talas. Na slici 3.13 ilustrovan je ovaj slučaj.



Slika 3.13: Nailazak prenaponskog talasa po jednom vodu u čvornu tačku u kojoj je priključeno još $n - 1$ vodova

Radi jednostavnosti je pretpostavljeno da svi vodovi imaju identične karakteristične impedanse Z . U tom slučaju svi prelomljeni talasi koji se kreću od tačke A po nekom od vodova j ($j = 2, \dots, n$) imaju istu vrednost:

$$U_{odjA} = \alpha_{1A} U_{up1A} \quad (3.94)$$

Oznake u izrazu 3.94 imaju značenje:

U_{up1A} – direktna komponenta napona koja se kreće po vodu 1 u pravcu tačke A , koja se naziva **upadnom komponentom** napona u odnosu na tačku A ,

U_{odjA} – direktna komponenta napona koja se kreće po vodu j od tačke A i koja se naziva **odbijenom komponentom** napona u odnosu na tačku A .

Koeficijent prelamanja α_{1A} za talas koji po vodu 1 nailazi na tačku A ima vrednost:

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_{ekA}}{Z_{ekA} + Z} \quad (3.95)$$

gde je Z_{ekA} ekvivalentna karakteristična impedansa svih $n - 1$ paralelno vezanih vodova na koje nailazi talas. Po pretpostavci su karakteristične impedanse svih vodova međusobno jednake, pa je ekvivalentna impedansa $n - 1$ voda:

$$Z_{ekA} = \frac{Z}{n - 1} \quad (3.96)$$

Posle zamene izraza 3.96 u izraz 3.95 dobija se:

$$\alpha_{1A} = \frac{\frac{2Z}{n-1}}{\frac{Z}{n-1} + Z} = \frac{2}{n} \quad (3.97)$$

Odbijena komponenta napona od čvora A po prvomvodu je:

$$U_{od1A} = \beta_{1A} U_{up1A} \quad (3.98)$$

gde je:

$$\beta_{1A} = \frac{Z_{ekA} - Z}{Z_{ekA} + Z} \quad (3.99)$$

Posle izračunavanja se dobija sledeća vrednost:

$$\beta_{1A} = \frac{\frac{Z}{n-1} - Z}{\frac{Z}{n-1} + Z} = \frac{2-n}{n} \quad (3.100)$$

Na ovom primeru biće ilustrovan princip invarijantnosti napona čvora od voda po kome se posmatraju talasi.

Ukupan napon čvora A računat na osnovu upadnog i odbijenog talasa na vodu 1 je:

$$U_A = U_{up1A} + U_{od1A} = U_{up1A} (1 + \beta_{1A}) \quad (3.101)$$

odnosno,

$$U_A = (1 + \frac{2-n}{n}) U_{up1A} = \frac{2}{n} U_{up1A} \quad (3.102)$$

Isti napon se može izračunati na osnovu upadne i odbijene komponente napona po bilo kom vodu j pri nailasku upadne komponente napona samo po vodu 1, jer je čvor A zajednički za sve vodove. Napon čvora A jednak je samo odbijenoj komponenti napona po vodu j , jer upadna ne postoji, odnosno:

$$U_A = U_{odjA} = \alpha_{1A} U_{up1A} = \frac{2}{n} U_{up1A} \quad (3.103)$$

Bez obzira po kome se vodu računaju talasi, napon čvora A uvek ima istu vrednost.

Na identičan način se može proveriti prvi Kirhofov zakon za struje. Ukupna struja koja po vodu 1 dotiče ka čvoru A je:

$$I_{1A} = I_{up1A} + I_{od1A} = I_{up1A} (1 + \beta_{1A}) \quad (3.104)$$

gde je:

$$\beta_{1A} = \frac{Z - \frac{Z}{n-1}}{\frac{Z}{n-1} + Z} = \frac{n-2}{n} \quad (3.105)$$

koeficijent odbijanja za strujni talas koji po vodu 1 dolazi u tačku A . Kada se izračuna ukupna struja, dobija se:

$$I_{1A} = \frac{2(n-1)}{n} I_{up1A} \quad (3.106)$$

Struja po pojedinim vodovima se dobija deljenjem odbijene komponente napona sa karakterističnom impedansom voda, odnosno:

$$I_{jA} = \frac{U_{odjA}}{Z} = \alpha_{1A} \frac{U_{up1A}}{Z} \quad (3.107)$$

Posle izračunavanja se dobija struja po vodu j :

$$I_{jA} = \frac{2}{n} I_{up1A} \quad (3.108)$$

Ukupna struja po svih $n-1$ vodova je:

$$\sum_{j=2}^n I_{jA} = \frac{2(n-1)}{n} I_{up1A} \quad (3.109)$$

Ova struja jednaka je struji prvog voda I_{1A} , čime je pokazano da važi princip kontinuiteta za struje.

Razlike u definicijama komponenti napona i struja

Direktne i inverzne komponente talasa napona i struja definišu se u odnosu na usvojeni smer grane po kojoj se talasi prostiru. Za svaki vod se usvaja pozitivan smer. Talasi koji se kreću u tom smeru su direktni, a talasi koji se kreću u suprotnom smeru su inverzni. U predhodnim primerima je pozitivan smer grane bio sa leva na desno.

Upadne i odbijene komponente napona i struja definišu se u odnosu na posmatrani čvor. Upadna komponenta napona ili struje se kreće ka čvoru i to se smatra pozitivnim smerom, a odbijena se kreće od čvora i smatra se negativnim smerom.

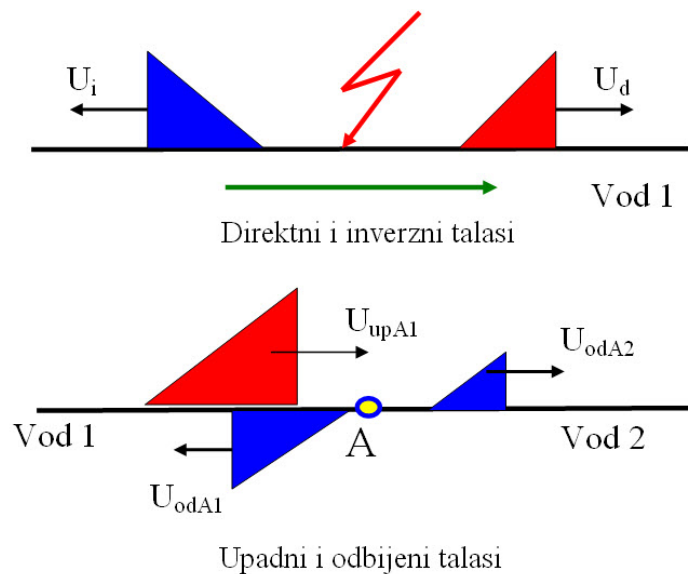
Na slici 3.14 gore prikazani su direktni i inverzni talasi na vodu 1, a dole upadni i odbijeni talasi na vodu 1 i 2 u odnosu na tačku A .

Oznake imaju sledeće značenje:

U_d - direktna komponenta napona u odnosu na orijentaciju voda 1,

U_i - inverzna komponenta napona u odnosu na orijentaciju voda 1,

U_{upA1} - upadna komponenta napona po vodu 1 u odnosu na tačku A ,



Slika 3.14: Direktni i inverzni talasi na vodu 1 (gore) i upadni i odbijeni talasi na vodovima 1 i 2 u odnosu na tačku A (dole)

U_{odA1} - odbijena komponenta napona po vodu 1 u odnosu na tačku A,

U_{odA2} - odbijena komponenta napona po vodu 2 u odnosu na tačku A.

Ekvivalentni talas

Za tumačenje procesa prelamanja i odbijanja talasa u jednoj tački nehomogeniteta složene mreže polazi se od najopštijeg slučaja čvora A u kome se susiće n dugačkih vodova po kojima dolaze upadni talasi i jedan koncentrisan element operatorske impedanse $Z_A(p)$, kao na slici 3.15.

Na slici 3.15 oznake imaju sledeće značenje:

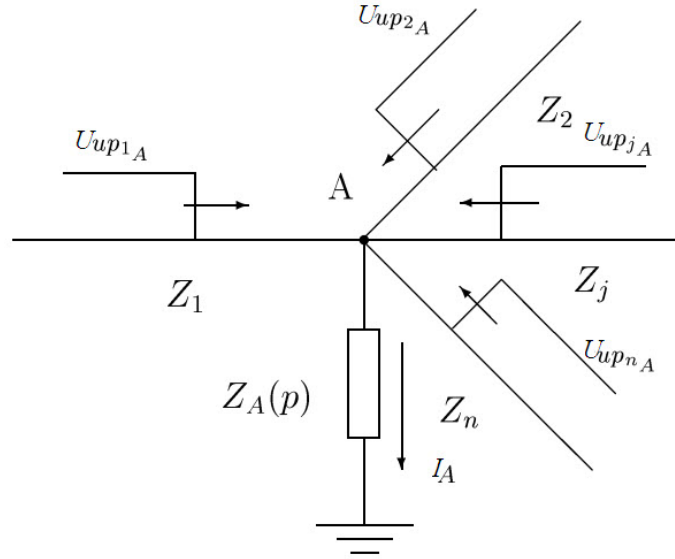
U_{upjA} ($j = 1, 2, \dots, n$) – upadni talas koji se prostire po j -tom vodu ka tački A ,

U_A – napon u čvornoj tački A ,

Z_j ($j = 1, 2, \dots, n$) – karakteristična impedansa j -tog voda,

I_A – struja kroz koncentrisanu impedansu $Z_A(p)$.

U čvornoj tački A umesto koncentrisane impedanse $Z_A(p)$ može da bude priključen vod karakteristične impedanse Z_A po kome ne dolazi upadni naponski talas. Pošto je



Slika 3.15: Definicija ekvivalentnog talasa

ulazna impedansa dugačkog voda po kome ne dolaze putujući talasi ka tački posmatranja jednaka karakterističnoj impedansi tog voda, to znači da se u tački A dugačak vod može zameniti otporom Z_A koji je jednak karakterističnoj impedansi tog voda.

Na slici 3.15 pretpostavljeno je da po svih n vodova priključenih u čvornu tačku A nailaze upadni prenaponski talasi. Ovo je najopštiji slučaj koji omogućava rešavanje problema kada se zbog višestrukih refleksija uspostavlja prelazni napon u kompletnoj proučavanoj mreži.

Napon u čvornoj tački A može se izraziti preko upadnog i odbijenog naponskog talasa po bilo kom vodu j , odnosno:

$$U_A = U_{upjA} + U_{odjA} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.110)$$

gde je U_{odjA} ($j = 1, 2, \dots, n$) – odbijeni talas koji se prostire po j -tom vodu od tačke A .

Pod **upadnim talasom** se podrazumeva talas koji se kreće ka posmatranoj tački A , a pod **odbijenim talasom** se podrazumeva talas koji se kreće od posmatrane tačke A . Za razliku od direktnog i inverznog talasa, koji su definisani u odnosu na pozitivnu orijentaciju voda, upadni i odbijeni talas se definišu u odnosu na posmatranu tačku.

Na osnovu izraza 3.110 mogu se odrediti odbijene komponente napona po pojedinim vodovima:

$$U_{odjA} = U_A - U_{upjA} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.111)$$

Upadni strujni talasi po pojedinim vodovima koji se prostiru ka čvornoj tački A su:

$$I_{up_{jA}} = \frac{U_{up_{jA}}}{Z_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.112)$$

Odbijeni strujni talasi po pojedinim vodovima koji se prostiru od čvorne tačke A su:

$$I_{od_{jA}} = -\frac{U_{od_{jA}}}{Z_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.113)$$

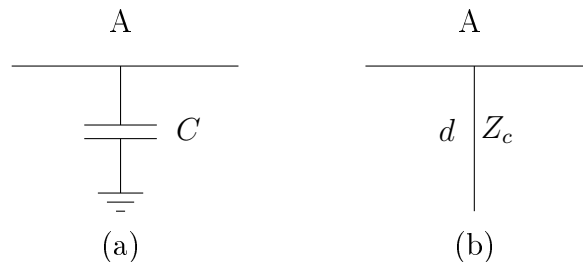
Odbijeni strujni talasi imaju negativan predznak jer je pretpostavljena orijentacija svih vodova prema slici 3.15 ka tački A . Struja grane j jednaka je zbiru upadnog i odbijenog strujnog talasa po toj grani:

3.3 Zamena koncentrisanog elementa vodom

Pri proračunima talasnih procesa u složenim šemama u kojima se pored vodova pojavljuju i elementi sa koncentrisanim parametrima, pogodno je prelazni proces u kompletnoj mreži rešavati jedinstvenim postupkom. Zbog toga se elementi sa koncentrisanim parametrima kao što su otpornici, kondenzatori i kalemovi mogu modelovati ekvivalentnim kratkim vodovima, uz zadovoljavajuću tačnost pri malim koracima proračuna.

3.3.1 Kondenzator vezan otočno prema zemlji

Kondenzator koji je vezan otočno prema zemlji, a koji se najčešće zamenjuje ulaznu kapacitivnost energetskog ili mernog transformatora pri proračunima atmosferskih prenapona, zamenjuje se kratkim ekvivalentnim vodom karakteristične impedanse Z_c i dužine d , kao na slici 3.16:



Slika 3.16: Zamena otočno vezanog kondenzatora ekvivalentnim vodom

Kapacitivna impedansa u frekvencijskom domenu gledana iz tačke A na slici 3.16 (a) ima oblik:

$$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.114)$$

gde su

C –kapacitivnost kondenzatora koji se zamenjuje vodom,

$j\omega$ –kompleksna kružna učestanost.

Idealan kratak vod dužine d otvoren na drugom kraju sa slike 3.16 (b), po kome je vreme prostiranja $T = d/v$, gde je v brzina prostiranja talasa, ima ulaznu impedansu:

$$Z_{ul} = Z_c \operatorname{ctgh}\left(\frac{j\omega d}{v}\right) \quad (3.115)$$

Posle prelaska sa hiperboličnih na trigonometrijske funkcije, što je moguće kada je argument hiperboličke funkcije imaginaran broj, dobija se:

$$Z_{ul} = -jZ_c \operatorname{ctg}\left(\frac{\omega d}{v}\right) \quad (3.116)$$

Za male vrednosti argumenta $(\omega d)/v$ mogu se uraditi sledeće aproksimacije:

$$\cos\left(\frac{\omega d}{v}\right) \approx 1 \quad (3.117)$$

$$\sin\left(\frac{\omega d}{v}\right) \approx \frac{\omega d}{v} \quad (3.118)$$

Posle izvršenih aproksimacija se dobija ulazna impedansa voda u sledećem obliku:

$$Z_{ul} = -j \frac{Z_c v}{\omega d} = -j \frac{Z_c}{\omega T} \quad (3.119)$$

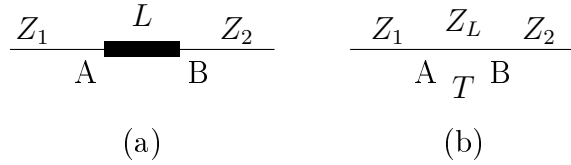
Izjednačavanjem kapacitivne impedanse iz izraza 3.114 i ulazne impedanse iz izraza 3.118 se dobija karakteristična impedansa ekvivalentnog voda kojim se zamenjuje otočna kapacitivnost:

$$Z_c = \frac{T}{C} \quad (3.120)$$

Vreme prostiranja po ekvivalentnom vodu se može proizvoljno usvojiti, ali treba da bude što je moguće kraće, jer se time smanjuje i greška proračuna. Zbog toga se usvaja da je vreme prostiranja talasa po ekvivalentnom vodu jednako elementarnom koraku proračuna, jer se time greška minimizira. U mreži sa raspoređenim parametrima se elementarni korak proračuna bira da je jednak vremenu prostiranja po najkraćem vodu u kompletnoj šemi. Po pravilu, to su dužine spusnih provodnika do odvodnika prenapona ili kratke deonice između aparata u postrojenju. Ako se razmatra ugroženost nadzemnih vodova, tada su to kratki elementi stubova kao što su konzole, vertikalni delovi između vrha stuba i gornje konzole, ili između konzola u slučaju trofaznih modela stubova. U ovom slučaju elementi nadzemnog voda se modeluju kratkim vodovima.

3.3.2 Kalem vezan redno između dva voda

Kalem induktivnosti L redno vezan između dva voda takođe može da bude zamenjen kratkim ekvivalentnim vodom, kao na slici 3.17. Posmatrajmo odnose napona i struja na



Slika 3.17: Ekvivalentiranje kalema kratkim vodom

krajevima kalema:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (3.121)$$

gde su:

U_A, U_B —naponi u tačkama A i B ,

I_A, I_B —struja ka tački A i struja od tačke B .

Ako se kalem zameni kratkim vodom po kome je vreme prostiranja talasa T , tada se odnosi napona i struja na krajevima kratkog voda mogu prikazati rešenjima jednačina telegrafičara u hiperboličnom obliku:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(j\omega T) & Z_L \cdot \text{sh}(j\omega T) \\ \frac{1}{Z_L} \text{sh}(j\omega T) & \text{ch}(j\omega T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (3.122)$$

Posle prelaska sa hiperboličnih na trigonometrijske funkcije se dobija:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(j\omega T) & Z_L \cdot \sin(j\omega T) \\ \frac{1}{Z_L} \sin(j\omega T) & \cos(j\omega T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (3.123)$$

Uvođenjem aproksimacija:

$$\cos\left(\frac{\omega d}{v}\right) \approx 1 \quad (3.124)$$

$$\sin\left(\frac{\omega d}{v}\right) \approx \frac{\omega d}{v} \quad (3.125)$$

$$\frac{\sin\left(\frac{\omega d}{v}\right)}{Z_L} \approx 0 \quad (3.126)$$

izraz 3.123 postaje:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega Z_L T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (3.127)$$

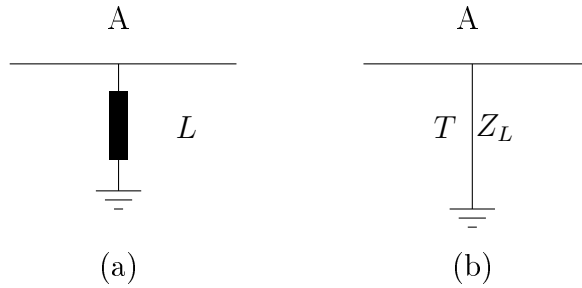
Upoređivanjem izraza 3.119 i 3.127 može se zaključiti da se kalem može zameniti kratkim vodom čija je karakteristična impedansa:

$$Z_L = \frac{L}{T} \quad (3.128)$$

Vreme prostiranja po ekvivalentnom vodu bira se da je jednako elementarnom koraku proračuna.

3.3.3 Kalem vezan otočno prema zemlji

Kalem vezan otočno prema zemlji može se ekvivalentirati kratkim vodom, koji je na drugom kraju uzemljen, karakteristične impedanse Z_L po kome je vreme prostiranja talasa T , kao na slici 3.18. Induktivna impedansa kalema sa slike 3.18 (a) u frekvencijskom



Slika 3.18: Ekvivalentiranje otočnog kalema kratkim vodom

domenu ima oblik:

$$Z(j\omega) = j\omega L \quad (3.129)$$

Kratak idealan vod, kratko spojen na drugom kraju, ima ulaznu impedansu:

$$Z_{ul} = Z_L \operatorname{tgh}\left(\frac{j\omega d}{v}\right) \quad (3.130)$$

Prelaskom sa hiperboličnih na trigonometrijske funkcije se dobija:

$$Z_{ul} = Z_L \operatorname{tg}\left(\frac{j\omega d}{v}\right) \quad (3.131)$$

Uvažavanje aproksimacija trigonometrijskih funkcija za male vrednosti argumenata izraz 3.131 postaje:

$$Z_{ul} = Z_L \frac{j\omega d}{v} = j\omega Z_L T \quad (3.132)$$

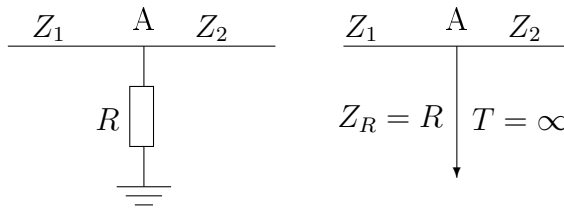
Izjednačavanjem ulazne impedanse iz izraza 3.129 i 3.132 dobija se karakteristična impedansa ekvivalentnog kratkog voda koji zamenjuje kalem:

$$Z_L = \frac{L}{T} \quad (3.133)$$

Vreme prostiranja po vodu treba usvojiti da je jednako jednom elementarnom koraku proračuna.

3.3.4 Otpornik vezan otočno prema zemlji

Otpornik otpornosti R vezan otočno prema zemlji se modeluje beskonačno dugim vodom čija je karakteristična impedansa Z_R brojno jednaka otpornosti R otpornika koji se ekvivalentira. Ovakav način modelovanja otpornika je direktna posledica primene Petersenovog pravila, po kome se beskonačno dugačak vod može modelovati koncentrisanom otpornošću čija je vrednost jednaka karakterističnoj impedansi voda. Ovaj slučaj ilustrovan je na slici 3.19.



Slika 3.19: Zamena otpornika beskonačno dugim vodom

Na ovaj način se elementi sa koncentrisanim parametrima kao što su redni ili otočni kalemovi i otočni kondenzatori, kao i otpornici mogu jednostavno modelovati. Redno vezani kondenzatori se ne mogu na ovaj način uključiti u proračun, već posebnom metodom modifikovanih koeficijenata prelamanja.

3.4 Modifikovani koeficijenti prelamanja

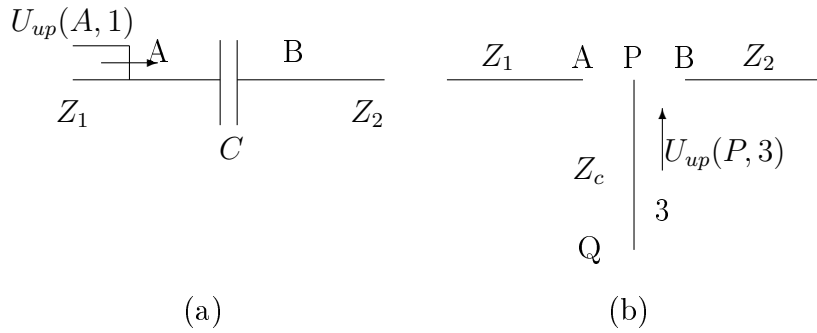
Metoda modifikovanih koeficijenata prelamanja [28] omogućava rešavanje mreža sa raspoređenim parametrima u kojima postoji redna veza kondenzatora između dva voda. Ove slučajeve nije moguće rešiti klasičnim ekvivalentiranjem koncentrisanih elemenata vodovima.

3.4.1 Modelovanje redno vezanog kondenzatora vodom

Na slici 3.20 (a) prikazana je redna veza kondenzatora C između dva voda karakterističnih impedansi Z_1 i Z_2 , a na slici 3.20 (b) model koji se sastoji od tri voda, od kojih srednji kratak idealan vod otvoren na drugom kraju, koji služi za ekvivalentiranje kapacitivnosti, nije priključen direktno na ostale vodove, već se napon na njemu računa posebnim postupkom. Ekvivalentni vod ima karakterističnu impedansu:

$$Z_c = \frac{T_c}{C} \quad (3.134)$$

gde je T_c vreme prostiranja talasa po ekvivalentnom vodu.



Slika 3.20: Modelovanje rednog kondenzatora ekvivalentnim vodom

Čvor P na ekvivalentnom vodu nije galvanski odvojen od čvorova A i B , već se uzima kao sastavni deo složenog čvora u kome se prelomljeni i odbijeni talasi računaju posebnim postupkom.

Koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 1 dolazi u tačku A , na osnovu koga se određuje vrednost napona u tački A ima oblik:

$$\alpha_{A1} = \frac{2(Z_c + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_c} \quad (3.135)$$

Napon u čvoru A samo usled nailaska upadnog talasa $U_{up}(A, 1)$ u čvor A po vodu 1 je:

$$U_{A1} = \alpha_{A1} U_{up}(A, 1) \quad (3.136)$$

Koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 1 dolazi u tačku A i prelama se na ekvivalentni vod, na osnovu koga se računa napon u tački P , ima oblik:

$$\alpha_{P1} = \frac{2Z_c}{Z_1 + Z_2 + Z_c} \quad (3.137)$$

Napon u čvoru P usled nailaska upadnog talasa $U_{up}(A, 1)$ u čvor A po vodu 1 je:

$$U_{P1} = \alpha_{P1} U_{up}(A, 1) \quad (3.138)$$

Koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 1 dolazi u tačku A i prelama se na vod 2, na osnovu koga se računa napon u tački B , ima oblik:

$$\alpha_{B1} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_c} \quad (3.139)$$

Napon u čvoru B usled nailaska upadnog talasa $U_{up}(A, 1)$ u čvor A po vodu 1 je:

$$U_{B1} = \alpha_{B1} U_{up}(A, 1) \quad (3.140)$$

Analogno bi se odredili koeficijenti prelamanja za talas koji po vodu 2 dolazi u tačku B i prelama se i prenosi se na ekvivalentni vod i prenosi se na vod 1.

Talas koji se preneo na ekvivalentni vod putuje do njegovog kraja i totalno se odbija od tačke Q . Ovaj talas, posle nailaska u tačku P se prelama. Napon u tački P usled nailaska upadnog talasa po ekvivalentnom vodu u tačku P izračunava se na osnovu izraza:

$$U_{P3} = \alpha_{PP} U_{up}(P, 3) \quad (3.141)$$

gde su:

$$\alpha_{PP} = \frac{2(Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_c} \quad (3.142)$$

$U_{up}(P, 3)$ –upadni talas koji po ekvivalentnom vodu nailazi u čvor P .

Koeficijent prelamanja za talas koji po ekvivalentnom vodu dolazi u tačku P i prelama se na vod 1 je:

$$\alpha_{PA} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_c} \quad (3.143)$$

Napon u čvoru A usled talasa koji po ekvivalentnom vodu dolazi u čvor P i prelama sa na vod 1 je:

$$U_{A3} = \alpha_{PA} U_{up}(P, 3) \quad (3.144)$$

Koeficijent prelamanja za talas koji po ekvivalentnom vodu dolazi u tačku P i prelama se na vod 2 je:

$$\alpha_{PB} = -\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_c} \quad (3.145)$$

Napon u čvoru B usled talasa koji po ekvivalentnom vodu dolazi u čvor P i prelama sa na vod 2 je:

$$U_{B3} = \alpha_{PB} U_{up}(P, 3) \quad (3.146)$$

Ukoliko bi posmatrali upadni talas koji nailazi po vodu 2 u čvor B , tada bi se modifikovani koeficijenti odredili identičnim postupkom.

Važno je naglasiti da koeficijent prelamanja iz čvora P ka čvoru A , na koji nailazi inicijalni talas, ima različit znak od koeficijenta prelamanja iz čvora P ka čvoru B .

Ako smatramo da inicijalni talas dolazi po vodu 1, tada se naponi u pojedinim čvorovima mogu sračunavati vodeći računa o simultanom dejstvu upadnog talasa po vodu 1 i talasa koji dolazi po ekvivalentnom vodu u tačku P . Napon u čvoru A je:

$$U_A = U_{A1} + U_{A3} = \alpha_{A1}U_{up}(A, 1) + \alpha_{AP}U_{up}(P, 3) \quad (3.147)$$

Napon u čvoru B je:

$$U_B = U_{B1} + U_{B3} = \alpha_{AB}U_{up}(A, 1) + \alpha_{PB}U_{up}(P, 3) \quad (3.148)$$

Napon u čvoru P na ekvivalentnom vodu usled nailaska prenapona samo povodu 1 u čvor A je:

$$U_P = \alpha_{AP}U_{up}(A, 1) + \alpha_{PP}U_{up}(P, 3) \quad (3.149)$$

Iz čvora P kreće odbijena komponenta napona:

$$U_{odP} = U_P - U_{up}(P, 3) \quad (3.150)$$

Ukoliko bi istovremeno dolazio upadni talas i po vodu 2, tada bi trebalo vršiti proračun napona nezavisno za pojedine upadne naponske talase, a na kraju superponirati napone u čvorovima A i B usled pojedinih upadnih talasa. Pri tome se moraju nezavisno posmatrati naponi na pomoćnom vodu nastali usled dejstva inicijalnog talasa koji dolazi po vodu 1, odnosno po vodu 2.

Redna veza kondenzatora se najčešće koristi kod modelovanja kapacitivnog prenošenja prenapona sa jednog na drugi namotaj transformatora.

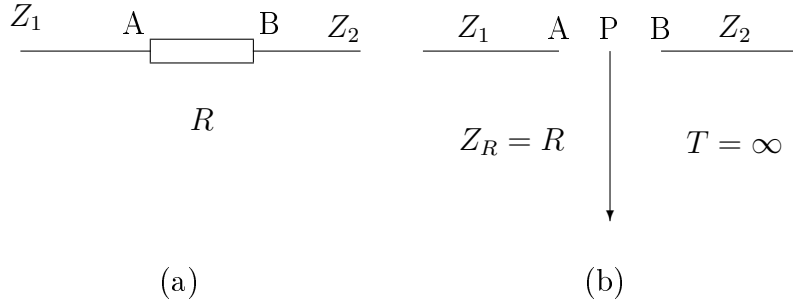
3.4.2 Modelovanje redno vezanog otpornika

U slučaju redno vezanog otpornika se formira slična zamenska šema kao u slučaju redno vezanog kondenzatora. Jedina razlika je u tome što je ekvivalentni vod beskonačne dužine, a njegova karakteristična impedansa $Z_R = R$. Postupak ekvivalentiranja prikazan je na slici 3.21. Proračun napona se vrši na identičan način kao u slučaju rednog kondenzatora, jedino što po ekvivalentnom vodu ne postoji upadni talas u čvor P . Napon u čvoru A usled nailaska upadnog talasa $U_{up}(A, 1)$ u čvor A po vodu 1 je:

$$U_A = \alpha_{A1}U_{up}(A, 1) \quad (3.151)$$

Napon u čvoru B usled nailaska upadnog talasa $U_{up}(A, 1)$ u čvor A po vodu 1 je:

$$U_B = \alpha_{B1}U_{up}(A, 1) \quad (3.152)$$



Slika 3.21: Ekvivalentiranje redno vezanog otpornika vodovima

Modifikovani koeficijenti prelamanja se dobijaju iz sledećih izraza:

$$\alpha_{A1} = \frac{2(R + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + R} \quad (3.153)$$

$$\alpha_{B1} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2 + R} \quad (3.154)$$

Pad napona na otporniku se izračunava kao napon u čvoru P na ekvivalentnom vodu, odnosno:

$$U_P = \alpha_{P1} U_{up}(A, 1) \quad (3.155)$$

gde je:

$$\alpha_{P1} = \frac{2R}{Z_1 + Z_2 + R} \quad (3.156)$$

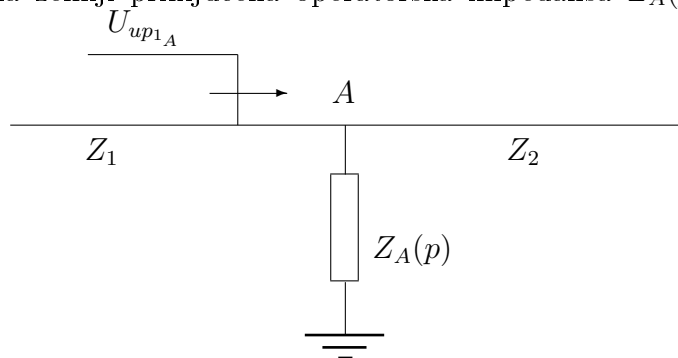
Na ovaj način se mogu jedinstvenim postupkom rešavati prelazni procesi u šemama u kojima se pojavljuju koncentrisane otpornosti, kao naprimer otpornosti uzemljenja elemenata postrojenja ili stubova za nadzemne vodove.

3.5 Petersenovo pravilo

Za rešavanje problema prelamanja talasa u slučaju nailaska talasa na čvorne tačke u kojima se sučeljavaju vodovi i koncentrisani elementi koristi se postupak koji se naziva **Petersenovim pravilom**. Prema ovom postupku se svi vodovi zamenjuju koncentrisanim otpornostima koje su brojno jednake karakterističnim impedansama vodova. Vod po kome nailazi prenaponski talas ili ekvivalentni vod po kome nailazi ekvivalentni talas modeluju se naponskim izvorom čija je elektromotorna sila jednaka dvostrukoj vrednosti upadnog talasa, a unutrašnja otpornost izvora jednaka karakterističnoj impedansi voda po kome se talas prostire. Koncentrisani elementi u posmatranoj čvornoj tački u kojoj se

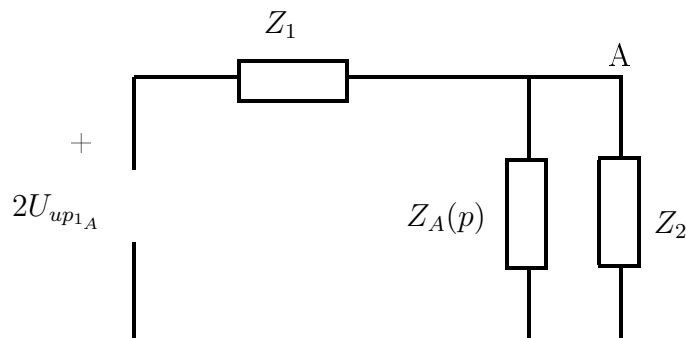
dogadja prelamanje talasa se predstavljaju svojim operatorskim impedansama. Zamenska šema dobijena ovim postupkom naziva se **Petersenovom šemom**.

Na sl. 3.22 prikazan je slučaj nailaska prenaponskog talasa u čvornu tačku A u kojoj je otočno prema zemlji priključena operatorska impedansa $Z_A(p)$. Na slici 3.23



Slika 3.22: Nailazak upadnog prenaponskog talasa u čvornu tačku sa otočno vezanom koncentrisanom impedansom

prikazana je ekvivalentna Petersenova šema za taj slučaj. Vod po kome nailazi upadni talas zamenjen je otpornikom čija je vrednost Z_1 , a upadni talas izvorom elektromotorne sile $E = 2U_{up1A}$. Beskonačno dugačak vod po kome se prelomljeni talas prostire dalje od tačke A zamenjuje se koncentrisanom otpornošću vrednosti Z_2 koja je vezana izmedju čvorne tačke A i zemlje. Ulazna impedansa voda 2 gledana iz tačke A zaista je jednaka karakterističnoj impedansi voda, pa se zato može formirati ovakva ekvivalentna šema. U

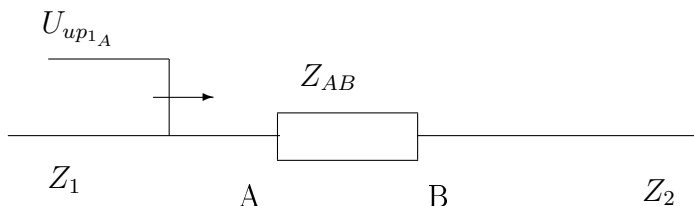


Slika 3.23: Primena Petersenovog pravila na šemu sa koncentrisanom impedansom u čvornoj tački A

slučaju kada se izmedju tačke nehomogenosti A i zemlje nalazi priključen element $Z_A(p)$ predstavljen svojom koncentrisanom operatorskom impedansom, vremenski oblik napona se može jednostavno odrediti formiranjem zamenske šeme sa koncentrisanim elementima po Petersenovom pravilu i odredjivanjem inverzne Laplasove transformacije napona izračunatog u tački A u tako formiranoj šemi.

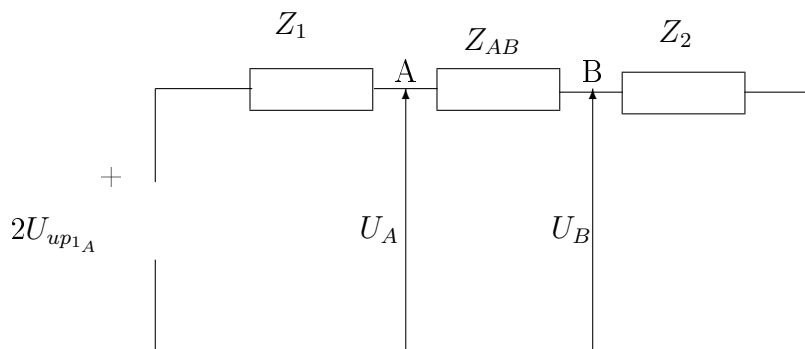
Petersenovo pravilo se može primenjivati i na koncentrisane elemente priključene između dva dovoljno dugačka voda, kao na slici 3.24.

U tom slučaju se primenjuje isto pravilo po kome se vodovi zamenjuju koncentrisanim otpornostima brojno jednakim karakterističnim impedansama. Petersenova šema za



Slika 3.24: Nailazak upadnog talasa na redno vezani koncentrisani element između tačaka A i B u šemi sa raspoređenim parametrima

ovaj slučaj data je na slici 3.25.



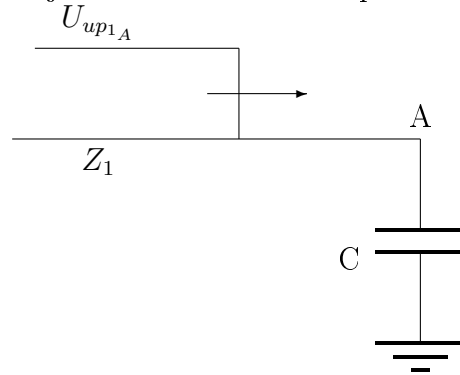
Slika 3.25: Primena Petersenovog pravila na redno vezane koncentrisane elemente

Radi ilustracije će biti prikazana primena Petersenovog pravila na jednostavnim praktičnim primerima.

3.5.1 Kondenzator priključen na kraju voda

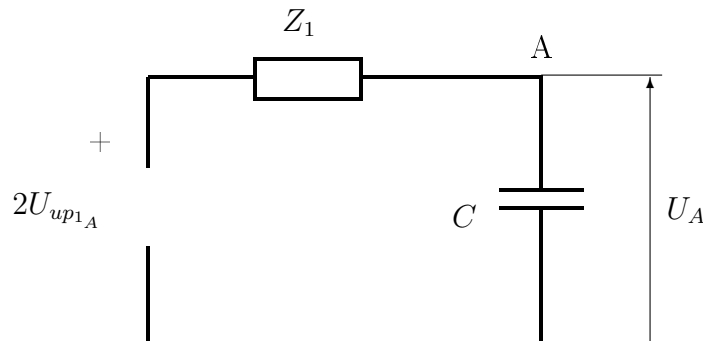
Pri modelovanju brzih elektromagnetskih prelaznih procesa nastalih atmosferskim pražnjenjem u elemente elektroenergetskog sistema energetske i merni transformatori se mogu jednostavno zameniti samo svojim ulaznim kapacitetom namotaja. Tako dobijena zamenska šema je jednostavna, a dovoljno tačna za procene ugroženosti izolacije od atmosferskih prenapona.

Radi ilustracije uticaja ulaznog kapaciteta namotaja transformatora na deformaciju talasa atmosferskog prenapona posmatran je slučaj voda po kome nailazi prenaponski talas pravougaonog čela i beskonačnog trajanja. Na kraju voda je priključen transformator koji se zamenjuje u ekvivalentnoj šemi kondenzatorom prema zemlji, kao na slici 3.26.



Slika 3.26: Nailazak pravougaonog talasa beskonačnog trajanja na kondenzator

Primenom Petersenovog pravila može se formirati zamenska šema sa koncentrisanim parametrima za proračun napona na kondenzatoru kao na slici 3.27.



Slika 3.27: Petersenova šema voda sa kondenzatorom na kraju

Na osnovu šeme sa slike 3.27 može se odrediti napon na kondenzatoru C u zavisnosti od amplitude upadnog prenaponskog talasa. Talasni oblik upadnog napona može se prikazati u vremenskom domenu sledećom funkcijom.

$$u_{up1A}(t) = U_m h(T) \quad (3.157)$$

Laplasova transformacija napona na kondenzatoru ima oblik:

$$U_c(p) = \frac{2U_m}{p(Z_1 C p + 1)} \quad (3.158)$$

gde su:

U_m – amplituda prenaponskog talasa,

Z_1 – karakteristična impedansa voda,

C – ulazna kapacitivnost namotaja transformatora,

p – Laplasov operator,

$h(t)$ – jedinična odskočna funkcija.

Primenom inverzne Laplasove transformacije dobija se vremenska promena napona na kondenzatoru, koja ima sledeći analitički oblik:

$$u_c(t) = 2U_m(1 - e^{-t/T})h(t) \quad (3.159)$$

gde su:

$T = Z_1 C$ – vremenska konstanta kola,

$h(t)$ – jedinična odskočna funkcija koja pokazuje da u bilo kom trenutku $t < 0$ nije bilo napona na kondenzatoru.

Odbijena komponenta napona koja se vraća nazad od tačke A iznosi:

$$u_{od1_A}(t) = u_c(t) - u_{up1_A}(t) \quad (3.160)$$

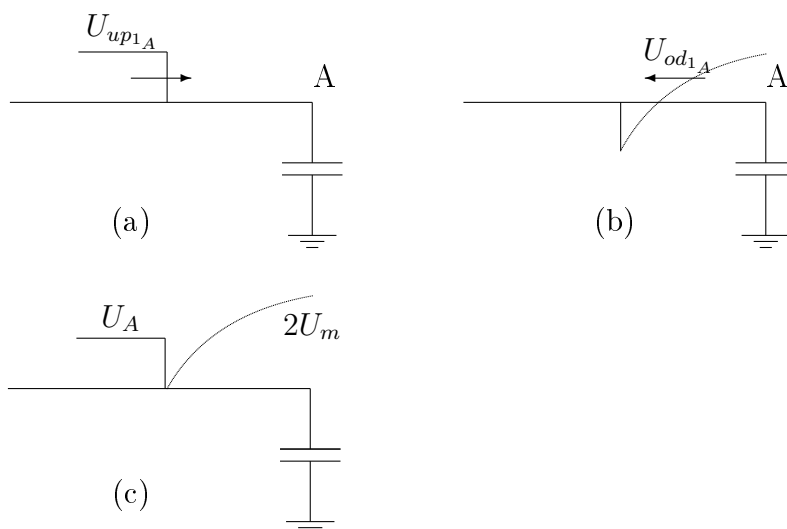
Kada se izračuna odbijena komponenta napona, dobija se:

$$u_{od}(t) = U_m[1 - 2e^{-t/T}]h(t) \quad (3.161)$$

Na slici 3.28 prikazan je vremenski oblik upadnog talasa (a), prostorna raspodela odbijenog talasa (b), kao i prostorna raspodela ukupnog napona (c).

Može se uočiti da kondenzator ima osobinu da smanjuje strminu prenaponskih talasa. U prvom trenutku nakon nailaska čela talasa kondenzator C se ponaša kao mesto kratkog spoja za visokofrekventne harmonike napona na čelu, usled čega je u trenutku nailaska talasa napon na kondenzatoru praktično jednak nuli.

Posle dovoljno dugog vremena prelazni režim na kondenzatoru se završava i talas napona beskonačnog trajanja se ponaša kao izvor jednosmernog napona, za koji kondenzator predstavlja mesto gde je vod otvoren. Zato se posle završetka prelaznog procesa na tom mestu napon udvostručava. Ukoliko bi transformator imao beskonačno veliku ulaznu impedansu ($C \rightarrow 0$), nailazak prenaponskog talasa bi izazvao trenutno udvostručenje napona, što bi bilo znatno opasnije za izolaciju transformatora.

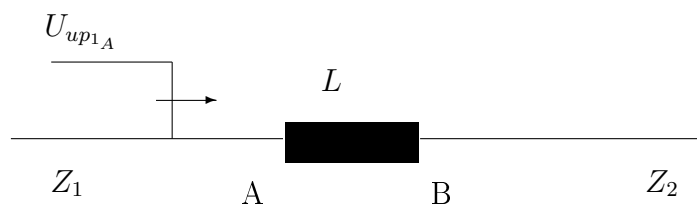


Slika 3.28: (a) Vremenska promena upadnog talasa, (b) Prostorna raspodela odbijenog talasa, (c) Prostorna raspodela ukupnog napona na vodu.

3.5.2 Redna veza induktivnosti

Redna ili otočna induktivnost se vrlo retko koristi u modelovanju mreža pri analizi atmosferskih prenapona. Elementi koji se ponekad zamenjuju rednom induktivnošću su reaktor za ograničenje struje kratkog spoja ili model uzemljivača u udarnom periodu u kome njegova induktivnost ima izuzetno značajnu funkciju.

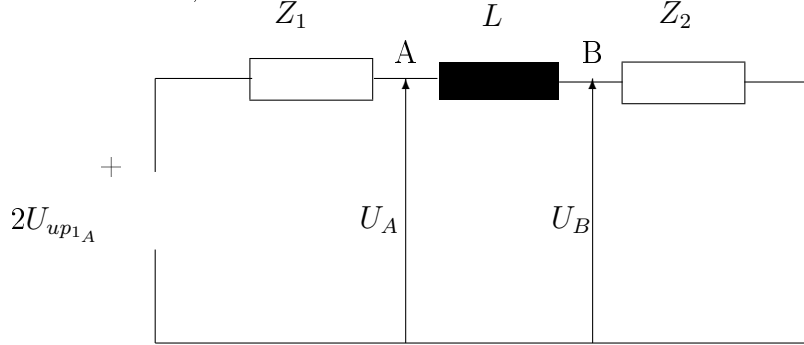
Na slici 3.29 prikazana je redna veza induktivnosti izmedju dva duga voda karakterističnih impedansi Z_1 i Z_2 . Upadni talas se prostire po vodu 1 ka čvoru A.



Slika 3.29: Nailazak prenaponskog talasa na redno vezanu induktivnost

Primenom Petersenovog pravila može se formirati ekvivalentna šema sa koncentrisanim parametrima na osnovu koje se određuje vremenska promena napona ispred i iza

redno vezane induktivnosti, u tačkama A i B .



Slika 3.30: Ekvivalentna Petersenova šema za slučaj redno vezane induktivnosti

Na osnovu zamenske šeme sa slike 3.30 mogu se odrediti Laplasove transformacije napona u tačkama A i B za slučaj talasa pravougaonog čela:

$$U_A(p) = \frac{2U_m}{p} \frac{Lp + Z_2}{Lp + Z_1 + Z_2} \quad (3.162)$$

i

$$U_B(p) = \frac{2U_m}{p} \frac{Z_2}{Lp + Z_1 + Z_2} \quad (3.163)$$

Primenom inverzne Laplasove transformacije dobija se vremenska promena napona u tačkama A i B :

$$u_A(t) = U_m \left[\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} e^{-t/T} \right] h(t) \quad (3.164)$$

i

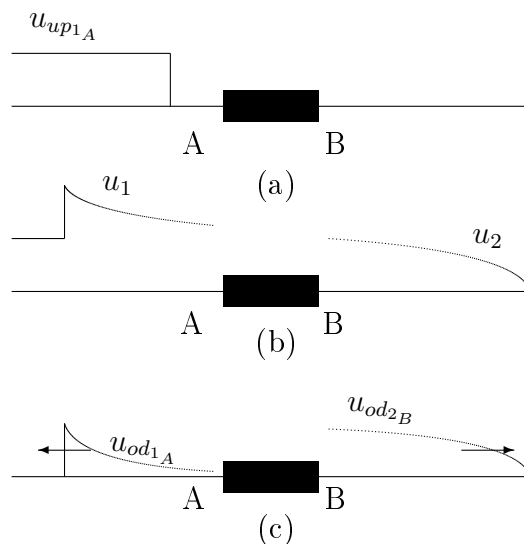
$$u_B(t) = U_m \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 - e^{-t/T}) h(t) \quad (3.165)$$

gde je: $T = L/(Z_1 + Z_2)$ – vremenska konstanta kola. Odbijena komponenta napona od tačke A koja se vraća unazad po vodu 1 je:

$$u_{od1_A} = U_m \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-t/T} \right] h(t) \quad (3.166)$$

Prelomljeni talas koji se prostire od tačke B po vodu 2 jednak je naponu u tački B , jer po vodu 2 nema drugih komponenti napona.

Na slici 3.31 (a) prikazan je upadni talas, na slici (b) prostorna raspodela ukupnog napona ispred i iza induktivnosti posle prelamanja i refleksije, a na slici (c) prostorna raspodela odbijenog napona od tačke A i napona nakon prelamanja u tački B .



Slika 3.31: (a) Prostorna raspodela upadnog napona, (b) prostorna raspodela ukupnog napona na vodu 1 i 2, (c) prostorna raspodela odbijenog napona od tačke A i napona nakon prelamanja u tački B.

Može se uočiti da se u trenutku nailaska talasa na induktivnost napon u tački A povećava do dvostruke vrednosti, da bi se zatim postepeno napon smanjivao do vrednosti koja bi odgovarala slučaju prelamanja talasa sa voda karakteristične impedanse Z_1 na vod karakteristične impedanse Z_2 bez prisustva induktivnosti. Zbog toga je neophodno primenjivati mere zaštite od visokih prenaponskih talasa na elementima koji se odlikuju velikom induktivnošću, a imaju zanemarljivu kapacitivnost.

3.6 Metode proračuna talasnih procesa na vodovima

U ovom poglavlju će biti opisane metode koje omogućavaju posmatranje višestrukih refleksija na idealnim vodovima ili vodovima na kojima je ispunjen Hevisajdov uslov. Metode se mogu primenjivati u grafoanalitičkom obliku za rešavanje jednostavnijih slučajeva talasnih procesa ili u numeričkom obliku kod metoda za procenu ugroženosti izolacije od atmosferskih prenapona korišćenjem računara.

3.6.1 Metoda mrežnog dijagrama

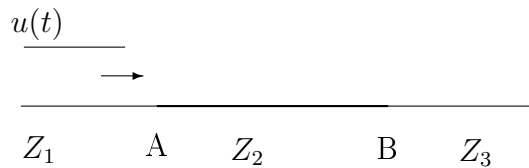
Metodu mrežnog dijagrama razvio je Bewely (Bjuli) [3] pre početka korišćenja računara za proračun talasnih prelaznih režima, omogućivši postupak za jednostavno sistematsko praćenje talasa pri pojavi višestrukih refleksija na vodovima.

Metoda mrežnog dijagrama predstavlja jednostavan analitički postupak za analizu

višestrukih refleksija u linearnim mrežama sastavljenim isključivo od vodova. Metoda će biti objašnjena na nekoliko jednostavnih primera.

Serijska veza tri voda različitih karakterističnih impedansi

Na slici 3.32 prikazana je ekvivalentna šema sistema koji se sastoji iz tri redno vezana voda različitih karakterističnih impedansi. Ovakav slučaj se može sresti u praksi prilikom korišćenja kablovskih vodova za ukrštanje sa određenim preprekama kao što su saobraćajnice ili reke.



Slika 3.32: Redna veza tri voda različitih karakterističnih impedansi

Po prvom vodu nailazi talas koji se može modelovati linearno rastućim čelom i konstantnim začeljem. Ovaj talas izaziva na srednjem vodu višestruke refleksije talasa.

Upadni naponski talas se može modelovati sledećom analitičkom funkcijom:

$$u(t) = a [th(t) - (t - T_c)h(t - T_c)] \quad (3.167)$$

gde su:

a –strmina čela naponskog talasa,

T_c –vreme trajanja čela talasa,

$h(t)$ –jedinična odskočna funkcija.

Koeficijenti prelamanja u tačkama A i B su:

$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}$ –koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 1 nailazi u tačku A ,

$\alpha_{2A} = \frac{2Z_1}{Z_1+Z_2}$ –koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 2 nailazi u tačku A ,

$\alpha_{2B} = \frac{2Z_3}{Z_2+Z_3}$ –koeficijent prelamanja za talas koji po vodu 2 nailazi u tačku B .

Koeficijenti odbijanja za tačke A i B imaju sledeći oblik:

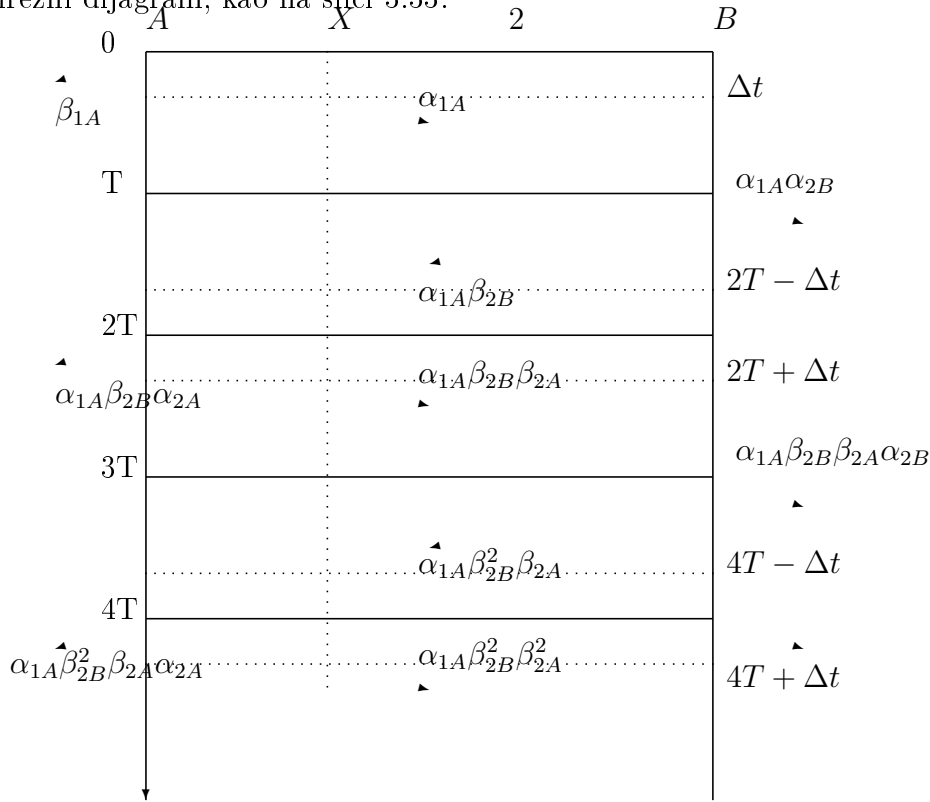
$$\beta_{1A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \text{--koeficijent odbijanja za talas koji po vodu 1 dolazi u tačku } A,$$

$$\beta_{2A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \text{--koeficijent odbijanja za talas koji po vodu 2 dolazi u tačku } A,$$

$$\beta_{2B} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3} \text{--koeficijent odbijanja za talas koji po vodu 2 dolazi u tačku } B.$$

Vreme prostiranja talasa po vodu 2 je $T = d/v$, gde je d dužina voda u m , a v brzina prostiranja u m/s .

Da bi se napisao analitički izraz za napon u bilo kojoj tački na vodu mora se prethodno nacrtati mrežni dijagram, kao na slici 3.33.



Slika 3.33: Mrežni dijagram za tri redno vezana voda

Na apscisnu osu se nanosi rastojanje, a na ordinatnu osu koja je orijentisana naniže, nanosi se vreme izraženo kao multipl vremena prostiranja talasa.

Prenaponski talas koji nailazi po vodu 1 u tačku A prelama se sa koeficijentom α_{1A} , nastavljajući da putuje po vodu 2. Ovaj talas je krenuo iz tačke A u trenutku $t = 0$ i stiže u tačku B u trenutku $t = T$. Kretanje talasa od tačke A do tačke B označeno je pravom postavljenom pod nagibom koji je obrnuto srazmeran brzini prostiranja.

Njegova amplituda je $u(t)\alpha_{1A}$, jer je talas prelomljen u tački A sa koeficijentom α_{1A} .

Prilikom nailaska upadnog talasa u tačku A dolazi i do njegovog odbijanja nazad po vodu 1 sa koeficijentom odbijanja β_{1A} . Posle nailaska talasa koji putuje po vodu 2 do tačke B dolazi do njegovog odbijanja od tačke B sa koeficijentom β_{2B} . Ovaj talas se vraća nazad prema tački A po vodu 2. U tački B dolazi do prelamanja talasa sa koeficijentom α_{2B} . Prelomljeni talas nastavlja da putuje po trećem vodu.

Talas koji se vratio iz tačke B do tačke A u trenutku $t = 2T$ ponovo se odbija sa koeficijentom β_{2A} i vraća nazad prema tački B . Ujedno dolazi i do prelamanja talasa u tački A sa koeficijentom α_{2A} . Ovaj talas putuje nazad po vodu 1.

Iznad svake prave koja označava kretanje talasa ubeležena je vrednost koeficijenta prelamanja i odbijanja kojima treba množiti odgovarajuću vrednost napona za posmatrani trenutak i položaj upadnog naponskog talasa.

Ukupan napon u proizvoljnoj tački X na vodu 2 u bilo kom trenutku t može se dobiti sumiranjem svih komponentnih talasa koji se pojavljuju na mestu X , a koji su pretrpeli različit broj višestrukih refleksija.

Posle sumiranja svih komponentnih napona, vodeći računa o koeficijentima prelamanja i odbijanja sa mrežnog diagrama, može se napisati sledeći analitički izraz za vremensku promenu napona u tački X :

$$\begin{aligned}
 u_X(t) = & \alpha_{1A}u(t - \Delta t)h(t - \Delta t) + \\
 & + \alpha_{1A}\beta_{2B}u[t - (2T - \Delta t)]h[t - (2T - \Delta t)] + \\
 & + \alpha_{1A}\beta_{2B}\beta_{2A}u[t - (2T + \Delta t)]h[t - (2T + \Delta t)] + \\
 & + \alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}u[t - (4T - \Delta t)]h[t - (4T - \Delta t)] + \\
 & + \alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}^2u[t - (4T + \Delta t)]h[t - (4T + \Delta t)] + \dots
 \end{aligned}
 \tag{3.168}$$

U gornjem izrazu $u[t - (2nT - \Delta t)]h[t - (2nT - \Delta t)]$ označava da se talas $u(t)$ pojavljuje prvi put u trenutku $t = 2nT - \Delta t$.

Ako se u izraz 3.168 zameni izraz za upadni talas 3.167 dobija se sledeći izraz za vremensku promenu napona u tački X :

$$\begin{aligned}
u_X(t) = & \alpha_{1A}a(t - \Delta t)h(t - \Delta t) - \\
& -\alpha_{1A}a(t - T_c - \Delta t)h(t - T_c - \Delta t) + \\
& +\alpha_{1A}\beta_{2B}a[t - (2T - \Delta t)]h[t - (2T - \Delta t)] - \\
& -\alpha_{1A}\beta_{2B}a[t - T_c - (2T - \Delta t)]h[t - T_c - (2T - \Delta t)] + \\
& +\alpha_{1A}\beta_{2B}\beta_{2A}a[t - (2T + \Delta t)]h[t - (2T + \Delta t)] - \\
& -\alpha_{1A}\beta_{2B}\beta_{2A}a[t - T_c - (2T + \Delta t)]h[t - T_c - (2T + \Delta t)] + \\
& +\alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}a[t - (4T - \Delta t)]h[t - (4T - \Delta t)] - \\
& -\alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}a[t - T_c - (4T - \Delta t)]h[t - T_c - (4T - \Delta t)] + \\
& +\alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}a[t - (4T + \Delta t)]h[t - (4T + \Delta t)] - \\
& -\alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}a[t - T_c - (4T + \Delta t)]h[t - T_c - (4T + \Delta t)] + \dots
\end{aligned} \tag{3.169}$$

Na osnovu analitičkog izraza 3.169 zamenom odgovarajućih brojnih podataka može se nacrtati vremenski dijagram napona u čvoru X . Radi ilustracije će biti usvojeni sledeći brojni podaci:

- –Strmina talasa $a = 1000kV/\mu s$
- –Vreme linearno rastućeg čela talasa $T_c = 1\mu s$
- –Vreme prostiranja talasa po drugomvodu $T = 4\mu s$
- –Vreme prostiranja od tačke A do tačke X u kojoj se posmatra napon $\Delta T = 1\mu s$
- – karakteristične impedanse vodova $Z_1 = Z_3 = 400\Omega$, $Z_2 = 50\Omega$

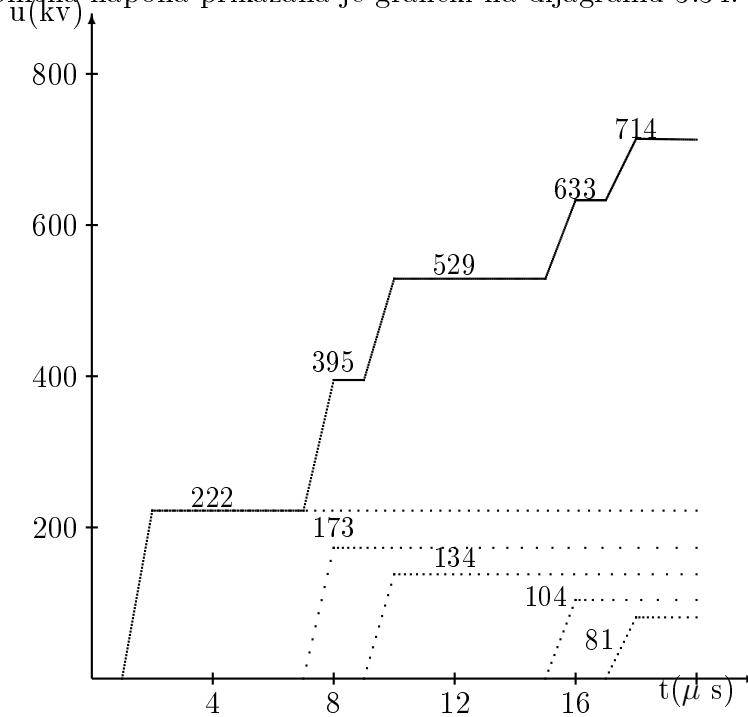
Koeficijenti prelamanja i odbijanja imaju sledeće vrednosti

$$\begin{aligned}
\alpha_{1A} &= 0,2222 \\
\beta_{2B} &= 0,7778 \\
\beta_{2A} &= 0,7778
\end{aligned}$$

Vremenska promena napona dobijena zamenom brojnih vrednosti u izraz 3.169, kada se članovi poredjaju po hronološkom redosledu ima sledeći numerički oblik:

$$\begin{aligned}
u_X(t) = & 222(t-1)h(t-1) - 222(t-2)h(t-2) + \\
& +173(t-7)h(t-7) - 173(t-8)h(t-8) - \\
& +134(t-9)h(t-9) - 134(t-10)h(t-10) + \\
& +104(t-15)h(t-15) - 104(t-16)h(t-16) - \\
& +81(t-17)h(t-17) - 81(t-18)h(t-18) + \dots
\end{aligned}
\tag{3.170}$$

Vremenska promena napona prikazana je grafički na dijagramu 3.34.



Slika 3.34: Vremenska promena napona u čvoru X posle nailaska talasa kosog čela i beskonačnog trajanja na redno vezane vodove

Tačkaste linije na slici 3.34 označavaju pojedine komponente napona, a puna linija predstavlja njihov zbir.

Na identičan način bi se mogla odrediti vremenska promena napona u bilo kojoj tački na vodovima 1, 2 ili 3 usled višestrukih refleksija.

Ako se pretpostavi da talas zadržava konstantnu vrednost na začelju u dužem vremenskom periodu, tada se može proceniti visina napona koja bi nastupila posle velikog broja refleksija. U ovom slučaju se može trajanje čela talasa T_c zanemariti u odnosu na ukupno trajanje talasa, pa se talas može zameniti odskočnom (Hevisajdovom) funkcijom

$u(t) = U_m \cdot h(t)$. U tački X se posle velikog broja refleksija uspostavlja sledeća vrednost napona:

$$\begin{aligned} U_X = & U_m(\alpha_{1A} + \alpha_{1A}\beta_{2B} + \alpha_{1A}\beta_{2B}\beta_{2A} + \alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A} + \\ & + \alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}^2 + \dots + \alpha_{1A}\beta_{2B}^n\beta_{2A}^{n-1} + \alpha_{1A}\beta_{2B}^n\beta_{2A}^n + \dots) \end{aligned} \quad (3.171)$$

Posle pregrupisanja članova se dobija:

$$\begin{aligned} U_X = & U_m\alpha_{1A}(1 + \beta_{2B})(1 + \beta_{2B}\beta_{2A} + \beta_{2B}^2\beta_{2A}^2 \\ & + \dots + \beta_{2B}^{n-1}\beta_{2A}^{n-1} + \beta_{2B}^n\beta_{2A}^n + \dots) \end{aligned} \quad (3.172)$$

Kada se izvrši sumiranje prvih n članova reda, dobija se:

$$U_X(n) = U_m\alpha_{1A}(1 + \beta_{2B})\frac{1 + (\beta_{2A}\beta_{2B})^n}{1 - \beta_{2A}\beta_{2B}} \quad (3.173)$$

Ukoliko broj refleksija $n \rightarrow \infty$ dobija se:

$$U_X(n \rightarrow \infty) = U_m\alpha_{1A}(1 + \beta_{2B})\frac{1}{1 - \beta_{2A}\beta_{2B}} \quad (3.174)$$

Ako se zamene izrazi za koeficijente prelamanja i refleksija u izraz 3.174, dobija se:

$$U_X(n \rightarrow \infty) = \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_3}U_m \quad (3.175)$$

Na osnovu gornje analize se može zaključiti da se na srednjem vodu posle velikog broja refleksija uspostavlja napon kao da se talas prelama direktno sa prvog na treći vod, a da srednji vod uopšte ne postoji. Ovo se može objasniti činjenicom da se posle velikog broja refleksija uspostavlja identičan napon duž celog srednjeg voda, tako da njegova dužina više nema nikakvog uticaja na visinu napona, pa se oba njegova kraja ponašaju kao jedna tačka koja je zajednička za oba voda.

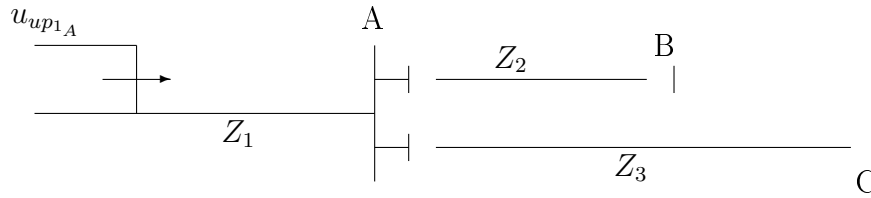
Više vodova sa zajedničkim čvorom

Na slici 3.35 je prikazana ekvivalentna šema sistema koja se sastoji od jednog beskonačno dugog voda karakteristične impedanse Z_1 koji je priključen u tački A za dva kabla različitih dužina d_1 i d_2 koja su na drugim krajevima otvorena.

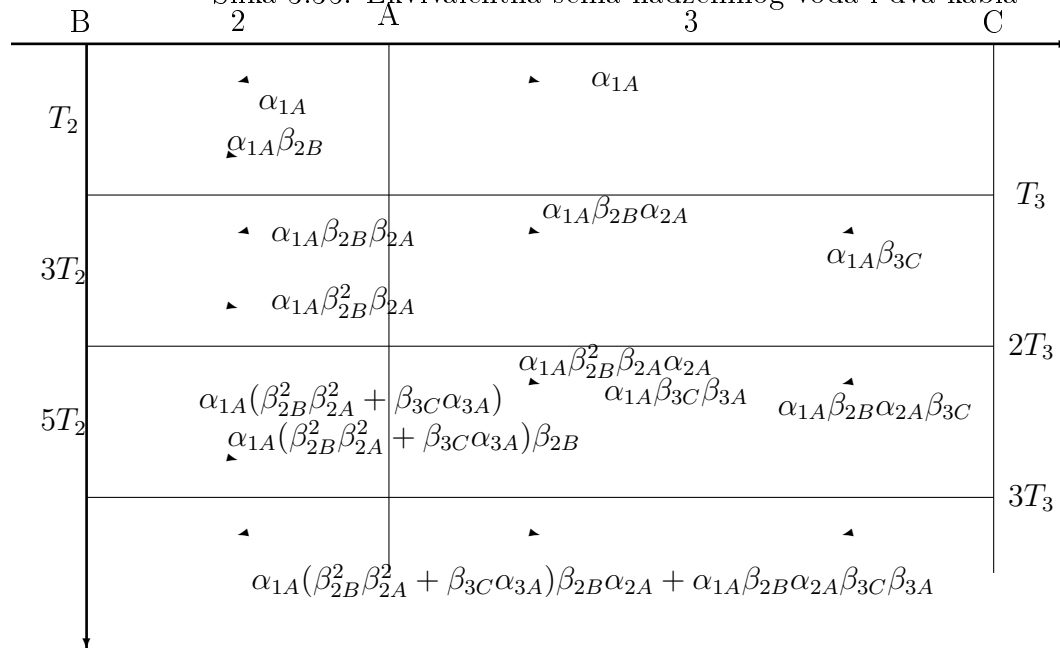
Mrežni dijagram je prikazan na slici 3.36. Radi lakše analize vod 2 nacrtan je levo, a vod 3 desno od zajedničke tačke A .

Napon u bilo kom čvoru se može dobiti sabiranjem svih naponskih talasa u tački u kojoj se određuje napon. Na primer, ako se određuje napon u tački B , tada analitički izraz pomoću koga se napon može izračunati ima oblik dat izrazom 3.176.

Oznake i numeričke vrednosti parametara iz relacije 3.176 imaju sledeće značenje:



Slika 3.35: Ekvivalentna šema nadzemnog voda i dva kabla



Slika 3.36: Mrežni dijagram za slučaj voda i dva kabla

- –Karakteristična impedansa voda 1 je $Z_1 = 390\Omega$,
- –karakteristične impedanse kablova 2 i 3 su $Z_2 = 40\Omega$ i $Z_3 = 40\Omega$,
- –vreme prostiranja duž voda 2 je $T_2 = 2\mu s$,
- –vreme prostiranja duž voda 3 je $T_3 = 4\mu s$,
- –upadni naponski talas koji dolazi po vodu 1 ka čvornoj tački A se radi jednostavnosti zamenjuje talasom pravougaonog čela i beskonačnog trajanja, amplitude $U_m = 1000kV$.

$$\begin{aligned}
u_B(t) = & \alpha_{1A}(1 + \beta_{2B})u(t - T_2)h(t - T_2) + \\
& + \alpha_{1A}\beta_{2B}\beta_{2A}(1 + \beta_{2B})u(t - 3T_2)h(t - 3T_2) + \\
& + \alpha_{1A}\beta_{2B}^2\beta_{2A}^2(1 + \beta_{2B})u(t - 5T_2)h(t - 5T_2) + \\
& + \alpha_{1A}\beta_{3C}\alpha_{3A}(1 + \beta_{2B})u[t - (2T_3 + T_2)]h[t - (2T_3 + T_2)] + \dots
\end{aligned} \tag{3.176}$$

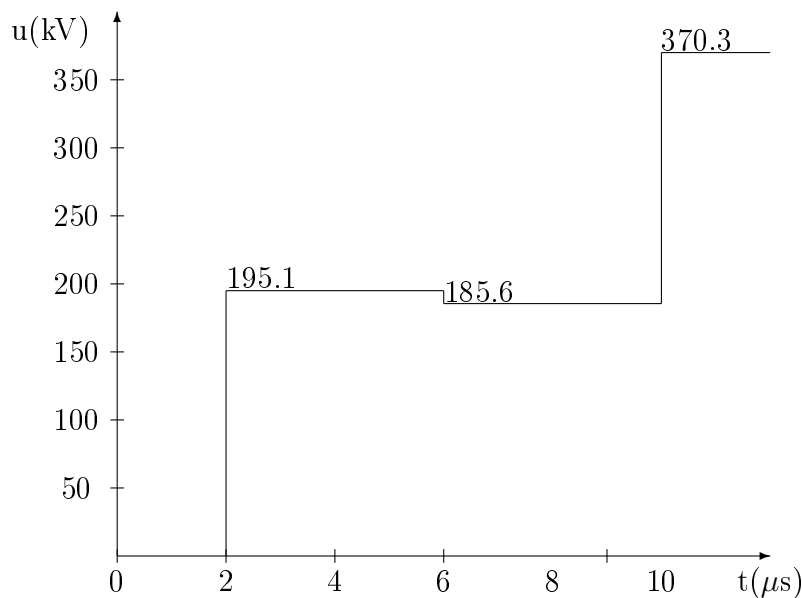
Posle izračunavanja se dobijaju sledeće vrednosti za koeficijente prelamanja i odbijanja:

$$\begin{aligned}
\alpha_{1A} &= 0.0975 \\
\alpha_{2A} &= 0.9512 \\
\alpha_{3A} &= 0.9512 \\
\beta_{2A} &= -0.0487 \\
\beta_{3A} &= -0.0487 \\
\beta_{2B} &= 1 \\
\beta_{3C} &= 1
\end{aligned}$$

Kada se numerički podaci zamene u izraz 3.176, dobija se sledeći brojni izraz:

$$u_B(t) = 195,122h(t - 2) - 9,518h(t - 6) + 184,7h(t - 10) \tag{3.177}$$

Vremenski dijagram kompletnog napona prikazan je na slici 3.37. Višestruke refleksije



Slika 3.37: Vremenski oblik napona u tački B

na kablovima dovode do oscilatornog prelaznog procesa čije su prve oscilacije prikazane

na slici 3.37. U realnom sistemu ne bi bile moguće promene napona koje se odvijaju beskonačnom strminom, već bi se uspostavljao prelazni proces sa konačnim strminama uspostavljanja napona.

3.6.2 Beržeronova grafoanalitička metoda

Beržeronova metoda je našla svoju prvu primenu u rešavanju talasnih procesa u hidraulici, a tek kasnije je počela da se primenjuje u proučavanju talasnih procesa pri brzim elektromagnetskim prelaznim režimima na vodovima. Metoda se može primenjivati u grafičkom i analitičkom obliku. Osnovna prednost Beržeronove grafičke metode u odnosu na sve ostale analitičke i grafoanalitičke metode za rešavanje talasnih procesa je u jednostavnom rešavanju prelaznih procesa u mrežama koje sadrže nelinearne elemente. Ovo je izuzetno važna osobina zbog potrebe rešavanja prelaznih procesa u šemama koje sadrže nelinearne otpornike u odvodnicima prenapona, koji predstavljaju glavno zaštitno sredstvo elemenata visokonaponskih postrojenja od atmosferskih prenapona.

Beržeronova metoda u analitičkom obliku se primenjuje uglavnom u numeričkim programima za proračun prelaznih režima, kao što je poznati program **EMTP**, koji je skraćenica od engleskog naziva **E**lectro**M**agnetic **T**ransient **P**rogram koji je opisan u [24] i [25].

Ukupan napon u bilo kojoj tački voda se može prikazati kao zbir direktnog i inverznog naponskog talasa:

$$u = U_d + U_i \quad (3.178)$$

Ukupna struja sa orijentacijom od početka ka kraju voda može se na isti način opisati pomoću zbira direktnog i inverznog strujnog talasa, koji se mogu izraziti preko naponskih talasa:

$$i = \frac{U_d}{Z_1} - \frac{U_i}{Z_1} \quad (3.179)$$

gde je Z_1 karakteristična impedansa posmatranog voda. Ako se relacija 3.179 pomnoži sa Z_1 i sabere sa relacijom 3.178, dobija se:

$$u + Z_1 i = 2U_d \quad (3.180)$$

Kada se relacija 3.179 pomnoži sa Z_1 i oduzme od relacije 3.178, dobija se:

$$u - Z_1 i = 2U_i \quad (3.181)$$

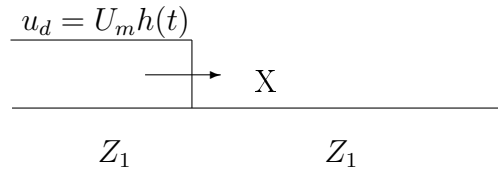
Relacije 3.180 i 3.181 predstavljaju prave linije u koordinatnom sistemu u kome apscisna osa odgovara struji, a ordinatna osa naponu. Relacija 3.180 se naziva **direktnom karakteristikom**, koja predstavlja prostiranje talasa u direktnom smeru (od početka ka kraju voda), a relacija 3.181 se naziva **inverznom karakteristikom** i predstavlja prostiranje talasa u obrnutom smeru.

Direktni i inverzni talasi mogu da imaju različite talasne oblike, ali se najčešće koristi talas pravougaonog čela i konstantnog začelja ili talas linearno rastućeg čela i konstantnog začelja.

Beržeronova metoda će biti objašnjena korak po korak na više jednostavnih primera.

Prostiranje pravougaonog talasa duž idealnog voda

Prostiranje talasa pravougaonog čela i beskonačnog trajanja duž voda karakteristične imedanse Z_1 će biti objašnjeno pomoću Beržeronove metode na primeru. Ekvivalentna šema prikazana je na slici 3.38, gde $h(t)$ predstavlja jediničnu odskočnu funkciju.

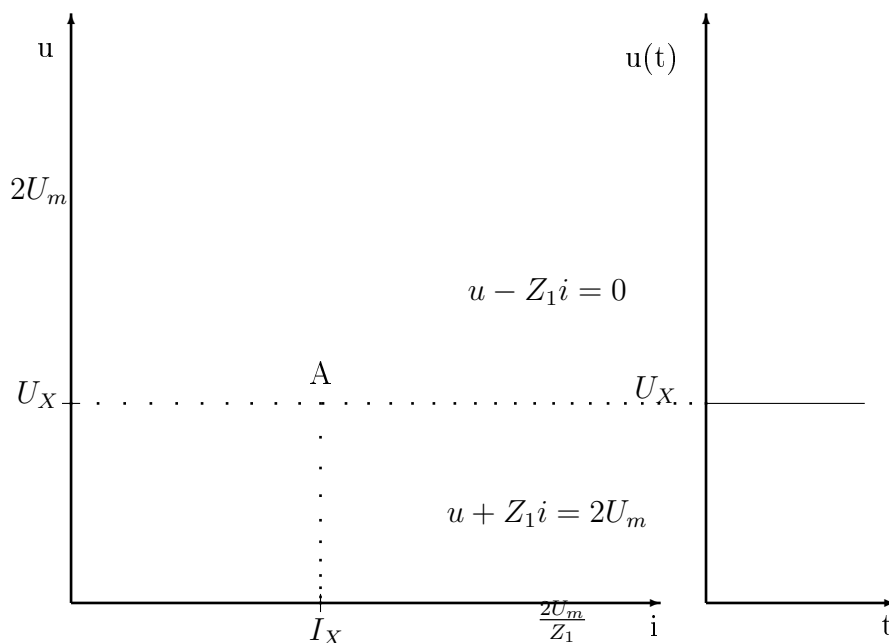


Slika 3.38: Ekvivalentna šema za objašnjenje procesa prostiranja talasa duž idealnog voda

Na slici 3.39 prikazan je Beržeronov dijagram za direktni talas pravougaonog čela čija je amplituda U_m . Pretpostavljeno je da inverznog talasa uopšte nema. Prave linije koje odgovaraju izrazima 3.180 i 3.181 su nacrtane na dijagramu. Amplituda napona U_X i struje I_X u čvoru X mogu se odrediti u preseku pravih definisanih direktnom i inverznom karakteristikom. Vremenski dijagram napona je nacrtan na desnoj strani dijagrama u istoj razmeri kao i Beržeronov dijagram.

Amplituda napona u čvoru X jednaka je amplitudi direktne komponente napona $U_1 = U_m$, a amplituda struje na vodu 1 jednaka je direktnoj komponenti struje $I_1 = \frac{U_m}{Z_1}$ jer su direktna i inverzna karakteristika određene pravama pod uglovima α , odnosno $180^\circ - \alpha$ prema horizontali, koji zavise samo od karakteristične imedanse Z_1 , pa daju upravo gornje parametre režima.

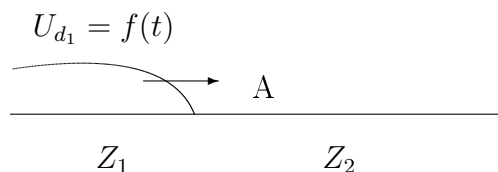
Beržeronov dijagram na slici 3.39 opisuje proces u čvoru X u trenutku nailaska direktnog talasa u čvor X . Usvajamo upravo taj trenutak za referentno vreme $t = 0$. Za bilo koji vremenski trenutak $t > 0$ Beržeronov dijagram ostaje nepromenljiv, samo se sa porastom vremenske koordinate t i tačka posmatranja pojave X pomera brzinom prostiranja talasa v u pravcu od početka ka kraju voda.



Slika 3.39: Beržeronov dijagram za jedan vod

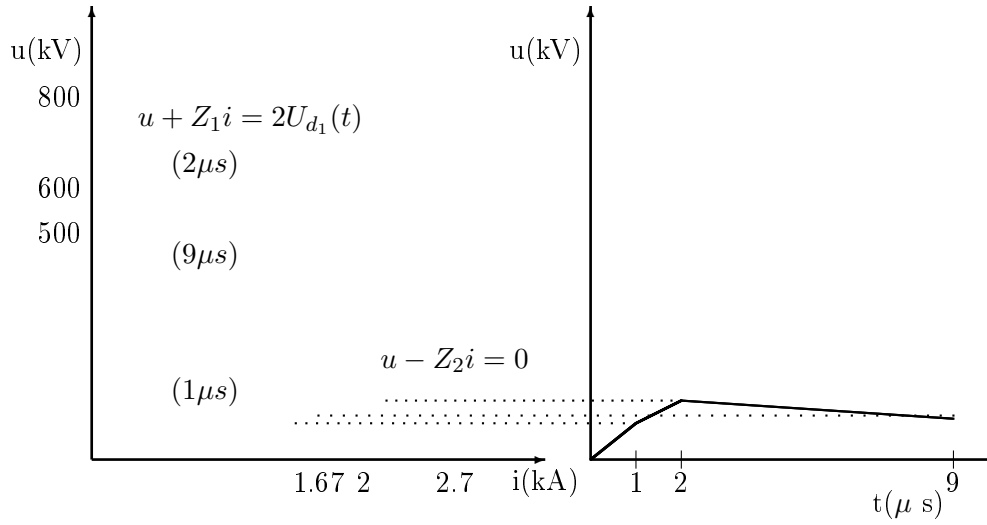
Modelovanje prelamanja talasa u tački nehomogenosti na vodu

Na slici 3.40 je prikazan sistem koji se sastoji od dva beskonačno duga voda karakterističnih impedansi Z_1 i Z_2 koji se sučeljavaju u zajedničkoj tački A . Direktan talas koji nailazi po vodu 1 se modeluje sa više diskretnih tačaka u cilju objašnjenja metode u naj-generalnijem obliku. Po vodu 2 uopšte ne postoji inverzni naponski talas koji bi se kretao ka tački A . Numerički podaci o parametrima sistema su:



Slika 3.40: Ekvivalentna šema za posmatranje prelamanja talasa složenog oblika u tački nehomogenosti

- karakteristična impedansa prvog voda $Z_1 = 300\Omega$,
- karakteristična impedansa drugog voda $Z_2 = 50\Omega$,
- vremenska zavisnost direktnog naponskog talasa koji se prostire po prvom vodu data je u tablici:



Slika 3.41: Beržeronov dijagram za napon u zajedničkoj čvornoj tački pri nailasku direktnog talasa složenog vremenskog oblika

$t_i (\mu s)$	1	2	9
$U_{d1}(t_i) (kV)$	250	400	300

U svakom vremenskom trenutku t_i u Beržeronovom dijagramu se konstruiše nova direktna karakteristika prema izrazu 3.180 koja se dobija zamenom numeričke vrednosti karakteristične impedanse prvog voda, odnosno:

$$u + 300i = 2U_{d1}(t_i) \quad (3.182)$$

gde je t_i posmatrani vremenski momenat.

Režim u zajedničkom čvoru A oba voda se dobija u preseku direktne karakteristike prvog voda date relacijom 3.182 i inverzne karakteristike drugog voda koja se dobija zamenom brojne vrednosti karakteristične impedanse drugog voda u izraz 3.181:

$$u - 50i = 0 \quad (3.183)$$

Inverzni talas povodu 2 je nula, pa je zamenjena ova vrednost u izraz 3.183.

Beržeronov dijagram za posmatrane vremenske trenutke $t_i(\mu s) = 1, 2, 9$ dat je na slici 3.41. Pored svake direktne karakteristike obeležen je i trenutak pojave napona u tački A. Za svaku presečnu tačku direktne karakteristike voda 1 i inverzne karakteristike voda 2, vrednost napona je prenesena tačkastim linijama na vremenski dijagram sa desne strane slike. Na ovaj način se direktno dobija vremenska promena napona iz Beržeronovog dijagrama.

Vremenska promena struje može se dobiti na sličan način prenoseći vrednost struje koja odgovara svakoj tački preseka karakteristika na poseban dijagram za struje. Vremenska promena struje obično nije od velikog interesa za rešavanje praktičnih problema

koordinacije izolacije, osim pri analizi energetskog naprezanja nelinearnih otpornika odvodnika prenapona.

Ukoliko bi u tački A vod 1 bio otvoren, tada bi se smatralo da je karakteristična impedansa drugog voda beskonačno velika, pa bi inverzna karakteristika drugog voda bila data relacijom:

$$i = 0 \quad (3.184)$$

Režimska tačka bi se u tom slučaju dobijala u preseku direktne karakteristike prvog voda i ordinatne ose koja predstavlja inverznu karakteristiku drugog voda. Napon u presečnoj tački bi bio jednak dvostrukoj vrednosti upadnog talasa, a struja je jednaka nuli.

Na sličan način, ako bi prvi vod bio spojen sa zemljom u tački A , inverzna karakteristika drugog voda bi bila data relacijom:

$$u = 0 \quad (3.185)$$

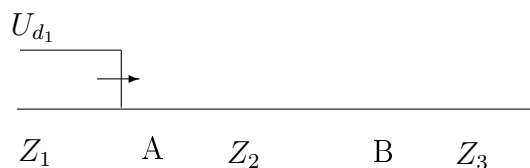
Režim bi se u ovom slučaju dobio u preseku direktne karakteristike prvog voda i apscisne ose. Napon u toj tački je nula, a struja:

$$i = \frac{2U_{d1}(t)}{Z_1} \quad (3.186)$$

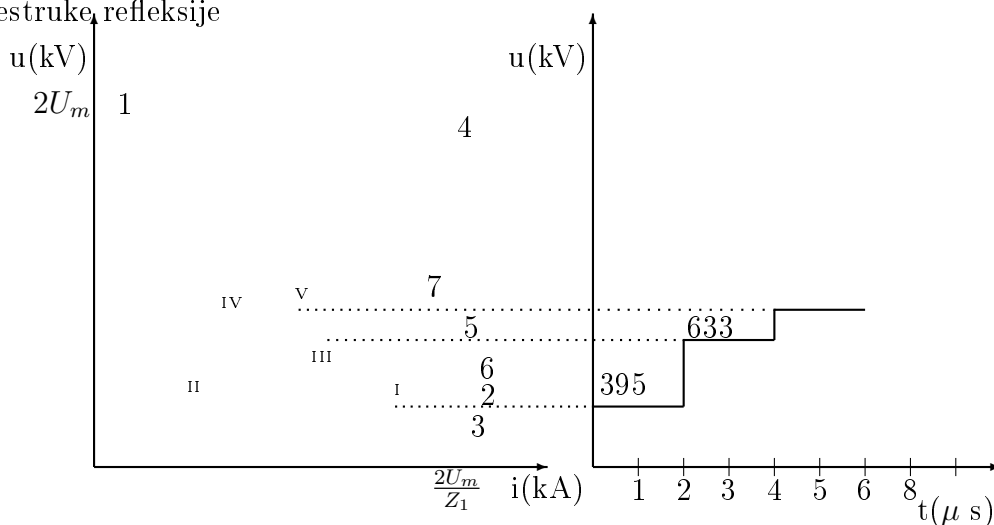
Modelovanje višestrukih refleksija

Najznačajnija primena Beržeronove grafičke metode je pri rešavanju talasnih procesa u složenim mrežama u kojima se događaju višestruke refleksije talasa. Na slici 3.42 prikazana su dva beskonačno duga voda između kojih se nalazi kratak vod različite karakteristične impedanse na kome se događaju višestruke refleksije talasa. Po vodu 1 se prostire direktni talas pravougaonog čela i konstantnog začelja, amplitude U_m , dok na drugim vodovima nema nikakvih naponskih talasa. Postupak će biti objašnjen na primeru, sa sledećim brojnim podacima:

- karakteristična impedansa prvog voda $Z_1 = 300\Omega$,
- karakteristična impedansa drugog voda $Z_2 = 50\Omega$,
- karakteristična impedansa trećeg voda $Z_3 = 300\Omega$,
- vreme prostiranja po drugom vodu $T = 1\mu s$,
- amplituda direktnog talasa po prvom vodu $U_m = 1000kV$.



Slika 3.42: Sistem koji se sastoji od tri voda, sa srednjim vodom na kome se događaju višestruke refleksije



Slika 3.43: Beržeronov dijagram za slučaj višestrukih refleksija

Pretpostavljeno je da u trenutku $t = 0$ direktni talas stiže u čvornu tačku A na početku voda 2. Direktna karakteristika prvog voda u tom trenutku ima oblik:

$$u + Z_1 i = 2U_m \quad (3.187)$$

Izraz 3.187 se može primeniti za bilo koju tačku na vodu 1, uključujući i tačku A , jer je $U_{d_1} = U_m h(t)$.

Inverzna karakteristika drugog voda u trenutku nailaska direktnog talasa po vodu 1 u tačku A ima sledeći oblik:

$$u - Z_2 i = 0 \quad (3.188)$$

Po drugom vodu ne postoji inverzni talas napona, pa je član na desnoj strani izraza 3.188 jednak nuli. Izraz 3.188 se može primeniti za bilo koju tačku na vodu 2, pa i za tačku A koja je zajednička tačka za oba voda. Režim u tački A se može odrediti u preseku direktne karakteristike prvog voda i inverzne karakteristike drugog voda u trenutku $t = 0$, koje su date relacijama 3.187 (prava 1) i 3.188 (prava 2) na slici 3.43. Presek direktne karakteristike prvog voda i inverzne karakteristike drugog voda u trenutku $t = 0$ obeležen je rimskim brojem I . Odgovarajuća vrednost napona se prenosi na vremenski dijagram na desnoj strani crteža.

Posle prelamanja u čvoru A prostire se direktni talas po drugom vodu ka tački B . Direktna karakteristika koja opisuje ovo prostiranje data je relacijom:

$$u + Z_2 i = 2U_{d_2}(t_1) \quad (3.189)$$

$U_{d_2}(t_1)$ je direktan talas koji se prostire posle prelamanja u tački A po drugom vodu. Prava 3 data izrazom 3.189 mora prolaziti kroz presečnu tačku I pošto karakteristika 3.189 važi za sve tačke voda 2, pa i za tačku A . Nepoznata vrednost amplitude direktnog talasa $U_{d_2}(t_1)$ koji se prostire po vodu 2 određuje se postavljanjem prave 3.189 kroz presečnu tačku I . Nagib prave 3.189 određen je karakterističnom impedansom Z_2 drugog voda.

Režim u čvoru B u trenutku $t = T$ nailaska direktnog talasa na kraj voda 2 određuje se u preseku karakteristike 3.189 i inverzne karakteristike trećeg voda date karakteristikom:

$$u - Z_3 i = 0 \quad (3.190)$$

Po trećem vodu ne postoji inverzni naponski talas, pa je član na desnoj strani izraza 3.190 uvek jednak nuli. Režim u čvoru B u trenutku $t = T$ se određuje u preseku karakteristike 3.189 (prava 3) i karakteristike 3.190 (prava 4). Ova režimska tačka obeležena je rimskim brojem II .

Sada se pojavljuje reflektovani talas od tačke B , koji se kao inverzni talas $U_{i_2}(t_2)$ vraća po drugom vodu ka tački A , u koju stiže posle vremena $t = 2T$. Ovaj talas je dat relacijom za inverznu karakteristiku:

$$u - Z_2 i = 2U_{i_2}(t_2) \quad (3.191)$$

Ova prava obeležena brojem 5 je paralelna pravoj 2 koja je data relacijom 3.189, a njen položaj je određen tako da prolazi kroz presečnu tačku II koja definiše režim u čvoru B . Amplituda inverznog talasa $U_{i_2}(t_2)$ nastalog posle refleksije talasa u tački B u trenutku $t_2 = T$ se određuje tako da bude zadovoljen uslov da prava 5 prolazi kroz radnu tačku II , paralelno sa pravom 2.

Režim u čvoru A , koji je zajednički za vodove 1 i 2, određuje se u presečnoj tački III direktne karakteristike prvog voda date relacijom 3.187 (prava 1) koja se ne menja u toku vremena zbog konstantne vrednosti napona i inverzne karakteristike drugog voda 3.191 (prava 5) u trenutku nailaska inverznog napona u tačku A u trenutku $t = 2T$.

U daljoj proceduri se razmatra direktna karakteristika voda 2, koja se postavlja kroz radnu tačku III paralelno pravoj 3 na Beržeronovom dijagramu. Ova karakteristika data je izrazom:

$$u + Z_2 i = 2U_{d_2}(t_3) \quad (3.192)$$

$U_{d_2}(t_3)$ je direktan talas koji nastaje u trenutku $t_3 = 2T$ kada nastupa refleksija od tačke A na početku drugog voda.

Režim u čvoru B može se odrediti u trenutku nailaska direktnog talasa na kraj voda $t = 3T$ u preseku IV direktne karakteristike voda 2 date izrazom 3.192 (prava 6) i inverzne karakteristike 3.190 voda 3, koja je nepromenljiva (prava 4).

Inverzna karakteristika voda 2 koja odgovara odbijenom talasu od čvora B po vodu 2 u trenutku $t_4 = 3T$ postavlja se kroz režimsku tačku IV sa nagibom identičnim kao kod prave 5. Ova karakteristika na dijagramu je obeležena pravom 7, a data je izrazom:

$$u - Z_2 i = 2U_{i_2}(t_4) \quad (3.193)$$

Amplituda inverznog talasa $U_{i_2}(t_3)$ određena je uslovom da ova prava prolazi kroz presečnu tačku IV .

Posle velikog broja višestrukih refleksija, u slučaju konstantnog začelja talasa, režim bi se mogao odrediti u preseku direktne karakteristike prvog voda date relacijom 3.187 (prava 1 na slici 3.43) i inverzne karakteristike voda 3 date izrazom 3.190 (prava 4) na slici 3.43. Kompletana vremenska promena napona u čvoru A prikazana je na vremenskom dijagramu napona na desnoj strani slike uzimajući vrednosti napona iz režimskih tačaka I , III i V . Na potpuno isti način bi se mogla odrediti vremenska promena napona u čvoru B na osnovu režimskih tačaka II i IV , prenoseći vrednost napona na desnu stranu dijagrama. Vremenska promena napona u čvoru B nije prikazana samo zbog preglednosti slike.

Više vodova sa zajedničkim čvorom

U složenim mrežama se ponekad pojavljuje potreba za rešavanjem talasnih procesa u zamenskim šemama u kojima se pojavljuje više vodova koji se susreću u jedan čvor. Pored toga, pojavljuje se potreba i za rešavanjem problema u kojima su elementi otočno vezani prema zemlji u čvornoj tački (odvodnik prenapona postavljen prema zemlji iza koga se nastavlja vod). Na slici 3.44 prikazana je zamenska šema sistema koja se sastoji od tri beskonačno duga voda i jednog voda konačne dužine na kome se događaju višestruke refleksije talasa.

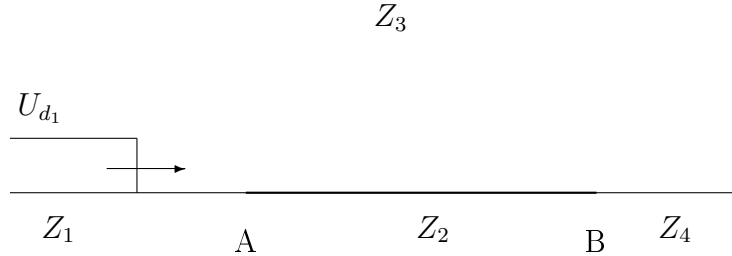
U primeru će biti razmatran talas U_{d_1} pravougaonog čela i konstantnog začelja, koji se prostire po prvom vodu.

Beskonačno dugački vodovi 1 po kome se prostire prenaponski talas i 3 na koji nailazi prenaponski talas se mogu zameniti ekvivalentnim vodom po kome se prostire ekvivalentni talas čija je amplituda:

$$U_{d_{1ekv}} = Z_{ekv} \frac{U_{d_1}}{Z_1} \quad (3.194)$$

Ako se usvoji da su $Z_1 = Z_3$, tada je:

$$U_{d_{1ekv}} = \frac{U_{d_1}}{2} \quad (3.195)$$



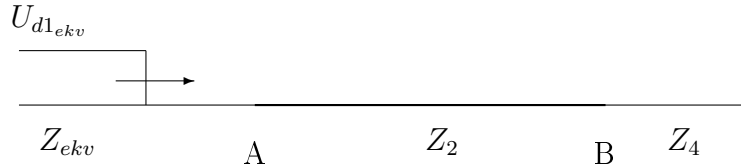
Slika 3.44: Zamenska šema sistema u kome postoji spoj više vodova u jednom čvoru

jer je $Z_{ekv} = Z_1/2$.

Analiza prelaznog režima bi se nastavila postupkom za rešavanje redno vezanih vodova, ali se koristi nova ekvivalentna šema prikazana na slici 3.45. Nova ekvivalentna direktna karakteristika za vod 1 je:

$$u + Z_{ekv}i = 2U_{d1ekv} \quad (3.196)$$

Direktna karakteristika ekvivalentnog voda se može odrediti računskim putem, proraču-



Slika 3.45: Zamenska šema sa ekvivalentnim vodom

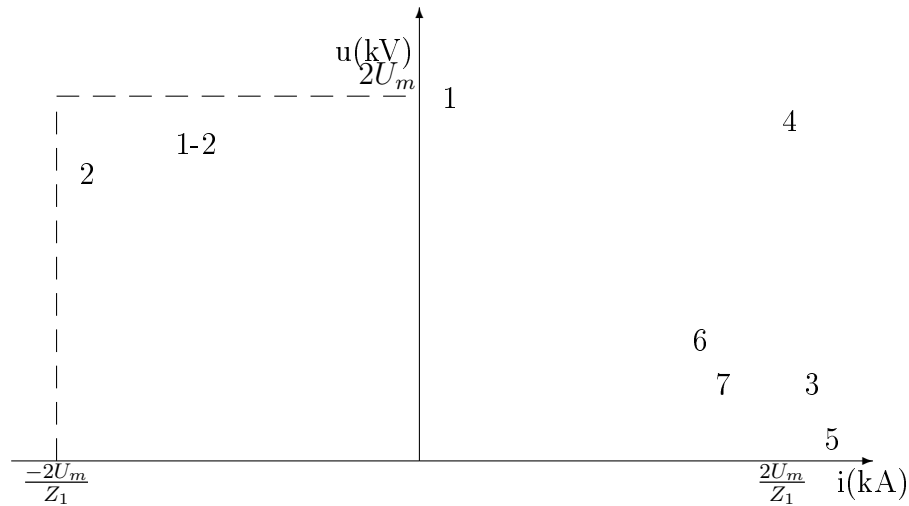
nom ekvivalentne karakteristične impedanse i vrednosti napona ekvivalentnog talasa. Ista karakteristika se može dobiti i grafičkim putem sa Beržeronovog dijagrama. Na slici 3.46 prikazan je Beržeronov dijagram na kome prava 1 predstavlja direktnu karakteristiku prvog voda po kome se prostire talas amplitude U_m . Ova karakteristika data je izrazom:

$$u + Z_1i = 2U_m \quad (3.197)$$

Prava 2 označava direktnu karakteristiku trećeg voda po kome nema talasa koji putuje ka tački A. Ova karakteristika data je izrazom:

$$u + Z_3i = 0 \quad (3.198)$$

Ekvivalentna karakteristika za oba voda označena pravom 1 – 2 dobija se sabiranjem struja za iste vrednosti napona koje odgovaraju karakteristikama 1 i 2. Za dobijanje karakteristike 1 – 2 ekvivalentnog voda dovoljno je odrediti koordinate samo dve tačke sabiranjem struja za odgovarajuće vrednosti napona (na primer sabiranjem struja za napone 0 i $2U_m$).



Slika 3.46: Grafičko određivanje ekvivalentnog talasa

Dalji postupak analize višestrukih refleksija je identičan kao u prethodnom primeru, samo se umesto direktne karakteristike 1 koristi karakteristika ekvivalentnog voda 1 – 2, po kome nailazi ekvivalentni talas.

Nailazak prenaponskog talasa na nelinearni otpornik

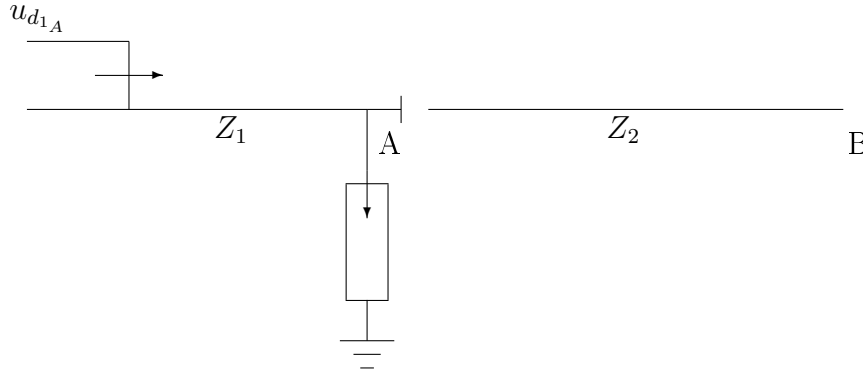
Najvažnija prednost primene Beržeronove grafoanalitičke metode je kod analize procesa u mrežama koje sadrže nelinearne otpornike koji se koriste kod odvodnika prenapona. Kasnije će biti date osnovne karakteristike i način delovanja odvodnika prenapona, dok će na ovom mestu biti objašnjena primena Beržeronove metode u slučaju prisustva nelinearnog otpornika odvodnika prenapona.

Proces će biti ilustrovan na primeru veze dugačkog vazdušnog voda i kratkog kablovskog voda koji se štiti odvodnikom prenapona. Šema veza data je na slici 3.47

Odvodnik prenapona se predstavlja nelinearnom karakteristikom čija je volt–amperska karakteristiika data na slici 3.48. Radi jednostavnijeg modelovanja često se kriva zavisnosti napona u u funkciji struje kroz odvodnik aproksimira linearnim segmentima, kao na slici. Funkcija na slici 3.48 može se u analitičkom obliku izraziti u istom obliku kao inverzna karakteristika voda bez talasa koji se po njemu prostire, odnosno:

$$u - R(i)i = 0 \quad (3.199)$$

gde je $R(i)i = u(i)$ volt-amperska karakteristika odvodnika izražena kao pad napona na nelinearnom otporniku.



Slika 3.47: Zamenska šema sistema sa odvodnikom prenapona

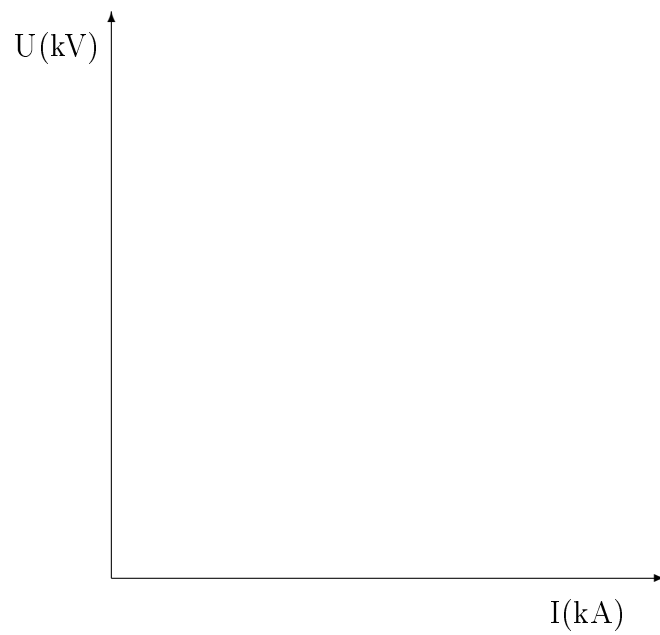
Direktna karakteristika odvodnika prenapona se može na sličan način definisati kao direktna karakteristika voda čija karakteristična impedansa zavisi od struje, a po kome nema talasa koji se prostire:

$$u + R(i)i = 0 \quad (3.200)$$

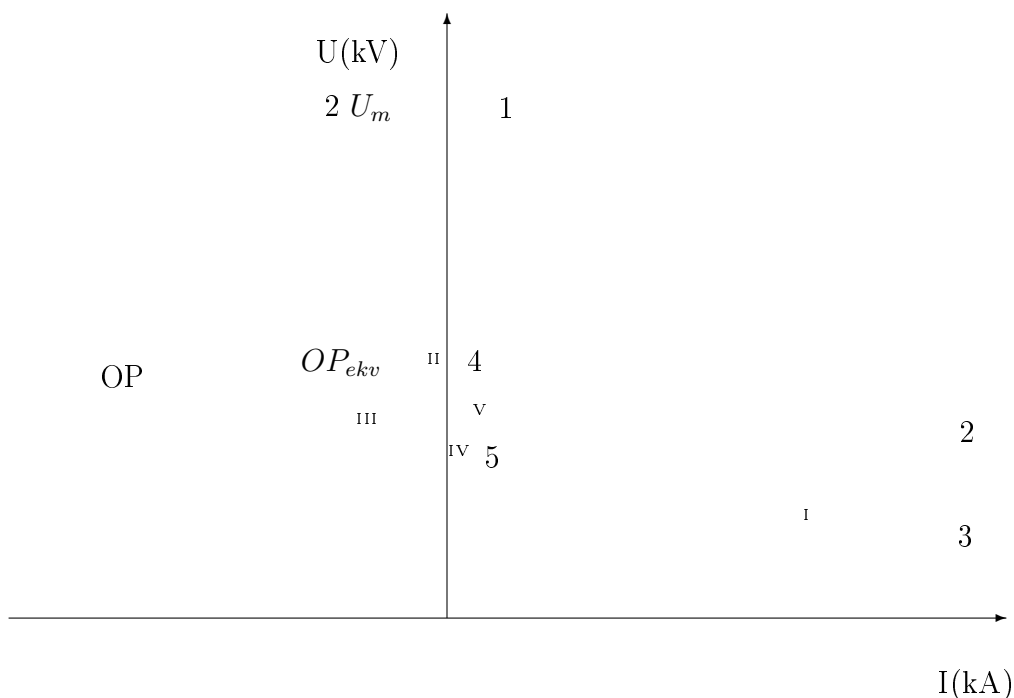
Ova karakteristika se može dobiti simetričnim preslikavanjem karakteristike na slici 3.48 u odnosu na ordinatnu osu kao osu preslikavanja.

Sada se odvodnik prenapona može tretirati kao bilo koji drugi vod koji se opisuje svojom direktnom i inverznom karakteristikom, jedina je razlika što karakteristika odvodnika prenapona za razliku od voda nije prava linija.

Na slici 3.49 prikazan je Beržeronov dijagram za mrežu koja sadrži odvodnik prenapona. U ovom slučaju je direktna karakteristika odvodnika obeležena sa OP i tretira se kao direktna karakteristika bilo kog voda. Odvodnik prenapona se može smatrati da je paralelno vezan vodu 1 po kome nailazi napon, pa se ova dva elementa mogu zameniti ekvivalentnom karakteristikom dobijenom sabiranjem struja za iste vrednosti napona za direktnu karakteristiku voda 1 datu pravom 1 i direktnu karakteristiku odvodnika OP . Na ovaj način je formirana ekvivalentna karakteristika OP_{ekv} . Analiza višestrukih refleksija se vrši na potpuno identičan način kao i u prethodnim primerima, jedino što ulogu karakteristike 1 sada preuzima karakteristika OP_{ekv} . Režim u tački A na mestu priključenja odvodnika u trenutku $t = 0$ nailaska talasa se dobija u preseku direktne ekvivalentne karakteristike OP_{ekv} i inverzne karakteristike drugog voda date pravom 2, u tački I . Kroz radnu tačku I se postavlja direktna karakteristika voda 2 data pravom 3. Režim na otvorenom kraju voda u trenutku $t = T$ se dobija u preseku prave 3 sa ordinatnom osom (radna tačka II). Zatim se kroz tu tačku postavlja prava 4 koja predstavlja inverznu karakteristiku voda 2 posle pojave reflektovanog talasa. U preseku prave 4 sa ekvivalentnom karakteristikom se dobija režim u tački A u trenutku $t = 2T$ (radna tačka III). Praćenje višestrukih refleksija se može na isti način nastaviti dalje. Posle velikog broja refleksija se režim ustaljuje u preseku ekvivalentne karakteristike OP_{ekv} i ordinatne ose. Kada ne bi bilo odvodnika, režim bi se ustalio posle većeg broja refleksija u preseku direktne karakteristike prvog voda date pravom 1 i ordinatne ose, što bi izazvalo znatno više prenapone



Slika 3.48: Volt-amperska karakteristika nelinearnog otpornika odvodnika prenapona na kraju voda.



Slika 3.49: Beržeronov dijagram za mrežu koja sadrži odvodnik prenapona

3.7 Numeričke metode

Numerički proračun prelaznih procesa korišćenjem digitalnih računara je nastao u sedmoj dekadi prošlog veka, sa početkom šire primene kompjutera za rešavanje različitih tehničkih problema. Zbog skromnih resursa tadašnjih računarskih sistema, moralo se voditi računa o računarskom vremenu i memorijskom kapacitetu, što je danas daleko manji problem. Pre toga su korišćeni fizički modeli (mikro-mreže) koji su sastojali od sprege kalemova i kondenzatora za modelovanje vodova, malih transformatora koji su modelovali stvarne transformatore, kao i generatora koji su mogli da budu skalirani modeli realnih generatora. Ponekad su se neke komponente zamenjivali elektronskim kolima, što se nazivalo analognim računarima. Znatno pre toga, razvijane su metode analitičkog rešavanja diferencijalnih jednačina koje opisuju prelazne pojave i njihovog ručnog izračunavanja.

Od početka upotrebe računara za simulacije prelaznih procesa u elektroenergetskim sistemim, razvijeno je više numeričkih metoda za proračun prelaznih procesa na vodovima, koje se svode na vrlo slične principe. Na ovom mestu je opisana jedna od metoda koja se veoma često primenjuje.

3.7.1 Diskretna metoda

Diskretna metoda bazirana na metodi putujućih talasa predstavlja efikasan način obavljanja numeričkog proračuna prelaznih procesa u mrežama sa raspodeljenim parametrima. Ukoliko se radi o idealnim vodovima po kojima se prostiranje talasa vrši bez prigušenja i izobličenja, tada se ceo proračun svodi na tri operacije definisane odgovarajućim relacijama.

Prva operacija opisuje prostiranje talasa, što je prikazano na slici 3.50.



Slika 3.50: Prostiranje talasa po vodu

Prostiranje talasa po idealnom vodu može se predstaviti sledećim relacijama za vremenski trenutak t :

$$\begin{aligned} U_{up}(Y, j) &= U_{od}(X, j, t - \Delta t_j) & \text{za } t > \Delta t_j \\ U_{up}(Y, j) &= 0 & \text{za } t \leq \Delta t_j \end{aligned} \quad (3.201)$$

$$Y = A, B, \dots, Z$$

$$X = A, B, \dots, Z$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$X \neq Y$$

gde su:

X i Y čvorovi na krajevima grane j po kojoj se prostire talas, relacija važi za sve čvorove koji su spojeni granama,

j grane mreže, zajednička za čvorove X i Y ,

$U_{up}(Y, j)$ - upadni naponski talas koji se prostire po vodu j ka tački Y u tekućem vremenskom trenutku t ,

$U_{od}(X, j, t - \Delta t_j)$ - odbijeni naponski talas koji je krenuo iz tačke X po vodu j u trenutku $t - \Delta t_j$,

Δt_j -vreme prostiranja između tačaka X i Y po vodu j .

Mora se naglasiti da je upadna komponenta napona definisana vodom po kome se prostire i čvorom ka kome se prostire talas, a vremenski trenutak se podrazumeva. Za razliku od upadne komponente napona, odbijena komponenta napona mora da budu memorisana u posmatranom vremenskom trenutku, da bi mogle da se iskoriste u narednim koracima nakon isteka vremena Δt_j .

$$\Delta t_j = \frac{d_j}{v} \quad (3.202)$$

d_j –rastojanje između tačaka X i Y ,

v –brzina prostiranja koja je za vazdušne vodove bliska brzini svetlosti, a za kablovske vodove ima manju vrednost,

Z –ukupan broj čvorova u mreži,

n –ukupan broj grana u mreži.

Izraz 3.201 naziva se **relacijom prostiranja talasa**. Pretpostavlja se da poremećaj nastaje posle trenutka $t = 0$, a da su pre toga svi naponi u sistemu bili jednaki nuli. Praktično se ovakav prilaz može koristiti kod analize atmosferskih prenapona u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama u kojima radni napon u trenutku pražnjenja nema bitnu ulogu.

Ukoliko se uvažava trenutna vrednost radnog napona koja postoji na provodnicima voda nezavisno od atmosferskog pražnjenja, tada se izraz 3.201 može modifikovati na sledeći način:

$$\begin{aligned} U_{up}(Y, j) &= U_{od}(X, j, t - \Delta t_j) & \text{za } t \geq \Delta t_j \\ U_{up}(Y, j) &= U_{rad} & \text{za } t < \Delta t_j \end{aligned} \quad (3.203)$$

$$Y = A, B, \dots, Z$$

$$X = A, B, \dots, Z$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$X \neq Y$$

gde je U_{rad} trenutna vrednost faznog radnog napona u trenutku posmatranja pojave.

Na osnovu izraza 3.201 ili 3.203 izračunavaju se upadne komponente napona po svim vodovima osim po kanalu groma, na kome se upadna komponenta zadaje nezavisno:

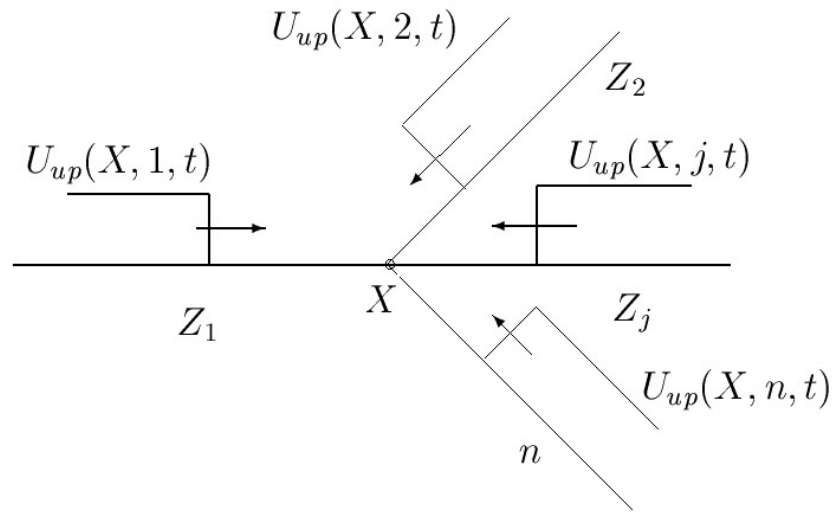
$$U_{up}(X, g) = F(t) \quad (3.204)$$

gde su:

g – grana koja odgovara kanalu groma,

$F(t)$ – vremenska promena upadne komponente napona po kanalu groma.

Na slici 3.51 prikazana je čvorna tačka u kojoj se susstiće više vodova. Na slici 3.51 je pretpostavljen najopštiji slučaj kada po svim vodovima koji su priključeni u čvornu tačku nailaze upadne komponente talasa.



Slika 3.51: Prelamanje talasa u čvornoj tački X

Ukoliko bi samo po vodu j dolazila upadna komponenta napona, tada bi napon u čvornoj tački X bio:

$$U(X, t) = \alpha(X, j)U_{up}(X, j) \quad (3.205)$$

$$X = A, B, \dots, Z$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

gde je $\alpha(X, j)$ koeficijent prelamanja za talas koji po vodu j dolazi u tačku X . Koeficijent prelamanja se izračunava na sledeći način:

$$\alpha(X, j) = \frac{2Z_{eqj}}{Z_{eqj} + Z_j} \quad (3.206)$$

gde su:

$$Z_{eqj} = \frac{1}{\sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{1}{Z_i}} \quad (3.207)$$

Z_j –karakteristična impedansa voda $j = 1, 2, \dots, n$ po kome nailazi talas u čvornu tačku $X = A, B, \dots, Z$

Z_{eq_j} –ekvivalentna karakteristična impedansa svih vodova koji se susište u čvornoj tački X osim voda j po kome posmatramo nailazak talasa.

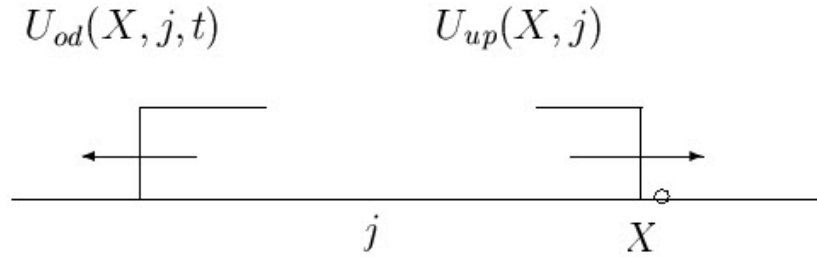
Ako po svim vodovima postoje upadne komponente napona, tada se ukupan napon u čvornoj tački X može dobiti superpozicijom pojedinih upadnih talasa:

$$U(X, t) = \sum_{j=1}^n \alpha(X, j) U_{up}(X, j) \quad (3.208)$$

$$\begin{aligned} X &= A, B, \dots, Z \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Izraz 3.208 naziva se **relacijom prelamanja talasa**.

U čvornoj tački X događa se i odbijanja talasa, kao na slici 3.51.



Slika 3.52: Odbijanje talasa

Odbijeni talas iz čvorne tačke X može se izračunati iz sledeće relacije za j -tu granu:

$$U_{od}(X, j, t) = U(X, t) - U_{up}(X, j) \quad (3.209)$$

$$\begin{aligned} X &= A, B, \dots, Z \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Gornja relacija se naziva **relacijom odbijanja talasa**.

3.7.2 Optimizacija diskretne metode

Prilikom pisanja relacija prostiranja, prelamanja i odbijanja datih izrazima 3.201, 3.208 i 3.209, nije vođeno računa o tome da nisu svi vodovi i čvorovi međusobno spojeni. Da bi se pri proračunu uzela u obzir složena konfiguracija, uvodi se pojam matrice incidencija za vodove.

Matrica incidencije za vodove se definiše na isti način kao matrica incidencije nezavisnih čvorova kod mreža sa koncentrisanim parametrima. Jedina razlika je u tome što kod matrice incidencije vodova orijentacija grana nije bitna.

Kolone matrice incidencije vodova odgovaraju pojedinim granama, a vrste čvorovima. Element matrice incidencije ima vrednost 1 ako je vod koji odgovara posmatranoj koloni spojen sa čvorom koji odgovara posmatranoj vrsti, inače je nula, odnosno:

$$a(X, j) = \begin{cases} 1 & \text{za čvor } X \text{ spojen sa vodom } j \\ 0 & \text{ako čvor } X \text{ nije spojen sa vodom } j \end{cases} \quad (3.210)$$

$$\begin{aligned} X &= A, B, \dots, Z \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.211)$$

Kada se vrši numerički proračun prelaznog procesa diskretnom metodom, potrebno je prilagoditi tri osnovne relacije koje se koriste u proračunu tako da se optimizuje korišćenje memorije i smanjuje broj operacija.

Proračun se vrši u diskretnim vremenskim trenutcima. Umesto da se napon daje u funkciji vremena, daje se kao funkcija celobrojne promenljive koja predstavlja redni broj koraka, koji je obeležen sa:

$$n_t = \frac{t_n}{h} \quad (3.212)$$

gde su:

t_n – posmatrani n -ti korak proračuna izražen u sekundama,

h – elementarni korak proračuna izražen u sekundama.

Elementarni korak treba tako izabrati da vreme prostiranja po vodovima može da se izrazi kao celi broj elementarnih koraka proračuna, a ako to nije moguće, tada treba

voditi računa da greška pri zaokruživanju vremena prostiranja po pojedinim vodovima ne bude suviše velika.

Vreme prostiranja duž i -tog voda dužine d_i izraženo u broju elementarnih koraka je:

$$\Delta n_i = CINT\left[\frac{d_i}{vh}\right] \quad (3.213)$$

gde su:

$CINT(x)$ – funkcija koja zaokružuje neki broj x na najbliži ceo broj,

v – brzina prostiranja talasa izražena u m/s,

d_i – dužina i -tog voda u m.

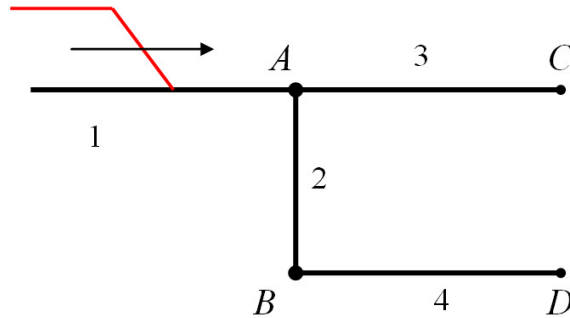
Izborom manjeg koraka proračuna smanjuje se greška u zaokruživanju vremena prostiranja po pojedinim vodovima. Izborom suviše kratkog elementarnog koraka se povećava ukupan broj koraka za posmatrani vremenski interval prelaznog procesa od interesa, što može nepotrebno da produži trajanje ukupnog proračuna, kao i da izazove pojavu numeričke greške usled velikog broja aritmetičkih operacija.

Ako se posmatraju osnovne relacije diskretne metode, može se uočiti da su pojedine veličine indeksirane po rednom broju čvora, po rednom broju voda, kao i u zavisnosti od vremena. Da bi se izvršila praktična realizacija programa za proračun prelaznog procesa, mora se izvršiti optimizacija postupka indeksiranja promenljivih.

U električnoj mreži nisu svi čvorovi spojeni sa svim vodovima. Stoga je pogodno eliminisati sve one elemente koji realno ne postoje, a koji se pojavljuju u izrazima za proračun prelaznog režima. Na taj način se može znatno smanjiti broj promenljivih, što dovodi do smanjenja zauzeća memorije i ubrzanja proračuna. Za optimizaciju korišćenja memorije i eliminaciju elemenata matrica koji realno ne postoje, koristi se tehnika slabo popunjenih matrica. Umesto matrica se koriste jednodimenzionalni vektori čiji su elementi nenulti elementi matrica, kao i pomoćni vektori za definisanje adresa tih elemenata. U našem slučaju adrese su kolone koje odgovaraju čvorovima mreže i vrste koje odgovaraju granama mreže.

Jedan od načina formiranja komprimovane matrice elemenata prikazan je u daljem tekstu. U tu svrhu se formira matrica incidencije sa prebrojanim elementima, koja se dobija iz matrice incidencije vodova na taj način što se svakom nenultom elementu matrice incidencije daje vrednost koja je jednaka rednom broju posmatranog nenultog elementa, s tim što se brojanje vrši po vrstama sa leva na desno.

Na primer, za jednostavnu mrežu sa slike 3.53, matrica incidencije za vodove imala bi sledeći oblik:



Slika 3.53: Primer jednostavne mreže

$$[A_i] = \begin{array}{c|cccc} X/j & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline A & 1 & 1 & 1 & 0 \\ B & 0 & 1 & 0 & 1 \\ C & 0 & 0 & 1 & 0 \\ D & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Dobijena matrica će biti obeležena sa $[A_i]$. X označava čvorove, a j grane. Grane se daju po kolonama, a čvorovi po vrstama.

Prebrojana matrica incidencije dobija se brojanjem nenultih elemenata matrice incidencija sa leva na desno po vrstama i ima sledeći oblik:

$$[A_p] = \begin{array}{c|cccc} X/j & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline A & 1 & 2 & 3 & 0 \\ B & 0 & 4 & 0 & 5 \\ C & 0 & 0 & 6 & 0 \\ D & 0 & 0 & 0 & 7 \end{array}$$

Ova matrica će biti obeležena sa $[A_p]$. Nenulti elementi matrice $[A_p]$ nazivaju se indeksi prebrojavanja. Svaki element matrice $[A_p]$ nosi informaciju o grani, odnosno čvoru koji reprezentuje. Na primer indeks 4 reprezentuje granu 2, odnosno čvor B , jer se upravo u preseku kolone definisane granom 2 i vrste definisane čvorom B ovaj elemenat nalazi. Indeksi prebrajanja se obeležavaju kao i_p .

Na osnovu matrice incidencije sa prebrojanim elementima može se formirati vektor čvorova. Elementi ovoga vektora su redni brojevi čvorova, a indeksirani su po indeksima prebrojavanja. Za gornju mrežu vektor čvorova ima sledeći oblik:

$$[N_c] = \begin{matrix} & i_p & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{bmatrix} A & A & A & B & B & C & D \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Na sličan način se može formirati vektor grana indeksiran po prebrojanim indeksima:

$$[N_g] = \begin{matrix} & i_p & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 4 & 3 & 4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Broj prebrojanih indeksa N_{pr} označava ukupan broj čvorova i vodova koji su incidentni. Svaka grana je incidentna sa 2 čvora osim posebnog slučaja kada je u pitanju model beskonačno dugačkog voda, koji je incidentan sa jednim čvorom.

Sada se vektori upadnih komponenti napona i koeficijenata prelamanja mogu memorisati po prebrojanom indeksu. Na primer umesto elementa $\alpha(B, 2)$ dovoljno je napisati $\alpha(4)$ po indeksu prebrojavanja. Na sličan način element matrice upadnih napona $U_{up}(B, 2)$ postaje elemenat vektora upadnih napona $U_{up}(4)$, što zajedno sa vektorima $[N_c]$ i $[N_g]$ daje punu informaciju o elementu vektora U_{up} .

Umesto korišćenja matrica sa elementima $\alpha(X, j)$ i $U_{up}(X, j)$ koriste vektori sa prebrojanim elementima $\alpha(i_p)$ i $U_{up}(i_p)$, uz pomoć elemenata vektora čvorova sa prebrojanim elementima $X = N_c(i_p)$ i elemenata vektora grana sa prebrojanim elementima $j = N_g(i_p)$.

Po diskretnoj metodi se koriste 3 vektora napona:

- Trenutna vrednost napona u čvorovima mreže data je vektorom $[U(X)]$, koja se u svakom koraku izračunava iz izraza 3.208 na strani 109. Naponi koji su od interesa se zapisuju u fajl sa izlaznim rezultatima.
- Upadne komponente napona $U_{up}(X, j)$ koje su definisane sa dva indeksa se pretvaraju u upadne komponente po prebrojanim indeksima $U_{up}(i_p)$, čime se eliminišu elementi matrice $U_{up}(X, j)$ za čvorove X koji nisu incidentni sa granama j . Na taj način se značajno umanjuje broj upadnih komponenti napona.
- Odbijene komponente napona $U_{od}(X, j, t)$ koje su definisane sa tri indeksa pretvaraju se u matricu indeksiranu sa dva indeksa, prebrojani indeks incidencija čvorova i vodova i_p i indeks rednog broja koraka n_t , odnosno $U_{od}(i_p, n_t)$

Odbijene komponente napona se moraju pamtiti u onoliko koraka, koliko je vreme prostiranja izraženo u elementarnim koracima proračuna po posmatranom vodu. Po izrazu 3.201 na strani 106, upadna komponenta napona se izračunava na osnovu odbijene komponente napona koja je krenula iz susednog čvora po istom vodu, ali u koraku koji je Δn_j koraka pre tekućeg koraka n_t , gde je Δn_j broj koraka prostiranja po vodu j .

Uvode se prebrojani indeksi koji odgovaraju različitim čvorovima koji pripadaju istom vodu. Obeležimo tako uvedene prebrojane indekse i_p i i_q . Sada se može napisati ponovo relacije prostiranja, preko prebrojanih indeksa u skraćenoj formi, prema 3.203.

$$\begin{aligned} U_{up}(i_p) &= U_{od}(i_q, n_t - \Delta n_t) \text{ za } n_t - \Delta n_t > 0 \\ U_{up}(i_p) &= U_{rad} \text{ za } n_t - \Delta n_t \leq 0 \\ i_p &= 1, 2, \dots, N_{pr} \end{aligned} \quad (3.214)$$

gde je:

U_{rad} -trenutna vrednost radnog napona u trenutku udara groma kod proračuna atmosferskih prenapona. Za nazivne napone sistema ispod 400 kV radni napon se zanemaruje. U slučaju sklopnih prenapona primenjuje se poseban postupak određivanja početnih uslova.

Δn_j - celobrojna promenljiva koja označava broj koraka potrebnih da talas pređe dužinu d_j voda j .

n_t - redni broj vremenskog koraka proračuna za određeni vod j koji je celobrojna promenljiva. Ova veličina se od inicijalne vrednosti $n_t = 1$ povećava za 1 u svakom koraku dok ne dostigne vrednost $n_t = \Delta n_j + 1$ za vod j , a zatim se izvršava operacija dodeljivanja početne vrednosti, odnosno $n_j = 1$. To znači da se brojanje koraka proračuna vrši posebno za svaki vod.

Vrednosti indeksa prebrajanja i_p i i_q određuju se za vod j tako da odgovaraju indeksima prebrajanja za čvorove X i Y prema izrazu 3.203.

Jednačina prelamanja koja je bila data izrazom 3.208 ima sledeći oblik pri primeni prebrojanih indeksa:

$$U(X) = \sum_{i_p=1}^{N_{pr}} \alpha(i_p) \cdot U_{up}(i_p) \text{ za } X = A, B, \dots, N_c \quad (3.215)$$

U izrazu 3.215 oznaka N_{pr} označava ukupan broj prebrojanih indeksa u mreži.

Jednačina odbijanja koja je bila data izrazom 3.209 ima sledeći oblik pri primeni prebrojanih indeksa:

$$U_{od}(i_p, n_t) = U(X) - U_{up}(i_p) \quad (3.216)$$

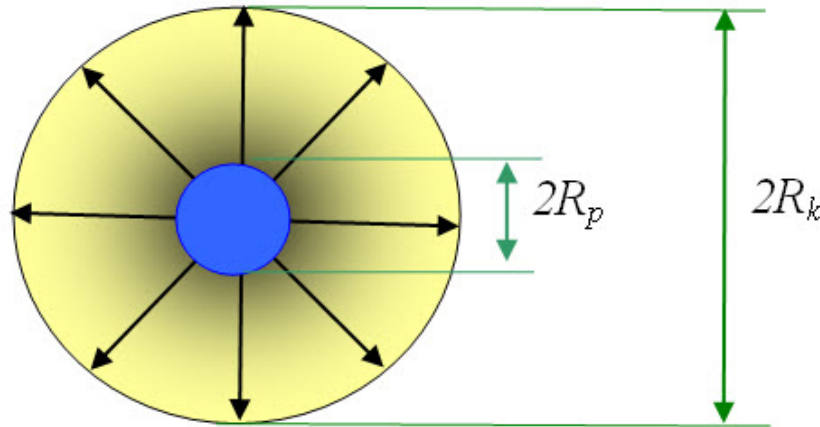
U slučaju ako je $n_t - \Delta n_j = \Delta n_j + 1$, tada se izvršava operacija dodeljivanja nove vrednosti rednom broju koraka n_t :

$$n_t - \Delta n_j \Rightarrow n_t = 1 \quad (3.217)$$

To znači da je $1 \leq n_t \leq \Delta n_j$. U jednačini prostiranja 3.214 se preuzima vrednost $U_{od}(i_p, n_t - \Delta n_j)$ iz koraka $n_t - \Delta n_j$, da bi se u istom koraku n_t u izrazu 3.216, dodelila nova vrednost promenljivoj $U_{od}(i_p, n_t)$. Posle svakih Δn_j koraka vremenski indeks n_t dobija istu vrednost, ali se vrednost promenljive $U_{od}(i_p, n_t)$ menja.

3.7.3 Obuhvatanje korone

Visokonaponski putujući talasi po nadzemnim vodovima izazivaju efekat lokalne jonizacije vazduha uz površinu provodnika, koja se manifestuje kao promena efektivne podužne kapacitivnosti provodnika na tom mestu zbog prividnog povećanja prečnika provodnika, kao na slici 3.54. Oblast jonizovanog vazduha prostire se zajedno sa talasom.



Slika 3.54: Prividno povećanje provodnika usled impulsne korone

Oznake na slici 3.54 imaju sledeće značenje:

$2R_p$ – stvarni prečnik provodnika,

$2R_k$ – prečnik omotača od jonizovanog vazduha.

Pri naponima na vodu koji su niži od kritičnog napona za nastanak korone, podužna količina elektriciteta srazmerna je naponu, prema izrazu:

$$q = C_o \cdot u(x, t) \quad (3.218)$$

gde je:

C_o – podužna kapacitivnost voda pre nastanka korone,

$u(x, t)$ – trenutna vrednost napona na vodu na mstu x na kome posmatramo talas, u trenutku t .

Kada na vodu postoji korona, podužna količina elektriciteta može se približno izračunati korišćenjem empirijskog izraza:

$$q = \begin{cases} C_o[1 + B \cdot u(x, t)]u(x, t) & \text{za } u(x, t) > U_{kr} \\ C_o \cdot u(x, t) & \text{za } u(x, t) \leq U_{kr} \end{cases} \quad (3.219)$$

gde su:

B – empirijski koeficijent koji zavisi od prečnika provodnika,

$u(x, t)$ – trenutna vrednost napona na posmatranom mestu,

U_{kr} – kritični napon iznad koga nastaje korona.

Veličina:

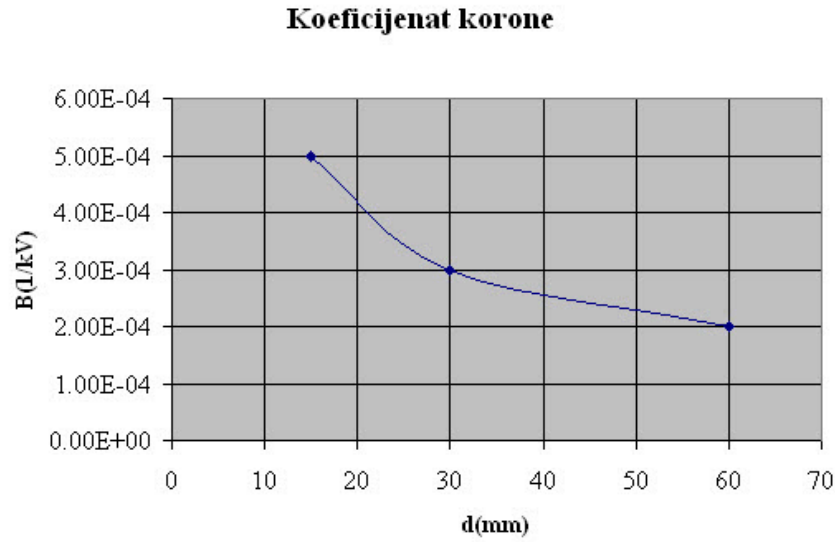
$$C_k = \frac{\partial q}{\partial u(x, t)} = C_o[1 + 2B \cdot u(x, t)] \quad (3.220)$$

naziva se dinamičkom kapacitivnošću voda, koja je veća od podužne kapacitivnosti voda pre nastanka korone.

Talasi negativnog polariteta se znatno češće pojavljuju, a osim toga, korona usled pozitivnih talasa je intenzivnija i izaziva veće izobličenje talasa. Zbog toga će biti razmatrana samo korona usled negativnih talasa.

Na slici 3.55 data je zavisnost koeficijenta B u funkciji prečnika provodnika pri negativnim naponskim talasima.

Induktivnost voda se ne menja usled dejstva korone, tako da je brzina prostiranja talasa na vodu sa koronom data izrazom:



Slika 3.55: Koeficijent korone u funkciji prečnika provodnika

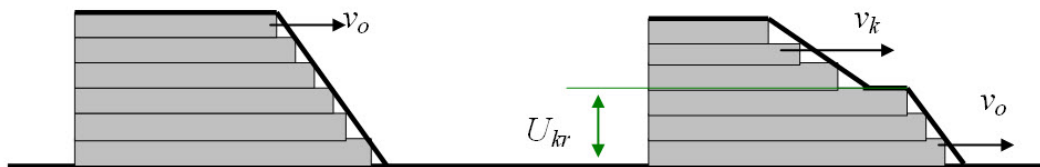
$$v_k = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_k}} = \frac{v_o}{\sqrt{1 + 2B \cdot u(x, t)}} \quad (3.221)$$

gde su:

$v_o = 1/\sqrt{L_1 C_o}$ – brzina prostiranja talasa na vodu bez korone,

L_1 – podužna induktivnost voda.

Može se uočiti da se pojedini delovi talasa čija je trenutna vrednost napona različita prostiru različitim brzinama. Na slici 3.56 skicirano je kašnjenje talasa linearno rastućeg čela usled dejstva korone na vodu dužine d .



Slika 3.56: Skica principa izobličenja talasa pri prostiranju usled promene brzine

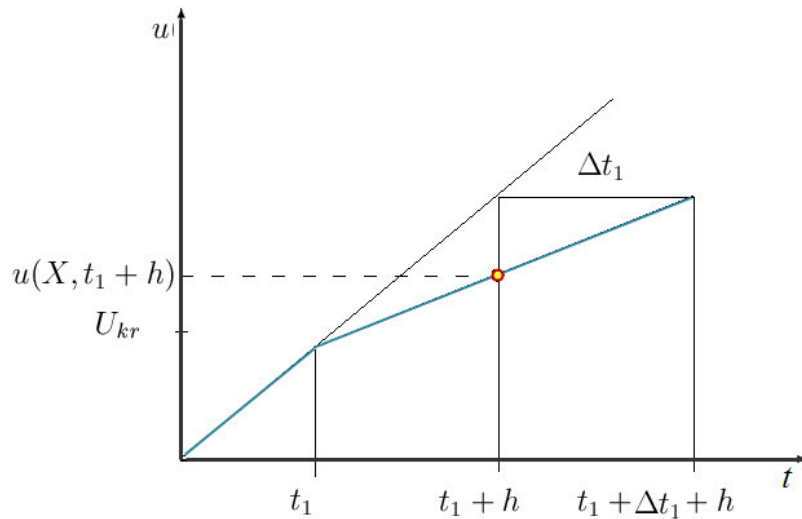
Vreme kašnjenja talasa pri naponu $u(x, t)$ posle prostiranja duž deonice voda dužine d , nakon izračunavanja brzine prostiranja iz izraza 3.221 iznosi:

$$\Delta t = \frac{d}{v_k} - \frac{d}{v_o} \quad (3.222)$$

odnosno:

$$\Delta t = \frac{d}{v_o} (\sqrt{1 + 2Bu(x, t)} - 1) \quad (3.223)$$

Na slici 3.57 prikazan je numerički postupak izračunavanja napona na vodu pri postojanju korone, ako je dopunsko kašnjenje talasa usled korone Δt .



Slika 3.57: Numerički postupak obuhvatanja korone pri prostiranju talasa po vodu

Na slici 3.57 oznaka h predstavlja elementarni vremenski korak sa kojim se proračun vrši.

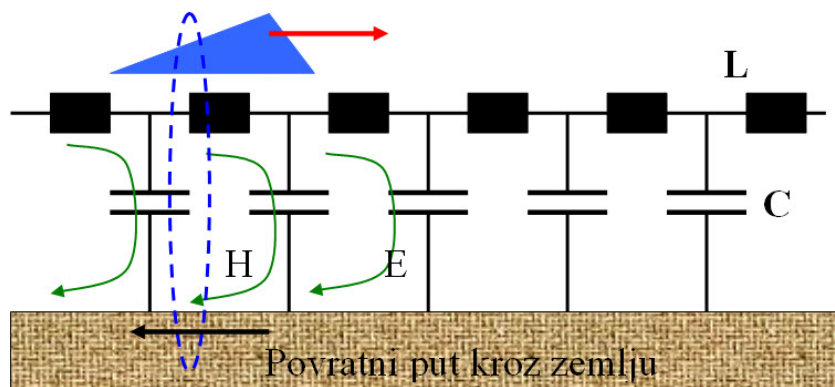
U trenutku t_1 vlada napon $u(x, t_1)$ niži od napona nastajanja korone, a u trenutku $t_1 + h$ vlada napon viši od napona nastajanja korone, usled čega dolazi do vremenskog kašnjenja talasa za interval Δt_1 . U trenutku $t_1 + h$ se dobija napon uz uvažavanje korone linearnom interpolacijom napona iz prethodnog koraka t_1 i napona u trenutku $t_1 + \Delta t_1 + h$ posle dodatnog vremenskog zakašnjenja.

3.8 Frekvencijski zavistan povratni put kroz zemlju

3.8.1 Jedinični odziv

Prilikom prostiranja talasa po nadzemnom vodu iznad ravne homogene zemlje konačne provodnosti ρ dolazi do pojave proticanja struje kroz zemlju kao povratni put, sa uticajem na prigušenje i izobličenje talasa koje zavisi od frekvencije procesa. Kod trofaznih vodova u prostiranju talasa po povratnom putu kroz zemlju učestvuje dominantno nulta komponenta struje, dok je skin efekat na fazama znatno slabije izražen. Ove pojave su od značaja kod proračuna prenapona po dugačkim vodovima, što ima veći značaj kod proračuna sklopnih prenapona, dok je za proračun atmosferskih prenapona od malog značaja jer samo udari na malom rastojanju od postrojenja koje analiziramo mogu da ugroze izolaciju.

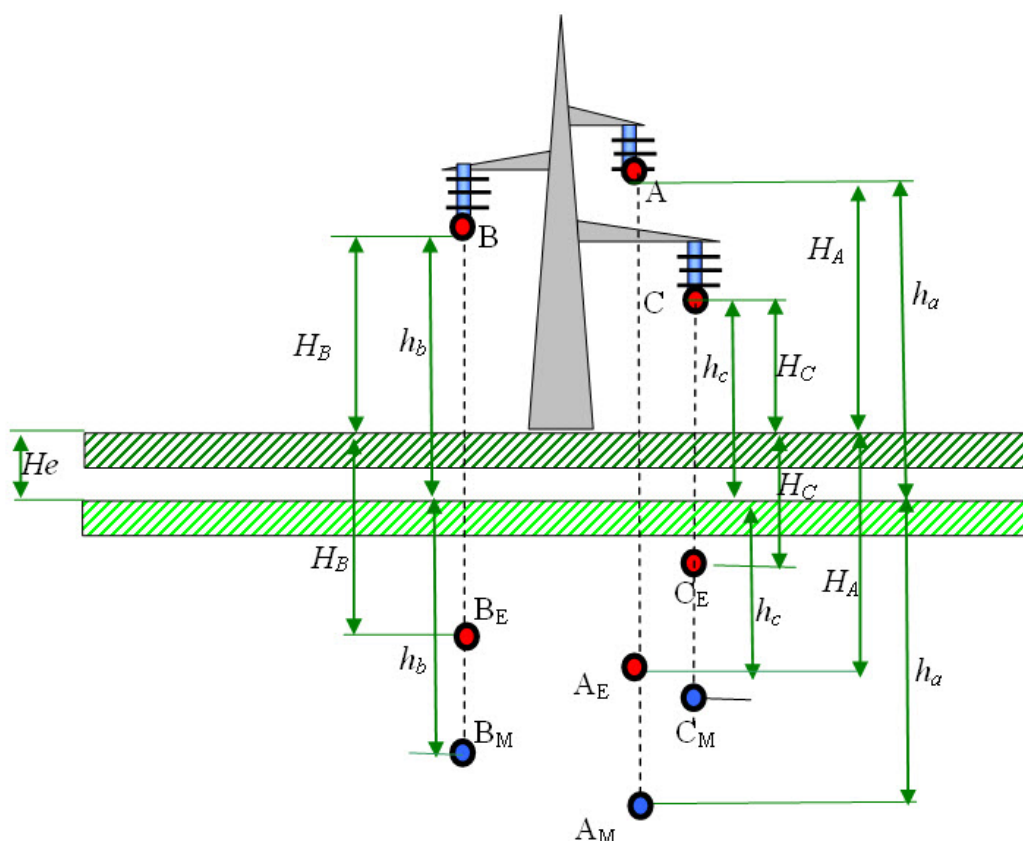
Na slici 3.58 prikazan je monofazni vod preko elementarnih L - C deonica iznad ravne homogene zemlje konačne specifične otpornosti ρ . Po vodu se prostire atmosferski udarni talas i pri prostiranju puni elementarne kapacitete prema zemlji. Povratni put za kapacitivnu struju je kroz zemlju. Električno polje koje izaziva proticanje kapacitivne struje prema zemlji je E , a magnetno polje usled proticanja struje kroz vod, koje se zatvara kroz zemlju izazivajući proticanje indukovane struje suprotnog smera je H .



Slika 3.58: Zamenska šema monofaznog voda sa povratnim putem kroz zemlju

Radi objašnjenja uticaja frekvencije na parametre voda, na slici 3.59 je prikazan trofazni vod sa geometrijom faznih provodnika koja odgovara stubu tipa "jela". Kapacitivnosti prema zemlji (sopstvene kapacitivnosti faznih provodnika), određuju se metodom ogledanja u odnosu na stvarnu površinu zemlje, koja je na nultom potencijalu i može se zameniti savršeno provodnom pločom. Po metodi ogledanja, savršeno provodna ploča se zamenjuje likovima u ogledalu provodnika suprotnog polariteta. Naprotiv, induktiviteti se određuju u odnosu na povratni put kroz zemlju na dubini koja zavisi od frekvencije pojava. Pri jednosmernoj struji se ona ravnomerno raspoređuje po poprečnom preseku

zemlje i može se zameniti ekvivalentnim provodnikom na veoma velikoj dubini. Što je frekvencija struje veća, po principu površinskog efekta, struja na povratnom putu se sabija sve više uz površinu zemlje. Pri beskonačno velikoj frekvenciji i specifičnoj otpornosti tla koja bi bila nula, sva struja bi bila sabijena uz samu površinu zemlje i u tom slučaju bi se mogla koristiti površina zemlje po metodi ogledanja za određivanje ekvivalentnih likova provodnika u zemlji, sa suprotnim smerovima struja u odnosu na stvarne fazne provodnike. Fizičko tumačenje frekvencijski zavisnih induktiviteta se može objasniti preko fiktivne površine zemlje koja je na dubini H_{ekv} u odnosu na stvarnu površinu zemlje, gde dubina H_{ekv} zavisi od frekvencije i specifičnog otpora tla.



Slika 3.59: Primena principa ogledanja za određivanje kapacitivnosti i induktivnosti faznih provodnika sa povratnim putem kroz zemlju

Na slici 3.59 oznake imaju sledeće značenje:

A, B, C - fazni provodnici nadzemnog voda,

A_E, B_E, C_E - likovi faznih provodnika u odnosu na stvarnu površinu zemlje kao ravan ogledanja, što služi za proračun faznih kapacitivnosti vodova,

$\mathbf{A}_M, B_M, C_M$ -likovi faznih provodnika u odnosu na fiktivnu površinu ogledanja, što služi za proračun faznih induktiviteta vodova,

h_a, h_b, h_c - visine faznih provodnika u odnosu na fiktivnu površinu zemlje,

H_a, H_b, H_c - visine faznih provodnika u odnosu na stvarnu površinu zemlje,

Prema Karsonovom obrascu ekvivalentna dubina povratnog puta kroz zemlju ima sledeći oblik za pogonsku učestanost:

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (3.224)$$

gde je:

D_e -ekvivalentna dubina lika faznog provodnika u odnosu na površinu zemlje

f - učestanost

ρ - specifična otpornost zemlje.

U [59], dato je kompletno izvođenje koeficijenta prostiranja i karakteristične imedanse za vod iznad homogene ravne zemlje u frekvencijskom domenu. Izraz nije pogodan za praktičnu primenu zbog izuzetno složene analitičke forme. U radu [60] i [64] predloženo je jednostavno rešenje za koeficijent prostiranja u obliku:

$$\Upsilon(p) = \frac{p}{v} + p \cdot T_m + \beta \sqrt{p} + \alpha \quad (3.225)$$

gde su:

p - operator Laplasove operacije,

v - brzina prostiranja, $v = 3 \times 10^8$ m/s,

T_m - dopunsko kašnjenje u prostiranju nulte komponente talasa napona,

β - koeficijent koji obuhvata uticaj izobličenja talasa usled frekvencijski zavisnih parametara povratnog puta kroz zemlju,

α - koeficijent prigušenja napona koji utiče samo na promenu amplitude, ali ne i oblika napona.

U slučaju delovanja odskočne funkcije napona amplitude U_1 na početku voda, na rastojanju d od početka voda, napon ima sledeći oblik:

$$u_2(p) = \frac{U_1}{p} \cdot [e^{-p \cdot (\frac{d}{v} + T_m)} \cdot e^{-\beta \sqrt{p} \cdot \frac{d}{v}} \cdot e^{-\alpha \frac{d}{v}}] \quad (3.226)$$

Prema [60] funkcija 3.226 se može transformisati u vremensku funkciju sledećeg oblika:

$$u_2(t) = U_1 \cdot e^{-\alpha \cdot (d/v)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta(d/v)}{2 \cdot \sqrt{t - T_m(d/v)}}\right) \quad (3.227)$$

Funkcija $\operatorname{erf}(x)$ naziva se funkcijom greške (koristi se naziv Gausova funkcija greške) i predstavlja jednu od neelementarnih funkcija koja se javlja u verovatnoći, statistici, i parcijalnim diferencijalnim jednačinama. Raspoloživa je kao aplikativna funkcija u većini programskih jezika, a definisana je izrazom:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.228)$$

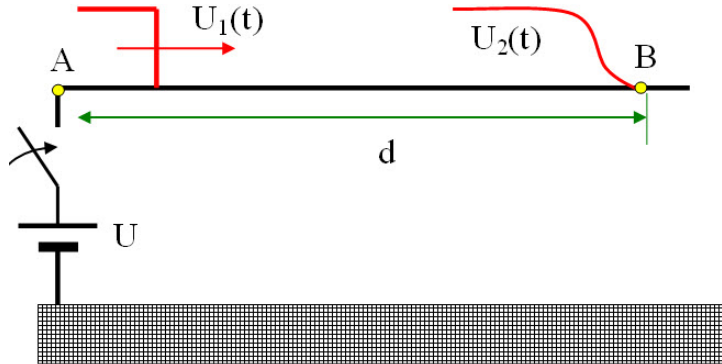
Komplementarna funkcija greške $\operatorname{erfc}(x)$ dobija se iz izraza:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

odnosno:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (3.229)$$

Da bi se modelovalo izobličenje talasa usled prostiranja, može se posmatrati beskonačno dugačak vod koji polazi od tačke **A** u kojoj se uključuje izvor pravougaonog napona, kao na slici 3.60. Talas posmatramo posle prostiranja u tački **B** na udaljenosti d od tačke **A**.



Slika 3.60: Odziv voda na odskočnu funkciju napona

Ukoliko je talas U_1 jedinične amplitude, tada je napon U_2 odziv voda na jediničnu odskočnu funkciju.

Ako se odredi vremenska funkcija odziva U_2 , tada se može izvršiti aproksimacije te funkcije sa zbirom eksponencijalnih funkcija.

$$F(t) = \sum_{i=1}^k e^{-\alpha_i t} A_i (1 - e^{-a_i t}) \quad (3.230)$$

gde su:

A_i -amplitude pojedinih komponenti eksponencijalnih funkcija,

$T_i = 1/a_i$ -Vremenske konstante pojedinih eksponencijalnih funkcija,

α_i - koeficijenti prigušenja pojedinih eksponencijalnih funkcija.

Uslov koje treba gornja funkcija da ispunjava je da za $t \rightarrow \infty$:

$$\sum_{i=1}^k A_i = 1 \quad (3.231)$$

Za praktičnu primenu je dovoljno koristiti samo jednu ili dve eksponencijalne funkcije, odnosno $k = 1$ ili $k = 2$.

U slučaju kada se primenjuje samo jedna eksponencijalna funkcija, tada ta funkcija ima sledeći oblik:

$$F(t) = e^{-\alpha \cdot t} \cdot (1 - e^{-a_1 \cdot t}) \quad (3.232)$$

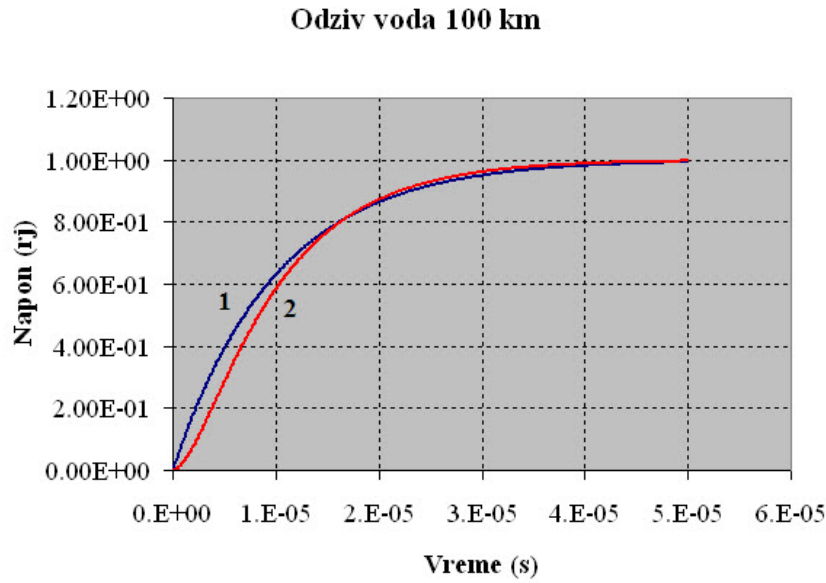
Za slučaj voda dugačkog 100 km i specifičnog otpora ravne homogene zemlje $\rho = 300 \Omega\text{m}$ prikazan je jedinični odziv na slici 3.61. Da bi se sprečile refleksije talasa od kraja voda, na kraj voda priključen otpornik koji ima vrednost otpora identičnu karakterističnoj impedansi voda (otpornik za prilagođavanje). Nacrtan je odziv voda aproksimiran sa jednom eksponencijalnom funkcijom i realan odziv voda određen tačnim postupkom na slici 3.61.

Za inženjerske proračune dovoljno je koristiti jednu eksponencijalnu funkciju.

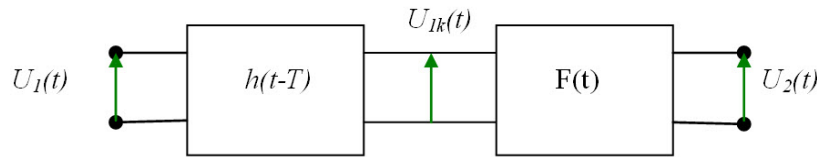
3.8.2 Numeričko modelovanje izobličenja pri prostiranju

Numerički proračun napona pri prostiranju duž voda se može objasniti na blok šemi na slici 3.62.

Oznake na slici imaju sledeće značenje:



Slika 3.61: Odziv voda aproksimiran jednom eksponencijalnom funkcijom (1) i originalni odziv određen tačnim postupkom (2)



Slika 3.62: Blok šema proračuna odziva voda preko funkcije prenosa ili transfer funkcije

U_1 - upadni talas na početku voda dobijen proračunom prelaznog procesa,

U_{1k} - talas posle prostiranja kroz vod, neizobličen, samo vremenski pomeren za vreme prostiranja $T = \frac{d}{v}$, gde je d dužina voda, a v - brzina prostiranja bliska brzini svetlosti,

U_2 - izobličen talas koji stiže na kraj voda kao upadni talas,

$h(t - T)$ - Blok koji reprezentuje Hevisajdova odskočna funkcija koja predstavlja funkciju kašnjenja talasa $U_{1k}(t) = U_1(t - T)h((t - T))$.

$F(t)$ - funkcija odziva voda na jediničnu odskočnu funkciju.

Proračunom odziva voda na ulazni napon $U_1(p)$ u domenu Laplasove transformacije dobija se u sledeći izraz:

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot e^{-\frac{p}{v} \cdot d} \star F(p) \quad (3.233)$$

Transformacija u vremenski domen vrši se primenom konvolucionog integrala:

$$u_2(t) = u_1(t)F(0) + \int_0^t u_1(z)F'(t-z) \cdot dz \quad (3.234)$$

gde je:

$$u_{1k}(t) = u_1(t-T) \cdot h(t-T) \quad (3.235)$$

Prilikom numeričkog proračuna se u svakom koraku proračuna mora vršiti izračunavanje integrala 3.234 množeći podintegralnu funkciju $u_1(z)$ za svako z sa funkcijom $F'(t-z)$. Pri tome u svakom koraku se argumenti z i $(t-z)$ razlikuju. Zbog toga je direktno integraljenje veoma dugotrajan proces.

Uvođenjem aproksimacije funkcije odziva eksponencijalnim funkcijama sa k članova, funkcija $F'(t)$ na osnovu 3.230 postaje:

$$F'(t) = \sum_{i=1}^k e^{-\alpha_i d} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i t} \quad (3.236)$$

Znajući da funkcija odziva za $t = 0$ ima vrednost 0, konvolucionni integral 3.234 sada dobija oblik:

$$u_2(t) = \int_0^t u_1(z) \cdot \sum_{i=1}^k e^{-\alpha_i d} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-z)} dz \quad (3.237)$$

Konvolucionni integral se može podeliti na dva člana, jedan koji važi od trenutka $t = 0$ do trenutka $t - \Delta t$ i drugi od trenutka $t - \Delta t$ do trenutka t , gde je Δt elementarni vremenski korak proračuna.

$$\begin{aligned} u_2(t) = & \int_0^{t-\Delta t} u_1(z) \cdot \sum_{i=1}^k e^{-\alpha_i d} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-\Delta t-z)} dz \\ & + \int_{t-\Delta t}^t u_1(z) \cdot \sum_{i=1}^k e^{-\alpha_i d} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-z)} dz \end{aligned} \quad (3.238)$$

Ukoliko postoji k eksponencijalnih funkcija odziva, gde je $k = 1$ ili 2 , član koji odgovara komponenti i izračunatog odziva ima oblik:

$$\begin{aligned} u_{2i}(t) = & \int_0^{t-\Delta t} u_1(z) \cdot e^{-\alpha_i d} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-\Delta t-z)} dz \\ & + \int_{t-\Delta t}^t u_1(z) \cdot e^{-\alpha_i d} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-z)} dz \end{aligned} \quad (3.239)$$

Prvi član izraza 3.239 može se napisati u obliku:

$$u_{2i}(t - \Delta t) = \int_0^{t-\Delta t} u_1(z) e^{-\alpha_i z} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-\Delta t-z)} dz \quad (3.240)$$

Na osnovu 3.240 se izraz 3.239 može napisati u obliku:

$$u_{2i}(t) = u_{2i}(t - \Delta t) + \int_{t-\Delta t}^t u_1(z) \cdot e^{-\alpha_i z} A_i \cdot a_i \cdot e^{-a_i(t-z)} dz \quad (3.241)$$

To znači da se komponenta i upadnog naponskog talasa $u_{2i}(t)$ može izračunati na osnovu iste komponente napona iz predhodnog koraka uz integraljenje funkcije u poslednjem koraku.

Ako se izvrši linearna interpolacija napona na intervalu $[t - h, h]$, može se analitički rešiti drugi interval u izrazu 3.241. Nakon izračunavanja se dobija:

$$u_{2i}(t) = R_{1i} \cdot U_1(t) + R_{2i} \cdot U_1(t - \Delta t) + R_{3i} \cdot U_{2i}(t - \Delta t) \quad (3.242)$$

gde su:

$$R_{1i} = \left[1 - \frac{1}{a_i \cdot \Delta t} (1 - e^{-a_i \cdot \Delta t}) \right] \cdot A_1 \quad (3.243)$$

$$R_{2i} = -[e^{-a_i \cdot \Delta t} - \frac{1}{a_i \cdot \Delta t} \cdot (1 - e^{-a_i \cdot \Delta t})] \cdot A_1 \quad (3.244)$$

$$R_{3i} = e^{-a_i \cdot \Delta t} \cdot A_1 \quad (3.245)$$

Ukupan napon se dobija sabiranjem komponenti usled dejstva pojedinih eksponencijalnih članova.

$$u_2(t) = \sum_{i=1}^k u_{2i}(t) \quad (3.246)$$

Ovim postupkom proračuna uvodi se pojam izobličene komponente napona usled dejstva samo jednog eksponencijalnog člana. Komponente napona izračunatog izobličene napona se zadržavaju u memoriji samo do narednog koraka, isto kao i neizobličene komponente napona, jer se ove dve komponente pozivaju pri izračunavanju izobličene komponente napona u narednom koraku. Ovakvim postupkom se vrši značajno ubrzavanje procesa proračuna konvolucionog integrala i vrši se ušteda u korišćenoj memoriji jer se memorišu upadne komponente samo tekućeg i predhodnog koraka.

Poglavlje 4

Trofazna transformacija

4.1 Objašnjenje trofazne transformacije

Proračun prelaznih procesa u trofaznim elektro-enegetskim mrežama vezan je sa računskim teškoćama zbog velikog broja jednačina koje treba rešavati. Da bi se račun pojednostavio, vrši se transformacija jednačina trofaznih mreža u nove, transformisane jednačine u kojima je proračun jednostavniji. U transformisanoj mreži se elementi i promenljive razlikuju od onih u originalnoj mreži. Da bi se odredile originalne električne veličine u stvarnoj mreži, posle završenog proračuna mora se izvršiti inverzna transformacija izračunatih veličina.

Kod trofaznih mreža javljaju se međufazni magnetni i kapacitivni uticaji koji se modeluju međufaznim induktivitetima i međufaznim kapacitivnostima. U slučaju povratnog puta kroz zemlju se mogu pojaviti otpornički elementi van glavne dijagonale koji reprezentuju zajednički povratni put kroz zemlju. Pri pisanju jednačina mreža kod matematičkog modelovanja trofaznih elemenata u matričnom obliku, elementi se opisuju matricama trećeg reda. Elementi na glavnoj dijagonali su fazne impedanse, odnosno admittanse. Elementi van glavne dijagonale su međufazni induktiviteti, kapaciteti ili otpornosti koji reprezentuju zajednički povratni put kroz zemlju.

Ukoliko se posmatraju nadzemni vodovi, predpostavlja se da je izvršena idealna transpozicija faza, tada elementi na glavnoj dijagonali imaju identične vrednosti, a takođe su svi elementi van glavne dijagonale međusobno jednaki. Kod netransponovanih horizontalnih vodova se razlikuje impedanse između dve susedne faze od impedansi udaljenijih faza. U tom slučaju je matrica elementa simetrična, ali se elementi matrice susednih faza razlikuju od elemenata koji odgovaraju udaljenijim fazama. Cilj trofaznih transformacija je da se u jednačinama mreža ovi međufazni uticaji eliminišu.

Jednačine po Omovom zakonu u matričnom obliku za trofazni sistem u opštem slučaju imaju sledeću formu:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{23} \\ \underline{Z}_{13} & \underline{Z}_{23} & \underline{Z}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Izraz 4.1 se odnosi na ustaljeno stanje, tako da su sve veličine izražene kao kompleksne. U slučaju proračuna prelaznih režima, naponi i struje se izražavaju kao trenutne vrednosti, a elementi mreže se daju preko realnih vrednosti parametara mreže.

Kod svih pasivnih elemenata elektroenergetskog sistema koji nemaju rotacionih delova se može smatrati da je $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$, $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32}$ i $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31}$. U tom slučaju se sistem naziva simetričnim. Ukoliko je ispunjeno da su elementi $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{33}$ i $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{13}$, tada se matrica sistema naziva cikličnom, jer idući po vrstama sa leva na desno elementi se ciklično ponavljaju. Nadzemni vod se može modelovati simetričnom i cikličnom matricom elemenata ukoliko je on idealno transponovan (svaka faza ima identičnu geometriju prema zemlji i susednim fazama). Primer simetrične i ciklične matrica trofaznog elementa dat je sledećim izrazom:

$$[Z] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_F & \underline{Z}_M & \underline{Z}_M \\ \underline{Z}_M & \underline{Z}_F & \underline{Z}_M \\ \underline{Z}_M & \underline{Z}_M & \underline{Z}_F \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

gde su:

$\underline{Z}_F$ -sopstvena kompleksna impedansa jedne faze,

$\underline{Z}_M$ -međusobna kompleksne impedansa dve faze.

Kod simetričnog i cikličnog elementa sve sopstvene impedanse su jednake i sve međusobne impedanse su jednake. U skraćenom matričnom obliku se izraz za Omov zakon 4.1 može napisati u sledećoj formi:

$$[U_F] = [Z] \cdot [I_F] \quad (4.3)$$

gde su:

- $[U_F]$ - vektor od tri fazna napona u kompleksnom ili operatorskom domenu,
- $[I_F]$ - vektor od tri fazne struje u kompleksnom ili operatorskom domenu,
- $[Z]$ - matrica reda 3×3 od kompleksnih ili operatorskih impedansi.

Cilj trofaznih transformacija je da se matrice trofaznog elemenata $[Z]$ dijagonalizuje. U tu svrhu se uvode matrica transformacija $[P]$ za napone i $[Q]$ za struje. To su kvadratne nesusingularne matrice trećeg reda čiji su elementi u opštem slučaju mogu biti realni ili kompleksni brojevi. Ako se pomnoži matična relacija 4.3 sa leve strane matricom $[P]$, dobija se:

$$[P] \cdot [U_F] = [P] \cdot [Z] \cdot [I_F] \quad (4.4)$$

Uvedimo matricu transformacije struja na sledeći način:

$$[I_K] = [Q]^{-1} \cdot [I_F] \quad (4.5)$$

gde su:

- $[Q]^{-1}$ - inverzna matrica transformacije,
- $[I_K]$ - vektor trećeg reda transformisanih struja, koje ćemo nazivati komponentnim strujama.

Uvedimo transformacije vektora napona na sledeći način:

$$[U_K] = [P] \cdot [U_F] \quad (4.6)$$

gde je $[U_K]$ vektor trećeg reda transformisanih napona.

Ako se zamene izrazi za vektore transformisanih električnih veličina, dobija se Omov zakon u matičnom obliku za transformisane veličine.

$$[U_K] = [P] \cdot [Z] \cdot [Q] \cdot [I_K] \quad (4.7)$$

Uvedimo pojam transformisane matrice impedansi:

$$[Z_K] = [P] \cdot [Z] \cdot [Q] \quad (4.8)$$

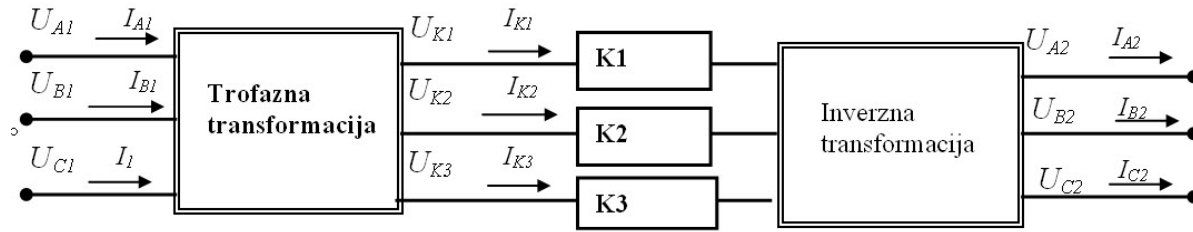
Matrice transformacije treba izabrati tako da transformisana matrica impedansi Z_k bude dijagonalna matrica.

Posle završene transformacije matični izraz 4.1 dobija sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} U_{K_1} \\ U_{K_2} \\ U_{K_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{K_1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{K_2} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{K_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{K_1} \\ I_{K_2} \\ I_{K_3} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Naponi i struje u izrazu 4.9 nazivaju se komponentnim električnim veličinama. Transformacijom izraza 4.1 u 4.9 sistem od tri jednačine sa tri nepoznate trofaznog elementa se raspada na tri nezavisne jednačine za pojedine komponentne sistema. To se može grafički prikazati kao na slici 4.1.

Oznake na slici 4.1 imaju sledeće značenje:



Slika 4.1: Transformacije iz faznih u komponentne veličine i inverzna transformacija

K1, K2, K3 - ekvivalentni nezavisni komponentni sistemi

Inverzna transformacija iz komponentnih u fazne veličine vrši se sledećim matičnim operacijama:

$$[U_F] = [P]^{-1} \cdot [U_K] \quad (4.10)$$

$$[I_F] = [Q] \cdot [I_K] \quad (4.11)$$

Ukoliko se vektori napona i struja odnose na stacionaran režim i sadrže kompleksne brojeve, tada elementi matrica transformacija mogu biti realni ili kompleksni brojevi. Ukoliko su elementi vektora napona i struja trenutne vrednosti, tada elementi matrica transformacija treba da budu realni brojevi.

4.2 Najčešće korišćene transformacije

4.2.1 Simetrične komponente

U slučaju ustaljenog režima najčešća je trofazna transformacija u simetrične komponente, (transformacija Edith Clark). Matrica transformacije u ovom slučaju ima oblik:

$$[Q] = \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$[P] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

U 4.12 i 4.13 $\underline{a}$ označava kompleksni operator:

$$\underline{a} = e^{j \cdot 2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.14)$$

$$\underline{a}^2 = e^{j \cdot 4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.15)$$

Kod transformacije u simetrične komponente važi sledeći odnos između matrica transformacija za napone i struje:

$$[P] = [Q]^{-1} \quad (4.16)$$

Ako se primeni transformacija u simetrične komponente trofaznog elementa predstavljenog matricom impedansi koja je simetrična i ciklična, dobija se dijagonalna matrica komponentnih impedansi. U tom slučaju Omov zakon u matičkom obliku za transformisani sistem u simetrične komponente ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_F - \underline{Z}_M & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_F - \underline{Z}_M & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_F + 2 \cdot \underline{Z}_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_o \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

gde veličine označene indeksom d označavaju direktni komponentni sistem, i inverzni komponentni sistem i o označavaju nulti sistem.

Direktne i inverzne i nulte električne veličine dobijaju se iz faznih sledećom operacijom:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Mogu se uvesti sledeće oznake:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d &= \underline{Z}_F - \underline{Z}_M & - \text{direktna, koja je jednaka inverznoj impedansi trofaznog elementa,} \\ \underline{Z}_o &= \underline{Z}_F + 2 \cdot \underline{Z}_M & - \text{nulta impedansa trofaznog elementa.} \end{aligned}$$

Obrnuto, fazne veličine se dobijaju iz komponentnih inverznom transformacijom:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Ukoliko se raspolaze direktnom, odnosno nultom impedansom nekog trofaznog sime-

tričnog elementa, onda se mogu dobiti fazne i međufazne vrednosti sledećim relacijama:

$$\underline{Z_F} = \frac{2\underline{Z_d} + \underline{Z_o}}{3} \quad (4.20)$$

$$\underline{Z_M} = \frac{\underline{Z_0} - \underline{Z_d}}{3} \quad (4.21)$$

4.2.2 Transformacija u α , β i o komponente

Transformacija u α , β i o komponente je pogodna za rešavanje prelaznih režima, kada se elementi mreže mogu opisati simetričnim i cikličnim matricama. U slučaju vodova, to su idealno transponovani vodovi. Može se koristiti za rešavanje i prelaznih režima za transformaciju trenutnih vrednosti napona i struja, kao i za rešavanje ustaljenih režima. Elementi matrice su realni brojevi.

Matrice transformacije imaju sledeći oblik:

$$[P] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Ispunjen je uslov da je:

$$[P] = [Q]^{-1} \quad (4.24)$$

Transformacija faznih napona u vremenskom domenu u komponentne data je matičnim izrazom:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Obrnuto, transformacija komponentnih u fazne veličine data je izrazom:

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Fazne i komponentne vrednosti napona se mogu predstavljati trenutnim vrednostima, jer se α , β i o transformacija mogu primenjivati i u vremenskom domenu, za razliku od simetričnih komponenti koje su transformacija sa kompleksnim matricama i mogu se primenjivati samo u kompleksnom domenu.

Omov zakon u matričnom obliku posle transformacije u α , β i 0 komponente ima opšti oblik koji važi za vremenski ili kompleksan domen:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F - Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_F - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_F + 2 \cdot Z_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_o \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Veličine U_α , U_β , U_o , kao i I_α , I_β , I_o mogu biti trenutne vrednosti ili kompleksne vrednosti električnih veličina. Za induktivan elemenat se komponente induktivnosti definišu na sledeći način:

$L_\alpha = L_F - L_M$ - α , koja je jednaka β komponenti induktiviteta trofaznog elementa,

$L_0 = L + 2L_M$ - nulta induktivnost trofaznog elementa,

L_F - sopstvena induktivnost faze,

L_M - međusobna induktivnost dve faze.

Izraz 4.27 izražen za induktivan elemenat u vremenskom domenu ima oblik:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Transformacija elektromotornih sila idealnog naponskog generatora u $\alpha, \beta, 0$ transformaciju u kompleksnom domenu vrši se sledećom matričnom transformacijom:

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_\alpha \\ \underline{E}_\beta \\ \underline{E}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ E \cdot \underline{a} \\ E \cdot \underline{a}^2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

gde je:

$$\begin{aligned} \underline{a} &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \underline{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Posle zamene 4.30 u 4.29 dobija se:

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_\alpha \\ \underline{E}_\beta \\ \underline{E}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ Ee^{j\frac{\pi}{2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

4.3 Modalna transformacija

Modalna transformacija predstavlja transformaciju koja se može primenjivati i za nesimetričan raspored provodnika, odnosno u slučajevima kada se vodovi ne tretiraju kao idealno transponovani. Najčešće se vodovi tretiraju kao idealno transponovani jer se ne poznaju dovoljno dobro svi parametri koji utiču na prostiranje, a posebno na prigušenje pri prostiranju. Mora se naglasiti da se kod dugačkih vodova struktura i sastav tla na trasi voda menja, što je praktično veoma teško da se modeluje. Ipak, kod vodova najviših naponskih nivoa određene pojave vezane za nesimetričnost geometrije faznih provodnika mogu da budu od značaja kod analize sklopnih prenapona. Zbog toga će na ovom mestu biti opisana transformacija u **prirodne modove**, to jest matrica transformacije je prilagođena prirodnim karakteristikama voda.

4.3.1 Jednačine telegrafičara za trofazni vod

Na slici 4.2 prikazana je šema elementarne deonice trofaznog voda dužine Δx . Prikazani vod je nesimetričan sa različitim podužnim parametrima po pojedinim fazama radi generalizacije. Posmatrani vod je bez zaštitnih užadi. Tlo na kome je vod podignut je homogeno, specifičnog otpora ρ . Svi parametri voda su podužni, izraženi po metru.

Oznake na slici 4.2 imaju sledeće značenje:

r_1, r_2, r_3 -podužna otpornost faznih provodnika A, B i C (Ω/m),

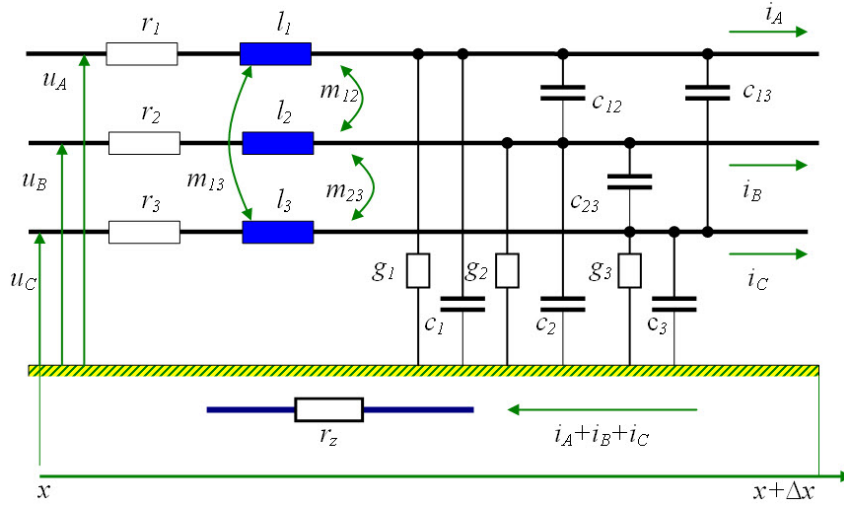
l_1, l_2, l_3 -podužna induktivnost faznih provodnika A, B i C (H/m),

m_{12}, m_{23}, m_{13} - međusobna induktivnost po jedinici dužine dva fazna provodnika (H/m),

c_1, c_2, c_3 - podužna kapacitivnost faznih provodnika A, B i C prema zemlji (F/m),

c_{12}, c_{23}, c_{13} - međusobna kapacitivnost dva fazna provodnika (F/m),

r_Z - podužne otpornost povratnog puta kroz zemlju (Ω/m).



Slika 4.2: Elementarna deonica trofaznog netransponovanog voda

Parcijalne diferencijalne jednačine za redni pad napona na dužini dx za sistem na slici 4.2 u matricnom obliku dat je izrazom:

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial u_A(x,t)}{\partial x} \\ -\frac{\partial u_B(x,t)}{\partial x} \\ -\frac{\partial u_C(x,t)}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & l_2 & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & l_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_A(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i_B(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i_C(x,t)}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 + r_z & r_z & r_z \\ r_z & r_2 + r_z & r_z \\ r_z & r_z & r_3 + r_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(x,t) \\ i_B(x,t) \\ i_C(x,t) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Parcijalne diferencijalne jednačine za otočno odvođenje struje na dužini dx za sistem na slici 4.2 u matricnom obliku dat je izrazom:

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial i_A(x,t)}{\partial x} \\ -\frac{\partial i_B(x,t)}{\partial x} \\ -\frac{\partial i_C(x,t)}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{F1} & -c_{12} & -c_{13} \\ -c_{12} & c_{F2} & -c_{23} \\ -c_{13} & -c_{23} & c_{F3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u_A(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial u_B(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial u_C(x,t)}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A(x,t) \\ u_B(x,t) \\ u_C(x,t) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

gde su uvedene sledeće oznake:

$$\begin{aligned} c_{F1} &= c_1 + c_{12} + c_{13} \\ c_{F2} &= c_2 + c_{12} + c_{23} \\ c_{F3} &= c_3 + c_{13} + c_{23} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Posle prelaska na domen Laplasove transformacije, dobijaju se u skraćenom matričnom obliku sledeći izrazi:

$$-\frac{\partial[U(x)]}{\partial x} = [Lp + R] \cdot [I(x)] \quad (4.35)$$

$$-\frac{\partial[I(x)]}{\partial x} = [Cp + G] \cdot [U(x)] \quad (4.36)$$

gde oznake imaju sledeće značenje:

- p - Laplasov operator,
- $[U(x)]$ - vektor od tri fazna napona u Laplasovom domenu,
- $[I(x)]$ - vektor od tri fazne struje u Laplasovom domenu,
- $[Lp + R]$ - kvadratna matrica 3×3 podužnih induktiviteta i otpornosti na osnovu izraza 4.32 u Laplasovom domenu,
- $[Cp + G]$ - kvadratna matrica 3×3 podužnih kapaciteta i odvodnosti na osnovu izraza 4.33 u Laplasovom domenu.

Uvedimo oznake:

$$\begin{aligned} [Z] &= [R + pL] \\ [Y] &= [G + pC] \end{aligned} \quad (4.37)$$

Diferenciranjem izraza 4.35 i zamenom izraza 4.36, korišćenjem predhodnih skraćenica 4.37, dobija se parcijalna diferencijalna jednačina za fazne napone u matričnom obliku.

$$-\frac{\partial^2[U(x)]}{\partial x^2} = [Z] \cdot [Y] \cdot [U(x)] \quad (4.38)$$

Diferenciranjem izraza 4.36 i zamenom izraza 4.35, dobija se parcijalna diferencijalna jednačina za fazne struje u matričnom obliku.

$$-\frac{\partial^2[I(x)]}{\partial x^2} = [Y] \cdot [Z] \cdot [I(x)] \quad (4.39)$$

Važi sledeća relacija:

$$[Y] \cdot [Z] = ([Z] \cdot [Y])^T \quad (4.40)$$

Uvedimo oznaku matrice koeficijenata prostiranja $[\gamma]$ za fazne napone:

$$[\gamma] = \sqrt{[Z] \cdot [Y]} \quad (4.41)$$

Da bi se mogle rešiti jednačine telegrafičara u matričnom obliku 4.38, neophodno je matricu $[\gamma]$ primenom linearnih transformacija (množenjem odgovarajućim matricama sa leve i desne strane) dijagonalizovati [61], [62], [63].

4.3.2 Sopstvene vrednosti matrica i sopstveni vektori

Posmatrajmo kvadratnu nesingularnu matricu $[A]$ reda n . Ako je $[I]$ jedinična matrica reda n , tada se karakteristični polinom kvadratne matrice $[A]$ definiše na sledeći način:

$$P(\lambda) = \det([A] - \lambda[I]) \quad (4.42)$$

gde je $[I]$ odgovarajuća jedinična matrica.

U slučaju simetrične i ciklične matrice $[Z]$ karakteristični polinom se dobija rešavanjem sledeće determinante:

$$P(\lambda) = |A - \lambda I| = \begin{vmatrix} Z - \lambda & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z - \lambda & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z - \lambda \end{vmatrix} \quad (4.43)$$

Kada se napiše jednačina $P(\lambda) = 0$, to nazivamo karakterističnom jednačinom.

Karakteristična jednačina na osnovu karakterističnog polinoma 4.43 za matricu impedansi u operatorskom domenu, kada je matrica simetrična i ciklična, ima sledeći oblik:

$$P(\lambda) = (Z - \lambda)^3 + 2Z_m^3 - 3Z_m^2(Z - \lambda) \quad (4.44)$$

Svaki koren karakterističnog polinoma λ_i nazivamo sopstvenom ili karakterističnom vrednošću matrice $[A]$. Svaku kolonu matricu (vektor) $[v]$, gde je $[v] \neq 0$ koja zadovoljava uslov da je:

$$[A][v] = \lambda[v] \quad (4.45)$$

nazivamo sopstvenim ili karakterističnim vektorom, a λ_i je jedna sopstvena vrednost matrice $[A]$.

Za proizvoljnu matricu $[A]$, tipa $n \times n$, karakteristični polinom je uvek polinom n -tog stepena:

$$P(\lambda) = (-1)^n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 \quad (4.46)$$

Problem određivanja sopstvenih vektora matrice $[A]$ svodi se na rešavanje sistema homogenih linearnih jednačina oblika:

$$\begin{aligned} ([A] - \lambda_1[I]) \cdot [v_1] &= [0] \\ ([A] - \lambda_2[I]) \cdot [v_2] &= [0] \\ &\dots = \dots \\ ([A] - \lambda_n[I]) \cdot [v_n] &= [0] \end{aligned} \quad (4.47)$$

gde su $[v_1]$, $[v_2]$... $[v_n]$ sopstveni vektori koji odgovaraju sopstvenim vrednostima λ_1 , λ_2 ... λ_n .

Sva rešenja za članove svakog od sopstvenih vektora kolona $[v_1]$ do $[v_n]$ dolaze u obzir osim trivijalnog rešenja kada su svi članovi jednog vektora kolone jednaki nuli. Homogeni sistem jednačina ima netrivialna rešenja ukoliko je $\det[A - \lambda_i I] = 0$. Ukoliko postoje netrivialna rešenja, u tom slučaju se neka rešenja mogu pretpostaviti, a druga rešenja se dobijaju kao linearna kombinacija predhodnih.

Ukoliko su određeni sopstveni vektori $[v_1]$ do $[v_n]$, tada se formira kvadratna matrica transformacije $[T]$ na sledeći način:

$$[T] = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_n] \quad (4.48)$$

Ako se preuredi izraz 4.47, može se napisati za više karakterističnih vektora na sledeći način:

$$[A] \cdot [T] = \text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n) \cdot [T] \quad (4.49)$$

gde je $\text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n)$ dijagonalna matrica reda $n \times n$ čiji su članovi sopstve vrednosti matrice $[A]$.

Ukoliko je matrica $[T]$ nesingularna, tada se množenjem sa leve strane inverznom matricom $[T]^{-1}$ dobija:

$$[T]^{-1} \cdot [A] \cdot [T] = [T]^{-1} \cdot \text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n) \cdot [T] \quad (4.50)$$

odnosno:

$$[T]^{-1} \cdot [A] \cdot [T] = \text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n) \quad (4.51)$$

Na osnovu izraza 4.51 postignuto je da matricom transformacije $[T]$ postignemo dijagonalizaciju nesingularne matrice $[A]$.

4.3.3 Primena modalne transformacije na simetričnu i cikličnu matricu

Posmatrajmo matricu koeficijenata prostiranja za idealno transponovan vod datu izrazom

$$[\gamma]^2 = [Z][Y] = \begin{bmatrix} \gamma & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & \gamma \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Modalna transformacija se radi u nekoliko koraka.

Korak 1: formiranje i rešavanje karakteristične jednačine

Karakteristični polinom kvadratne matrice $[\gamma]$ se definiše na sledeći način:

$$P(\lambda) = \det \begin{bmatrix} \gamma - \lambda & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma - \lambda & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & \gamma - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Posle izračunavanja determinante i izjednačavanja karakterističnog polinoma sa nulom $P(\lambda) = 0$ dobija se karakteristična jednačina u sledećem obliku:

$$-\lambda^3 + 3\gamma\lambda^2 + 3(\gamma_m^2 - \gamma^2)\lambda + (\gamma^3 + 3\gamma_m^3 - 3\gamma\gamma_m^2) = 0 \quad (4.54)$$

Rešavanjem karakteristične jednačine dobijaju se sledeće karakteristične vrednosti matrica, od kojih prve dve predstavljaju dvostruku nulu karakteristične jednačine:

1. karakteristična vrednost $\lambda_1 = \gamma - \gamma_m$
2. karakteristična vrednost $\lambda_2 = \gamma - \gamma_m$
3. karakteristična vrednost $\lambda_3 = \gamma + 2\gamma_m$

Korak 2: određivanje karakterističnih vektora

Određivanje karakterističnih vektora svodi se na rešavanje sistema linearnih homogenih jednačina za pojedine karakteristične vrednosti matrice γ . Prvo se određuje karakteristični vektor-kolona koji odgovara karakterističnoj vrednosti λ_1 .

$$\begin{bmatrix} \gamma - \lambda_1 & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma - \lambda_1 & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & \gamma - \lambda_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

zamenom vrednosti za $\lambda_1 = \gamma - \gamma_m$ se dobija:

$$\begin{bmatrix} \gamma_m & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & \gamma_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Pošto je sistem singularan, moraju se 2 rešenja pretpostaviti u vektoru v_1 , a treće se dobija kao linearna kombinacija predhodna dva. Pretpostavimo da su dva rešenja $v_{a1} = 1$ i $v_{b1} = -1/2$. Treće rešenje se dobija iz bilo koje vrste:

$$v_{c1} = -\frac{\gamma_m v_{a1} + \gamma_m v_{b1}}{\gamma_m} = -1 + 1/2 = -1/2 \quad (4.57)$$

Na isti način se može odrediti drugi sopstveni vektor v_2 za istu karakterističnu vrednost $\lambda_2 = \lambda_1$. Pretpostavimo da su dva rešenja $v_{a2} = 0$ i $v_{b2} = \sqrt{3}/2$. Treće rešenje se dobija iz bilo koje vrste:

$$v_{c2} = -\sqrt{3}/2 \quad (4.58)$$

Treći karakteristični vektor-kolona koji odgovara karakterističnoj vrednosti λ_3 se dobija na osnovu izraza.

$$\begin{bmatrix} \gamma - \lambda_3 & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma - \lambda_3 & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & \gamma - \lambda_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{a3} \\ v_{b3} \\ v_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

Zamenom vrednosti za $\lambda_3 = \gamma + 2\gamma_m$ se dobija:

$$\begin{bmatrix} -2 \cdot \gamma_m & \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & -2 \cdot \gamma_m & \gamma_m \\ \gamma_m & \gamma_m & -2 \cdot \gamma_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{a3} \\ v_{b3} \\ v_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Ukoliko se odabere vrednost za $v_{a3} = 1$ i $v_{b3} = 1$, dobija se na osnovu prve vrste matrice rešenje:

$$v_{c3} = -\frac{-2\gamma_m v_{a3} + \gamma_m + v_{b3}}{\gamma_m} = 2 - 1 = 1 \quad (4.61)$$

Konačan oblik matrice transformacije ima oblik:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

Matrica 4.62 identična je matrici transformacije u α , β i 0 transformaciju Q prema 4.23. Ovim smo pokazali da opšti pristup omogućava transformaciju simetrične i ciklične matrice u α , β i 0 komponente.

Može se uočiti da postoji bezbroj mogućih matrica transformacije trofaznih simetričnih i cikličnih matrica elemenata elektroenergetskog sistema, koje zavise od izbora rešenja vektora-kolona homogenih linearnih jednačina.

4.3.4 Primena modalne transformacije na horizontalni vod sa simetričnim rasporedom provodnika

Opšti oblik prizvoda matrica $[Z]$ i $[Y]$ horizontalnog voda sa simetričnim provodnicima ima oblik:

$$[ZY] = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & D \\ C & B & A \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

Određivanjem nula karakterističnog polinoma dobijene su sledeće karakteristične vrednosti matrice $[ZY]$:

1. $\lambda_1 = A + C + B \cdot M$
2. $\lambda_2 = A - C$
3. $\lambda_2 = A + C + B \cdot N$

Na osnovu gornjih rešenja karakteristične vrednosti matrice $[ZY]$ određeni su karakteristični vektori-kolone $[v_1]$, $[v_2]$ i $[v_3]$.

$$[v_1] = \begin{bmatrix} 1 \\ M \\ 1 \end{bmatrix}, [v_2] = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, [v_3] = \begin{bmatrix} 1 \\ N \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

gde su:

$$M = \frac{E - A - C + \sqrt{(A + C - E)^2 + 8BD}}{2B} \quad (4.65)$$

$$N = \frac{E - A - C - \sqrt{(A + C - E)^2 + 8BD}}{2B} \quad (4.66)$$

Ovi izrazi se mogu proširiti na bilo koji raspored provodnika, ali bi se morala za taj slučaj rešavati druga karakteristična jednačina i formirati odgovarajuća matrica transformacije. Matrica transformacije u ovom slučaju ima oblik:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ M & 0 & N \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Inverzna matrica transformacije ima sledeći oblik:

$$[T]^{-1} = \frac{1}{2(N - M)} \begin{bmatrix} N & -2 & N \\ N - M & 0 & -(N - M) \\ -M & 2 & -M \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

Primenom modalne transformacije matricna diferencijalna jednačina telegrafičara 4.38 raspada se na 3 nezavisne jednačine telegrafičara u obliku:

$$-\frac{\partial^2 [U_k(x)]}{\partial x^2} = [\gamma_k]^2 \cdot [U_k(x)] \quad (4.69)$$

gde je $k = 1, 2, 3$ redni broj prirodnog moda, a $\gamma_k = \sqrt{\lambda_k}$.

Matrica $[\gamma_k]$ dobija se na sledeći način:

$$[\gamma_k] = [T]^{-1}[Z][Y][T] \quad (4.70)$$

Odnosno, kada se napiše u razvijenom obliku, izračunava se sledećim operacijama:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2(Q - P)} \begin{bmatrix} N & -2 & N \\ N - M & 0 & -(N - M) \\ -M & 2 & -M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & D \\ C & B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ M & 0 & N \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

Na ovaj način se može u višefazom sistemu vodova modelovati prostiranje talasa bez međusobnog delovanja između komponentnih sistema.

Za praktičnu primenu pri proračunu sklopnih prenapona dovoljno je koristiti uprošćenje da je vod idealno transponovan. Samo izuzetno se pojavljuje potreba za tačnijim proračunima.

Ne sme se zaboraviti da se matrica impedansi razlikuje po svojoj strukturi od matrice prostiranja. U posebnom slučaju horizontalnog simetričnog voda matrica impedansi ima oblik:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{12} \\ Z_{13} & Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

Za simetričnu matricu impedansi $[Z]$ potrebno je napraviti karakterističan polinom izračunavanjem determinante:

$$P(\lambda) = \begin{vmatrix} Z_{11} - \lambda & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{22} - \lambda & Z_{12} \\ Z_{13} & Z_{12} & Z_{11} - \lambda \end{vmatrix} \quad (4.73)$$

odnosno:

$$P(\lambda) = -\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C \quad (4.74)$$

gde su:

$$A = -2Z_{11} \quad (4.75)$$

$$B = Z_{11}^2 + Z_{13}^2 + 2Z_{12}^2 \quad (4.76)$$

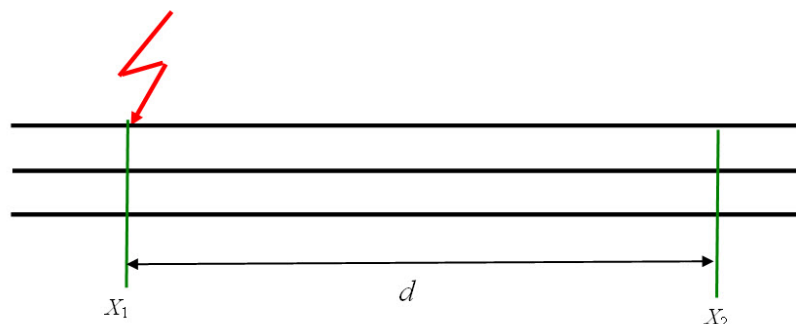
$$C = Z_{22}Z_{11}^2 + 2Z_{13}Z_{12}^2 \quad (4.77)$$

Zbog složenosti postupka ovaj polinom nećemo rešavati analitički, već se mogu za svaki konkretan slučaj odrediti nule polinoma λ_1, λ_2 i λ_3 .

4.3.5 Primer dvobrzinskog prostiranja talasa

Na slici 4.3 prikazan je deo trofaznog dalekovoda na kome se proučavaju efekti dvobrzinskog prostiranja talasa usled atmosferskog pražnjenja. Do pražnjenja je došlo u fazu A u tački X_1 , a talasi se posmatraju u tački X_2 . Dalekovod je dovoljno dugačak da se mogu zanemariti efekti višestrukih refleksija. Potrebno je odrediti koliki će se pojaviti napon u tački X_2 , koja je na rastojanju d od tačke u kojoj je došlo do pražnjenja, smatrajući vod idealnim i idealno transponovanim. Usvojeni su sledeći parametri sistema:

- Karakteristična impedansa kanala groma $Z_G = 200 \, \Omega$,
- Karakteristična impedansa voda u α komponentnom sistemu $Z_\alpha = 400 \, \Omega$,
- Karakteristična impedansa voda u nultom komponentnom sistemu $Z_o = 600 \, \Omega$,



Slika 4.3: Deo trofaznog dalekovoda na kome se proučavaju efekti dvobrzinskog prostiranja talasa usled atmosferskog pražnjenja

- Dužina voda na kojoj se posmatraju efekti prostiranja $d=3$ km.
- Brzina prostiranja talasa u α i β komponentnom sistemu je jednaka brzini svetlosti $v = 300\,000$ km/s.
- Brzina prostiranja u nultom komponentnom sistemu je $v_o = 250\,000$ km/s.

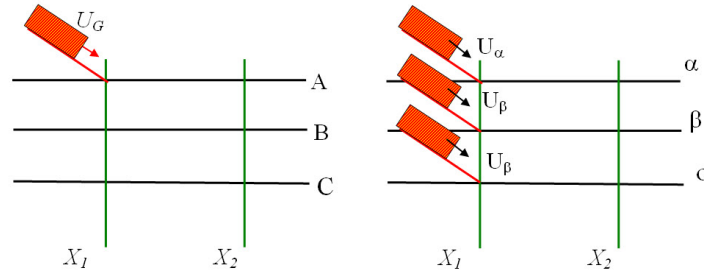
Pri proračunu su uvedene sledeće pretpostavke:

- Kanal groma se može zameniti vodom karakteristične impedanse Z_G , po kome se prostire naponski talas atmosferskog pražnjenja. Karakteristična impedansa kanala groma se smatra konstantnom iako se ona realno menja u toku procesa pražnjenja zbog promene dimenzija jonizovanog prostora koji čini kanal groma.
- Povratni put kroz zemlju se posmatra kao frekvenciski nezavistan. Usvojena karakteristična impedansa nultog komponentnog sistema veća je od karakterističnih impedansi u α i β komponentnim sistemima, ali se smatra konstantnom. U realnom sistemu bi se karakteristična impedansa menjala u zavisnosti od frekvencije procesa koji se posmatra i to tako da bi pri vrlo visokim frekvencijama bila identična kao i karakteristična impedansa u druga dva komponentna sistema. Pri nižim frekvencijama, kada dolazi do pomeranja povratnog puta na veću dubinu kroz zemlju, karakteristična impedansa nultog komponentnog sistema se povećava.
- Brzina prostiranja u nultom komponentnom sistemu takođe je usvojena nešto niža nego u ostala dva komponentna sistema, ali se smatra nezavisnom od frekvencije procesa koji se posmatra. U realnom sistemu brzina prostiranja se smanjuje pri nižim frekvencijama odvijanja procesa.

Sistem se posmatra kao da se proces odvija sa konstantnom učestanošću, iako se talas pražnjenja atmosferskog porekla odlikuje relativno širokim spektrom učestanosti zbog različite strmine talasa na čelu i začelju.

Radi jednostavnijeg proračuna naponski talas usled atmosferskog pražnjenja koji se prostire po kanalu groma zamenjuje se talasom pravougaonog čela i beskonačnog trajanja, amplitude $U_G = 600$ kV.

Na slici 4.4 prikazana je zamenska šema sistema u faznim koordinatama (levo) i u α , β i 0 komponentnim sistemima (desno). Na mestu atmosferskog pražnjenja, u tački X_1 , na fazi A priključen je vod kojim se zamenjuje kanal groma. Kako jedino na fazi A dolazi do atmosferskog pražnjenja, po kanalu groma na fazi A prostire se prenaponski talas.



Slika 4.4: Na slici levo prikazan je sistem u faznim koordinatama sa atmosferskim udarom u fazu A, a na slici desno sistem sa atmosferskim udarom transformisan u α , β i nulte koordinate

Napon talasa atmosferskog pražnjenja dobija se sledećom transformacijom u komponentne sisteme.

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_G \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

Nakon transformacije se dobija:

$$u_\alpha = \frac{2}{3}U_G \quad (4.79)$$

$$u_\beta = 0 \quad (4.80)$$

$$u_o = \frac{1}{3}U_G \quad (4.81)$$

Na mestu udara groma dolazi do prelamanja talasa usled prelaska sa kanala groma na fazni provodnik. Koeficijenti prelamanja u α i nultom komponentnom sistemu su:

$$\alpha_\alpha = \frac{2Z_\alpha/2}{Z_G + Z_\alpha/2} \quad (4.82)$$

$$\alpha_0 = \frac{2Z_0/2}{Z_G + Z_0/2} \quad (4.83)$$

kada se izračuna, dobija se:

$$\alpha_\alpha = 1 \quad (4.84)$$

$$\alpha_o = 1.2 \quad (4.85)$$

Posle prelamanja po vazдушnom vodu putuje talas u α i 0 komponentnim sistemima:

$$u_{\alpha 1} = \frac{2}{3} \cdot U_G \cdot h(t) \quad (4.86)$$

$$u_{01} = 0.4 \cdot U_G \cdot h(t) \quad (4.87)$$

gde je $h(t)$ Hevisajdova odskočna funkcija.

Kada se zameni vrednost za amplitudu talasa napona atmosferskog pražnjenja, dobija se:

$$u_{\alpha 1} = 400 \cdot h(t) \quad (4.88)$$

$$u_{01} = 240 \cdot h(t) \quad (4.89)$$

Vreme prostiranja duž deonice d u α komponentnom sistemu je:

$$T_\alpha = \frac{d}{v} \quad (4.90)$$

Kada se izračuna, dobija se: $T_\alpha = 10 \mu s$.

Vreme prostiranja duž deonice d u nultom komponentnom sistemu je:

$$T_o = \frac{d}{v_o} \quad (4.91)$$

Kada se izračuna, dobija se: $T_o = 12 \mu s$.

Napon u tačku X_2 stiže sa vremenskim zakašnjenjem usled prostiranja. U α komponentnom sistemu napon u tački X_2 , je:

$$U_{\alpha 2}(t) = \frac{2}{3} U_G \cdot h(t - T_\alpha) \quad (4.92)$$

ili, kad se zamene vrednosti:

$$U_{\alpha 2}(t) = 400 \cdot h(t - 10) \text{ (kV)} \quad t(\mu s) \quad (4.93)$$

U nultom komponentnom sistemu napon u tački X_2 , je:

$$U_{02}(t) = 0.4 \cdot U_G \cdot h(t - T_0) \quad (4.94)$$

ili, kad se zamene vrednosti:

$$U_{02}(t) = 240 \cdot h(t - 12) \text{ (kV)} \quad t(\mu s) \quad (4.95)$$

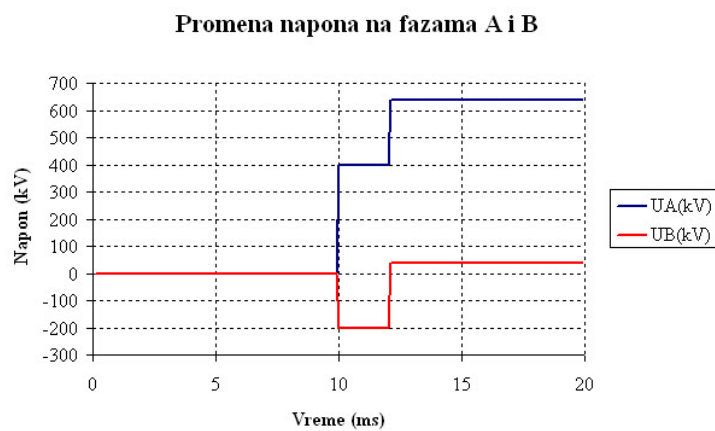
Pošto se vod smatra idealnim, pri prostiranju duž deonice dužine d uopšte ne dolazi do prigušenja i izobličenja talasa. Napon u faznim koordinatama dobija se inverznom transformacijom na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} \quad (4.96)$$

Pošto je napon usled atmosferskog pražnjenja u β komponentnom sistemu nula, nakon prostiranja napon β komponentnom sistemu ostaje jednak nuli. Kada se izračunaju brojčane vrednosti za napone na pojedinim fazama u tački X_2 , dobijaju se izrazi 4.97, gde je vreme t izraženo u μs :

$$\begin{aligned} U_{A2}(t) &= 400 \cdot h(t - 10) + 240 \cdot h(t - 12) \text{ (kV)} \\ U_{B2}(t) &= -200 \cdot h(t - 10) + 240 \cdot h(t - 12) \text{ (kV)} \\ U_{C2}(t) &= -200 \cdot h(t - 10) + 240 \cdot h(t - 12) \text{ (kV)} \end{aligned} \quad (4.97)$$

Kada se skicira vremenski tok napona na pojedinim fazama, dobijaju se dijagrami za faze A i B na slici 4.5. Napon na fazi C identičan je naponu na fazi B. Može se uočiti da se na fazi B, odnosno C, koje nisu pogođene udarom, pojavljuje talas suprotnog polariteta.



Slika 4.5: Skica napona na fazama A i B pri idealizovanom dvobrzinskom prostiranju po trofaznom vodu

Poglavlje 5

Mešovite mreže

5.1 Kombinovana metoda rešavanja mešovitih mreža

Kod proračuna sklopnih prenapona pogodno je vodove zameniti raspoređenim parametrima, na kojima se proračun radi primenom putujućih talasa, a ostali elementi se zamenjuju koncentrisanim parametrima, posebno ako su amplitudno nelinearni. Ovo se odnosi na modele nelinearnih karakteristika magnećenja transformatora, kao i odvodnike prenapone i eventvano nelinearne modele električnog luka u prekidačima.

Prilikom proračuna sklopnih prenapona u elektroenergetskim sistemima po pravilu se proračuni rade trofazno. Izuzetak su slučajevi kada se rade edukativni primeri ili se vrši modelovanje procesa u mrežama koje nisu trofazne.

Mešovita mreža je ona koja sadrži elemente sa koncentrisanim parametrima i elemente sa raspodeljenim parametrima. Za mešovite mreže vezan je pojam zajedničkog čvora. Čvor je zajednički ako se čvor koncentrisane mreže poklapa sa čvorom raspodeljene mreže. Prilikom proračuna sklopnih prenapona pogodnije je primenjivati modele mešovitih mreža, mada se mogu pri približnim proračunima koristiti samo modeli mreža sa raspoređenim parametrima ili samo modeli mreža sa koncentrisanim parametrima.

Kada se modeluju vodovi, tada je pogodno vršiti transformaciju trofaznog sistema u komponentne sisteme. Razlaganje na komponentne sisteme omogućava jednostavno modelovanje frekvencijski zavisnih karakteristika u nultom komponentnom sistemu koji obuhvata povratni put kroz zemlju. Karakteristike povratnog puta kroz zemlju su različita brzina prostiranja i različito frekvencijski zavisno prigušenje talasa koji se prostiru po nultom komponentnom sistemu od talasa koji se prostiru samo po fazama. Za modelovanje prelaznih procesa pogodnija je transformacija u α , β i 0 komponente, jer su elementi matrica transformacija realni brojevi. Za rešavanje ustaljenih stanja mogu se koristiti

matrice sa realnim brojevima, kao i simetrične komponente sa kompleksnim brojevima.

Kada su u pitanju nelinearni i nestacionarni elementi, tada je jednostavnije da se svi proračuni rade u trofaznom sistemu. Na primer, postepeno isključivanje pojedinih polova prekidača modeluje se prekidanjem pojedinih grana u trofaznom kolu, što je znatno složenije kada se vrši transformacija u komponentne sisteme.

5.2 Metoda kompenzacije

Pri rešavanju mešovitih mreža koristi se metoda kompenzacije. Po ovoj metodi može se ukloniti jedan ili više elemenata, a njihov uticaj se obuhvata generatorom takvih karakteristika da se režim u kolu posle kompenzacije ne razlikuje od režima u prvobitnoj mreži. Po ovoj metodi uticaj delova mreže sa koncentrisanim parametrima na delove mreže sa raspodeljenim, i obrnuto, obuhvata se ekvivalentnim generatorima koji se priključuju u zajedničkim čvorovima. U složenoj mreži može biti više zajedničkih čvorova, u kojima se spajaju mreže sa raspoređenim i mreže sa koncentrisanim parametrima.

Prilikom proračuna mešovite mreže, u svakom koraku proračuna se određuju ekvivalentni generatori u zajedničkim čvorovima. Ukoliko se vrše analize sklopnih prenapona u trofaznim mešovitim mrežama, potrebno je izvršiti transformaciju trofaznih veličina u komponente sistema u svim zajedničkim čvorovima. Ekvivalentni generatori u mrežama sa raspoređenim parametrima su u komponentnim sistemima. Inverznom transformacijom se određuju generatori u faznim koordinatama, kojima se obuhvata uticaj raspodeljenog dela mreže na deo mreže sa koncentrisanim parametrima.

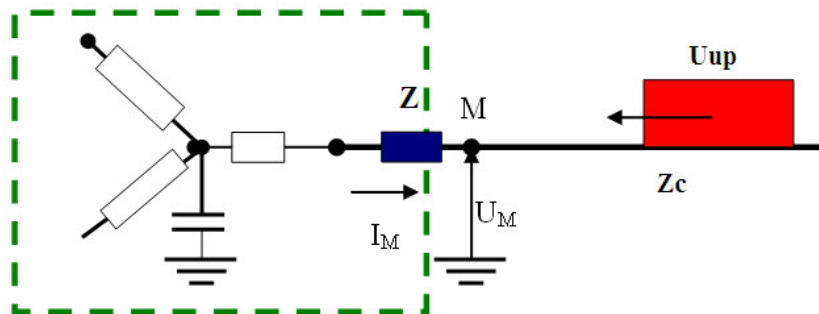
Razlikujemo dva tipa zajedničkih čvorova:

1. Zajednički čvor sa priključenom rednom impedansom Z , koja je najčešće induktivni kalem ili redna veza induktivnog kalema i otpornika (model generatora, transformatora ili zajednička induktivna grana koja modeluje blok generator-transformator).
2. Zajednički čvor sa priključenom otočnom granom prema zemlji (najčešće kapacitet sabirnica ili ekvivalentna kapacitivnost namotaja transformatora).

5.2.1 U zajedničkom čvoru sa strane koncentrisane mreže vezana je induktivna grana

Na slici 5.1 prikazan je slučaj kada je u tački u kojoj se vod predstavljen raspoređenim parametrima spaja sa delom mreže u kojoj je element priključen u zajednički čvor M

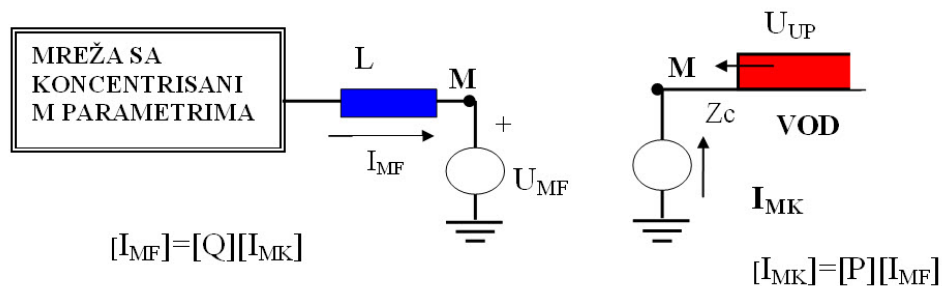
induktivna grana, predstavljena matricom impedansi $[Z]$ 3 x 3 sopstvenih i međufaznih induktiviteta i rednih otpornosti usled gubitaka.



Slika 5.1: Zamenska šema mreže u kojoj se deo mreže predstavljen koncentrisanim parametrima spaja rednom granom sa vodom predstavljenim raspoređenim parametrima u zajedničkom čvoru

Mreža se može podeliti na deo mreže modelovan koncentrisanim parametrima i deo mreže modelovan preko vodova.

Na slici 5.2 prikazana je mreža sa slike 5.1 kod koje je izvršeno razdvajanje mreža i primenjen princip kompenzacije.



Slika 5.2: Ekvivalentna šema kod koje je izvršeno razdvajanje mreža i primenjen princip kompenzacije

Uticaj jednog dela mreže na drugi se modeluje metodom kompenzacije, odnosno priključivanjem idealnog naponskog, odnosno strujnog izvora. Rešavanjem mreže sa koncentrisanim parametrima u trenutku t dobija se tročlani vektor faznih struja $[I_{MF}]$ kroz redni elemenat mreže sa koncentrisanim parametrima koji je vezan za zajednički čvor M. Transformacijom u komponentne sisteme dobija se tročlani vektor struja idealnog strujnog generatora u mreži sa raspoređenim parametrima $[I_{MK}]$ u komponentnim sistemima. Proračunom prelaznog režima u mreži sa vodovima metodom putujućih talasa dobijaju se upadni naponi u komponentnim sistemima koji dolaze u zajednički čvor M, u kome

se izračunava napon u komponentnim sistemima $[U_{MK}]$, koji posle transformacije u fazne koordinate predstavlja napon idealnog naponskog izvora u $[U_{MF}]$ u faznim koordinatama u čvoru M u mreži sa koncentrisanim parametrima. Napon u zajedničkom čvoru M se izračunava iz izraza 5.2 u mreži sa raspoređenim parametrima, gde je data i transformacija napona iz komponentnih u fazne koordinate:

$$[U_{MK}] = 2 \cdot [U_{up}] - [Z_c \cdot I_{MK}] \quad (5.1)$$

$$[U_{MF}] = [Q] \cdot [U_{MK}] \quad (5.2)$$

gde su:

$[U_{MK}]$ - vektor komponentnih napona u zajedničkom čvoru M koji se transformiše u fazne napone $[U_{MF}]$,

$[U_{MF}]$ - vektor faznih napona u zajedničkom čvoru M, koji se koristi u mreži sa koncentrisanim parametrima kao izvor na osnovu koga se određuje vektor struja $[I_{MF}]$ za sledeći korak, sve izraženo u faznim koordinatama,

$[U_{up}]$ - vektor upadnih komponenti napona u komponentnim sistemima, koji nailazi po vodovima u čvor M,

$[Z_c]$ - dijagonalna matrica karakterističnih impedansi voda u komponentnim sistemima,

$[I_{MF}]$ - vektor struja izračunat u mreži sa skoncentrisanim parametrima, koja se koristi kao strujni izvor u mreži sa raspodeljenim parametrima u komponentnim sistema $[I_{MK}]$ nakon transformacije,

$[Q]$ - matrica transformacije iz komponentnih u fazne veličine, prema 4.23, na strani 132,

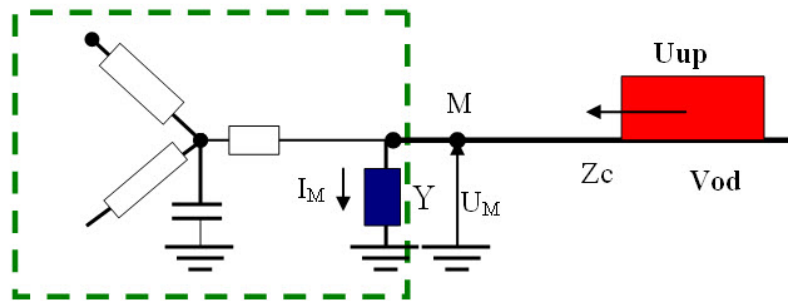
$[P]$ - matrica transformacije iz faznih u komponentne u veličine, prema 4.22,

Vektori trenutnih vrednosti faznih napona, komponentnih napona, faznih struja i komponentnih struja imaju sledeći oblik:

$$[U_{MF}] = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, [U_{MK}] = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_o \end{bmatrix}, [I_{MF}] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, [I_{MK}] = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

5.2.2 U zajedničkom čvoru sa strane koncentrisane mreže priključena kapacitivna grana

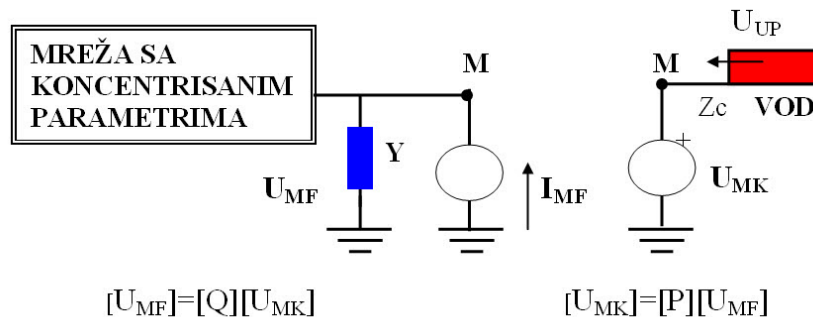
Na slici 5.3 prikazana je kompletna mreža kod koje je u zajedničkom čvoru M priključena u delu mreže sa koncentrisanim parametrima otočno prema zemlji kapacitivna grana predstavljena admitansom Y . Ova grana može da bude sastavljena od dve paralelne grane, kondenzatora i omske odvodnosti.



Slika 5.3: Kompletna mreža kod koje je u zajedničkom čvoru priključena otočna admitansa prema zemlji

Na slici 5.3 admitansa $[Y]$ predstavlja matricu 3×3 sopstvenih i međusobnih kapacitivnosti i odvodnosti.

Na slici 5.4 prikazane su razdvojene podmreže sa koncentrisanim parametrima i deo mreže sa raspoređenim parametrima, u kojima ekvivalentni generatori u potpunosti zamenjuju deo mreže koji reprezentuju.



Slika 5.4: Razdvojene mreže sa koncentrisanim i raspoređenim parametrima, sa idealnim izvorima koji kompenzuju drugi deo mreže, sa otočnom skoncentrisanom impedansom (kondenzatorom) vezanom u zajedničkom čvoru

Vektor struja strujnog izvora u faznim koordinatama u mreži sa koncentrisanim parametrima $[I_{MF}]$ izračunava se na osnovu struje na vodu koji vezan za čvor M u mreži

sa raspoređenim parametrima $[I_{MK}]$ u komponentnim sistemima na osnovu izraza:

$$[I_{MK}] = \frac{[U_{MK}] - 2 \cdot [U_{up}]}{Z_c} \quad (5.4)$$

$$[I_{MF}] = [P] \cdot [I_{MK}] \quad (5.5)$$

U izrazu 5.5 sve veličine predstavljaju vektore sa po 3 elementa. Matrica $[Z_c]$ predstavlja dijagonalnu matricu 3x3 karakterističnih impedansi u komponentnim sistemima, oblika:

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} Z_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Z_\beta & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Napon na kondenzatoru $[U_{MF}]$ u faznim koordinatama se izračunava u kolu sa koncentrisanim parametrima rešavanjem diferencijalnih jednačina. Po pravilu admitansa ima kapacitivni karakter ili se može predstaviti kao paralelna veza kondenzatora kapaciteta C i omske provodnosti G . Naponi na kondenzatorima prema zemlji $[U_{MF}]$ se dobija rešavanjem jednačina stanja. Transformacijom vektora $[U_{MF}]$ u komponentne sisteme dobija se napon u mreži sa raspoređenim parametrima u komponentnim sistemima $[U_{MK}]$ na osnovu koga se određuju odbijene komponente iz čvora M .

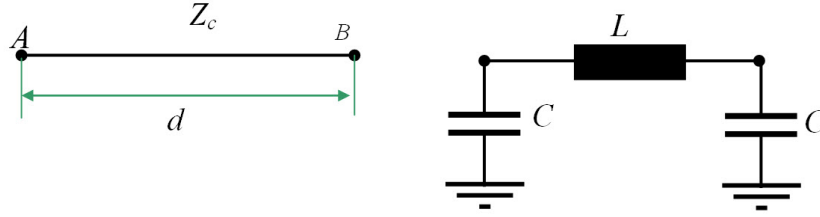
5.3 Određivanje ustaljenog stanja

Prilikom proračuna sklopnih prenapona pojavljuje se potreba da se vrši proračun kada mreža iz jednog stacionarnog prostoperiodičnog stanja prelazi u drugo operacijom sklopnih aparata. Proračunom ustaljenog stanja se određuju početni uslovi za proračun prelaznog režima. Pri određivanju početnih uslova, potrebno je sve vodove zameniti ekvivalentnom šemom sa koncentrisanim parametrima.

5.3.1 Zamena vodova koncentrisanim elementima

Pri rešavanju ustaljenog stanja svi vodovi se zamenjuju koncentrisanim parametrima, na taj način što se pravi Π ekvivalent posmatrane deonice voda. Podužni induktivitet voda se množi sa dužinom i dobija koncentrisan induktivitet, a podužna kapacitivnost voda pomnožena sa polovinom dužine predstavlja se kao koncentrisana kapacitivnost na svakom od krajeva voda, kao na slici 5.5.

Osnovni parametri vodova na osnovu kojih se dobijaju koncentrisani parametri su:



Slika 5.5: Pretvaranje voda predstavljenog raspoređenim parametrima i II šemu sa koncentrisanim parametrima

$Z_c = \sqrt{l/c}$ - karakteristična impedansa nadzemnog voda (Ω),

$v_c = 1/\sqrt{l c}$ - brzina prostiranja talasa u vakuumu, $v_c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s,

$v_k = 1/\sqrt{l_k c_k}$ - brzina prostiranja talasa po kablovima,

l_k, c_k - podužni induktivitet i kapacitet kablova,

$v_r = v_k/v_c$ - relativna brzina prostiranja u odnosu na brzinu prostiranja u vakuumu u relativnim jedinicama (rj),

d - dužina voda (m).

Koncentrisana kapacitivnost C i induktivnost L sa slike 5.5 dobijaju se iz izraza:

$$\begin{aligned} L &= \frac{Z_c}{v_c \cdot v_r} \cdot d \\ C &= \frac{1}{Z_c \cdot v_c} \cdot d \end{aligned} \quad (5.7)$$

Modeli vodova za rešavanje stacionarnog stanja se formiraju u komponentnim sistemima. Moguće je koristiti simetrične komponente ili transformacije sa realnim matricama kao na primer $\alpha, \beta, 0$. Postoji značajna razlika u karakteristikama između direktnog odnosno α i nultog komponentnog sistema. Međutim, direktni i inverzni sistem, odnosno α i β sistem se smatraju identičnim (sem kada se u mreži nalaze obrtne mašine). Kod određivanja ustaljenog stanja za izračunavanje početnih uslova se ne koriste tačnije transformacije trofaznih veličina u komponentne sisteme koje obuhvataju razlike u podužnim parametrima pojedinih faza vodova najviših napona kada se ne vrši transpozicija faza. Upotreba modalnih transformacija u komponentne sisteme bi bilo komplikovano, a ne bi se mogla postići velika tačnost jer je već uvedena aproksimacija pri zameni vodova koncentrisanim parametrima. Koncentrisane kapacitivnosti i induktivnosti dobijene na ovaj način postaju deo mreže sa koncentrisanim parametrima u komponentnim sistemima. Pri proračunu ustaljenih režima koriste se sledeća uprošćenja:

- zanemaruje se podužna promena napona i struja kod dužih vodova,

- Zanimaruje se efekat produženog vremena prostiranja kod modelovanja nulte komponente voda zbog povratnog puta kroz zemlju,
- posmatraju se samo idealno transponovani vodovi kod kojih su α i β parametri međusobno jednaki, samo se nulti sistem razlikuje. To omogućava jednostavne transformacije u komponentne sistema pomoću simetričnih i cikličnih matrica transformacije.

Zbog nedovoljno tačnog modelovanja početnih uslova se može pojaviti prelazni proces u trenutku početka proračuna prelaznog režima. Taj problem se rešava na taj način što se nakon početka proračuna odlaže početak registracije rezultata dok se prelazni proces ne priguši.

5.3.2 Simetrično ustaljeno stanje

Proračun prelaznog režima u delu mreže sa koncentrisanim parametrima se sprovodi u trofaznom sistemu. Kada se rešava ustaljeno stanje mreže sa koncentrisanim elementima u koju su dodati i vodovi zamenjeni odgovarajućim koncentrisanim parametrima u vidu Π šeme, tada se proračun radi u komponentnim sistemima. To omogućava simulaciju ustaljenog režima sa kvarovima. Ustaljeno stanje koje predhodi prelaznom procesu može biti simetrično i nesimetrično.

Na osnovu matričnog oblika jednačina stanja u generalnom obliku koje su prikazane u izrazu 2.32 na strani 32, može se napisati kompleksni izraz koji opisuje ustaljeno simetrično stanje na taj način što se elementi matrica koji se množe izvodom električnih veličina kod jednačina stanja pretvaraju u elemenat pomnožen sa kompleksnom kružnom učestanošću $j\omega$. Izraz 5.8 napisan je za ustaljeni režim, pa se vrednosti elemenata odnose na direktni sistem ili α komponentni sistem u zavisnosti koja se trofazna transformacija sprovodi.

$$\begin{bmatrix} G + j\omega C & K \\ -K^T & R + j\omega L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

U izrazu 5.8 oznake imaju sledeće značenje:

$[G + j\omega C]$ -submatrica kompleksnih admitansi svih elemenata sistema,

$[R + j\omega L]$ - submatrica kompleksnih impedansi svih elemenata sistema,

$[K]$ -submatrica veza između kapacitivnih i induktivnih elemenata. Elementi matrice $[K]$ imaju vrednosti samo ± 1 ili 0 u zavisnosti od strukture grafa mreže.

$[\underline{U}, \underline{I}]$ -kompleksni naponi i struje koji se dobijaju rešavanjem ovog sistema jednačina.

$[\underline{E}]$ - vektor kompleksnih ems svih generatora u sistemu.

Pošto je sistem simetričan, rešavanje se vrši samo u direktnom komponentnom sistemu. Ukoliko se radi u sistemu $\alpha, \beta, 0$ transformacije, veličine u β sistemu su samo fazno pomerene za 90° u odnosu na α sistem. Pri simetričnom stanju u nultom sistemu naponi i struje su 0, dok se kod nesimetričnog stanja primenjuje princip superpozicije.

Izračunavanje nepoznatih kompleksnih napona i struja u simetričnom režimu vrši se rešavanjem sistema jednačina u kompleksnom obliku 5.8 inverzijom matrice kompleksnih elemenata sistema.

$$\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G + j\omega C & K \\ -K^T & R + j\omega L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

5.3.3 Princip superpozicije pri analizi kratkih spojeva

Proračun kratkih spojeva po principu superpozicije radi se na sledeći način:

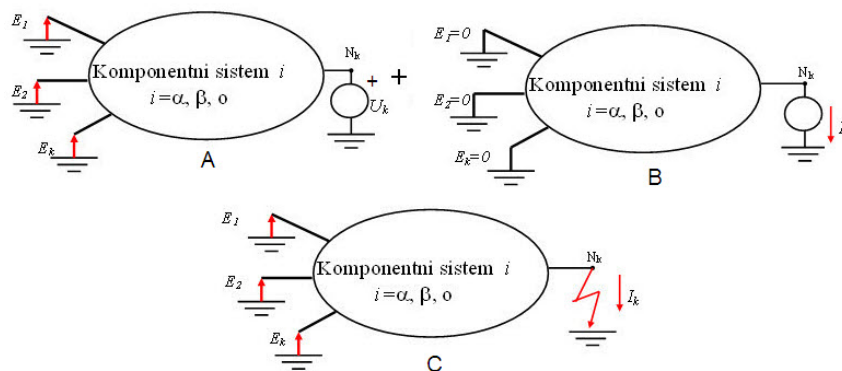
- Odredi se ustaljeno stanje u mreži u kojoj nema kvara i odredi napon na mestu kvara $\underline{U}_k$ kada kvara ne bi bilo (slika A).
- Odredi se ustaljeno stanje u mreži u kojoj su svi izvori napravljeni pasivnim (elektromotorne sile su proglašene da su nula), a na mestu kvara se nalazi ekvivalentan strujni izvor koji izaziva proticanje struja kvara po granama mreže kao pri kratkom spoju (slika B).
- Superpozicijom ova dva stanja dobija se sistem sa kvarom, kod koga se naponi na mestu kvara poništavaju, a elektromotorna sila svih izvora izaziva struje kvara (slika C).

Na slici 5.6 je ilustrovan način određivanja parametara ustaljenog režima pri nesimetričnom režimu primenom principa superpozicije:

5.3.4 Nesimetrični režimi za pojedine tipove kvarova

U slučaju da je sistem pre operacije koja je izaziva prelazni režim, bio u ustaljenom režimu sa nesimetričkim kvarom, tada parametri tog režima definišu početne uslove za dalji proračun trenutnih napona i struja. Da bi se proračun obavio primenom $\alpha, \beta, 0$ transformacije pojednostavio, razmatraju se samo određeni tipovi kvarova:

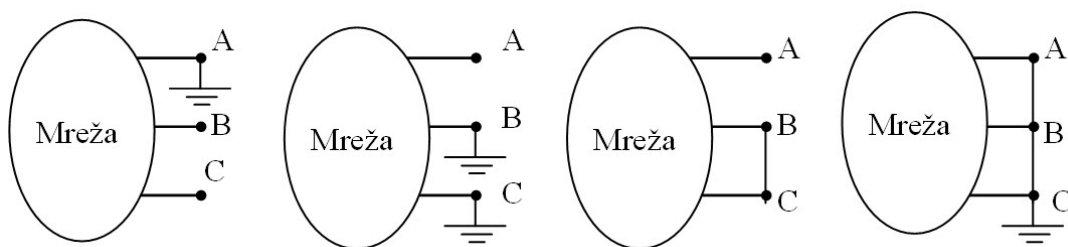
1. jednopolni spoj sa zemljom faze A,



Slika 5.6: Princip superpozicije pri određivanju režima za vreme kvara

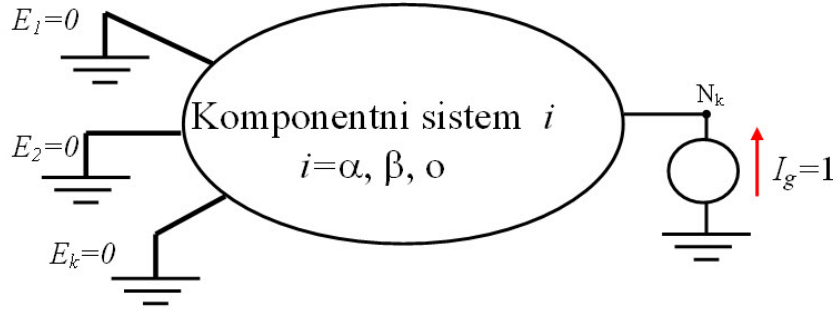
2. dvopolni kratak spoj faza B i C,
3. dvopolni kratak spoj faza B i C sa zemljom,
4. trofazni kratak spoj.

Svi ostali tipovi kvarova se mogu svesti na predhodne jednostavnom prenumeracijom faza. Umesto $\alpha, \beta, 0$ transformacije mogu se koristiti i simetrične komponente, stim što bi se struje kvarova u pojedinim komponentnim sistemima na različit način izračunavale. Na slici 5.7 prikazani su tipovi kvarova koji se razmatraju.



Slika 5.7: Tipovi nesimetričnih kvarova koji se razmatraju u ustaljenom stanju

Za rešavanje nesimetričnih režima potrebno je poznavati ekvivalentnu impedansu sistema merenu odočno sa mesta kvara u α i nultom komponentnom sistemu. Proračun ovih impedansi vrši se priključivanjem jediničnog strujnog generatora čija je amplituda struje $I_g = 1$ na sistem koji je učinjen pasivnim kao na slici 5.8. Smatra se da su karakteristike pasivnih elemenata mreža u α i β komponentnim sistemima identične i zbog toga se račun sprovodi sa pojednostavljenjem da je $Z_\beta = Z_\alpha$. Sistem se pravi pasivnim tako što su svi generatori premošćeni i uzemljeni.



Slika 5.8: Određivanje ekvivalentne impedanse sistema merene očno sa mesta kvara

Dobijanje ekvivalentne impedanse merene očno sa mesta kvara svodi se na rešavanje sistema:

$$\begin{bmatrix} G_i + j\omega C_i & K \\ -K^T & R_i + j\omega L_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, 0 \quad (5.10)$$

gde je $\underline{1}$ vektor struja strujnih izvora čiji su svi elementi jednaki 0, osim elementa koji odgovara čvoru sa kvarom N_K , koji je jednak 1.

Impedansa α sistema brojno je jednaka naponu u čvoru sa kvarom N_K u α sistemu pri delovanju jedinične struje, odnosno:

$$\underline{Z}_\alpha = \frac{\underline{U}_{N_\alpha}}{\underline{I}_\alpha} = \underline{U}_{N_\alpha} \text{ za } \underline{I}_\alpha = 1 \quad (5.11)$$

Na isti način se dobija ekvivalentna impedansa nultog sistema:

$$\underline{Z}_o = \frac{\underline{U}_{N_o}}{\underline{I}_o} = \underline{U}_{N_o} \text{ za } \underline{I}_o = 1 \quad (5.12)$$

Jednopolni kvar prema zemlji

Uslovi na mestu kvara koji vladaju u slučaju jednopolnog kvara na fazi A su:

$$\begin{aligned} U_A &= 0 \\ I_B &= 0 \\ I_C &= 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Ako se napon faze A izrazi preko komponentnih napona u α , β i 0 komponentama, dobija se:

$$U_A = U_\alpha + U_0 = 0 \quad (5.14)$$

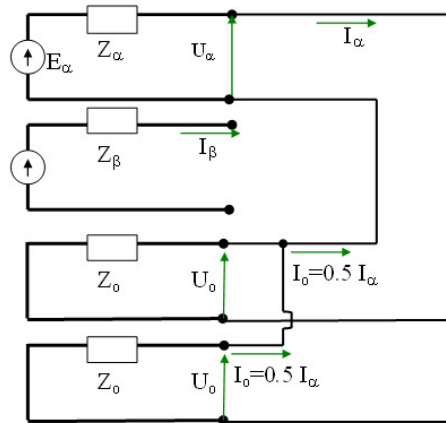
Ako se struje faza B i C izraze preko komponentnih struja u α , β i 0 komponentama, dobija se:

$$\begin{aligned} I_B &= -\frac{1}{2}I_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta + I_0 = 0 \\ I_C &= -\frac{1}{2}I_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta + I_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Iz izraza 5.14 i 5.15 dobijaju se sledeći odnosi:

$$\begin{aligned} U_\alpha + U_0 &= 0 \\ I_\alpha &= 2I_0 \\ I_\beta &= 0 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Sprega ekvivalentnih šema u komponentnim sistemima za izračunavanje struje kvara data je na slici 5.9. Na slici je α komponentni sistem vezan na red sa dva nulta komponentna sistema u paraleli.



Slika 5.9: Sprega komponentnih sistema za izračunavanje struje jednopolnog kvara na fazi A

U slučaju jednopolnog kvara struja kvara u komponentnim sistemima se može izračunati na osnovu izraza:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= \frac{U_{k\alpha}}{\underline{Z}_\alpha + 0.5 \cdot \underline{Z}_o} \\ I_\beta &= 0 \\ I_o &= I_\alpha / 2 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Oznaka $\underline{U}_{k\alpha} = \underline{E}_\alpha$ je kompleksni napon koji bi vladao na mestu kvara, kada kvara ne bi bilo. Ovaj napon se dobija rešavanjem sistema jednačina 5.9.

Struje u faznim koordinatama se dobijaju inverznom transformacijom iz komponentnih sistema u fazne koordinate. Kad se izračunaju kompleksne struje na mestu kvara, dobija se:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \frac{3\underline{U}_{k\alpha}}{(2\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_o) \\ \underline{I}_B &= 0 \\ \underline{I}_C &= 0\end{aligned}\tag{5.18}$$

Dvopolni kratak spoj bez zemlje

Uslovi na mestu kvara koji vladaju u slučaju dvopolnog kvara na fazama B i C su:

$$\begin{aligned}I_A &= 0 \\ I_B &= -I_C\end{aligned}\tag{5.19}$$

$$U_B = U_C\tag{5.20}$$

Ako se struja faze A izrazi preko komponentnih struja u α , β i 0 komponentama, dobija se:

$$I_A = I_\alpha + I_0 = 0\tag{5.21}$$

Kako je kratak spoj bez zemlje, $I_0 = 0$, sledi iz 5.21 da mora i $I_\alpha = 0$. Ako se struje faza B i C izraze preko komponentnih struja u α , β i 0 , dobija se, vodeći računa o predhodnom zaključku:

$$\begin{aligned}I_B &= \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta \\ I_C &= -\frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta\end{aligned}\tag{5.22}$$

Ako se fazni naponi na fazama B i C izraze preko komponentnih, dobija se:

$$\begin{aligned}U_B &= -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta + U_0 \\ U_C &= -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta + U_0\end{aligned}\tag{5.23}$$

Može zaključiti iz 5.23 da je $U_\beta = 0$ da bi $U_B = U_C$. Struje kvara u komponentnim sistemima su:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= 0 \\ \underline{I}_\beta &= \frac{\underline{U}_{k\beta}}{\underline{Z}_\beta} \\ I_0 &= 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

gde je:

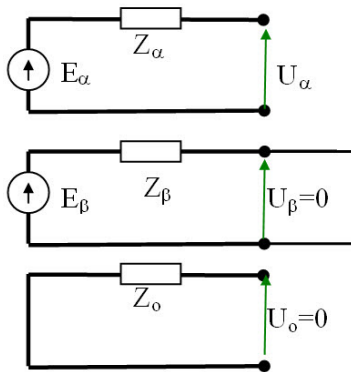
$$\underline{U}_{k\beta} = \underline{E}_\beta \quad (5.25)$$

$$\underline{E}_\beta = E_\alpha e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (5.26)$$

$$\underline{Z}_\beta = \underline{Z}_\alpha \quad (5.27)$$

$$(5.28)$$

Na slici 5.10 prikazana je sprega komponentnih sistema na osnovu kojih se računa struja na mestu kvara.



Slika 5.10: Šema spoja komponentnih sistema za dvofazni kvar bez zemlje

Kompleksne struje u faznim koordinatama su

$$\begin{aligned} I_A &= 0 \\ \underline{I}_B &= \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{E}_\beta}{\underline{Z}_\beta} \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\underline{I}_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{E}_\beta}{\underline{Z}_\beta} \quad (5.30)$$

$$(5.31)$$

gde je:

$$\underline{E}_\beta = E_\alpha e^{j\frac{\pi}{2}}$$

$$\underline{Z}_\beta = \underline{Z}_\alpha \quad (5.32)$$

$$(5.33)$$

Dvopolni kratak spoj sa zemljom

U slučaju dvopolnog kratkog spoja sa zemljom uslovi na mestu kvara mogu se opisati sledećim izrazima u faznim koordinatama.

$$\underline{I}_A = 0$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C \quad (5.34)$$

$$\underline{U}_B = 0 \quad (5.35)$$

$$\underline{U}_C = 0 \quad (5.36)$$

$$(5.37)$$

Ako se struja faze A izrazi preko komponentnih struja u α , β i 0 sistemu, dobija se:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_\alpha + \underline{I}_0 = 0 \quad (5.38)$$

odakle sledi da je:

$$\underline{I}_\alpha = -\underline{I}_0 \quad (5.39)$$

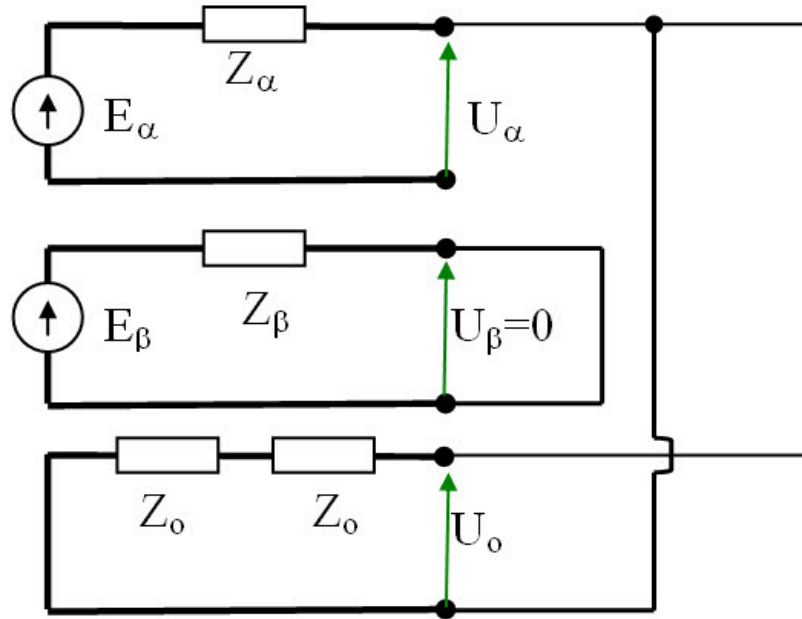
Ako se fazni naponi na fazama B i C izraze preko komponentnih, dobija se:

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= -\frac{1}{2}\underline{U}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{U}_\beta + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_C &= -\frac{1}{2}\underline{U}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{U}_\beta + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_B &= 0 \\ \underline{U}_C &= 0 \end{aligned} \quad (5.40)$$

Na isti način kao i u slučaju kratkog spoja faza B i C bez zemlje, iz 5.23 se može iz izraza 5.40 može zaključiti da je napon u β komponentnom sistemu na mestu kvara $\underline{U}_\beta = 0$. Odatle sledi da je:

$$\underline{U}_\alpha = 2\underline{U}_0 \quad (5.41)$$

Na osnovu izraza 5.39 i 5.41 može se nacrtati sprega ekvivalentnih šema u komponentnim sistemima na mestu kvara.



Slika 5.11: Šema spoja komponentnih sistema za dvofazni kvar sa zemljom

Veze između napona i struja u faznim koordinatama i komponentnim veličinama na mestu kvara dati su relacijama:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_\alpha &= \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{2 \cdot \underline{Z}_o + \underline{Z}_\alpha} \\
 \underline{I}_\beta &= \frac{\underline{U}_{k\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{\underline{Z}_\alpha} \\
 \underline{I}_o &= -\underline{I}_\alpha
 \end{aligned} \tag{5.42}$$

Fazne struje na mestu kvara imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_A &= 0 \\
 \underline{I}_B &= -\frac{\underline{U}_{k\alpha}}{2 \cdot \underline{Z}_o + \underline{Z}_\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{U}_{k\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{\underline{Z}_\beta}
 \end{aligned} \tag{5.43}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{2 \cdot \underline{Z}_o + \underline{Z}_\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{U}_{k\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{\underline{Z}_\beta} \tag{5.44}$$

$$\tag{5.45}$$

Tropolni kratak spoj sa ili bez zemlje

Povezanost struja na mestu kvara u ovom slučaju definisana je sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}\underline{I}_\alpha &= \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{\underline{Z}_\alpha} \\ \underline{I}_\beta &= \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{\underline{Z}_\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \\ \underline{I}_o &= 0\end{aligned}\tag{5.46}$$

Primena principa superpozicije

U slučaju kvara raspodela napona i struja u ustaljenom prostoperiodičnom režimu kvara na osnovu slike 5.6, slučaj (B), se izračunava tako što se struje kvara injektiraju na mestu kvara, na osnovu sledećeg kompleksnog matičnog sistema jednačina.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{iB} \\ \underline{I}_{iB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i + j\omega C_i & K \\ -K^T & R_i + j\omega L_i \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{Ki} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, \beta, 0 \tag{5.47}$$

gde je: $\underline{I}_{Ki}$ - struja kvara za $i = \alpha, \beta, 0$ određena vrstom kvara.

U slučaju sistema bez kvara, prema 5.6 slika (A), raspodela kompleksnih napona i struja u ustaljenom prostoperiodičnom režimu se dobijaju na osnovu sledećeg matičnog sistema jednačina, koji je identičan sa 5.9, samo sa izmenjenim oznakama:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{iA} \\ \underline{I}_{iA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i + j\omega C_i & K \\ -K^T & R_i + j\omega L_i \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E} \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, \beta, 0 \tag{5.48}$$

Superpozicija kompleksnih napona i struja pri kvaru i kompleksnih napona i struja bez kvara prikazana je sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{iB} \\ \underline{I}_{iB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{iA} \\ \underline{I}_{iA} \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, \beta, 0 \tag{5.49}$$

5.3.5 Početni uslovi

Prelazni proces u mešovitoj mreži se rešava numeričkim postupkom rešavanja promenljivih stanja u mreži sa koncentrisanim parametrima i metodom putujućih talasa u mreži sa

raspoređenim parametrima. Početni uslovi za proračun prelaznog procesa se odvojeno određuju za mrežu sa koncentrisanim i za mrežu sa raspoređenim parametrima.

Početni uslovi u mreži sa koncentrisanim parametrima

Početni uslovi u mreži sa koncentrisanim parametrima se izražavaju u komponentnim sistemima (α , β , 0 ili simetrične komponente). U opštem slučaju obeležimo kompleksne promenljive na kapacitetima i induktivitetima mreže u komponentnim sistemima kao $\underline{X}_{jk}$, gde je j redni broj promenljive, a $k = \alpha, \beta, o$ u slučaju primenjene te transformacije. Pri tome može da bude $\underline{X}_{jk} = \underline{U}_{jk}$ ili $\underline{X}_{jk} = \underline{I}_{jk}$, odnosno $\underline{U}$ i $\underline{I}$ su oznake fazora napona čvorova ili fazora struja grana u komponentnim sistemima k .

Fazor j -te promenljive stanja $\underline{X}_{jk}$ u k -tom komponentnom sistemu se može predstaviti preko realnog i imaginarnog dela, odnosno:

$$\begin{aligned} X_{R_{jk}} &= \operatorname{Re}(\underline{X}_{jk}) = |X_{jk}| \cdot \cos(\Theta_{jk}) \\ X_{I_{jk}} &= \operatorname{Im}(\underline{X}_{jk}) = |X_{jk}| \cdot \sin(\Theta_{jk}) \end{aligned}$$

Amplituda j -te promenljive stanja u k -tom komponentnom sistemu se izračunava pomoću Pitagorine teoreme:

$$|X_{jk}| = \sqrt{X_{R_{jk}}^2 + X_{I_{jk}}^2} \quad (5.50)$$

U daljem tekstu, radi jednostavnosti, amplituda promenljive stanja biće obeležavana kao X_{jk} .

Fazni stav promenljive stanja Θ_{jk} određuje se iz izraza:

$$\Theta_{jk} = \arctan \frac{X_{I_{jk}}}{X_{R_{jk}}} \quad (5.51)$$

Početni uslovi na promenljivim stanja u α komponentnom sistemu dobijaju se iz sledećih izraza:

$$\begin{bmatrix} u_{o\alpha} \\ i_{o\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{o1\alpha} \\ u_{o2\alpha} \\ \dots \\ u_{on\alpha} \\ i_{o(n+1)\alpha} \\ i_{o(n+2)\alpha} \\ \dots \\ u_{o(n+m)\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{1\alpha} \cdot \cos(\Theta_{1\alpha}) \\ U_{2\alpha} \cdot \cos(\Theta_{2\alpha}) \\ \dots \\ U_{n\alpha} \cdot \cos(\Theta_{n\alpha}) \\ I_{o(n+1)\alpha} \cdot \sin(\Theta_{(n+1)\alpha}) \\ I_{o(n+2)\alpha} \cdot \sin(\Theta_{(n+2)\alpha}) \\ \dots \\ I_{o(n+m)\alpha} \cdot \sin(\Theta_{(n+m)\alpha}) \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

Na potpuno isti način se mogu odrediti početni uslovi na promenljivim stanja u β i nultom komponentnom sistemu. Početni uslovi primenom transformacije u simetrične komponente se mogu vršiti identičnim postupkom.

Fazni početni uslovi se dobijaju transformacijom iz komponentnih u fazne veličine za svaki napon čvora, odnosno struju grane, transformacijama opisanim u sekciji 4.2.2 na strani 132, primenom izraza 4.22, odnosno za svaku kapacitivnu granu $i = 1, 2, \dots, n_C$ su određeni početni uslovi u faznim koordinatama:

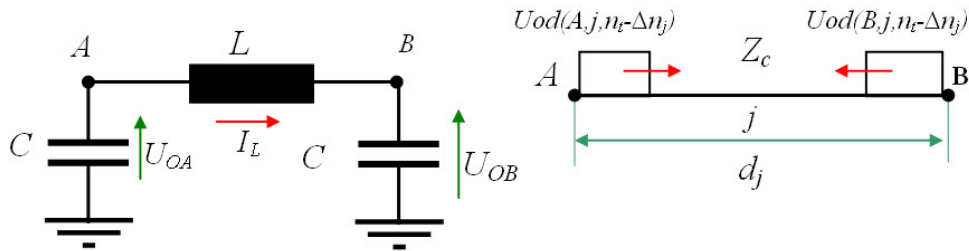
$$\begin{bmatrix} u_{oAi} \\ u_{oBi} \\ u_{oCi} \end{bmatrix} = [Q] \cdot \begin{bmatrix} u_{o\alpha i} \\ u_{o\beta i} \\ u_{oi} \end{bmatrix}$$

Za svaku induktivnu granu su određeni početni uslovi u faznim koordinatama za $j = n_C + 1, n_C + 2, \dots, n_C + n_L$:

$$\begin{bmatrix} i_{oAj} \\ i_{oBj} \\ i_{oCj} \end{bmatrix} = [Q] \cdot \begin{bmatrix} i_{o\alpha j} \\ i_{o\beta j} \\ i_{ooj} \end{bmatrix}$$

Početni uslovi u mreži sa raspoređenim parametrima

U slučaju mreže sa raspoređenim parametrima, odbijene komponente napona se određuju na osnovu napona na kondenzatorima u čvorovima na krajevima II modela deonice voda. Svi naponi se razmatraju u komponentnim sistemima. Dobijanje odbijenih komponenti napona koje predstavljaju početne uslove ilustrovano je na slici 5.12.



Slika 5.12: Određivanje početnih uslova na vodu

Odbijene komponente napona na slici 5.12 predstavljeni su kao trodimenzionalne matrice sa članovima koji odgovaraju čvorovima A i B i granom j , za vremenski trenutak definisan korakom $n_t - \Delta n_j$. Prelaskom na prebrojane indekse član koji odgovara čvoru

A i granu j pretvara se u član koji odgovara prebrojanom indeksu i_p , član koji odgovara čvoru A i granu j pretvara se u član koji odgovara prebrojanom indeksu i_q .

Odbijene komponente napona iz čvorova A i B moraju da se računaju za n_j vremenskih koraka koliko je potrebno odbijenoj komponenti da stigne do drugog kraja voda j .

Realni i imaginarni delovi kompleksnih napona u čvorovima A i B su:

$$U_R(A) = \operatorname{Re} \underline{U(A)} \quad (5.53)$$

$$U_I(A) = \operatorname{Im} \underline{U(A)}$$

$$U_R(B) = \operatorname{Re} \underline{U(B)} \quad (5.54)$$

$$U_I(B) = \operatorname{Im} \underline{U(B)}$$

Argument kompleksnog napona $|U(A)|$ je $\Theta(A)$, odnosno napona $|U(B)|$ je $\Theta(B)$.

$$\Theta(A) = \arctan\left(\frac{U_I(A)}{U_R(A)}\right) \quad (5.55)$$

$$\Theta(B) = \arctan\left(\frac{U_I(B)}{U_R(B)}\right)$$

Trenutne vrednosti odbijenih komponenti napona koje kreću iz čvora A u početnom trenutku, predstavljene kao element vektora sa prebrojanim indeksom i_p se mogu izračunati iz izraza:

$$u_{od}(i_p, n_t - \Delta n_j) = 0.5 \cdot |U_{i_p}| \cdot \cos[\omega(n_t - \Delta n_j) \cdot h - \Theta_{i_p}] \quad (5.56)$$

gde su:

$|U_{i_p}|$ - apsolutna vrednost fazora napona u čvoru A spojenog sa vodom j pretstavljenog preko indeksa prebrajanja i_p .

ω -industrijska kružna učestanost koja za 50 Hz iznosi 314 rad/s.

n_t -redni broj tekućeg koraka koji ima vrednost 0, 1,..., Δn_j . Odbijene kompone se moraju računati u svih Δn_j koraka, koliko je potrebno da napon iz tačke A stigne u tačku B po vodu j . Sve ove odbijene komponente napona predstavljaju početne uslove, jer one počinju da stižu u čvor B na drugom kraju voda posle Δn_j koraka.

h - elementarni vremenski korak proračuna.

5.3.6 Usaglašavanja početnih uslova u mreži sa koncentrisanim i raspoređenim parametrima

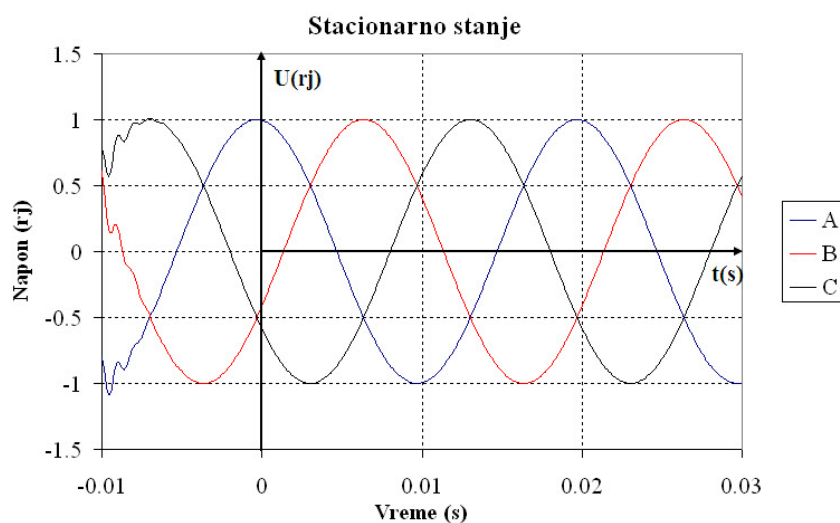
Prilikom početka rešavanja jednačina stanja u mreži sa koncentrisanim parametrima i putujućih talasa u ustaljenom stanju u mreži modelovanoj raspoređenim parametrima,

dolazi do pojave slabo izraženog prelaznog režima zbog toga što početni uslovi nisu u potpunosti usaglašeni.

- Vodovi se pri pripremi početnih uslova modeluju koncentrisanim parametrima u obliku II šeme. Kod dugačkih vodova neusaglašenost između procesa na vodu u obluku II šeme i na realnom vodu sa raspoređenim parametrima je veća.
- Na vodovima se pri rešavanju prelaznog režima uzima u obzir frekvencijski zavisno prigušenje i izobličenje talasa, koje se ne može modelovati pri pripremi početnih uslova.

Problem neusaglašenosti početnih uslova se najjednostavnije može rešiti na taj način što se proračun započinje u ustaljenom stanju i obavlja se sve dok se neželjeni prelazni proces potpuno ne priguši. Od tog trenutka se može smatrati da su parametri režima i u mreži sa koncentrisanim i u mreži sa raspoređenim parametrima usaglašeni. Ovi parametri režima će se smatrati početnim uslovima. Nadalje se može posmatrati stacionaran proces. Posle neke promene u sistemu se može analizirati prelazni režim koji je posledica isključivo promena u sistemu.

Na slici 5.13 prikazan je "pred-proračun" prelaznog procesa (deo proračuna koji se ne prikazuje korisniku) od trenutka -0.01 s do 0 s. Od trenutka 0 s do 0.03 s rezultati proračuna se zapisuju u fajl i nakon završetka proračuna prikazuju korisniku. Sve perturbacije u mreži se modeluju od trenutka $t > 0$ s.



Slika 5.13: Pred-proračun u cilju prigušenja prelaznog stanja usled neusaglašenosti početnih uslova

5.3.7 Određivanje vremenskog koraka proračuna

Vremenski korak proračuna je važan elemenat u priremi proračuna prelaznih režima. Kod različitih programa koriste se različiti načini određivanja vremenskog koraka. Vremenski korak može biti nepromenljiv u toku celog proračuna ili promenljiv.

Postoje 2 osnovna kriterijuma za određivanje nepromenljivog koraka proračuna.

- korak proračuna u mreži sa raspoređenim parametrima,
- korak proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima.

Kada se radi o mešovitoj mreži, usvaja se manji od predhodno odabrana 2 koraka.

Korak u mreži sa raspoređenim parametrima

Kod mreže sa raspoređenim parametrima, korak proračuna mora da bude jednak ili manji od vremena prostiranja po najkraćem vodu. Ukoliko imamo N_V vodova, korak proračuna je:

$$\Delta t = \min \left\{ \frac{d_1}{v}, \frac{d_2}{v}, \dots, \frac{d_{N_V}}{v} \right\} \quad (5.57)$$

gde je:

d_i - dužina i -tog voda u (m),

v - brzina prostiranja po vodu i u (m/s). Za nadzemni vod je to $v = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Sa ovako definisanim jedinicama vremenski korak se izražava u s.

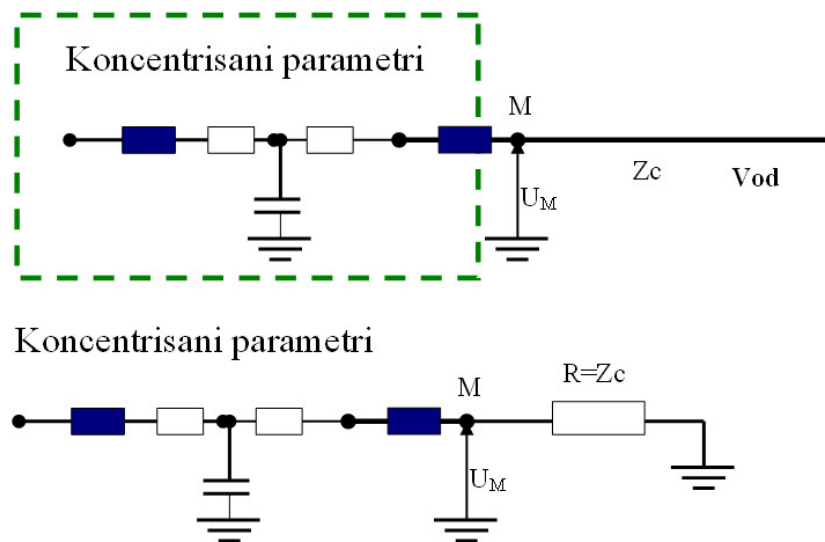
Pri proračunu atmosferskih prenapona, po pravilu najkraći korak definiše se na osnovu najkraćeg dela stuba (konzole) ili spusta od faznog provodnika do odvodnika prenapona. Kada se usvoji korak proračuna Δt , tada se dužine deonice zaokružuju na najbliži ceo umnožak najkraće deonice $\Delta d = v \cdot \Delta t$.

Korak u mreži sa koncentrisanim parametrima

Izbor koraka proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima vrši se na osnovu najviše sopstvene učestanosti mreže na oscilatornim delovima kola, odnosno na najkraćem

vremenu odziva delova kola sa aperioidičnim odzivom. Korak proračuna se može na ovaj način određivati samo u slučajevima konstantnih parametara mreže, dok kod nelinearnih mreža se korak ne može unapred odrediti.

U tu svrhu se mogu koristiti različite metode. Jedna od metoda je bazirana na određivanju sopstvenih učestanosti kompletne mreže za koncentrisanim parametrima uvažavajući uticaj mreže sa raspoređenim parametrima preko ekvivalentnih otpornika. Na slici 5.14 je prikazana je modifikovana mreža sa koncentrisanim parametrima koja u zajedničkim čvorovima ima priključene otpornike prema zemlji, koji imaju otpornost koja je identična vrednosti karakteristične impedanase voda.



Slika 5.14: Formiranje ekvivalentnog kola za određivanje sopstvene učestanosti

Automatizovan izbor koraka na osnovu karakterističnog polinoma

Na osnovu jednačina stanja u matričnom obliku date izrazom 2.32, odnosno 2.33 na strani 32 napravljena je matrica u operatorskom domenu koja reprezentuje mrežu, uvažavajući i ekvivalentne otpornike koji zamenjuju mrežu sa raspoređenim parametrima u zajedničkim čvorovima.

$$\begin{bmatrix} p \cdot u_1 \\ p \cdot i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ - \begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \right\} \quad (5.58)$$

U skraćenoj formi predhodni izraz ima oblik:

$$\begin{bmatrix} p \cdot u_1 \\ p \cdot i_2 \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

U izrazu 5.58 i 5.59 veličina p predstavlja Laplasov operator.

Karakteristične vrednosti matrice $[A]$ dobijaju se rešavanjem determinante:

$$\det(\lambda \cdot \mathbf{I} - A) = 0 \quad (5.60)$$

gde je $\mathbf{I}$ kvadratna jedinična matrica. Kada se determinanta koja se dobija na osnovu matrice elemenata sistema izjednači sa nulom, dobija se karakteristična jednačina. Rešenja karakteristične jednačine po λ predstavljaju karakteristične vrednosti matrice. Ukupan broj karakterističnih vrednosti jednak je redu matricem, sem ako nema višestrukih rešenja. Svaka karakteristična vrednost matrice odgovara određenoj slobodnoj učestanosti u slučaju kompleksnih rešenja ili koeficijentu prigušenja u slučaju realnih rešenja.

Korak proračuna se određuje na osnovu najveće slobodne učestanosti, ili na osnovu najkraće vremenke konstante. Smatra se da se sa zadovoljavajućom tačnošću može proračun vršiti sa korakom koji iznosi:

$$\Delta t = \frac{2\pi}{10 \cdot \omega_{Max}} \quad (5.61)$$

gde je ω_{Max} maksimalna slobodna kružna učestanost izračunata na osnovu rešavanje karakterističnog polinoma.

U slučaju aperiodičnog rešenja, može se usvojiti da je korak proračuna:

$$\Delta t = \frac{T}{10} \quad (5.62)$$

gde je T dobijena vremenska konstanta na osnovu rešavanje karakterističnog polinoma.

U slučaju mešoviti mreža se može dogoditi da je korak proračuna mnogo manji nego što je to potrebno u mreži sa raspoređenim parametrima. Ukoliko mreža sa raspoređenim parametrima ima jako dugačke vodove, na kojima je potreban veliki broj komponenti koje treba memorisati, tada se mogu raditi proračuni u mreži sa raspoređenim parametrima sa većim korakom, na primer $h_r = n_r \times h_k$, gde je:

h_r -korak proračuna u mreži sa raspoređenim parametrima.

h_k -korak proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima.

n_r -multipl koraka proračuna u mreži sa raspoređenim parametrima u odnosu na korak u mreži sa koncentrisanim parametrima.

U tom slučaju bi se uticaj između mreža uvažavao preko ekvivalentnih generatora posle svakih n_r koraka. Ovakav slučaj je redak, odnosno izborom adekvatnog ekvivalentnog kola se može izbeći. U slučaju prelaznog procesa jako visoke učestanosti dugačak vod se može zameniti ekvivalentnim otpornikom koji simulira beskonačno dugačak vod. U realnim sistemima visokofrekvencijske prelazne pojave generisane u mreži sa koncentrisanim parametrima se prigušuju prilikom prostiranja po vodovima usled frekvencijski zavisnih parametara, tako da nemaju značaj na drugom kraju dugačkih vodova.

Približna metoda određivanja koraka proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima

Prilikom pripreme parametara koncentrisane mreže se najčešće raspolaže parametrima direktnog, odnosno α sistema ili 0-tog sistema, koji se kasnije transformišu u fazne i međufazne parametre. Po približnoj metodi se određivanje najviših sopstvenih učestanosti radi tako što se prvo definišu parametri grana koji utiču na sopstvene učestanosti mreže. To se radi na sledeći način:

- Iz liste svih induktivnih grana odredi se grana sa minimalnom α komponentom induktiviteta $L_{\alpha MIN}$.
- Iz liste svih induktivnih grana odredi se grana sa minimalnom 0-tom komponentom induktiviteta $L_{0 MIN}$.
- Iz liste svih kapacitivnih grana odredi se grana sa minimalnom α komponentom kapaciteta $C_{\alpha MIN}$.
- Iz liste svih kapacitivnih grana odredi se grana sa minimalnom 0-tom komponentom kapaciteta $C_{0 MIN}$.
- Iz liste svih otporničkih grana odredi se grana sa minimalnom α komponentom otpornosti $R_{\alpha MIN}$.
- Iz liste svih otporničkih grana odredi se grana sa minimalnom 0-tom komponentom otpornosti $R_{0 MIN}$.

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra α sistema određuju se prvo maksimalne sopstvene učestanosti za α sistem.

$$\omega_{\alpha MAX} = \frac{1}{\sqrt{C_{\alpha MIN} L_{\alpha MIN}}} \quad (5.63)$$

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra nultog sistema određuju se maksimalne sopstvene učestanosti za nulti sistem.

$$\omega_{0MAX} = \frac{1}{\sqrt{C_{0MIN} L_{0MIN}}} \quad (5.64)$$

Zatim se bira veća slobodna učestanost.

$$\omega_{MAX} = \max \{ \omega_{\alpha MAX}, \omega_{0MAX} \} \quad (5.65)$$

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra α sistema određuju se minimalne vremenske konstante za α sistem za grane u kojima dominira otpornost. To su po pravilu u elektroenergetskim sistemima induktivne grane koje su u zajedničkim čvorovima spojene sa vodovima, koji se zamenjuju otpornicima koji imaju vrednost karakteristične imedanse vodova, mada mogu da budu i otpornički potrošači.

$$T_{\alpha MIN} = L_{\alpha MIN} \cdot R_{\alpha MIN} \quad (5.66)$$

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra o -tog sistema određuju se minimalne vremenske konstante za 0 -ti sistem.

$$T_{0min} = L_{0MIN} \cdot R_{0MIN} \quad (5.67)$$

Na kraju se bira manja vremenska konstanta.

$$T_{MIN} = \min \{ T_{\alpha MIN}, T_{0MIN} \} \quad (5.68)$$

Vremenski korak proračuna se bira kao manja vrednost koraka na osnovu vremenske konstante ili slobodne učestanosti iz izraza:

$$\Delta T = \min \left\{ \frac{T_{MIN}}{N}, \frac{2\pi}{N \times \omega_{MAX}} \right\} \quad (5.69)$$

gde je N - ceo broj koji se može sa zadovoljavajućom tačnošću usvojiti da je 10, koji predstavlja broj koraka potrebnih za modelovanje jedne periode maksimalne učestanosti.

Adaptivni korak proračuna

U slučaju mreže sa koncentrisanim parametrima koja sadrži nelinearne elemente, kao što je na primer nelinearna karakteristika magnećenja transformatora, može se dogoditi da usled smanjenja induktiviteta usled ulaska u zasićenje, dođe do pojave oscilacija viših sopstvenih učestanosti, što u slučaju neadekvatnog koraka dovodi do velike numeričke greške ili čak do numeričke nestabilnosti.

Prva faza

Izbor adaptivnog koraka se sprovodi na taj način što se izvrši proračun prelaznog procesa u dva uzastopna koraku $k \cdot \Delta t_1$, i $(k+1) \cdot \Delta t_1$, gde je k redni broj koraka, a Δt_1 odabrani elementarni korak proračuna.

Razlika vektora promenljivih stanja u dva susedna koraka prikazana je u obliku razlike 2 vektora:

$$\begin{bmatrix} x_1[(k+1) \cdot \Delta t_1] \\ x_2[(k+1) \cdot \Delta t_1] \\ \dots \\ x_n[(k+1) \cdot \Delta t_1] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1(k \cdot \Delta t_1) \\ x_2(k \cdot \Delta t_1) \\ \dots \\ x_n(k \cdot \Delta t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1(\Delta t_1) \\ \Delta x_2(\Delta t_1) \\ \dots \\ \Delta x_n(\Delta t_1) \end{bmatrix} \quad (5.70)$$

Maksimalna greška proračuna u ovom slučaju za vremensku razliku Δt_1 je:

$$\Delta x_{Max1} = \max \{ \Delta x_1(\Delta t_1), \Delta x_2(\Delta t_1), \dots, \Delta x_n(\Delta t_1) \} \quad (5.71)$$

Druga faza

U dugoj fazi se korak proračuna deli sa dva, tako da je novi korak $\Delta t_2 = \Delta t_1/2$. Proračun se vrši u tri koraka i to u koracima $k\Delta t_1$, $k\Delta t_1 + \Delta t_2$ i $k\Delta t_1 + 2\Delta t_2$.

Provera tačnosti se vrši oduzimanjem poslednjeg rezultata u trenutku $k\Delta t_1 + 2\Delta t_2$ i prvog rezultata, odnosno:

$$\begin{bmatrix} x_1(k\Delta t_1 + 2\Delta t_2) \\ x_2(k\Delta t_1 + 2\Delta t_2) \\ \dots \\ x_n(k\Delta t_1 + 2\Delta t_2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1(k\Delta t_1) \\ x_2(k\Delta t_1) \\ \dots \\ x_n(k \cdot \Delta t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1(2\Delta t_2) \\ \Delta x_2(2\Delta t_2) \\ \dots \\ \Delta x_n(2\Delta t_2) \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

Maksimalna greška proračuna u ovom slučaju za vremensku razliku Δt_1 je:

$$\Delta x_{Max2} = \max \{ \Delta x_1(2\Delta t_2), \Delta x_2(2\Delta t_2), \dots, \Delta x_n(2\Delta t_2) \} \quad (5.73)$$

Ukoliko je uslov da je absolutna greška $|\Delta x_{Max2} - \Delta x_{Max1}| < \varepsilon$ ispunjen, gde je ε dozvoljena greška, usvajaju se rezultati iz prve faze proračuna. U suprotnom se usvaja novi korak proračuna $\Delta t_3 = \Delta t_2/2$ i ponavlja se druga faza i proverava kriterijum 5.73. Ukoliko je greška manja od dozvoljene, usvaja se korak proračuna Δt_2 , a u suprotnom se nastavlja deljenje koraka sa 2. Postupak se može ponavljati dalje za korake $\Delta t_4 = \Delta t_3/2$, dok se ne zadovolji kriterijum 5.73. Umesto sa apsolutnim greškama, može se koristiti relativna greška, kada se razlika promenljivih stanja iz različitih koraka deli sa promenljivom stanja.

Ukoliko se u svakom koraku proračuna vrši procena greške i podešavanje koraka, to može značajno da produži trajanje proračuna. Stoga se u linearnim mrežama može proveriti korak na početku proračuna i držati konstantnim dok ne dođe do promene konfiguracije mreže. Nakon promene konfiguracije se ponovo proverava korak.

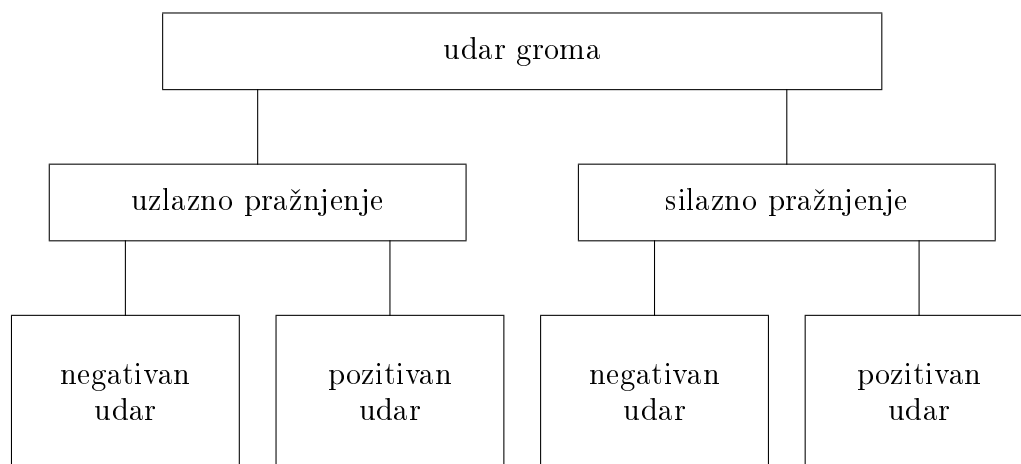
Ukoliko se poznaju minimalne vrednosti nelinearnih elemenata, tada se može odabrati korak proračuna prema tim vrednostima elementa umesto da se stalno proverava korak proračuna.

Poglavlje 6

Parametri atmosferskih pražnjenja

6.1 Tipovi atmosferskih pražnjenja

Prema [39] sva atmosferska pražnjenja u uzemljene objekte ili zemlju mogu se podeliti u nekoliko tipova prikazanih na slici 6.1.



Slika 6.1: Podela atmosferskih pražnjenja

Na slici 6.1 su usvojene sledeće konvencije:

- udar je negativan ako je oblak negativno naelektrisan,
- udar je pozitivan ako je oblak pozitivno naelektrisan,

- udar je uzlazni ako se skokoviti lider kreće od zemlje ka oblaku,
- udar je silazni ako se skokoviti lider kreće od oblaka ka zemlji.

6.2 Osnovni parametri atmosferskih pražnjenja

Pri procenjivanju ugroženosti objekata od atmosferskih pražnjenja neophodno je poznavati pojedine električne i meteorološke parametre grmljavinske aktivnosti.

6.2.1 Električni parametri

Osnovni električni parametri atmosferskog pražnjenja su:

- amplituda struje atmosferskog pražnjenja,
- polaritet struje
- oblik struje atmosferskog pražnjenja,
- strmina strujnog talasa,
- udarna količina elektriciteta, koja predstavlja količinu elektriciteta koja protekne za vreme trajanja udarne struje u vremenskom periodu t_{ud} , koji odlikuje veoma brza promena struje i veliki intenzitet,

$$Q_{ud} = \int_{t_{ud}} i dt \quad (6.1)$$

- količina elektriciteta prvog udara,

$$Q = \int i dt \quad (6.2)$$

koja obuhvata i struju skokovitog lidera i struju nakon završetka glavnog pražnjenja,

- ukupna količina elektriciteta kompletnog negativnog pražnjenja,

$$Q_u = \sum_{i=1}^n \int i dt \quad (6.3)$$

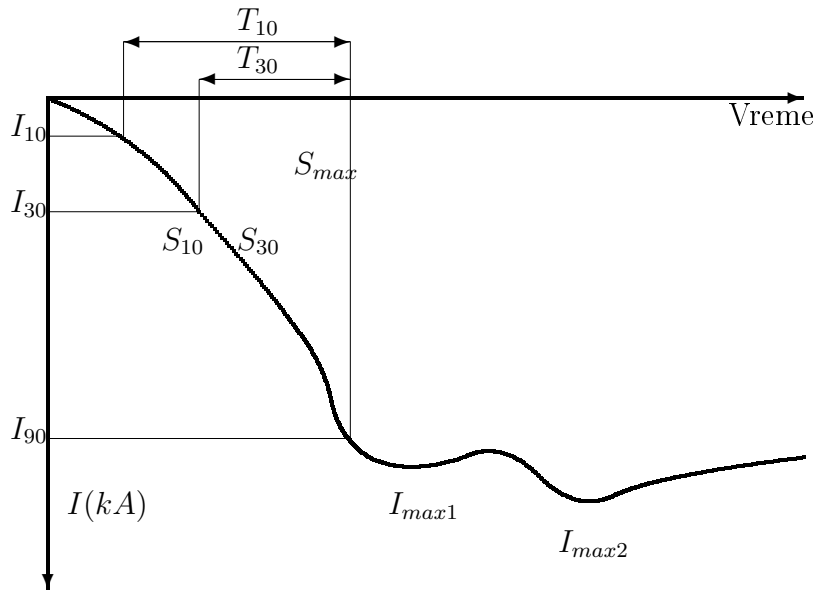
Ova veličina predstavlja ukupnu količinu elektriciteta koja protiče u zemlju u toku svih n udara koji čine jedno kompletno pražnjenje, gde je:

n – broj uzastopnih udara, odnosno broj pojedinačnih udara u jednom kompletnom pražnjenju.

- toplotni impuls kompletnog pražnjenja.

$$A = \int i^2 dt \quad (6.4)$$

Na slici 6.2 dat je tipičan vremenski oblik negativnog strujnog talasa prvog udara. Na slici su date definicije strmine struje atmosferskog pražnjenja prema [39].



Slika 6.2: Definicija strmine čela za tipičan oblik negativnog silaznog prvog udara

Na slici 6.2 oznake imaju sledeće značenje:

I_{10} —struja koja ima vrednost 10% od prvog maksimuma struje I_{max1} ,

I_{30} —struja koja ima vrednost 30% od prvog maksimuma struje I_{max1} ,

I_{90} —struja koja ima vrednost 90% od prvog maksimuma struje I_{max1} ,

T_{10} —vremenski interval između trenutaka kada nastupa I_{10} i I_{90} ,

T_{30} —Vremenski interval između trenutaka kada nastupa I_{30} i I_{90} ,

S_{max} —maksimalna strmina talasa koja se pojavljuje u bilo kom trenutku na čelu,

S_{10} —srednja strmina talasa u vremenskom intervalu T_{10} :

$$S_{10} = \frac{I_{90} - I_{10}}{T_{10}} \quad (6.5)$$

S_{30} —srednja strmina talasa u vremenskom intervalu T_{30} :

$$S_{30} = \frac{I_{90} - I_{30}}{T_{30}} \quad (6.6)$$

Sa slike 6.2 može se uočiti da strujni talas ima najčešće dva maksimuma I_{max_1} i I_{max_2} . Sve veličine koje definišu oblik talasa sa slike 6.2 određene su u odnosu na prvi maksimum.

Sistematska merenja parametara atmosferskog pražnjenja vršena su u više zemalja (Južna Afrika, Čehoslovačka, Italija, SAD, Meksiko), ali su kao najreprezentativniji usvojeni rezultati registrovanja zbog velikog broja uzoraka mogu smatrati merenja u Švajcarskoj na brdu Monte San-Salvatore na dva televizijska tornja, pod rukovodstvom profesora Bergera. Ovi su rezultati i istorijski značajni jer su prvi rezultti sistematski merenih i registrovanih struja atmosferskih pražnjena.

Danas postoje pokušaji da se objedine rezultati istraživanja više autora i formiraju zakoni raspodele parametara atmosferskog pražnjenja koji mogu da imaju široku primenu u inženjerskoj praksi [1],[42]. Iako postoje teškoće u objedinjavanju rezultata zbog različitih klimatskih, geografskih i lokalnih topoloških uslova na mestu merenja, ipak su ovakvi rezultati pouzdaniji od rezultata istraživanja sa malim brojem uzoraka za dobijanje statističkih pokazatelja koji karakterišu atmosferska pražnjenja. Parametri atmosferskih pražnjenja mogu imati vrednosti u veoma širokom opsegu, pa je zbog toga neophodno statistički obraditi i predstaviti ih odgovarajućim zakonima raspodele.

Danas se koriste rezultati masovnog korišćenja uređaja za lokaciju pražnjenja, koja su široko primenjivana u svetu, kao i kod nas u zemlji. Ovi uređaji daju lokaciju pražnjenja koja se kreće od oko ± 50 m do ± 200 m u zavisnosti od rezolucije uređaja, uz registraciju amplitude, polariteta i broja komponenti udara. Rezultati statističke obrade ovih rezultata ne postoje u našoj zemlji.

U daljem tekstu će biti prikazani neki od zakona raspodela parametara atmosferskih pražnjenja koji se mogu koristiti u inženjerskoj praksi.

Zakon raspodele amplitude struje atmosferskog pražnjenja

Na osnovu velikog broja merenja u više zemalja predloženi su različiti zakoni raspodele verovatnoće amplituda struja atmosferskih pražnjenja.

Danas je u širokoj upotrebi logaritamsko-normalni zakon raspodele amplitude struje groma. Gustina logaritamsko - normalne raspodele verovatnoće može se prikazati u sledećem analitičkom obliku [5]:

$$\omega(I) = \frac{1}{I_{sr}\sigma_{\ln I}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{\ln I - \ln I_{sr}}{\sqrt{2}\sigma_{\ln I}}\right)^2} \quad (6.7)$$

gde su:

$\omega(I)$ – gustina verovatnoće amplitude struje atmosferskog pražnjenja,

I – slučajna amplituda struje atmosferskog pražnjenja,

I_{sr} – srednja vrednost amplitude struje atmosferskog pražnjenja,

$\sigma_{\ln I}$ – standardno odstupanje logaritma amplitude struje atmosferskog pražnjenja.

Umesto u obliku 6.7 zakon raspodele verovatnoće se može prikazati u integralnom (kumulativnom) obliku verovatnoće dostizanja promenljive x :

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (6.8)$$

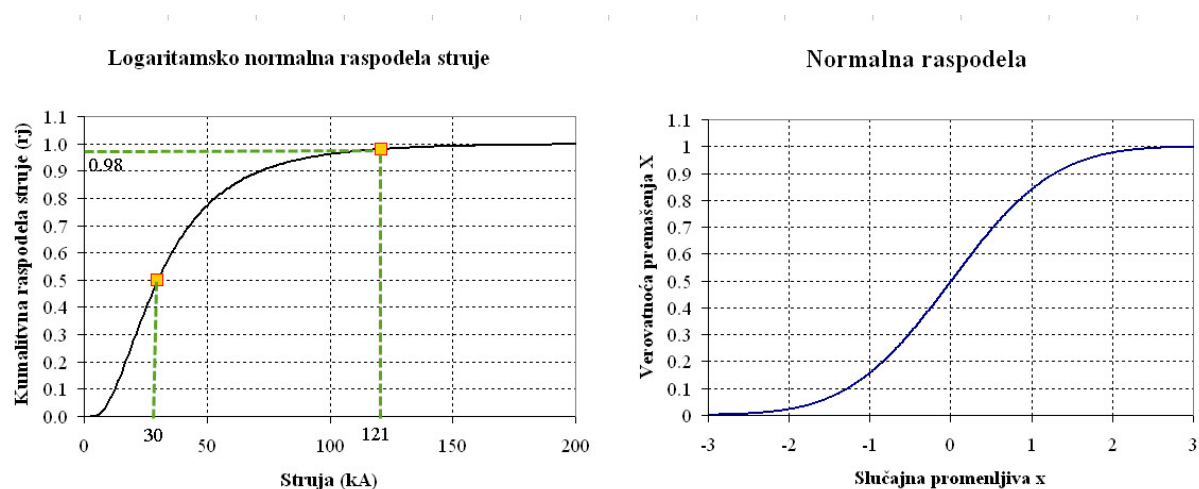
gde je: $x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}}$

Oznake u izrazu 6.8 imaju identično značenje kao u 6.7. Izraz 6.8 daje verovatnoću pojave amplitude struje koja je manja od struje I .

Na slici 6.3 prikazana je logaritamsko-normalna raspodela amplituda struje atmosferskih pražnjenja (levo) prema izrazu 6.7 u integralnom obliku i normalna (Gausova) raspodela slučajne veličine x sa matematičkim očekivanjem $M(x) = 0$ i rasipanjem $\sigma = 1$ (desno) prema izrazu 6.8.

Verovatnoća pojave struje koja je veća od struje I_m (odnosno verovatnoće premašenja) dobija se kao komplementarna verovatnoća, odnosno:

$$\overline{P}(I_m) = 1 - P(I_m) \quad (6.9)$$



Slika 6.3: Logaritamsko-normalna raspodela amplituda struje atmosferskih pražnjenja (levo) u integralnom obliku i normalna (Gausova) raspodela slučajne veličine X (desno)

Pri analizi parametara atmosferskih pražnjenja se po pravilu radi sa kumulativnim verovatnoćama pojave veličina koje su veće od posmatrane veličine x . Krive funkcije raspodele verovatnoće su u ovom slučaju opadajuće od 1 do 0 za rastuću vrednost slučajne promenljive x .

Na slici 6.3 levo označena je struja 121 kA za koju je verovatnoća premašivanja svega 2 %, odnosno verovatnoća pojave manje struje 98 %. Ova vrednost je značajna jer se ona koristi pri deterministički proračunima

Rezultati merenja vršenih na više mesta i sistematske obrade podataka daju relativno usaglašene vrednosti za srednju vrednost amplitude struje prvih negativnih udara u opsegu od $I_{sr} = 25 \text{ kA}$ do 34 kA . Standardna odstupanja logaritma struje prvih negativnih udara su znatno manje usaglašena i kreću se u opsegu $\sigma_{\ln I} = 0,39 - 0,9$.

Pored opisane logaritamsko-normalne raspodele u tehničkim proračunima se koristi i raspodela prema [13], [4] i [42], prema kojoj postoji granica od 20 kA. Atmosferska pražnjenja čija je amplituda manja od 20 kA ponašaju se prema jednoj funkciji raspodele, a oni preko 20 kA prema drugoj.

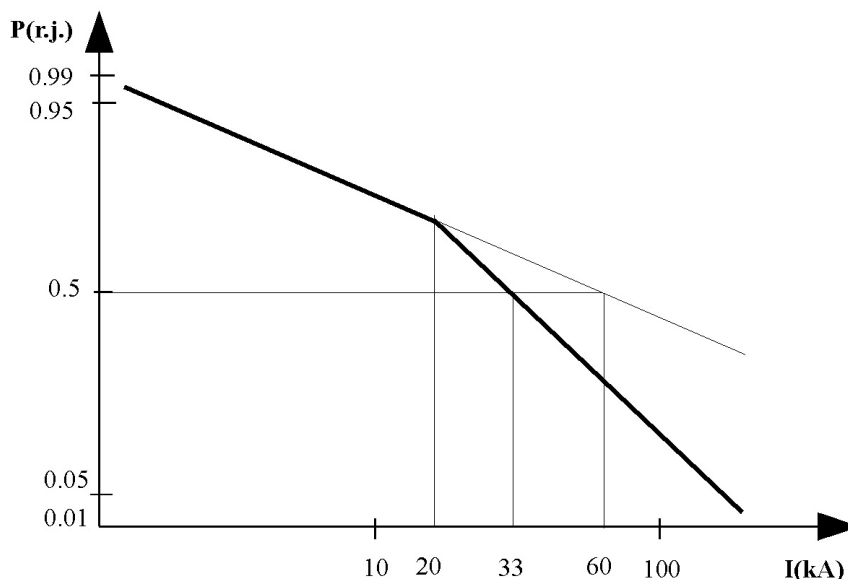
Parametri raspodele su dati u tabeli 6.1 Smatra se da struje $I < 20 \text{ kA}$ spadaju u

Tabela 6.1: Slika dvokomponentne raspodele struja do 20 kA i preko 20 kA

Parametar	$3 < I < 20 \text{ kA}$	$I > 20 \text{ kA}$
$I_{sr} \text{ (kA)}$	61	33.3
$\sigma_{\ln I} \text{ (rj)}$	1.33	0.605

oblast struja koja izaziva udare mimo zaštitnog užeta, dok struje $I > 20 \text{ kA}$ izazivaju

direktne udare u zaštitno uže ili u fazu ako zaštitno uže ne postoji. Kriva raspodele je prikazana na slici 6.4



Slika 6.4: Raspodela struje sa dvokomponentnom funkcijom raspodele

Pored logaritamsko-normalne raspodele se veoma često preporučuje za zakon raspodele amplituda struja pražnjenja sledeća analitička funkcija:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (6.10)$$

U programu koji se opisuje koristi se isključivo jedinstvena logaritamsko-normalna raspodela za ceo opseg struja, a verovatnoća prodora kroz zaštitnu zonu se uvažava posebnim postupkom.

Strmina struje atmosferskog pražnjenja

Pored amplitude struje atmosferskog pražnjenja veoma važan parametar za analizu ugroženosti elektroenergetskih objekata od atmosferskih pražnjenja predstavlja strmina struje atmosferskog pražnjenja na čelu talasa. Strmina struje atmosferskog pražnjenja predstavlja takođe slučajnu veličinu koja ima vrlo širok dijapazon vrednosti. Uočeno je da tehnika merenja može da doprinese velikim razlikama u vrednosti statističkih parametara strmine struje atmosferskog pražnjenja.

Danas je u svetu u širokoj primeni logaritamsko-normalni zakon raspodele strmina struja atmosferskog pražnjenja u obliku:

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (6.11)$$

gde su: $y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{lnS}}$

S —slučajna maksimalna strmina struje atmosferskog pražnjenja,

S_{sr} —srednja vrednost maksimalne strmine struje atmosferskog pražnjenja,

σ_{lnS} —standardno odstupanje logaritma strmine struje atmosferskog pražnjenja.

Za praktičnu upotrebu je veoma pogodna dvodimenzionalna gustina raspodele amplituda i strmina struja atmosferskog pražnjenja predložena u [5] koja ima sledeći oblik:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (6.12)$$

Oznake u izrazu 6.12 imaju sledeće značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{lnI}} \quad (6.13)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{lnS}} \quad (6.14)$$

I —slučajna amplituda struje atmosferskog pražnjenja,

I_{sr} —srednja vrednost amplitude struje atmosferskog pražnjenja (matematičko očekivanje amplitude struje atmosferskog pražnjenja),

S —slučajna strmina struje atmosferskog pražnjenja (definisana kao maksimalna strmina S_{max} sa slike 6.2),

S_{sr} —matematičko očekivanje maksimalne strmine struje atmosferskog pražnjenja,

σ_{lnI} —standardno odstupanje logaritma struje atmosferskog pražnjenja,

σ_{lnS} —standardno odstupanje logaritma strmine čela struje atmosferskog pražnjenja,

ρ —koeficijent korelacije između amplitude i strmine struje atmosferskog pražnjenja.

Pri statističkoj analizi parametara struje atmosferskog pražnjenja podatak o korelaciji između amplitude i strmine struje atmosferskog pražnjenja se pokazao kao najmanje poznat parametar u analizama raznih autora. Vrlo često se sreće prilaz po kome se amplituda i strmina struje atmosferskog pražnjenja razmatraju kao nezavisne slučajne veličine. U tom slučaju se mogu primenjivati zakoni raspodele amplitude i strmine struje korišćenjem izraza 6.8 na strani 181 i 6.11 na strani 184 nezavisno.

Prema [39] koeficijent korelacije ima pozitivnu vrednost $\rho = 0,49$, što pokazuje da postoji tendencija da struja veće amplitude ima i veću maksimalnu strminu. Prema [40] dobijeni su još veći koeficijenti korelacije.

Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma date su u tablici 6.2 prema različitim autorima [39],[5],[42].

Tabela 6.2: Brojčane vrednosti parametara dvojne raspodele struje atmosferskog pražnjenja

Raspodela G. Brown 1978					
Tip udara	I_{sr} (kA)	S_{sr} (kA/ μ s)	σ_{lnI} (rj)	σ_{lnS} (rj)	ρ (rj)
Prvi negativni	30	12	0.68	0.55	0.36
Raspodela Berger CIGRE 1991					
Prvi negativni	30	12	0.59	0.61	0.36
Uzastopni negativni	12	40	0.57	0.61	0.11
Pozitivni	35	2.4	1.21	1.54	-
Raspodela IEEE CIGRE 1991					
Prvi negativni	33	24.3	0.484	0.53	0.36
Uzastopni negativni	12.3	40	0.53	0.852	0.11

Parametri za pozitivne udare su najmanje poznati, zato se mogu smatrati nesigurnim.

Smatra se da je broj pozitivnih udara oko 10% u odnosu na negativne udare. Ovaj podatak se mora uzeti u obzir kao orijentacioni.

Dvojna raspodela parametara atmosferskih pražnjenja se pokazuje kao vrlo pogodna za detaljnije procene ugroženosti objekata od atmosferskih pražnjenja, mada se parametri raspodele moraju stalno korigovati u skladu sa novim rezultatima merenja od strane raznih autora.

Amplituda i strmina struje groma su najvažniji parametri za procenu ugroženosti elektroenergetskih objekata. Velika amplituda struje izaziva omski pad napona, posebno na otporu uzemljenja objekata, a struja velike strmine izaziva induktivni pad napona na provodnicima kroz koje protiče, kao i indukovanе napone u magnetski spregnutim konturama. Dalekovodni stub se ponaša kao induktivni elemenat na kome se javlja pad

napona srazmeran strmini talasa. Ostali parametri atmosferskog pražnjenja nisu od tolike važnosti za koordinaciju izolacije elektroenergetskih objekata.

Određivanje maksimalnih parametara struja atmosferskih udara pri determinističkom proračunu

Pri determinističkom proračunu biraju se najkritičniji uslovi koji mogu biti premašeni sa dovoljno malom verovatnoćom. Izbor verovatnoće sa kojom parametri atmosferskog pražnjenja mogu biti premašeni se za slučaj normalne raspodele slučajnog parametra x dati za verovatnoće premašenja 5%, 2% i 1 % u tabeli 6.3

Tabela 6.3: Tabela verovatnoća premašenja slučajne veličine $X > x$ za normalnu raspodelu

x	$F(X > x)$
1.65	0.95
2.05	0.98
2.33	0.99

Slučajna promenljiva x definisana je kao normalizovan logaritam amplitude struje, odnosno

$$x_{max} = \frac{\ln \frac{I_{max}}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (6.15)$$

gde je: I_{max} usvojena maksimalna vrednost struje za koju je verovatnoća premašenja data u tabeli 6.3. Iz izraza 6.15 se može izračunati vrednost struje I_{max} .

$$I_{max} = I_{sr} \cdot e^{(\sigma_{\ln I} x_{max})} \quad (6.16)$$

Maksimalne vrednosti struja koje mogu biti premašene sa zadatom verovatnoćom, za prve negativnih udare, data u tabeli 6.4. Prvi negativni udari se smatraju za najznačajnije za koordinaciju izolacije jer imaju najveću amplitudu struje. Strmina čela struje sa jedne strane povećava induktivne padove napona, ali sa druge strane strmiji naponski talasi teže izazivaju preskok na vazdušnoj izolaciji, pa se ta dva efekta donekle kompenzuju. U svakom slučaju, program omogućava da se proračunava rizik preskoka od svih tipova udara.

Minimalne vrednosti struja se mogu odrediti iz izraza:

$$I_{min} = I_{sr} \cdot e^{(-\sigma_{\ln I} x_{max})} \quad (6.17)$$

U programu GROM koji je razvijen na ETF u Beogradu, mogu se birati raspodele iz tabele 6.2, stim što postoji mogućnost sledećih kombinacija:

Tabela 6.4: Maksimalne vrednosti struja prvih negativnih udara koji mogu biti premašene sa zadatom verovatnoćom

	P(I>)=5%	P(I>)=2%	P(I>)=1%
σ_{ln_I}	I(kA)		
0.59	79	101	119
0.68	92	121	146

Berger1 -Bergerova prirodna raspodela, u kojoj se maksimalna vrednost struje prvih udara, kao i minimalna vrednost, određuje na osnovu izraza 6.16 i 6.17. Raspodela je usvojena na osnovu [39] i [42]

Berger2 - Bergerova raspodela sa ograničenjima, sa parametrima raspodele iz tabele 6.2, ali sa minimalnom strujom limitiranom na $I_{min} = 2$ kA i maksimalnom strujom koja se koristi kod determinističkog proračuna $I_{max} = 121$ kA.

Cigre - raspodela kombinovana rezultatima [39] i [42], sa podacima za pozitivne udare prema [39].

IEEE - parametri raspodele prema rezultatima [5].

IEC - parametri raspodele koji su specifični jer daju determinističku vezu između struja i strmine struje, koja će posebno biti opisana,[13].

Mora se naglasiti da pri određivanju logaritma standardnog odstupanja kod logaritamsko-normalne raspodele u nekim radovima (na primer [5]) se daje rasipanje u odnosu na prirodni logaritam σ_{ln_I} , a u [42] se daje kao dekadni logaritam σ_{lg_I} . Odnos između tih veličina je:

$$\sigma_{ln_I} = 2.302585 \cdot \sigma_{lg_I} \quad (6.18)$$

Kod raspodele prema [13] amplituda struje prvih negativnih udara je usvojena prema raspodeli IEEE CIGRE 1991 iz tabele 6.2. Trajanje čela određeno je sledećom relacijom:

$$T_c = 0.154 \cdot I^{0.624} \quad (6.19)$$

Relacija 6.19 važi za struje veće od 20 kA. Strmina struje se dobija iz izraza:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I_{max}}{T_c} \quad (6.20)$$

Količina elektriciteta

Količina elektriciteta predstavlja merilo energije koja se prenosi atmosferskim pražnjenjem. Ova veličina je značajna za procenu termičkih efekata radi sprečavanja topljenja

metalnih površina usled udara atmosferskog pražnjenja, a posebno je značajna za određivanje potrebne energetske apsorpcione moći odvodnika prenapona.

U tablici 6.5 prikazane su statističke vrednosti količine elektriciteta prvog udara i ukupne količine elektriciteta kompletnog pražnjenja pod pretpostavkom da su i ove veličine raspoređene po logaritamsko–normalnom zakonu, prema [39].

Pri razmatranju količine elektriciteta atmosferskih pražnjenja razlikuje se **udarna količina elektriciteta** (Q_{ud}) koja se odnosi samo na deo pražnjenja koji se odlikuje brzom promenom struje i **količina elektriciteta pražnjenja** (Q), koja se odnosi na kompletnu količinu elektriciteta pri udaru i obuhvata dugotrajnu struju pražnjenja koja ima znatno manju amplitudu, ali relativno duže trajanje, a može se javiti pre i posle glavnog pražnjenja.

U tablici 6.5 dati su parametri raspodele udarne količine elektriciteta prvih negativnih, pratećih negativnih i pozitivnog kompletnog pražnjenja (koje je uvek jednostruko). U tablici 6.6 dati su parametri raspodele količine elektriciteta prvih negativnih pražnjenja, kompletnih negativnih pražnjenja i pozitivnih udara.

Tabela 6.5: Parametri raspodele udarne količine elektriciteta

	$Q_{ud_{sr}}$ (C)	$\sigma_{lnQ_{ud}}$ (rj)
Prvi negativni udari	4,5	0,87
Prateći negativni udari	0,95	0,87
Pozitivna pražnjenja	16	1,31

Količina elektriciteta kompletnog pražnjenja i zbir količina elektriciteta prvog i uzastopnih negativnih pražnjenja se razlikuju za udeo količine elektriciteta koji protiče kanalom atmosferskog pražnjenja u pauzama između udara, koja takođe može da dodatno opteretiti odvodnik koji je u zagrejanom stanju usled predhodnih udara.

Tabela 6.6: Parametri raspodele količine elektriciteta kompletnog pražnjenja

	Q_{sr} (C)	σ_{lnQ}
Prvi negativni udari	5,2	0,93
Prateći negativni udari	1,4	1,2
Kompletni udari	7,5	1.014
Pozitivna pražnjenja	80	0,89

Oznake u tablicama imaju sledeće značenje:

$Q_{ud_{sr}}$ —srednja udarna količina elektriciteta,

$\sigma_{\ln Q_{ud}}$ —standardno odstupanje logaritma udarne količine elektriciteta.

Q_{sr} —srednja količina elektriciteta,

$\sigma_{\ln Q}$ —standardno odstupanje logaritma količine elektriciteta.

Može se uočiti da je količina elektriciteta pozitivnih udara znatno veća od negativnih.

Korelacija između amplitude struje prvih negativnih udara i količine elektriciteta kompletnog udara je prema [39] data je u tabeli 6.7:

Tabela 6.7: Korelacija između maksimalne struje prve komponente udara i količine elektriciteta

Vrsta udara	Korelacija ρ_{Q-I} (rj)
Negativni udari	0.61
Pozitivni udari	0.62

Na sličan način kao kod određivanja maksimalne struje za determinističke proračune, može se odrediti količina elektriciteta negativnih udara koja može da bude premašena sa verovatnoćom od 2%. Za negativne udare kao merodavna se računa količina elektriciteta kompletnog pražnjenja $Q_{sr_{kom}} = 7.5$ C, koja ima $\sigma_{\ln_{kom}} = 1.05$ rj. Maksimalna količina elektriciteta koja može biti premašena sa verovatnoćom 2% je prema tabeli 6.3:

$$Q_{Max_{kom}} = Q_{sr_{kom}} \cdot e^{(\sigma_{\ln_{kom}} 2.05)} \quad (6.21)$$

Kada se izračuna, dobija se za kompletna negativna pražnjenja:

$$Q_{Max_{kom}} = 58.2 \text{ C} \quad (6.22)$$

Za pozitivne talase je srednja vrednost opterećenja $Q_{sr_{poz}} = 80$ C, a $\sigma_{\ln_{poz}} 0.86$ rj. Kada se izračuna maksimalna količina elektriciteta kod pozitivnog pražnjenja, dobija se:

$$Q_{Max_{poz}} = 466 \text{ C} \quad (6.23)$$

6.2.2 Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja

Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja daju informaciju o grmljavinskoj aktivnosti na nekom području. Mogu se podeliti na dve grupe:

- Opšti meteorološki parametri pražnjenja,
- Parametri pražnjenja vezani za elektroenergetske objekte.

a) Opšti meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja

Jedan od najčešće korišćenih opštih meteoroloških parametara atmosferskih pražnjenja koji služi kao merilo grmljavinske aktivnosti na nekom području je keraunički nivo.

Keraunički nivo T_d se definiše kao prosečan broj dana sa grmljavinom u toku jedne godine na određenom području. Određuje se osmatranjem. Pod grmljavinskim danom se smatra dan kada se bar jedanput začuje grmljavina.

Osnovni nedostatak korišćenja kerauničkog nivoa kao jedinog merila grmljavinske aktivnosti je nedostatak podataka o intenzitetu grmljavinske aktivnosti.

Ovaj podatak se može dobiti na osnovu gustine pražnjenja u zemljinu površinu. Dnevna gustina pražnjenja N_{dn} predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u toku jednog grmljavinskog dana u horizontalnu površinu zemlje po km^2 . Godišnja gustina pražnjenja N_G predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u zemlju u toku jedne godine po km^2 .

Postoji sledeća veza između godišnje gustine pražnjenja, dnevne gustine pražnjenja i kerauničkog nivoa:

$$N_G = N_{dn}T_d \quad (6.24)$$

Gustina pražnjenja se može određivati osmatranjem, korišćenjem brojača pražnjenja ili postavljanjem stanica za lokalizaciju mesta pražnjenja. Osmatranjem se može dobiti broj pražnjenja samo približno za manju teritoriju dok se sistematskim praćenjem grmljavinske aktivnosti pomoću sistema za lokaciju pražnjenja može dobiti tačna slika o grmljavinskoj aktivnosti na jednoj teritoriji, ukoliko se prati najmanje 6 god.

Stanice za lokalizaciju pražnjenja daju informaciju o mestu na kome se pražnjenje dogodilo, kao i o amplitudi, polaritetu i broju komponenti pražnjenja.

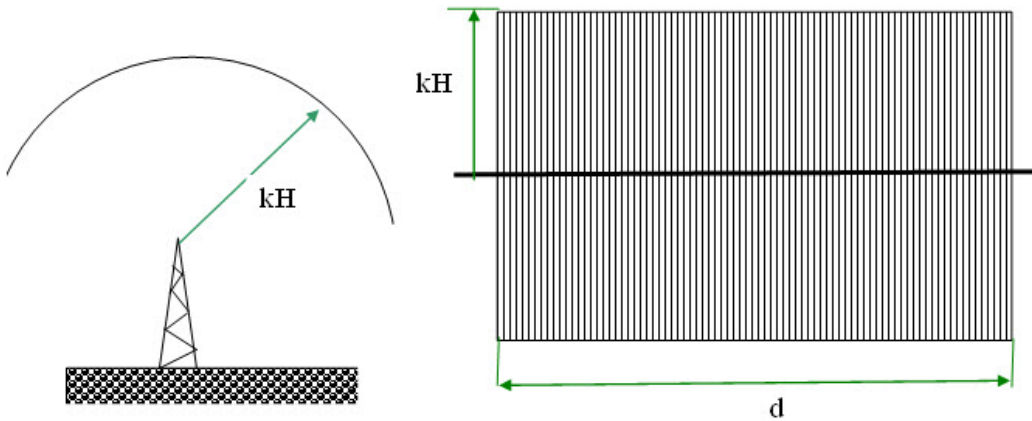
Da bi se dobila informacija o godišnjoj gustini pražnjenja za teritoriju zemlje u kojoj se ne vrši instrumentalno određivanje ovog parametra, može se koristiti približna empirijska formula za dobijanje gustine pražnjenja na osnovu kerauničkog nivoa [68]:

$$N_G = 0,04T_d^{1,25} \quad (6.25)$$

Ovakve empirijske formule mogu biti od velike koristi pri određivanju ugroženosti pojedinih objekata od atmosferskih pražnjenja, ali ih treba stalno korigovati u skladu sa povećanjem broja uzoraka pri sistematskom praćenju i registrovanju atmosferskih prenapona.

b) Broj pražnjenja u elektroenergetske objekte

Pri proučavanju ugroženosti elektroenergetskih objekata od atmosferskih pražnjenja najvažnije je proceniti očekivani broj pražnjenja u vodove. Pri tome se pretpostavlja da je poznata godišnja gustina pražnjenja u ravnu površinu zemlje $N_G[1/(km^2, god)]$. Prema [69] se može smatrati da je širina zone privlačnog dejstva dalekovoda za atmosferska pražnjenja (širina trase izloženosti) srazmerna visini dalekovoda. Usvaja se da je koeficijent srazmere $k = 3$ za vodove, a za stubove je uvećan za 1.2, odnosno iznosi 3.6. Trasa izloženosti prostire se simetrično na obe strane voda, kao na slici 6.5.



Slika 6.5: Atraktivna zona voda dužine d , prosečne visine H

Na slici 6.5 (desno) prikazana je horizontalna površina zemlje koja je ekranizovana atraktivnim dejstvom dalekovoda. Sva atmosferska pražnjenja koja bi se dogodila u zemlju unutar šrafirane površine završiće se na provodnicima ili zaštitnim užadima dalekovoda.

Na slici 6.5 (levo) prikazan je efekat privlačnog dejstva voda. Smatra se da udar atmosferskog pražnjenja završava na vodu ako se glava skokovitog lidera pred poslednji skok nalazi unutar cilindra poluprečnika kH , gde je H prosečna visina dalekovoda. Ostali udari se odvijaju u zemlju ili okolne objekte. Veličina kH naziva se visinom orijentacije atmosferskog pražnjenja. Usvojen je koeficijent privlačnog dejstva za vod $k = 3$, a za stubove je uvećan 1.2 puta.

Prihvata površina (atraktivna zona) nadzemnog voda je ravna površina zemlje u koju bi se odvijala atmosferska pražnjenja kada ne bi bilo voda. Za horizontalan vod prosečne visine najvišeg provodnika H (zaštitno uže ili najviše faze ako nema zaštitnog užeta), atraktivna površina je:

$$A_{ekv} = 2 \cdot 10^{-3} k \cdot H \cdot d \quad (6.26)$$

gde je:

A_{ekv} -ekvivalentna prihvatna površina u km^2 ,

$k = 3$ - empirijski koeficijent privlačnog dejstva za vod,

H -visina najvišeg provodnika (m),

d -posmatrana dužina voda (km).

Godišnji broj pražnjenja na 100 km voda može se proceniti na osnovu ovakvog prikaza korišćenjem sledećeg izraza:

$$n_{1god,100km} = 0.1N_G \cdot A_{ekv} \quad (6.27)$$

Ako se usvoji da je poluprečnik atraktivne zone dat izrazom 6.26 prema [70], broj udara na 100 km je:

$$n_{1god,100km} = 2 \cdot k \cdot H \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot N_G = 0.2 \cdot k \cdot H \cdot N_G \quad (6.28)$$

gde su:

H – prosečna visina voda (m)

N_G – godišnja gustina pražnjenja po km^2 .

Primenom sledećeg empirijskog izraza prema [39] može se izračunati godišnji prosečan broj udara u vod dužine 100 km:

$$n_{1god,100km} = 0.1 \cdot (b + 2R_a) \cdot N_G \quad (6.29)$$

gde je:

R_a – prosečna veličina privlačnog rastojanja voda u (m),

b – razmak između zaštitnih užadi (m), ako ih ima. Ako nema, tada je $b = 0$.

Privlačno rastojanje voda ne zavisi od amplitude struje pražnjenja

Privlačno rastojanje voda se može izračunati iz izraza za slučaj da atraktivno rastojanje voda R_a ne zavisi od amplitude struje atmosferskog pražnjenja I u sledećem opštem obliku:

$$R_a = K_c \cdot H^{K_2} \quad (6.30)$$

Modifikacija ovog izraza prikazana je u [42],[70].

$$n_{1god,100km} = 0.1 \cdot N_G \cdot (b + 2 \cdot K_c \cdot H^{K_2}) \quad (6.31)$$

Preporučuju se sledeće empirijske konstante:

$$K_c = 14 \quad (6.32)$$

$$K_1 = 28 \quad (6.33)$$

$$K_2 = 0.6 \quad (6.34)$$

Ovaj izraz se koristi za proračun prihvatne površine nadzemnog voda na dužini od 100 km, ako se atraktivno rastojanje R_a izražava u (m), u sledećem obliku.

$$N_L = 0.1 \cdot N_G \cdot (b + K_1 \cdot H^{K_2}) \quad (6.35)$$

Privlačno rastojanje voda zavisi od amplitude struje pražnjenja

Ukoliko se smatra prema elektroteometrijskom modelu koji je opisan u sekciji 8.3 da poslednji skok skokovitog lidera zavisi od struje glavnog udara, u tom slučaju prema [70] se atraktivno rastojanje može odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$N_L = 0.1 \cdot N_G \cdot (b + K_{I1} \cdot I^{K_{I2}} H^{K_{I3}}) \quad (6.36)$$

gde koeficijenti imaju sledeće vrednosti

$$K_{I1} = 0.84 \quad (6.37)$$

$$K_{I2} = 0.74 \quad (6.38)$$

$$K_{I3} = 0.6 \quad (6.39)$$

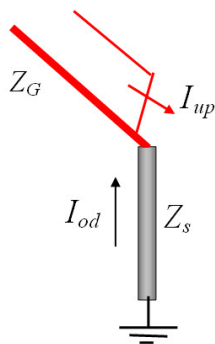
Preporučuje se strujno nezavisni model za primene u koordinaciji izolacije.

Poglavlje 7

Modelovanje elemenata

7.1 Modelovanje atmosferskog pražnjenja

Atmosfersko pražnjenje se pri proračunima prenapona u elektroenergetskom sistemu modeluje preko strujnog talasa koji nailazi po kanalu groma koji se zamenjuje vodom konstantne karakteristične impedanse. Karakteristična impedansa kanala groma se kreće u opsegu od $Z_G = 200 \Omega$ do $Z_G = 3000 \Omega$, stim što veće vrednosti odgovaraju manjim amplitudama struja. Pri proračunima se usvaja karakteristična impedansa kanala groma 300 do 400Ω . Na slici 7.1 predstavljen je model kanala groma pri udaru u stub u vidu voda karakteristične impedanse Z_G koji je spojen sa vrhom stuba karakteristične impedanse Z_S , koji je uzemljen tako da je otpornost uzemljivača $R_{uz} = 0$. Ukupna struja po kanalu groma se može rastaviti na dve komponente struje. Jedna komponenta se kreće u vidu putujućeg talasa od oblaka ka objektu (stubu), a druga komponenta, koja se odbija od uzemljivača, kreće se ka oblaku. Ukupna struja se dobija superpozicijom, kao na slici 7.1.



Slika 7.1: Tumačenje procene amplitude struje u dobro uzemljen objekt

Smatra se da je karakteristična impedansa stuba po svojoj vrednosti bliska karak-

terističnoj impedansi kanala groma, pa su usvojene da su identične. Pod tim uslovom se strujni talas koji dolazi po kanalu groma ne reflektuje od vrha stuba. Po kanalu groma dolazi upadni talas amplitude I_{up} koji se prostire bez izobličenja po stubu, dolazi do uzemljivača stuba i totalno se odbija, jer je otpor uzemljenja stuba mnogo manji nego karakteristična impedansa stuba (bar 20 puta). Zbog toga je ukupna amplituda struje groma u dobro uzemljeni objekat:

$$I_m = I_{up} + I_{od} \quad (7.1)$$

odnosno:

$$I_m \approx 2I_{up} \quad (7.2)$$

Struja I_m je amplituda struje koja se dobija kao rezultat merenja bilo preko sistema za lokaciju pražnjenja ili sa eksperimentalnih poligona na kojima su rađena istraživanja parametara struje pražnjenja. Ako je poznata amplituda struje I_m u dobro uzemljeni objekat, tada se može odrediti vrednost upadne komponente struje po kanalu groma:

$$I_{up} \approx \frac{I_m}{2} \quad (7.3)$$

Vidi se da je upadna komponenta struje približno jednaka polovini ukupne struje groma u dobro uzemljeni objekat.

Atmosferski upadni talas se može predstaviti upadnim naponskim talasom, koji se prostire po kanalu groma, čija amplituda ima vrednost:

$$U_{up} = Z_G \frac{I_m}{2} \quad (7.4)$$

gde je I_m amplituda struje u dobro uzemljeni objekat.

Pri koordinaciji izolacije modelujemo kanal groma po kome se prostire upadna komponenta struje I_{up} ili naponski talas U_{up} . Sistem daje odziv na upadnu komponentu struje ili napona u zavisnosti od konfiguracije sistema, kao i načina na koji su elementi spojeni sa zemljom. To znači da ako se pražnjenje odvija u objekat koji je uzemljen preko velike impedanse, tada će struja pražnjenja biti manja.

Prenaponi koji imaju najopasnije delovanje na izolaciju vodova i razvodnih postrojenja su atmosferski prenaponi, koji nastaju pri direktnom atmosferskom pražnjenju u nadzemne vodove, elemente razvodnih postrojenja ili u njihovu blizinu. Da bi se ispitala sposobnost izolacije da podnese udarne naponske talase atmosferskog porekla ili sklopne prenapone u laboratorijskim uslovima, grade se uređaji koji proizvode udarne napone koji se nazivaju udarnim generatorima. Udarni generatori su nezaobilazni elemenat svake laboratorije za visoki napon. Talasni oblik napona koji daju udarni generatori treba da je što sličniji stvarnom obliku atmosferskih pražnjenja. Na osnovu registracija talasnih

oblika struja pražnjena [6], [39] predložen je oblik napona na osnovu koga se definišu bitne karakteristike oblika struje prvih negativnih atmosferskih udara, kao na slici 6.2, na strani 179. Oblici struje se menjaju od udara do udara, zavise i od polaritetam ali predstavljeni oblik se često može uočiti na snimcima struje pražnjenja. Za proračune i laboratorijska ispitivanja pogodniji je jednostavniji oblik, stoga je razvijen veći broj različitih modela.

7.1.1 Dvostruko eksponencijalni oblik strujnog i naponskog talasa

Talasni oblik napona ili struje dat dvostruko eksponencijalnom funkcijom je jednostavan, veoma se lako realizuje u laboratorijskim uslovima, a ima sličan oblik kao i realni talasni oblici. Po definiciji, pod udarnim naponom, atmosferskim ili sklopnim, podrazumeva se naponski talas određenog polariteta koji ima brz porast na čelu do maksimalne vrednosti, a zatim sporije opada do nule.

Analitičko predstavljanje naponskih udarnih talasa preko dve eksponencijalne funkcije dato je sledećom relacijom:

$$u(t) = U_o(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (7.5)$$

gde su:

U_o teorijski maksimalan napon koji daje generator,

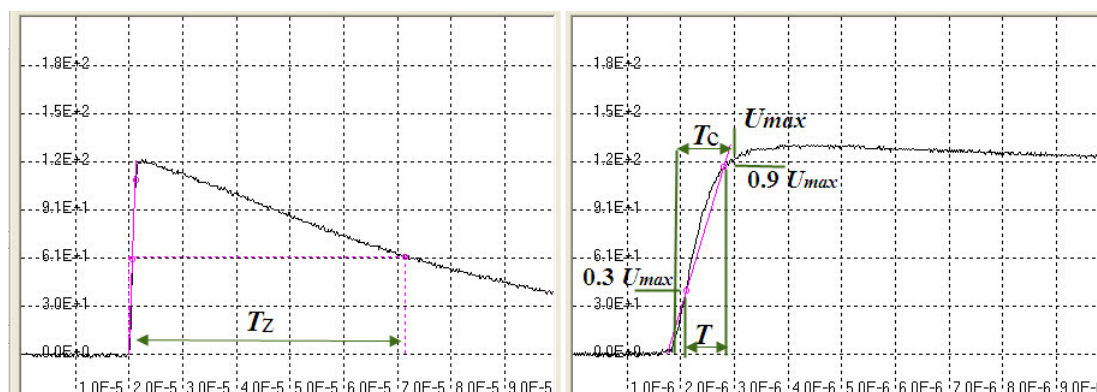
T_1 vremenska konstanta opadanja talasa na začelju,

T_2 vremenska konstanta porasta talasa na čelu.

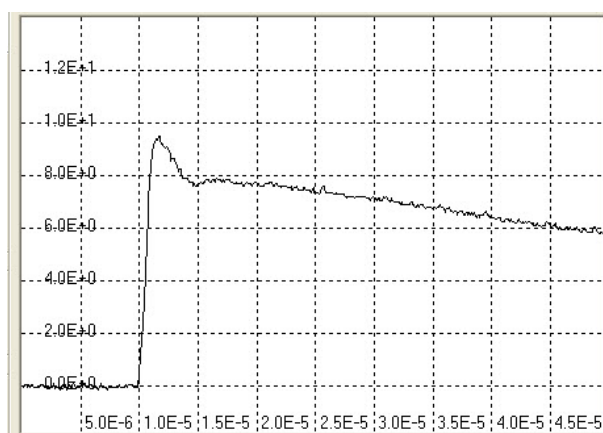
Realni talasi koji su dobijeni u laboratoriji za visoki napon imaju na početku talasa konkavni deo. Na slici 7.2 levo prikazan je kompletan registrovan talas u laboratoriji na kome se vide i čelo i začelje, a na slici desno prikazan je samo deo talasa na kome se može videti procedura određivanja čela talasa.

Previšenje napona je pojava oscilatorno prigušene oscilacije na vrhu talasa, koja ne sme da bude veća od 10% od amplitude talasa. Na slici 7.3 prikazan je snimak udarnog napona sa značajnim previšenjem koje je veće od 10 %.

Vreme čela talasa T_c se definiše kao vreme potrebno da talas poraste od vrednosti $0.3 U_{max}$ do vrednosti $0.9 U_{max}$ podeljeno sa 0.6, odnosno $T_c = T/0.6$. Kod ispitivanja visokonaponske opreme standardnim udarnim atmosferskim naponom prema standardu [14] vreme čela je $T_c = 1.2 \mu s \pm 30\%$. Vreme začelja se definiše kao vreme za koje talas opadne na polovinu vrednosti T_z , što je prikazano na slici 7.2, levo. Vreme začelja iznosi za ispitivanja standardnim udarnim atmosferskim naponom $T_z = 50 \mu s \pm 20\%$.



Slika 7.2: Kompletan talas na kome se vide i čelo i začelje (levo), deo talasa na kome se može videti procedura određivanja čela talasa (desno)



Slika 7.3: Registrovan udarni naponski talas sa previšenjem

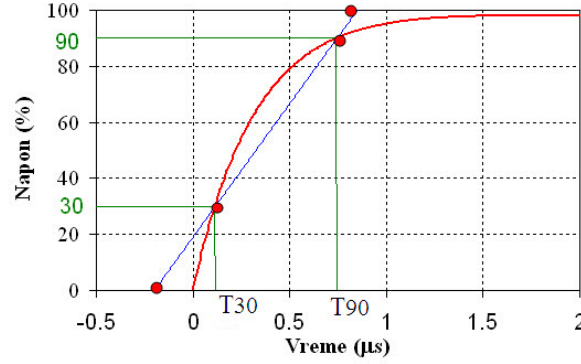
7.1.2 Određivanje vremenskih konstanti čela i začelja

Da bi odredili vremenske konstante potrebne za izbor elemenata udarnog naponskog generatora, razlaže se ukupan talas predstavljen dvostrukom eksponencijalnom funkcijom na dve nezavisne eksponencijalne funkcije koje odgovaraju čelu i začelju talasa.

Na slici 7.4 prikazan je samo deo eksponencijalnog talasa koji odgovara porastu napona na čelu. Ovaj talas se može prikazati sledećom eksponencijalnom funkcijom:

$$u(t) = U_o(1 - e^{-t/T_2}) \quad (7.6)$$

Vreme čela talasa se definiše kao vreme potrebno da linearizovano čelo talasa poraste od vrednosti 0% do vrednosti 100% od punog udarnog napona. Linearizovano čelo talasa se dobija kao prava koja prolazi kroz tačku kada talas postiže 30% od pune vrednosti i tačku kada talas postiže 90% pune vrednosti napona. Trenutak početka linearizovanog



Slika 7.4: Definicija čela atmosferskog udarnog talasa

čela talasa obeležen je sa T_0 , a trenutak kada linearizovan talas dostiže maksimum obeležen je sa T_{100} . Vreme čela talasa se može izračunati na osnovu izraza:

$$T_c = \frac{T_{90} - T_{30}}{0,6} \quad (7.7)$$

Vremenska konstanta čela talasa se može izračunati na osnovu vremena potrebnog da eksponencijalni talas postigne 30% i 90% od pune vrednosti napona, pod uslovom da je vreme začelja neuporedivo duže od vremena čela, odnosno:

$$0,3U_0 = U_0(1 - e^{-\frac{T_{30}}{T_2}}) \Rightarrow 0,7 = e^{-\frac{T_{30}}{T_2}} \quad (7.8)$$

$$0,9U_0 = U_0(1 - e^{-\frac{T_{90}}{T_2}}) \Rightarrow 0,1 = e^{-\frac{T_{90}}{T_2}} \quad (7.9)$$

$$(7.10)$$

U gornjem sistemu jednačina se smatra da je vremenska konstanta začelja T_1 neuporedivo duža od vremenske konstante čela T_2 i da se može smatrati neograničeno dugom. Iz gornjeg sistema jednačina deljenjem gornje jednačine sa donjom može se izračunati razlika $T_{90} - T_{30}$, odnosno:

$$T_{90} - T_{30} = T_2 \ln(7) \quad (7.11)$$

Vodeći računa o izrazu 7.7 i da je vrednost $\ln(7) = 1.946$ dobija se da je:

$$T_c = (1.946/0.6) \times T_2 = 3.243 \times T_2 \quad (7.12)$$

Vremenska konstanta čela je:

$$T_2 = T_c/3.243 \quad (7.13)$$

Začelje talasa se može modelovati nezavisno od čela, smatrajući da je čelo mnogo kraće od začelja i da je praktično čelo završeno u trenutku maksimuma napona, proglašavajući da je trenutak $t=0$ početak začelja. U tom slučaju začelje talasa se može modelovati eksponencijalnom funkcijom 7.14:

$$u(t) = U_o e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (7.14)$$

Vreme začelja je vreme potrebno da talas opadne na polovnu svoje početne vrednosti, odnosno:

$$0.5U_o = U_o e^{-\frac{T_z}{T_1}} \quad (7.15)$$

Kada se izvrši logaritmovanje obe strane, posle preračunavanja se dobija odnos vremenske konstante začelja i vremena začelja:

$$T_z = T_1 \cdot \ln(2) \text{ ili } T_z = 0.693 \cdot T_1 \quad (7.16)$$

Vremenska konstanta začelja je:

$$T_1 = T_z / 0.693 \quad (7.17)$$

Za standardni atmosferski udarni napon čije je vreme čela $T_c = 1.2 \mu s$ i vreme začelja $T_z = 50 \mu s$, vremenske konstante čela i začelja su:

$$\begin{aligned} T_2 &= 0.37 \mu s \\ T_1 &= 72.15 \mu s \end{aligned} \quad (7.18)$$

Maksimalna vrednost napona U_{max} je manja od U_o i može se odrediti tražeći maksimalnu vrednost funkcije 7.5.

Trenutak nastupanja maksimalne vrednosti napona t_m se dobija izjednačavanjem prvog izvoda funkcije 7.5 sa nulom, odnosno:

$$u'(t_m) = U_o \left(-\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_m}{T_1}} + \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_m}{T_2}} \right) = 0 \quad (7.19)$$

Izraz 7.19 se može napisati u sledećem obliku:

$$\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_m}{T_1}} = \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_m}{T_2}} \quad (7.20)$$

Deljenjem kompletnog izraza sa desnom stranom se dobija:

$$\frac{T_2}{T_1} e^{-t_m(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} = 1 \text{ odnosno } \frac{T_2}{T_1} = e^{t_m(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})} \quad (7.21)$$

Logaritmovanjem obe strane i izračunavanjem trenutka pojave maksimalne vrednosti t_m se dobija:

$$\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = t_m \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (7.22)$$

Posle izračunavanja se dobija:

$$t_m = \frac{\ln(\frac{T_2}{T_1})}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (7.23)$$

Za standardni atmosferski udarni talas sa parametrima prema 7.18 posle izračunavanja se dobija da je $t_m = 1.96 \mu s$.

Maksimalna vrednost napona U_{max} u trenutku t_m iznosi:

$$U_{max} = u(t_m) = U_o(e^{-t_m/T_1} - e^{-t_m/T_2}) \quad (7.24)$$

Kada se izračuna, dobija se vrednost maksimalnog napona za t_m :

$$t_m = 0.968 \times U_o \quad (7.25)$$

U nekim zemljama se koriste naponski talasi oblika $1/50$ za ispitivanje izolacije visokonaponske elektroenergetske opreme, a za ispitivanje elemenata prenaponske zaštite telekomunikacionih uređaja se koriste talasi različitog oblika, na primer oblika $0,3/50$, $10/700$ itd.

7.1.3 Uprošćen eksponencijalni oblik

U proračunima se može koristiti uprošćeni eksponencijalni oblik talasa koji uvek daje nešto kritičnije rezultate nego dvostruki eksponencijalni talas jer se ovom metodom ne modeluje opadanje talasa na začelju. Uprošćeni eksponencijalni talas se dobija prema izrazu:

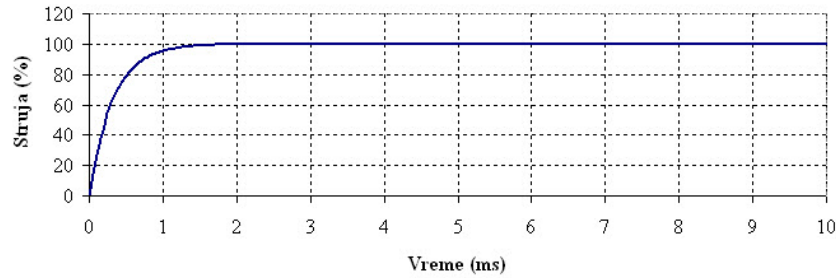
$$I(t) = I_{max}(1 - e^{-t/T_2}) \quad (7.26)$$

U izrazu 7.26 I_{max} predstavlja amplitudu strujnog talasa. Može se smatrati da se maksimalna vrednost struje uspostavlja posle $t > 3 \times T_2$, sa greškom od $\Delta I \approx 5\%$.

Pri proračunima atmosferskih prenapona na elektroenergetskim postrojenjima najčešće se još u toku uspona strujnog talasa počinje javljati opadanje naponskog odziva zbog delovanja prenaponske zaštite i preskoka. Zbog toga začelje talasa najčešće ne igra bitnu ulogu u proračunima, jer se maksimalni prenapon u postrojenju obično pojavljuje za vreme trajanja čela talasa. Na slici 7.5 prikazan je oblik strujnog talasa datog relacijom 7.26.

Vreme čela talasa se određuje na isti način kao kod talasa modelovanog sa dve eksponencijalne funkcije.

Talas modelovan jednom eksponencijalnom funkcijom

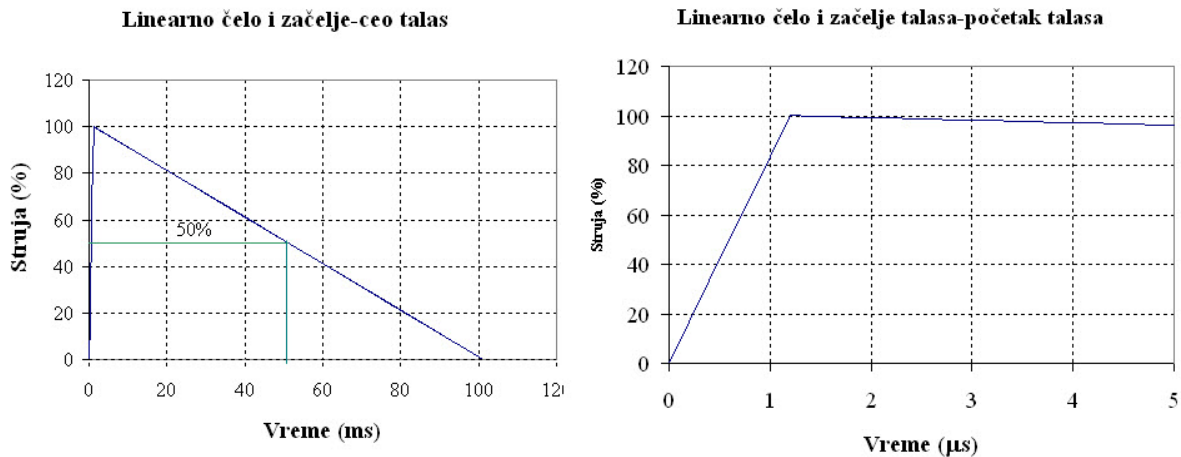


Slika 7.5: Talas eksponencijalnog čela i konstantnog začelja

7.1.4 Talas linearnog čela i linearnog začelja

Pri proračunima atmosferskih prenapona se dobijaju slični rezultati primenom talasa linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja kao i pri primeni eksponencijalnog talasa istih parametara.

Talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja prikazan je na slici 7.6.



Slika 7.6: Talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja

Na slici 7.6 označeni su sa T_c vreme trajanja čela talasa i sa T_z vreme opadanja do polovine maksimalne vrednosti amplitude talasa. Analitički izraz za ovakav talas ima oblik:

$$I(t) = \left\{ \begin{array}{ll} a_1 t \cdot h(t) & \text{za } t < T_c \\ a_1 t \cdot h(t) - (a_1 + a_2)(t - T_c)h[t - T_c] & \text{za } T_c \leq t < 2T_z \\ 0 & \text{za } t \geq 2T_z \end{array} \right\} \quad (7.27)$$

gde su:

a_1 – strmina struje na čelu talasa,

a_2 – brzina opadanja struje na začelju.

$$a_1 = \frac{I_{max}}{T_c} \quad (7.28)$$

$$a_2 = \frac{I_{max}}{2(T_z - T_c)} + a_1 \quad (7.29)$$

$h(t)$ – jedinična odskočna funkcija.

Prvi član u izrazu 7.27 definiše čelo talasa, drugi član opisuje začelje talasa, a treći član definiše deo funkcije koji posle vremena $2T_2$ poništava talas da se ne bi produžio kao negativna linearna funkcija.

7.1.5 Talas linearnog čela i konstantnog začelja

Iz istog razloga kao i kod eksponencijalnog talasa najčešće je dovoljno koristiti talas konstantnog začelja, kao na slici 7.7. Analitički izraz za ovaj oblik talasa je:



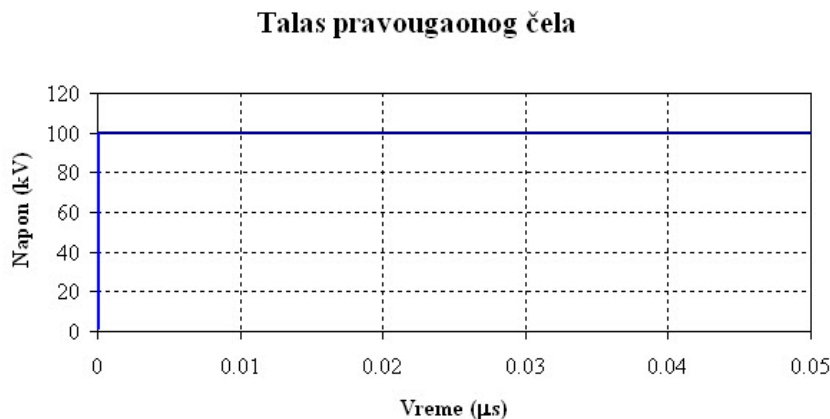
Slika 7.7: Talas linearnog čela i konstantnog začelja

$$I(t) = a_1[t \cdot h(t) - (t - T_1)h(t - T_1)] \quad (7.30)$$

Pri statističkoj analizi atmosferskih prenapona gornji oblik talasa je najpovoljniji, jer u njemu figurišu samo strmina i amplituda struje, tako da se celokupna statistička analiza može izvršiti na bazi samo dve slučajne promenljive, koje imaju dominantan uticaj na rezultate proračuna rizika kvara izolacije.

7.1.6 Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja

U praktičnoj analizi često se koristi uprošćen oblik talasa u vidu odskočne funkcije, kao na slici 7.8.



Slika 7.8: Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja

Opšti oblik talasa dat je analitičkim izrazom:

$$I(t) = I_{max}h(t) \quad (7.31)$$

Rezultati dobijeni modelom talasa sa beskonačnom strminom čela su najkritičniji sa stanovišta ugroženosti izolacije, pa je korisno prvu procenu visine prenapona izvršiti primenom ovakvog talasa, a zatim detaljniju analizu primenom nekog od ranije navedenih modela.

Pravougaoni talas je pogodan za edukativne svrhe za ispitivanja osetljivosti rezultata na različite modele elemenata.

7.1.7 CIGRE talas sa konkavnim čelom

CIGRE talas sa konkavnim čelom [6] služi za predstavljanje realnijeg oblika talasa koji se javljaju u prirodi.

Čelo struje

Talasni oblik čela struje po ovoj metodi definisan je izrazom prema [6]:

$$I(t) = A \cdot t + B \cdot t^n \quad (7.32)$$

gde je: t - vreme (μs). Ostale oznake imaju sledeće značenje:

t_f -vreme čela (μs),

S_m -maksimalna strmina (kA/ μs),

t_n -trenutak kada struja postiže 90 % od amplitude struje, kada je pretpostavljeno da je strmina struje maksimalna,

I - amplituda struje (kA).

$$\begin{aligned} s_n &= S_m \frac{t_f}{I} \\ n &= 1 + 2(s_n - 1)(2 + \frac{1}{s_n}) \\ t_n &= 0.6t_f \left[\frac{3s_n^2}{1 + s_n^2} \right] \\ A &= \frac{1}{n-1} \left[0.9 \left(\frac{I}{t_n} \right) \cdot n - S_m \right] \\ B &= \frac{1}{t_n^n \cdot (n-1)} [S_m t_n - 0.9I] \end{aligned}$$

Osnovna pretpostavka je da maksimalna strmina struje nastupa u trenutku kada je struja 90 % od amplitude u trenutku t_n koje zavisi od eksponenta n .

Začelje struje

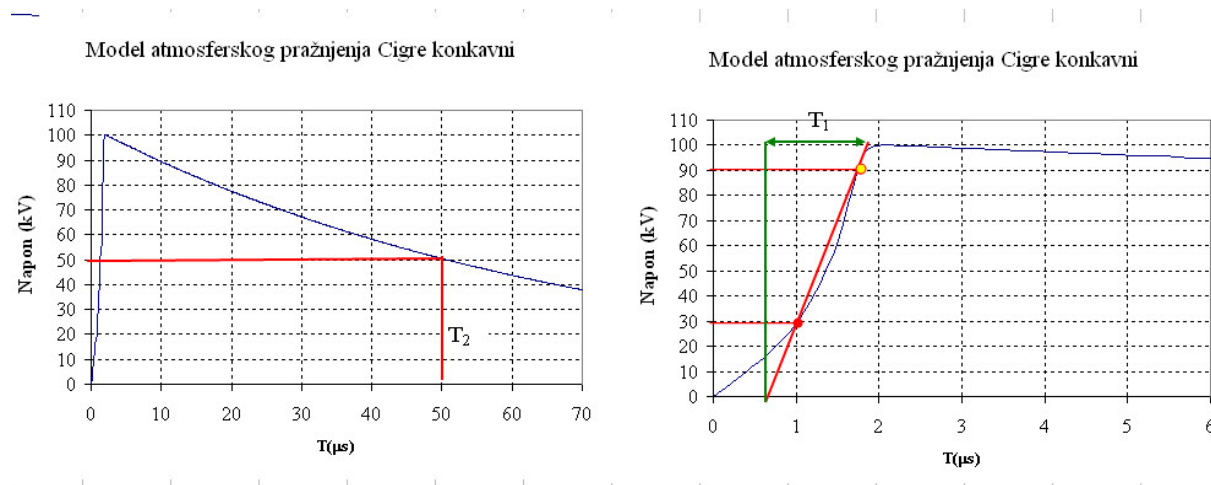
Izraz za začelje struje dat je relacijom:

$$I = I_1 e^{-\frac{t-t_n}{t_1}} - I_2 e^{-\frac{t-t_n}{t_2}} \quad (7.33)$$

gde su:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \frac{t_h - t_n}{\ln(2)} \\
 t_h &- \text{ vreme opadanja na polovinu vrednosti} \\
 t_2 &= 0.1 \frac{I}{S_m} \\
 I_1 &= \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[S_m + 0.9 \frac{I}{t_2} \right] \\
 I_2 &= \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[S_m + 0.9 \frac{I}{t_1} \right]
 \end{aligned}$$

Talasni oblik CIGRE konkavne struje realizovan u programu EMTP-atp za podešene parametre generatora $T_f = 1.2 \mu s$ i $T_h = 50 \mu s$ i maksimalnom strminom napona na čelu $S_{max} = 1.41 \cdot 10^{11}$ (A/s), koji posle proračuna daje tačno parametre talasa vreme čela $T_1 = 1.2 \mu s$ (slika desno) i vreme začelja $T_2 = 50 \mu s$ (slika levo), na slici 7.9.



Slika 7.9: Talasni oblik struje opisan CIGRE konkavnim modelom -začelje levo i čelo desno

7.1.8 Haidlerova funkcija

U naučnim istraživanjima se često koristi Haidlerova (Heidler) funkcija [18], [19], [20], [21], [22]. Iako je ova funkcija u analitičkom obliku složena isto kao i CIGRE konkavna funkcija, našla je primenu zajedno sa CIGRE konkavnom funkcijom u programskom paketi ATPDraw u okviru programa EMTP-atp, stoga će na ovom mestu biti opisana.

Hajdlerov model struje u kanalu groma može se analitički predstaviti u sledećem obliku:

$$I = \frac{I_{max}}{K} \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^n} e^{-\frac{1}{T_2}} \quad (7.34)$$

gde je:

I_{max} -maksimalna vrednost struje groma (kA),

K -koeficijent korekcije,

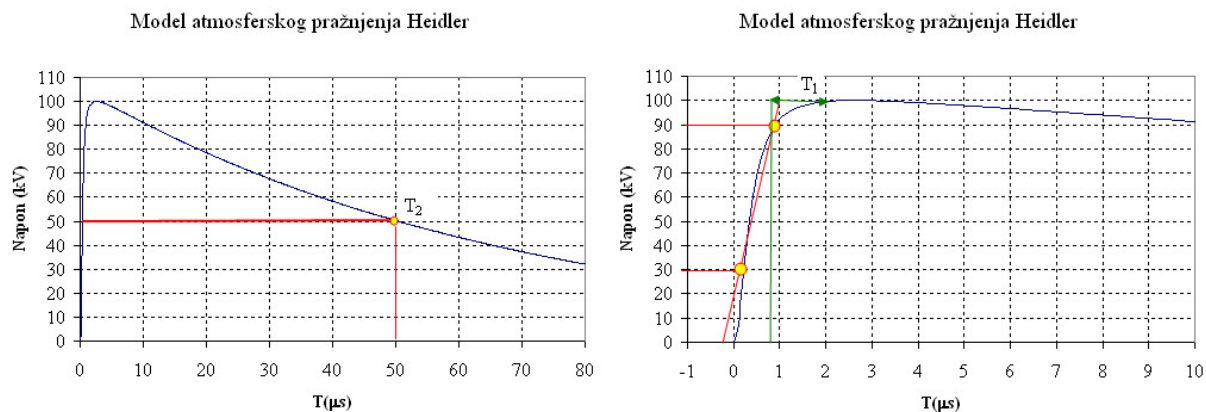
n -eksponent za koji se predlaže vrednost koja zavisi od oblika talasa.

t -vreme (μs),

T_1 -vremenska konstanta čela (μs), iznosi $2.6 \mu s$ za talas oblika $1.2/50 \mu s$,

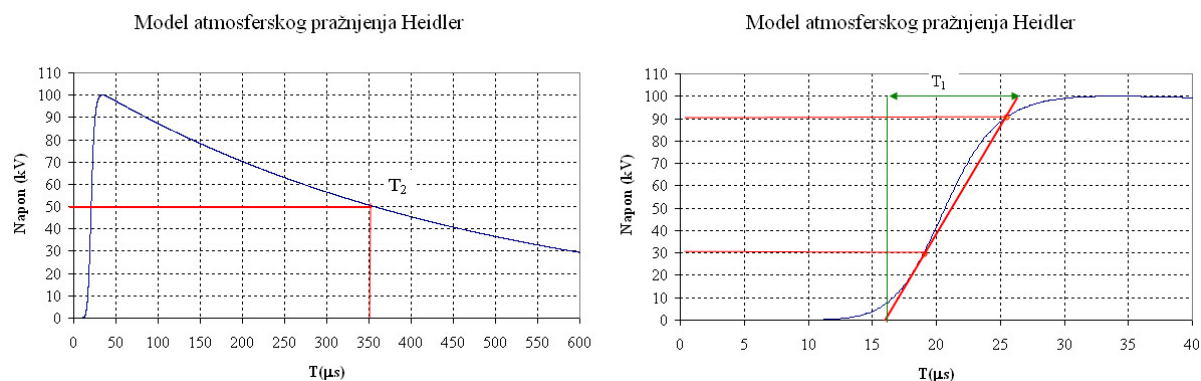
T_2 -vremenska konstanta začelja (μs). iznosi $6.7 \mu s$ za talas oblika $1.2/50 \mu s$.

Na slici 7.10 predstavljen je Heidlerov model prvog negativnog talasa oblika $1.2/50 \mu s$.



Slika 7.10: Heidlerov model talasa $1.2/50 \mu s$

Za ispitivanja niskonaponskih prenaponskih zaštitini uređaja (skraćenica SPD od engl. Surge Protective Devices) koriste se talasi $10/350 \mu s$ koji odgovaraju pozitivnim strujnim impulsima. Na slici 7.11 prikazan je talas oblika $10/350 \mu s$ dobijen pomoću programa EMTP-atp.



Slika 7.11: Talasni oblik dobijen pomoću Heindlerove funkcije za standardni pozitivan talas oblika 10/350μs

Za standardni talas su odabrani sledeći parametri talasa:

$$\begin{aligned}
 n &= 10 \\
 T_f &= 34 \mu s \\
 T_2 &= 460 \mu s \\
 K &= 1
 \end{aligned}
 \tag{7.35}$$

Ovi parametri se razlikuju od parametara koji su preporučeni u [20] i [15], što je posledica razlika u postupka proračuna u programu EMTP-atp u odnosu na druge postupke.

7.1.9 Zaključna razmatranja

Za proračun atmosferskih prenapona u cilju koordinacije izolacije elektroenergetskih mreža i postrojenja prednost treba dati talasu linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg za-čelja. Postoji više razloga za takav izbor:

- Ovakav talas je jednostavan u pogledu definisanja parametara,
- strmina čela talasa, koja je ključan faktor zbog pada napona na induktivitetima elemenata, definisana je direktno pravom koja definiše čelo talasa, tako da je strmina konstantna u toku kompletnog trajanja čela,
- realni talasi se toliko međusobno razlikuju, da nema smisla koristiti složene matematičke modele za pojave koje imaju tako izraženo rasipanje karakteristika,

- konkavni deo na samom početku talasa ima neznatan uticaj na prenaponske pojave,
- metoda opasnih parametara koja predstavlja efikasnu statističku metodu, podrazumeva korišćenje talasa linearnog čela.

7.2 Modelovanje provodnika

7.2.1 Modelovanje zaštitnog užeta

Zaštitno uže se modeluje kao provodnik karakteristične impedanse Z_u i dužine d između dva susedna stuba.

Karakteristična impedansa zaštitnog užeta je:

$$Z_u = 60 \ln \frac{2H_{ef}}{R_u} \quad (7.36)$$

gde su:

$$H_{ef} = H_{st} - \frac{2}{3}f \quad (7.37)$$

H_{ef} – efektivna visina zaštitnog užeta iznad zemlje,

H_{st} – visina stuba,

f – ugib zaštitnog užeta na sredini raspona,

R_u – poluprečnik užeta.

Primenom izraza 7.37 obuhvata se efekat promene visine užeta duž raspona.

Pri proračunu prostiranja talasa duž raspona po zaštitnom užetu uvažava se u obzir korona, prema ranije opisanom postupku. Za sve napone ispod kritičnog napona korone ne uvažava se dopunsko kašnjenje talasa. Kritični napon korone se određuje primenom sledećeg izraza [9]:

$$E_{kr} = 23,3m\delta\left[1 + \frac{0,62}{\delta R_u^{0,38}}\right] \quad (7.38)$$

gde su:

m – koeficijent glatkosti provodnika, koji je u granicama $0,82 - 0,94$, dok za zaprljane i uvlažene provodnike može da ima vrednosti čak i do $0,6$. Pošto se sa većim koeficijentom glatkosti dobija i viša kritična vrednost korone, može se usvojiti $m = 0,94$, čime se dobija na sigurnosti.

δ – specifična gustina vazduha, koja ima vrednost 1 pri standardnim uslovima ispitivanja pri pritisku 1033 milibara, temperaturi od 20°C i vlažnosti od 11g vodene pare na 1m^3 vazduha.

$$\delta = \frac{p}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \quad (7.39)$$

gde su:

δ - koeficijent svodenja preskočnog napona na normalne atmosferske uslove

p - atmosferski pritisak izražen u mBar,

t - temperatura izražena u $^\circ\text{C}$.

Pod normalnim atmosferskim uslovima se podrazumeva pritisak na visini mora, pri temperaturi ambijenta od 20°C

Promene ovog koeficijenta se zanemaruju do visine od 1000 m.

Kritična vrednost napona korone dobija se iz izraza [51]:

$$U_{kr} = E_{kr} R_u Z_u / 60 \quad (7.40)$$

Modelovanje korone po zaštitnom užetu je izuzetno važno kod analize atmosferskih pražnjenja duž raspona, kada usled prostiranja talasa po zaštitnom užetu do stuba dolazi do značajnog izobličenja talasa usled korone.

7.2.2 Modelovanje faznog provodnika

Model faznog provodnika je identičan modelu zaštitnog užeta. Jedina razlika se pojavljuje kod vodova sa provodnicima u snopu. Kod ovakvih vodova se proračun karakteristične impedanse vrši korišćenjem izraza za ekvivalentni prečnik provodnika u snopu, na osnovu kojeg se proračunava kapacitet voda. Za slučaj voda sa n provodnika u snopu identičnog poluprečnika R_p raspoređenih u obliku pravilnog mnogougla ekvivalentni poluprečnik provodnika se može izračunati prema formuli:

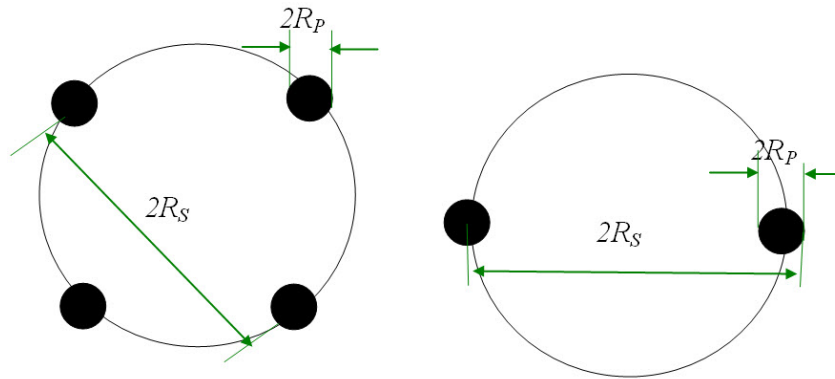
$$R_{ekv} = [nR_p R_s^{n-1}]^{1/n} \quad (7.41)$$

gde su:

R_s – poluprečnik kruga opisan iz centra snopa koji prolazi kroz centar svakog od provodnika raspoređenih u temenima pravilnog mnogougla,

R_p – poluprečnik pojedinih provodnika unutar snopa.

Na slici 7.12 levo je nacrtan sistem sa 4 provodnika u snopu, a desno sa dva provodnika u snopu.



Slika 7.12: Skica 4 provodnika snopu (levo) i 2 provodnika u snopu (desno)

Karakteristična impedansa faznog provodnika se računa po izrazu:

$$Z_f = 60 \ln \frac{2H_{ef}}{R_{ekv}} \quad (7.42)$$

gde su:

$$H_{ef} = H_v - \frac{2}{3}f_p \quad (7.43)$$

H_{ef} – efektivna visina faznog provodnika iznad zemlje,

H_v – visina vešanja provodnika na stubu,

f_p – ugib faznog provodnika na sredini raspona,

Kritično električno polje se računa na identičan način kao kod zaštitnog užeta, odnosno:

$$E_{kr} = 23,3m\delta\left[1 + \frac{0,62}{\delta R_{ekv}^{0,38}}\right] \quad (7.44)$$

Kritična vrednost napona korone dobija se na osnovu izraza [51]:

$$U_{kr} = kE_{kr}R_{ekv}Z_f/60 \quad (7.45)$$

gde je:

k – koeficijent koji uvažava efekat slabljenja polja kod provodnika u snopu. On se dobija iz izraza:

$$k = \frac{n}{1 + (n - 1)\frac{R_p}{R_s}} \quad (7.46)$$

7.3 Modelovanje dalekovodnog stuba

7.3.1 Određivanje karakteristične impedanse stuba

Kod proračuna prelaznih procesa usled atmosferskih pražnjenja i njihovog delovanja na izolaciju elektroenergetskih objekata, jedan od vrlo važnih elemenata je dalekovodni stub. Dalekovodni stub se najčešće modeluje kao kratak vod konstantne karakteristične impedanse na čijem se drugom kraju nalazi otpornost uzemljenja.

Za određivanje karakteristične impedanse dalekovodnog stuba koriste se analitičke metode, kao i eksperimenti na modelima ili stvarnim stubovima, opisani u [65]. Stub se može modelovati cilindrom ili konusom, a karakteristična impedansa se može tretirati kao da se kontinualno menja sa visinom, što je opisano u [56] ili da je konstantna. Prema [65] model stuba se razlikuje za slučaj vertikalnog udara direktno u vrh stuba i za slučaj pražnjenja u sredinu raspona kada strujni talas nailazi po zaštitnom užetu.

U [10] daje se veoma jednostavan empirijski izraz za karakterističnu impedansu vertikalnog cilindra dobijen na osnovu eksperimentalnih istraživanja:

$$Z_s = 60\left[\ln \frac{2\sqrt{2H}}{R} - 2\right] \quad (7.47)$$

gde su:

H – visina cilindra,

R – poluprečnik cilindra.

U slučaju da se stub sastoji iz n vertikalnih cilindra istog poluprečnika, tada se karakteristična impedansa prema [10] izračunava na osnovu izraza:

$$Z_s = \frac{1}{n} \{Z_{s1} + Z_{s2} + \dots + Z_{sn}\} \quad (7.48)$$

gde se sopstvena impedansa svakog cilindra Z_{si} računa prema izrazu:

$$Z_{si} = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H_i}}{R_i} - 2 \right], i = 1, \dots, n \quad (7.49)$$

Međusobna impedansa vertikalnih cilindra se računa na sledeći način:

$$Z_{s,m} = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H_i}}{D_m} - 2 \right] \quad (7.50)$$

U gornjim izrazima je:

H_i – visina i -tog cilindra u (m),

R_i – poluprečnik i -tog cilindra u (m),

D_m – rastojanje između cilindra u (m).

Ukoliko cilindri nisu vertikalno postavljeni, već su nagnuti, tada se može odrediti ekvivalentno rastojanje između cilindra:

$$D_m = D_V^{1/3} \cdot D_Z^{2/3} \quad (7.51)$$

gde su:

D_V – rastojanje između cilindra na vrhu stuba,

D_Z – rastojanje između cilindra na zemlji.

Za praktičnu primenu su veoma pogodni izrazi dati u [1] za tipične konstrukcije stubova. Zbog geometrije stubova se smatra da je brzina prostiranja talasa po stubovima oko 85% od brzine svetlosti.

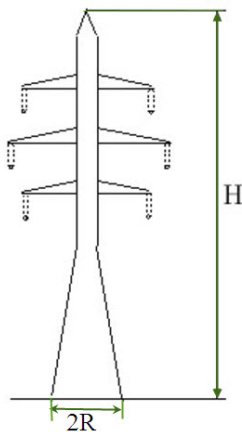
Za stub tipa jelka, sa oznakama dimenzija na slici 7.13, karakteristična impedansa se može izračunati na osnovu sledećeg izraza:

$$Z_s = 30 \ln \left[\frac{2(H^2 + R^2)}{R^2} \right] \quad (7.52)$$

gde su:

H – visina stuba u (m),

R – poluprečnik osnove stuba u (m).



Slika 7.13: Stub tipa jelka sa oznakama dimenzija

Za slučaj portalnog stuba, datog na slici 7.14, karakteristična impedansa se računa prema izrazu:

$$Z_s = \frac{1}{2} [Z_1 + Z_m] \quad (7.53)$$

gde su:

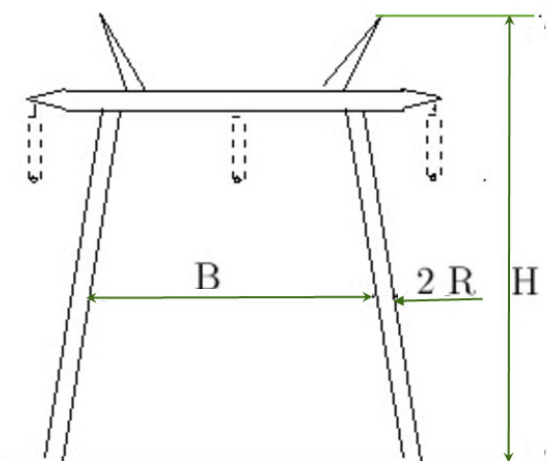
$$Z_1 = 60 \ln \frac{H}{R} + 90 \frac{R}{H} - 60 \quad (7.54)$$

$$Z_m = 60 \ln \frac{H}{B} + 90 \frac{B}{H} - 60 \quad (7.55)$$

Prema oznakama na slici 7.14 su:

H – visina stuba,

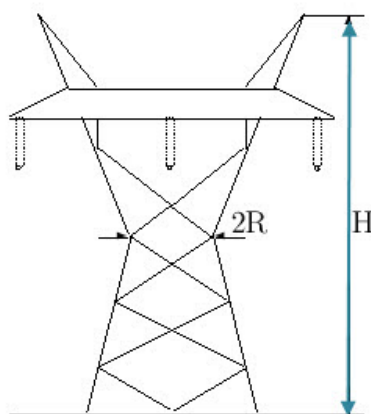
R – ekvivalentni poluprečnik kraka stuba,



Slika 7.14: Skica portalnog stuba sa oznakama dimenzija

B – razmak između krakova na polovini visine stuba.

Na slici 7.15 prikazana je skica Y stuba sa označenim osnovnim dimenzijama. Karakteristična impedansa ovakvog stuba se računa primenom sledećeg izraza:



Slika 7.15: Skica Y stuba sa oznakama dimenzija

$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2H\sqrt{2}}{R} - 1 \right] \quad (7.56)$$

gde je R ekvivalentni poluprečnik stuba na najužem mestu.

7.3.2 Modelovanje geometrije stuba

Prilikom proračuna atmosferskih prenapona usled atmosferskih pražnjenja u vodove razlikuju se dva slučaja:

- proračun ugroženosti elemenata postrojenja usled atmosferskih pražnjenja u vodove povezane sa postrojenjem,
- proračun broja preskoka na vodovima usled atmosferskih prenapona.

Kada se analizira ugroženost postrojenja od atmosferskih prenapona, tada se koriste samo monofazni modeli vodova i postrojenja. U slučaju proračuna kvarova u postrojenjima, analiziraju se kvarovi aparata (najčešće energetskih ili naponskih transformatora), svaki kvar izolacije predstavlja trajan kvar koji zahteva isključenje. Zato je za analizu postrojenja moguće koristiti jednodopolne modele.

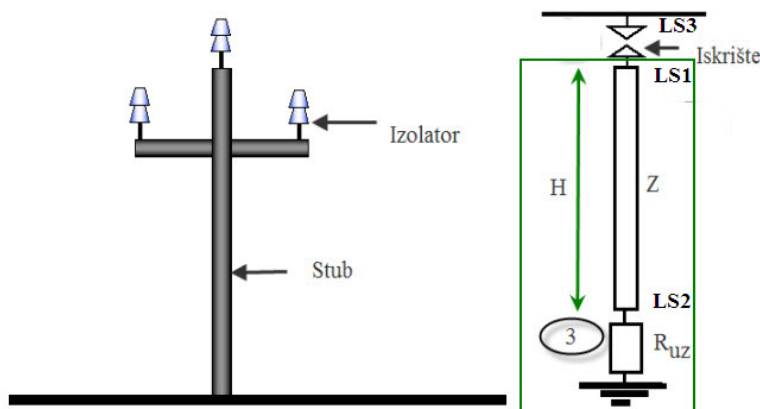
Ukoliko se analizira ugroženost vodova, a zanima nas da li se pojavljuju i međufazni kvarovi kada do preskoka na izolaciji ne dolazi samo između najugroženije faze i stuba, nego kada se pojavljuju preskoci na više faza ili preskoci na rasponu, tada se moraju koristiti trofazni modeli. Ovo je posebno važno kod visokonaponskih vodova (nazivnih napona 110 kV ili više), kod kojih se koriste prekidači koji imaju posebne mehanizme za pogon kontakata za svaki pol nezavisno. U slučaju jednofaznih preskoka na takvim vodovima, prekidači mogu da isključe samo fazu na kojoj je nastao preskok, a tehnikom brzog automatskog ponovnog uključenja (brzo APU), kvar se u većini slučajeva eliminiše, i vod se može vratiti u pogon gotove bez ikakvih smetnji kod potrošača.

Za potrebe određivanja efikasnosti zaštite vodova odvodnicima prenapona razvijeni su trofazni modeli stubova koji omogućavaju modelovanje preskoka na sve tri faze stuba, kao i preskoke na rasponu.

Monofazni modeli stubova

Razlikujemo dva monofazna modela stuba. Prvi monofazni model stuba se koristi za modelovanje stubova u mrežama bez zaštitnog užeta. Na slici 7.16 prikazana je levo skica konstrukcije stuba, a desno model stuba. Ovo su modeli koji se uglavnom koriste u mrežama srednjih napona.

Stub se modeluje ekvivalentnom vodom dužine H čija je karakteristična impedansa Z . Na donjem kraju stuba nalazi se otpornost uzemljenja R_{UZ} . Na gornjem kraju stuba nalazi se iskrište koje se modeluje preskočnom karakteristikom. Model preskoka dat je



Slika 7.16: Skica konstrukcije stuba(levo) i model stuba (desno)

izrazom:

$$\begin{aligned} R &= 0 & \Delta U &\geq U_{diel}(t) \\ R &= \infty & \Delta U &< U_{diel}(t) \end{aligned} \quad (7.57)$$

gde je:

ΔU -razlika napona između faznog provodnika i tačke u kojoj je izolator pričvršćen za stub.

$U_{diel}(t)$ -dielektrička izdržljivost vazduha između krajeva izolatora koji su na različitim potencijalima, koja zavisi od vremena proteklog od trenutka nailaska naponskog talasa na izolator, kao i od oblika i brzine uspostavljanja napona.

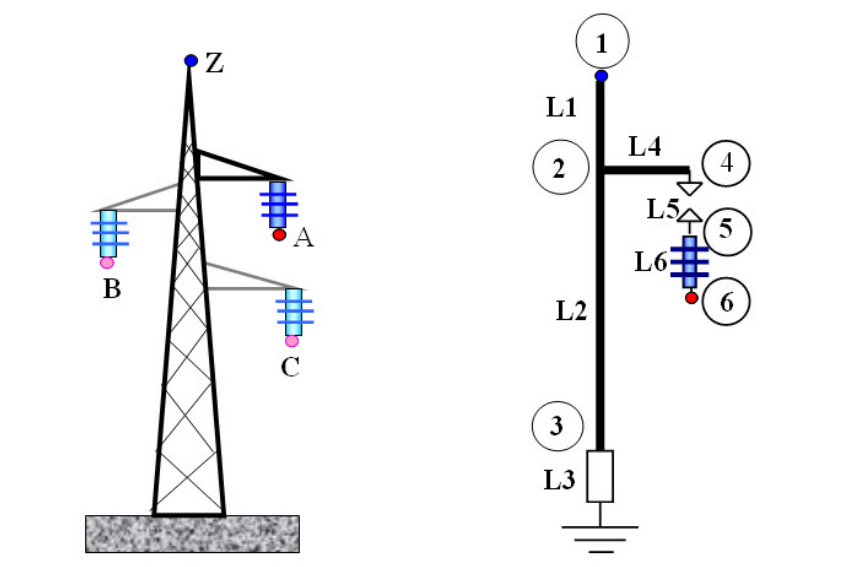
Modelovanje preskoka detaljno je objašnjeno u poglavlju 7.5, na strani 235.

U ekvivalentnoj šemi monofazni model stuba bez zaštitnog užeta se modeluje sa 3 grane, kao na slici 7.16, desno.

Model stuba jela koji sa zaštitnim užetom je složenijeg oblika, koji je prikazan na slici 7.17. Na slici levo prikazana je skica konstrukcije realnog stuba, a na slici desno ekvivalentna monofazna šema. Konzola i izolatori koji su svetlije boje na slici levo nisu uključeni u model.

Na slici 7.17 oznake pojedinih grana na šemi stuba desno imaju sledeće značenje:

$L1$ — gornji deo stuba od zaštitnog užeta do konzole,



Slika 7.17: Skica konstrukcije realnog stuba sa užetom (levo) i model stuba sa užetom (desno)

$L2$ — donji deo stuba,

$L3$ — otpor uzemljenja,

$L4$ — konzola stuba,

$L5$ — model preskoka u vidu iskrišta,

$L6$ — model izolatorskog lanca nakon preskoka (praktično kratak vod koji modeluje kanal električnog luka posle preskoka).

Čvorovi označeni brojevima u kružnicama imaju sledeće značenje:

1. vrh stuba na kome je učvršćeno zaštno užje,
2. spoj stuba sa najvišom konzolom,
3. spoj stuba sa uzemljivačem,
4. tačka vešanja izolatorskog lanca,
5. pomoćna tačka prema kojoj se odvija preskok, koja je fizički spojena sa donjom armaturom na potencijalu faze,
6. tačka na fazi.

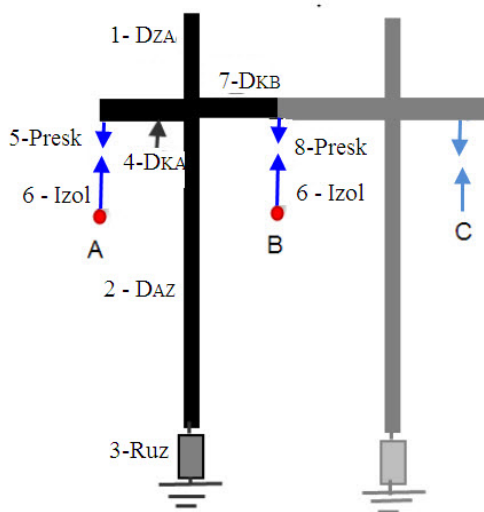
Izolator se modeluje sa dva elementa. Između tačaka 4 i 5 smešteno je iskrište, a preskok preko izolatorskog lanca nakon reagovanja iskrišta koji se modeluje kanalom luka smešten je između tačaka 5 i 6. Ovakav model je napravljen jer kod vodova vrlo visokih napona izolatorski kod kojih lanci mogu imati dužinu više metara. U slučaju vodova nižih napona može se usvojiti model voda u kome je u tački 5 smešten fazni provodnik, a tačka 6 ne postoji. Sve grane imaju istu karakterističnu impedansu Z_s . Otpornost uzemljenja stuba je R_{uz} . Model izolatora se sastoji od modela preskoka koji je prikazan kao iskrište i modela kratkog voda (grana 6) koji ima istu karakterističnu impedansu Z_s kao i ostali delovi stuba.

Trofazni modeli stubova

Prilikom modelovanja trofaznih stubova razlikujemo dva glavna tipa:

- stubovi sa vertikalnim rasporedom provodnika (jednosistemi - "jelka" i dvosistemi - "bure"),
- stubovi sa horizontalnim rasporedom provodnika (Y i portalni stubovi).

Na slici 7.18 prikazana je skica trofaznog portalnog stuba sa označenim pojedini granama koje se koriste u modelu.



Slika 7.18: Skica trofaznog portalnog stuba

Na slici 7.18 oznake imaju sledeće oznake:

1. gornji deo stuba od zaštitnog užeta do gornje konzole, dužine $L1$,
2. srednji deo stuba od gornje do srednje konzole, dužine $L2$,
3. srednji deo stuba od srednje konzole do donje konzole, dužine $L3$,
4. donji deo stuba od donje konzole do zemlje, dužine $L4$,
5. otpor uzemljenja R_{UZ} , označen kao $L5$ (otpornik se modeluje kao element koji nema dužinu),
6. konzola faze A stuba, dužine $L6$,
7. preskok na fazi A , označen kao $L7$,
8. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi A , označen kao $L8$
9. konzola faze B stuba, dužine $L9$,
10. preskok na fazi B , označen kao $L10$,
11. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi B , označen kao $L11$,
12. konzola faze C stuba, dužine $L12$,
13. preskok na fazi B , označen kao $L13$,
14. model izolatorskog lanca nakon preskoka na fazi B , označen kao $L14$.

Svi elementi stuba osim otpora uzemljenja i preskoka modeluju se ekvivalentnim vodovima karakteristične impedanse Z_c određene prema poglavlju 7.3.1. Brzina prostiranja po elementima voda usvaja se da je 80% brzine svetlosti. Elementi stuba koji se ne modeluju kao ekvivalentni vodovi su samo otpori uzemljenja stubova i grane koje modeluju preskoke. Grane koje modeluju izolatorski lanac nakon preskoka se takođe zamenjuju ekvivalentnim vodovima identične karakteristične impedanse kao i ostali elementi stuba, mada te grane ustvari predstavljaju model kanala preskoka preko izolatorskog lanca.

7.4 Model uzemljivača

Impedansa uzemljivača može biti modelovana na različite načine pri proračunima prelaznih procesa usled atmosferskih pražnjenja. Koriste se sledeći modeli [47], [48]:

- Konstantna omska otpornost uzemljivača koja se koristi kod konstrukcija manjih dimenzija (na primer uzemljivači dalekovodnih stubova, kada je specifična otpornost zemlje relativno mala, pa ne dolazi do jonizacije tla.

- U slučaju dalekovodnih stubova na tlu velikog specifičnog otpora dolazi do jonizacije tla, što povoljno utiče na smanjenje otpora rasprostiranja.
- Kod složenih konstrukcija uzemljivača postrojenja moraju se koristiti približne formule za procenu efektivne dužine uzemljivača sa koje se struja odvodi zbog uticaja prostiranja talasa po podzemnim provodnicima koji najveći deo struje odvede u blizini mesta priključka vertikalnog spusta po kome dolazi udarna struja, a sa udaljavanjem sve manji deo struje se odvodi.

7.4.1 Približne formule za otpornost rasprostiranja pri industrijskoj frekvenciji

Na ovom mestu su date približne formule pogodne za inženjersku praksu pri analizi uzemljivača kod delovanja naizmeničnih struja industrijske učestanosti.

Dugačak pravolinijski provodnik

Ukoliko se koristi dugačak pravolinijski uzemljivač zakopan na određenoj dubini, otpornost rasprostiranja uzemljivača u ustaljenom stanju određuje se pomoću sledećeg izraza za okrugao provodnik:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{l}{Hd} \text{ za } H > 0 \quad (7.58)$$

$$R_{uz} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2 \cdot l}{d} \text{ za } H = 0 \quad (7.59)$$

Objašnjenje oznaka dato je na slici 7.20.

Oznake imaju sledeće značenje:

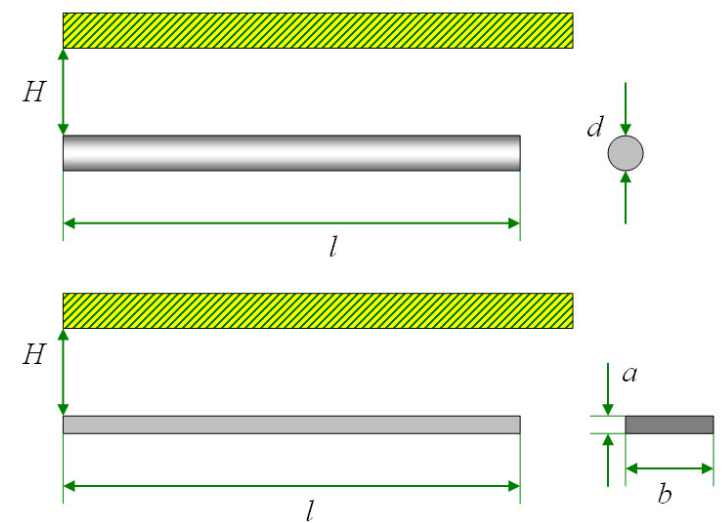
ρ - specifična otpornost zemlje (Ωm),

l - dužina uzemljivača u (m),

H - dubina ukopavanja u odnosu na površinu zemlje,

d - prečnik provodnika u slučaju kružnog poprečnog preseka, a ekvivalentni prečnik u slučaju pravougaonog provodnika sa stranicama a i b .

$$d = \frac{2}{\pi}(a + b) \quad (7.60)$$



Slika 7.20: Skica linearnog uzemljivača od okruglog provodnika ili trake pravougaonog preseka

Ukoliko je uzemljivač postavljen plitko, manje od 0.5 m, a postoji mogućnost isušivanja zemlje u površinskom sloju u toku leta, odnosno zamrzavanja tla u toku zimskog perioda, tada se može koristiti aproksimacija da je $H = 0$.

U većini praktičnih slučajeva je ispunjen uslov da je $l \gg d$. U tom slučaju se može koristiti približni izraz:

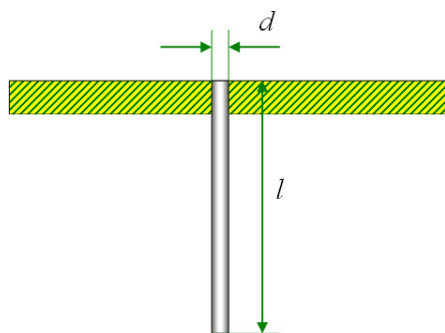
$$R_{uz} = \frac{2\rho}{l} \quad (7.61)$$

Vertikalna sonda

Vertikalne sonde se koriste da smanje udarnu impedansu dugačkih horizontalnih uzemljivača ili složenijih horizontalnih uzemljivačkih struktura. Na slici 7.21 prikazana je skica vertikalnog štapnog uzemljivača.

Otpornost rasprostiranja usamljenog vertikalnog štapa koji je najčešće dužine od $l = 1$ do 3 m dat je približnim izrazom kada je $d \ll l$:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{l} \quad (7.62)$$



Slika 7.21: Skica vertikalnog štapnog uzemljivača

Prstenasti uzemljivač

Otpor uzemljenja za prstenaste uzemljivače koji nisu u obliku kruga izračunava se tako što se prvo izračuna ekvivalentnih prečnik kruga, koji ima istu površinu kao i površina posmatranog prstenastog uzemljivača.

$$D_{ekv} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 1.13 \cdot \sqrt{A} \quad (7.63)$$

gde je:

D_{ekv} - prečnik zamišljenog kruga prstenastog uzemljivača,

A - površina pravougaonog uzemljivača ili uzemljivača drugačijeg oblika.

Formula za izračunavanje otpora rasprostiranja prstenastog uzemljivača dobija se iz sledećeg izraza:

$$R_{uz} = \frac{2\rho}{3D_{ekv}} \quad (7.64)$$

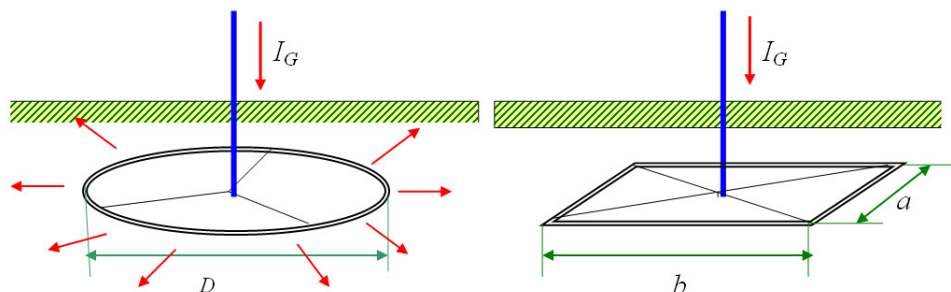
Na slici 7.22 levo je prikazan kružni prstenasti uzemljivač, a desno pravougaoni trakasti ili žičani uzemljivač.

Oznake imaju sledeće značenje:

D - prečnik prstena, koji je jednak D_{ekv} u izrazu 7.64,

a i b - dimenzije pravougaonika od trake ili žice koji čini uzemljivač,

A - površina pravougaonika $A = a \times b$.



Slika 7.22: Uzemljivač u obliku kružnog prstena (levo) i pravougaoni trakasti ili žičani uzemljivač (desno)

Mrežasti uzemljivač

U slučaju mrežastog uzemljivača koristi se sledeća empirijska relacija:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{2D_{ekv}} \text{ gde je } D_{ekv} = 1.13 \cdot \sqrt{A} \quad (7.65)$$

Pločasti uzemljivač

Za pločasti uzemljivač u obliku pravougaonika, čije su stranice dužine a i b , otpornost rasprostiranja je:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{4.5\sqrt{a \cdot b}} \quad (7.66)$$

Temeljni uzemljivaci

Temeljni uzemljivači ugrađeni su u betonske temelje objekta. Velika prednost temeljnih uzemljivača sastoji je u tome što se nalaze u betonu, koji ih štite od korozije, pa je njihovo vreme trajanja praktično neograničeno. Temeljni uzemljivač omogućava pouzdan kontakt uzemljivača sa tlom. Promena uslova kao što je vlažnost tla ili eventualno površinsko zaleđivanje tla ne utiču na otpornost rasprostiranja. Temeljni uzemljivač se ugrađuje u spoljašnje zidove temelja objekta u obliku zatvorene konture. Kod većih objekata se ugrađuju i u poprečne unutrašnje zidove objekta.

Kod proračuna otpora rasprostiranja temeljnog uzemljivača razmatra se ukupna zapremina razmatranog temelja V u obliku polusfere u zemlji. Izraz za otpor rasprostiranja uzemljivača ima oblik prema [47]:

$$R_{uz} = \frac{\rho}{\pi D_{ekv}} \quad (7.67)$$

gde je:

$$D_{ekv} = 1.56 \cdot \sqrt[3]{V} \quad (7.68)$$

Sve predhodne formule odnose se na homogeno tlo i otpornost rasprostiranja u ustaljenom režimu. Sve formule su približne, jer nema smisla insistirati na tačnosti formula, kada se tlo modeluje da je idealno homogeno. U realnosti tlo ne može biti idealno homogeno, a specifična otpornost tla se menja u zavisnosti od meteoroloških prilika, pre svega od vlažnosti tla.

7.4.2 Udar na impedansa uzemljenja

Proračun udarnih karakteristika uzemljivača predstavlja složen problem zbog velikog broja različitih faktora koji na njih utiču. Najvažniji uticaj na ove karakteristike imaju konstruktivni parametri uzemljivača, električne karakteristike tla, kao i oblik, amplituda i mesto injektiranja strujnog impulsa.

a) Definicija udarnih karakteristika uzemljivača

Ponašanje uzemljivača prilikom odvođenja struje groma definisano je njegovim udarnim karakteristikama. Injektiranje udarne struje u uzemljivač dovodi do pojave vremenski promenljivih napona i struja duž uzemljivača.

Udar na impedansa uzemljivača određuje se kao odnos napona u čvoru u koji se uvodi struja i injektirane struje:

$$z(t) = \frac{u(t)}{J_g(t)} \quad (7.69)$$

gde su:

t – posmatrani vremenski trenutak,

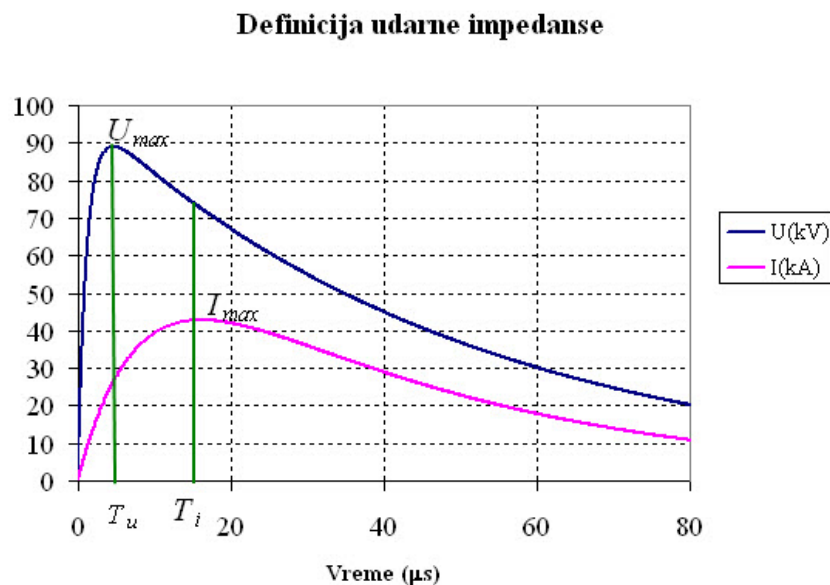
$u(t)$ – napon na mestu injektiranja u trenutku t ,

$J_g(t)$ – udarna struja koja se uvodi u uzemljivač,

$z(t)$ – udarna impedansa uzemljivača u trenutku t .

Udar na impedansa uzemljivača definisana izrazom 7.69 predstavlja vremenski promenljivu veličinu. Na slici 7.23 prikazani su vremenski tokovi struje groma koja se uvodi u uzemljivač i napona na mestu injektiranja.

Oznake na slici 7.23 imaju sledeće značenje:



Slika 7.23: Definicije udarne impedanse u odnosu na udarnu struju koja se uvodi u uzemljivač i odziva uzemljivača

U_{max} – maksimalna vrednost napona na mestu injektiranja,

T_u – trenutak maksimalne vrednosti napona,

T_i – trenutak maksimalne vrednosti struje,

I_{max} – maksimalna vrednost struje groma,

i –talasni oblik injektirane struje groma,

u –talasni oblik napona na mestu injektiranja struje groma.

Definišemo sledeće veličine:

I_{T_u} – vrednost struje groma u trenutku maksimalne vrednosti napona na mestu injektiranja,

U_{T_i} – vrednost napona na mestu injektiranja u trenutku maksimalne vrednosti struje na mestu injektiranja u uzemljivač.

U projektantskoj praksi često se koristi pojam konvencionalne impedanse uzemljivača Z_k . U literaturi se mogu sresti tri definicije ove karakteristične veličine uzemljivača. Prema prvoj definiciji konvencionalna impedansa uzemljivača predstavlja odnos napona

na mestu injektiranja i injektirane struje u trenutku kada injektirana struja dostiže maksimalnu vrednost [43]:

$$Z_k = \frac{U_{Ti}}{I_{max}} \quad (7.70)$$

gde su:

Z_k – konvencionalna impedansa uzemljivača. slici 7.23.

Prema drugoj definiciji konvencionalna impedansa uzemljivača predstavlja odnos napona na mestu injektiranja i injektirane struje u trenutku kada napon na mestu injektiranja dostiže maksimalnu vrednost:

$$Z_k = \frac{U_{max}}{I_{Tu}} \quad (7.71)$$

Oznake u izrazu 7.71 su objašnjene na slici 7.23. Prema trećoj definiciji konvencionalna impedansa uzemljivača predstavlja odnos maksimalnih vrednosti napona na mestu injektiranja i maksimalne vrednosti injektirane struje:

$$Z_k = \frac{U_{max}}{I_{max}} \quad (7.72)$$

Danas je prihvaćen postupak proračuna konvencionalne impedanse uzemljivača prema izrazu 7.72 zbog jednostavnosti proračuna. Za određivanje konvencionalne impedanse uzemljivača, prema ovom izrazu, dovoljno je poznavati samo maksimalne vrednosti napona na mestu uvođenja struje u uzemljivač i maksimalne vrednosti injektirane struje.

Odnos udarne impedanse uzemljivača i stacionarne otpornosti rasprostiranja predstavlja impulsni (udarni) koeficijent uzemljivača:

$$\alpha(t) = \frac{z(t)}{R_S} \quad (7.73)$$

gde su:

$z(t)$ – udarna impedansa uzemljivača definisana izrazom 7.69,

R_S – stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača,

$\alpha(t)$ - udarni koeficijent uzemljivača u vremenskom trenutku t .

Udarni koeficijent uzemljivača određuje se kao odnos konvencionalne impedanse uzemljivača i stacionarne otpornosti rasprostiranja [43]:

$$\alpha_k = \frac{Z_k}{R_S} \quad (7.74)$$

gde su:

Z_k – konvencionalna impedansa uzemljivača,

R_S – stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača,

α_k – udarni koeficijent uzemljivača.

Udarni koeficijent uzemljivača je izuzetno značajna veličina za inženjersku praksu, jer na jednostavan način uvažava promenu impedanse uzemljivača pri proticanju udarne struje.

Koeficijent α_k može biti veći od 1 ili manji od 1 u zavisnosti od efekata koji izazivaju frekvencijsku zavisnost impedanse uzemljenja. Efekti koji izazivaju frekvencijsku zavisnost impedanse uzemljenja su sledeći:

- induktivni efekat dugačkih provodnika uzemljivača,
- efekat jonizacije tla u slučaju velike specifične otpornosti tla,
- površinski efekat koji utiče na raspodelu struje koja otiče sa uzemljivača u slučaju udarnih struja, kada je u pitanju višeslojno tlo različitih specifičnih otpornosti slojeva.

b) Induktivni efekat dugačkih provodnika uzemljivača

Induktivni efekat je izražen kod dugačkih trakastih uzemljivača. On se može objasniti jednim od načina modelovanja uzemljivača u prelaznom periodu [43]. Svaki uzemljivač se može rastaviti na određen broj pravolinijskih elemenata. Svaki pravolinijski element se može modelovati koncentrisanim parametrima pomoću odgovarajuće zamenske šeme (Γ , Π , T - šema).

Na slici 7.24 je prikazan uzemljivač, čiji je i -ti element koji je dat krajnjim čvorovima k i l , modelovan obrnutom Γ - šemom.

Na slici 7.25 prikazana je zamenska Π šema grane uzemljivača.

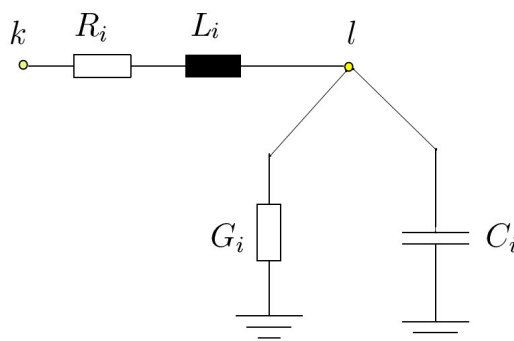
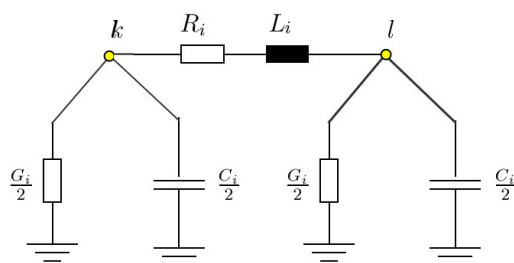
Na slici 7.26 prikazana je zamenska T šema grane uzemljivača.

Oznake na slikama imaju sledeće značenje:

R_i - redna otpornost elementa,

L_i - sopstvena induktivnost elementa,

G_i - provodnost elementa prema referentnoj zemlji,

Slika 7.24: Obrnuta Γ – šema elementa uzemljivačaSlika 7.25: Zamenska Π – – šema deonice uzemljivača

C_i – kapacitivnost elementa prema referentnoj zemlji.

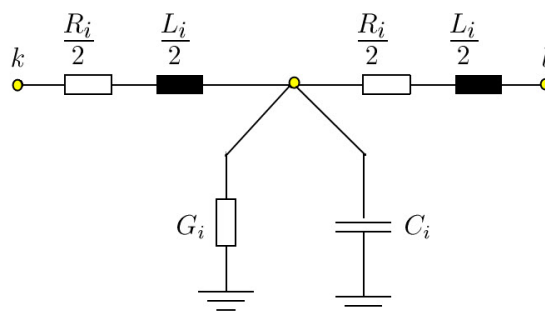
Parametri uzemljivača se mogu modelovati kao frekvencijski nezavisni ili frekvencijski zavisni. Pri tome, u zavisnosti od strukture tla u koje je uzemljivač položen, potrebno je obuhvatiti slučajeve jednoslojnog i dvoslojnog tla. Višeslojna struktura tla se dovoljno tačno može svesti na dvoslojnu strukturu tla.

Kapacitivnosti u zamenskoj šemi se najčešće mogu zanemariti, jer imaju uticaj samo pri jako visokim učestanostima. Pri nižim učestanostima dominantnu ulogu imaju serijski induktiviteti L_i i odvodnosti prema referentnoj zemlji G_i . Serijske otpornosti provodnika R_i uzemljivača se mogu zanemariti.

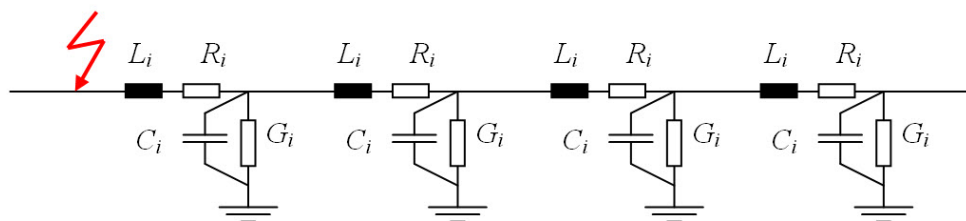
Na slici 7.27 prikazan je horizontalni linijski uzemljivač predstavljen koncentrisanim rednim induktivitetima L_i rednim otpornicima R_i , otočnim odvodnostima G_i i kapacitivnostima C_i .

Na slici 7.28 prikazani su talasni oblici struja duž pravolinijskog trakastog uzemljivača dužine $l=40$ m u tlu specifične otpornosti $\rho = 100 \Omega$ na dubini ukopavanja 0.5 m. U oznaci za struju $I(i)$ indksi $i = 1, 2, 3, 4$ označavaju redni broj elementarne deonice od mesta injektiranja struje.

Na slici 7.29 prikazani su talasni oblici struja koje otiču kroz koncentrisane omske



Slika 7.26: T – šema elementa uzemljivača



Slika 7.27: Zamenska šema horizontalnog linijskog uzemljivača predstavljenog koncentrisanim parametrima

otpore prena referentnoj nuli sa istog pravolinijskog trakastog uzemljivača. Oznake imaju isto značenje.

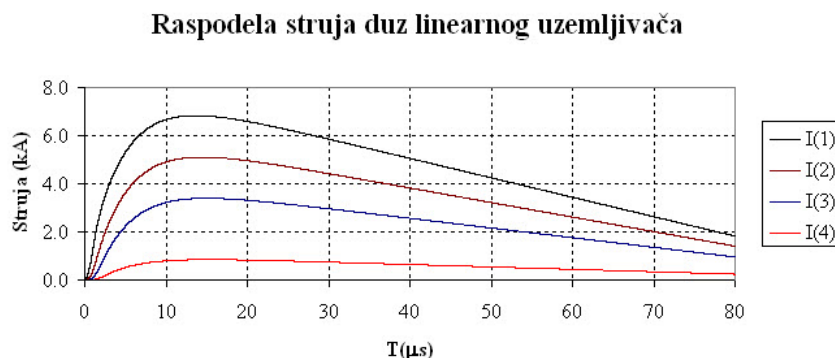
Može se uočiti da se amplituda struje duž linearnog uzemljivača smanjuje, ali je struja odvođenja gotovo identična duž celog uzemljivača zbog toga što je induktivni i omski pad napona duž linearnog uzemljivača vrlo mali.

Izvršena je analiza uticaja dužine pravolinijske uzemljivačke trake kada se injektiranje struje vrši na jednom kraju trake, pri različitim specifičnim otporima tla. Rezultati analize su prikazani na slici 7.30.

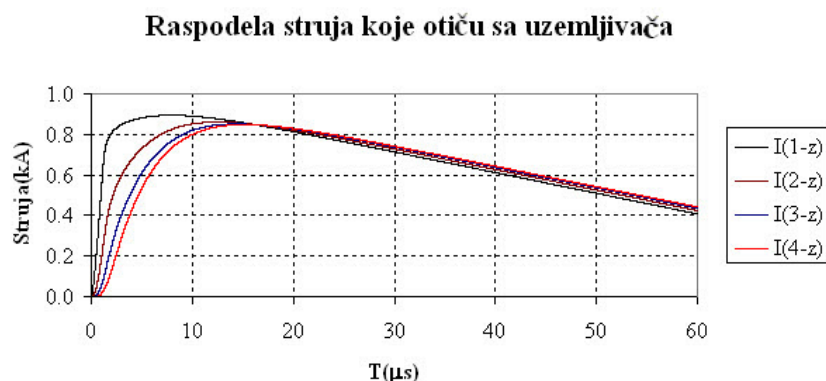
Na osnovu dobijenih rezultata prema slici 7.30 se može uočiti da dužine traka igraju ulogu samo za dužine do 30 m, a preko tih dužina produžavanje traka ima mali efekat.

Preporučuje se da se koriste najmanje dve uzemljivačke trake od mesta injektiranja struje groma, pa je napravljen model kao na slici 7.31 na osnovu koga je ispitan uticaj mesta injektiranja struje.

Izvršeno je upoređivanje impulsne impedanse uzemljivača za slučaj kada je uzemljivač sastavljen od jedne trake u koju se injektira struja na jednom kraju i od iste trake kada se struja injektira u sredini trake. Izvršeno je variranje dužine uzemljivača simetrično u odnosu na tačku injektiranja. Upoređenje je izvršeno za specifičnu otpornost zemlje od $500 \, \Omega\text{m}$ i $100 \, \Omega\text{m}$. Na slici 7.32 prikazani su grafički rezultati proračuna za identičnu



Slika 7.28: Talasni oblici struja duž deonice pravolinijskog trakastog uzemljivača u zavisnosti od posmatrane deonice u odnosu na tačku udara



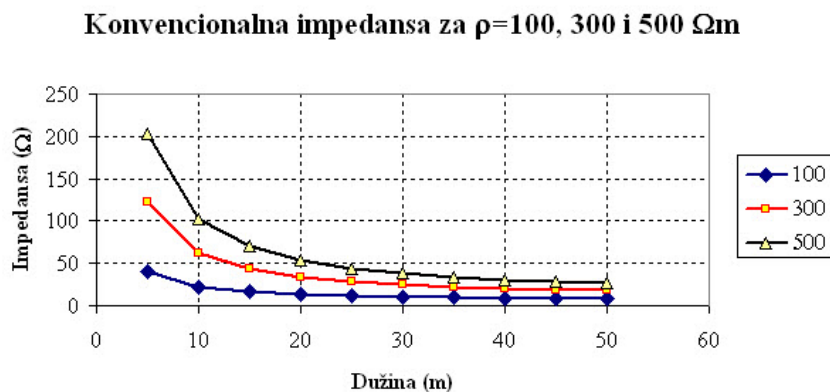
Slika 7.29: Talasni oblici struja koje otiču sa pravolinijskog trakastog uzemljivača

ukupnu dužinu trake, kada se injektira u sredinu pa se odvodi sa dve trake levo i desno, ili kada se injektira na kraj trake, pa je odvođenje sa jedne trake.

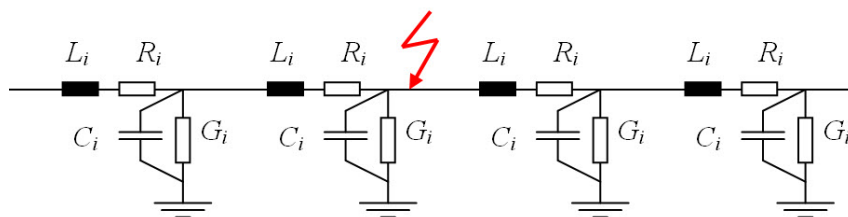
Može se uočiti da u slučaju malog specifičnog otpora tla postoje značajna prednost kada se struja dovodi na sredinu trake, dok su u slučaju velike specifične otpornosti tla te razlike značajno manje.

Prema međunarodnom standardu usvojenom u našoj zemlji [17], zavisnost minimalnih dozvoljenih pojedinačnih uzemljivačkih elektroda od specifičnog otpora tla za potrebe gromobranske zaštite je data na slici 7.33. Prema standardu, neophodno je za gromobransku zaštitu da postoje bar 2 elektrode koje odvođe struju sa mesta injektiranja. Pod klasom gromobranske zaštite LPL (Lightning Protection Level) podrazumeva se stepen zaštite koji zavisi od važnosti objekta, odnosno od dozvoljenog rizika oštećenja elemenata objekta.

U Tabeli 7.1 prikazana je podela prenaponske zaštite na klase prema prihvatljivoj



Slika 7.30: Uticaj dužine pravolinijske uzemljivačke trake na impulsnu impedansu uzemljivača



Slika 7.31: Model pravolinijskog trakastog uzemljivača sa koji se sastoji od dve grane od mesta priključka spusnog provodnika

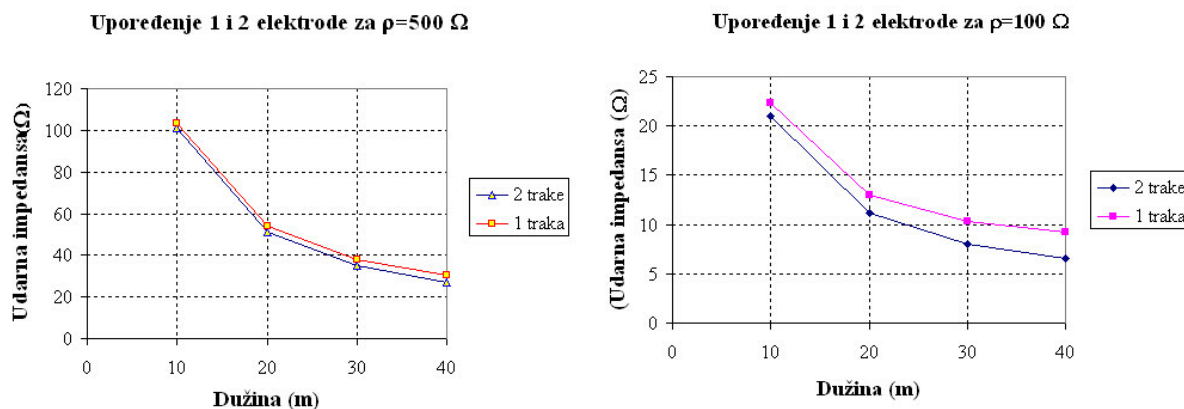
verovatnoći kvara usled udara groma.

Tabela 7.1: Podela prenaponske zaštite na klase prema prihvatljivoj verovatnoći kvara usled udara groma

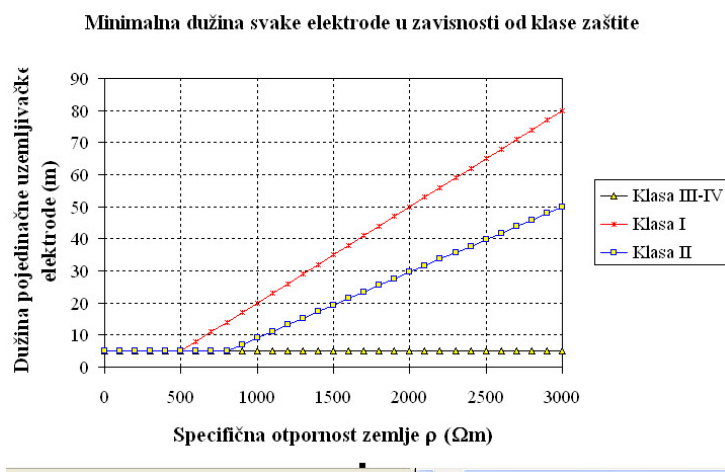
Karakteristika objekta	klasa zaštite LPL	Verovatnoća oštećenja
Bez zaštite	-	1
Postoji zaštita	IV	0.2
	III	0.1
	II	0.05
	I	0.02

c) Modelovanje jonizacije tla

U predelima velike specifične otpornosti tla, posebno u kamenitim oblastima, javlja se proces jonizacije tla, posebno u vazдушnim šuplinama. Ako se uvaži jonizacija tla, otpornost rasprostiranja uzemljivača zavisi od amplitude struje koja se sa uzemljivača odvodi u tlo.



Slika 7.32: Grafičko upoređenje proračuna kada se koristi traka sa injektiranjem struje na sredini (2 trake) ili na jednom kraju (jedna traka)



Slika 7.33: Minimalna dužina pojedinačnog uzemljivača u funkciji specifičnog otpora tla i zahtevane klase gromobranske zaštite

Izrazi po kojima se računa otpornost rasprostiranja uzemljivača sa prisustvom jonizacije dati su u standardu [13].

Otpornost rasprostiranja se računa na sledeća dva načina, u zavisnosti kolika je struja kroz uzemljivač:

a) Ako je struja kroz uzemljivač manja od granične pri kojoj dolazi do jonizacije $I < I_g$, otpornost je jednaka stacionarnoj otpornosti pri struji pogonske učestanosti od 50 Hz (R_o):

$$R = R_o \quad (7.75)$$

b) Ako je struja kroz uzemljivač veća od granične pri kojoj dolazi do jonizacije $I \geq I_g$, otpornost se računa prema sledećem izrazu:

$$R(I) = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (7.76)$$

I_g je granična struja u kA pri kojoj dolazi do jonizacije, koja se računa prema izrazu:

$$I_g = \frac{E_o \cdot \rho}{2\pi \cdot R_o^2} \quad (7.77)$$

E_o je jonizacioni gradijent za koji se uzima vrednost 400 kV/m,

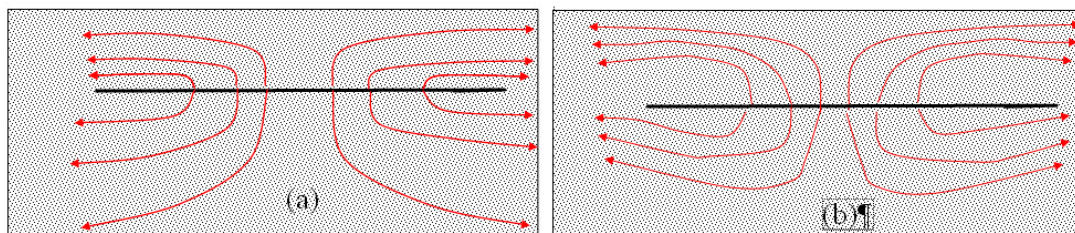
ρ je specifična otpornost tla u kome se nalazi uzemljivač.

Izraz 7.76 je predložen pre više od 30 godina. Zbog složenog postupka eksperimentalnog istraživanja ima vrlo malo rezultata koji bi doprineli razvoju tačnijem modela uzemljivača u uslovima jonizacije.

d) Objašnjenje uticaja višeslojnog tla na udarni koeficijent

Na ovom mestu će biti fizički objašnjeni uticaji povišene frekvencije pri homogenom i višeslojnom tlu.

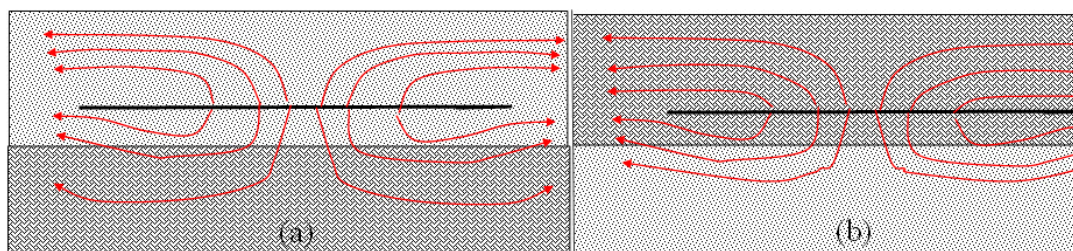
Na slici 7.34 skicirane su strujnice oko trakastog uzemljivača u homogenom tlu pri industrijskoj frekvenciji, slika (a) i pri udarnoj struji, slika (b).



Slika 7.34: Skica strujnica oko trakastog uzemljivača u homogenom tlu pri industrijskoj frekvenciji, slika (a) i pri udarnoj struji, slika (b)

Pri nižim frekvencijama strujnice teže da se ravnomerno rasporede po dubini zemlje 7.34 slika (a), dok se pri udarnim strujama strujnice sabijaju bliže površini zemlje usled površinskog efekta - slika (b). To izaziva porast udarne impedanse uzemljivača u odnosu na stacionarnu vrednost, odnosno udarni koeficijent je veći od 1.

Na slici 7.35 skicirane su strujnice oko trakastog uzemljivača u nehomogenom tlu kada je površinski sloj manje specifične otpornosti (humus), a dublji sloj je kamenit (slika (a)). Na slici 7.35 (b) desno gornji sloj je lošije provodljiv (suva zemlja ili pesak), a donji sloj provodljiviji (vlažna podloga zbog podzemnih voda).



Slika 7.35: Skica strujnica oko trakastog uzemljivača u nehomogenom tlu pri udarnoj struji, kada je površinski sloj provodljiviji - slika (a) i pri udarnoj struji kada je dublji sloj provodljiviji, slika (b)

Na slici 7.35 (a) veći broj strujnica sabijen je u površinskom sloju koji je manje otpornosti, pa je impulsna impedansa uzemljenja manja od stacionarne vrednosti kada su strujnice ravnomerno raspoređene po oba sloja. Naprotiv, kada je donji sloj zemlje ispod uzemljivačke trake znatno većeg specifičnog otpora (kamenito zemljište), a gornji sloj se sastoji od dobro provodnog zemljišta (humus), strujnice se sabijaju u prostoru bolje provodnog tla ispod površine, gde inače strujnice teže da se koncentrišu zbog površinskog efekta, pa je udarni koeficijent manji od 1. Veća gustina strujnica pri višim učestanostima nastaje tamo gde ih površinski efekat potiskuje, u odnosu na nisku frekvenciju, kada bi se strujnice raspoređivale ravnomerno i kroz gornji i kroz donji sloj.

Naprotiv, na slici 7.35 (b) se može uočiti da se veći broj strujnica sabija u slabije provodljivom površinskom sloju, pa je impulsna impedansa uzemljenja veća od stacionarne vrednosti (udarni koeficijent veći od 1).

7.5 Model preskoka na vazdušnoj izolaciji

Preskoci na dalekovodima se dešavaju usled delovanja tri vrste prenapona:

- prenaponi industrijske učestanosti,
- sklopni udarni naponi,
- atmosferskih udarni naponi.

Za sve tri vrste prenapona koriste se različiti modeli preskoka. Napon industrijske učestanosti je od značaja prilikom analize privremenih prenapona, posebno u slučaju kada izolacija radi u uslovima zagađene atmosfere. Udarni sklopni prenaponi su kritični za dimenzionisanje izolacije na dalekovodima veoma visokih nazivnih napona (engl. Extra High Voltages - EHV od 550 kV do 1000 kV i Ultra High Voltages - UHV preko 1000 kV). Udarni atmosferski prenaponi su od značaja za mreže niskih, srednjih i visokih napona u opsegu nazivnih napona od 0.4 kV do 400 kV. Udarni atmosferski prenaponai, kao i neki tipovi sklopnih i privremenih prenapona mogu biti od značaja u telekomunikacionim žičanim mrežama. Danas se uglavnom koriste optičke mreže u telekomunikacijama, tako da je taj problem eliminisan.

Određivanje preskočnog napona pri delovanju udarnih atmosferskih i sklopnih napona je složen zadatak jer udarni preskočni napon zavisi od velikog broja faktora od kojih su najvažniji:

- talasni oblik i polaritet napona,
- strmina čela talasa napona,
- oblik elektroda,
- slučajno rasipanje preskočnih napona,
- atmosferski uslovi.

Za matematičko modelovanje vremena do preskoka na vazdušnoj izolaciji dalekovoda prilikom delovanja udarnih atmosferskih prenapona najčešće se koriste sledeće tri metode:

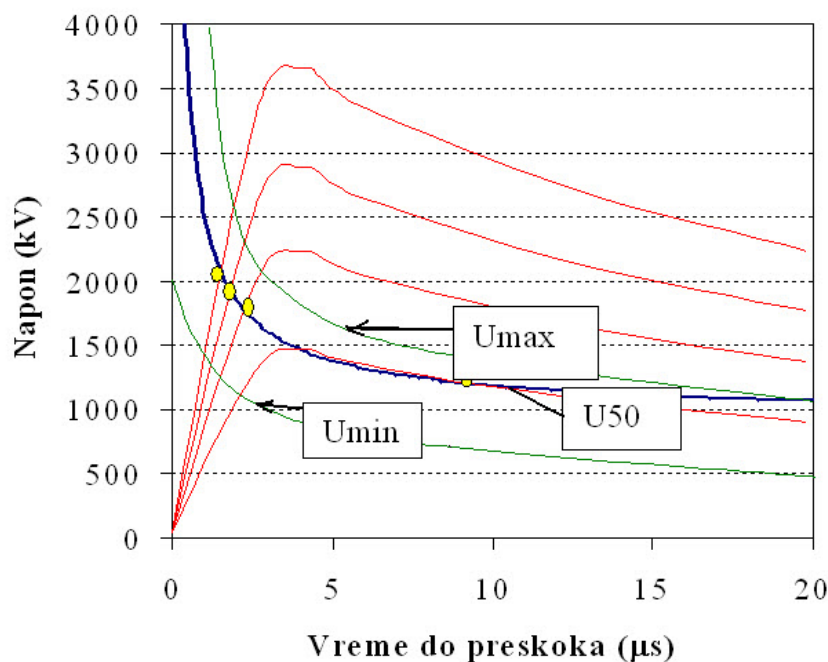
1. metoda volt - sekundne krive izolacije (V-t karakteristika),
2. metoda destruktivnog efekta, odnosno metoda kritične površine kao pojednostavljene metode destruktivnog efekta,
3. metoda progresivnog lidera.

Upotreba ove tri metode se predlaže u [6], [8] i [13].

7.5.1 Metoda volt - sekundne krive izolacije (V-t karakteristika izolacije)

Metoda volt - sekundne preskočne krive izolacije u vazduhu je najstarija, prihvaćena [26] kao preporučeni model. Po ovoj metodi zavisnost preskočnog napona od vremena do

preskoka se određuje eksperimentalno za određenu elektrodnu konfiguraciju u vazduhu na taj način što se izolaciona struktura ispituje udarnim naponom uvek istog oblika, ali različite amplitude talasa. Na taj način se dobijaju talasi istog oblika, ali različite strmine čela. Kada se izolaciona struktura ispituje serijom talasa različite amplitude, dobija se preskočni napon u funkciji strmine talasa. Ono što se mora naglasiti je da se metoda volt - sekundne preskočne krive izolacije primenjuje samo za jedan nepromenljiv oblik talasa (na primer kod visokonaponskih mreža za atmosferskih udarni napon standardnog oblika $1,2/50 \mu s$). Ukoliko bi se primenio drugačiji talas, metoda gubi na tačnosti. Pri atmosferskim pražnjenjima u nadzemne vodove, posebno kada se događaju višestruke refleksije u sistemu, talasni oblik napona koji napreže izolaciju odstupa od standardnog atmosferskog napona kojim se vrši ispitivanje izolacije opreme u laboratorijskim uslovima, tako da se metoda V-t karakteristike može smatrati grubom aproksimacijom. Princip formiranja volt-sekundne karakteristike ilustrovan je na slici 7.36.



Slika 7.36: Dobijanje volt-sekundne karakteristike izolacije u vazduhu

Oznake na slici 7.36 imaju sledeće značenje:

U_{50} –označava krivu 50% preskočnog napona u funkciji vremena do preskoka,

U_{min} –označava krivu podnosivog napona ispod koje nikada ne dolazi do preskoka,

U_{max} –označava krivu 100% preskočnog napona iznad koje uvek dolazi do preskoka.

U procenama godišnjeg broja preskoka na dalekovodima se često zanemaruje slučajna priroda preskoka, već se smatra da za vrednost napona ispod 50% preskočnog napona nema preskoka, a iznad tog napona se preskok uvek događa.

Drugi prilaz, koji daje kritičnije rezultate, radi sa podnosivim naponom izolacije U_{min} kao graničnim naponom ispod koga ne dolazi do preskoka, a svaka pojava napona iznad ovog napona izaziva preskok na izolaciji. Ovo je pesimistički pristup koji daje najkritičnije rezultate.

Volt-sekundna karakteristika je data u analitičkom obliku kao hiperbolička funkcija prema [1] sledećom relacijom:

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{A_n}} \quad (\text{kV}) \quad (7.78)$$

gde se prema [1] preporučuju sledeće vrednosti empirijskih konstanti K_1 , K_2 i A_n :

$$K_1 = 400d \quad (7.79)$$

$$K_2 = 710d \quad (7.80)$$

$$A_n = 0.75 \quad (7.81)$$

u kojima d predstavlja međuelektrodni razmak u [m].

Ukoliko se raspolaže eksperimentalnim rezultatima, tada se mogu za određenu dispoziciju elektroda odrediti konstante K_1 i K_2 tako da se dobije analitička funkcija koja reprezentuje eksperimentalnu zavisnost. Dovoljno je raspolagati sa preskočnim naponima $U(t_1)$ i $U(t_2)$ u dva vremenska trenutka t_1 i t_2 .

$$U(t_1) = K_1 + \frac{K_2}{t_1^{A_n}} \quad (7.82)$$

$$U(t_2) = K_1 + \frac{K_2}{t_2^{A_n}} \quad (7.83)$$

Rešavanjem gornjeg sistema jednačina po K_1 i K_2 se dobija:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{U_1 \cdot t_1^{A_n} - U_2 t_2^{A_n}}{t_1^{A_n} - t_2^{A_n}} \\ K_2 &= \frac{U(t_1) - U(t_2)}{t_1^{-A_n} - t_2^{-A_n}} \end{aligned} \quad (7.84)$$

Poželjno je da prvi vremenski trenutak odgovara vremenu do preskoka primenom vrlo strmih talasa, na primer od $1-3 \mu s$, a da drugi vremenski trenutak odgovara vremenu do preskoka pri dejstvu sporih talasa, na primer $10-20 \mu s$.

Izraz 7.78 je najstariji model preskoka na vazdušnoj izolaciji, pa je iz tog razloga i najviše korišćen. Postoje rezultati eksperimentalnih istraživanja na izolatorskim lancima koji su bili snabdeveni zaštitnim armaturama, [30] koji mogu biti podloga za proračune.

7.5.2 Metoda destruktivnog efekta

Glavno ograničenje u primeni volt-sekundne karakteristike je što je ona kalibrisana za primenu talasa standardnog oblika (u slučaju atmosferskih prenapona $1.2/50 \mu s$). U slučaju nestandardnih oblika udarnih talasa, za svaki oblik talasa bi bilo potrebno izvršiti eksperimentalna istraživanja i odrediti druge koeficijente koji definišu krivu. Pri atmosferskim pražnjenjima u stub po pravilu se javljaju nestandardni oblici talasa. Zbog toga je razvijena metoda koja se može primenjivati i u slučaju nestandardnih talasa, kod koje preskočni napon ne zavisi samo od visine napona, već i od vremena delovanja napona. Metoda koja omogućava modelovanje preskoka pri primeni nestandardnih napona koji nisu oscilatorni, prikazana je u [31], [32], [33]. Ova metoda je data u analitičkom obliku u izrazu:

$$DE = \int_{t_o}^t [u(t) - U_o]^{k_d} dt \quad (7.85)$$

gde su:

$u(t)$ – vremenska funkcija primenjenog napona,

k_d – empirijska konstanta,

DE – destruktivni efekat, mera naprezanja izolacije,

t_o – trenutak kada primenjeni naponski talas prvi put pređe U_o ,

U_o minimalni napon koji dovodi do preskoka pri neograničeno dugom delovanju (jednosmerni preskočni napon).

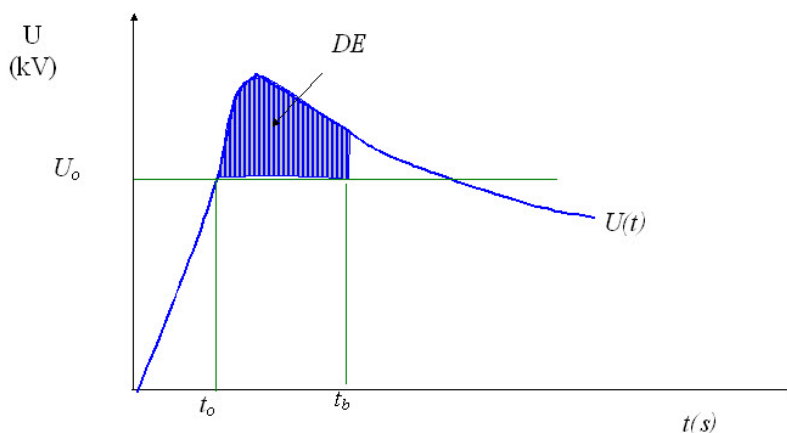
Kada DE postane veće od neke kritične vrednosti A_{crit} , dolazi do preskoka. Ako se to dogodi u trenutku t_b , tada je t_b trenutak uspostavljanja preskoka.

Kod metode destruktivnog efekta najveća teškoća je u određivanju empirijskih koeficijenata. Značajno uprošćenje se može postići kada se usvoji da je koeficijent $k_d=1$, kao u izrazu:

$$DE = \int_{t_o}^t [u(t) - U_o] dt \quad (7.86)$$

Oznake u izrazu 7.86 imaju identično značenje kao u 7.85.

Metodu destruktivnog efekta se u ovom slučaju zove metoda kritične površine, a grafička interpretacija metode prikazana je na slici 7.37.



Slika 7.37: Grafička interpretacija metode kritične površine

Na osnovu slike 7.37 se vidi da integral krive napona iznad minimalnog preskočnog napona predstavlja merilo naprezanja izolacije. Na slici je šrafirana površina između minimalnog preskočnog napona U_o i krive udarnog napona $u(t)$ iznad U_o merilo destruktivnog efekta DE . Kada se postigne u trenutku t_b da površina $DE > A_{crit}$, dolazi do preskoka.

Za praktičnu primenu usvojeni su izrazi za konstante u funkciji dužine razmaka prema [22] u sledećim okvirima:

$$\begin{aligned} U_o &= (435 \div 498) \times d \\ A_{crit} &= (380 \div 560) \times d \end{aligned} \quad (7.87)$$

Predlažu se koeficijenti koji su dobijeni laboratorijskim ispitivanjem izolacionih lanaca za 400 kV dalekovode [30] u sledećem obliku:

$$U_o = 495 \times d \quad (7.88)$$

$$A_{crit} = 520 \times d \quad (7.89)$$

gde je:

d - rastojanje između iskrišta (m),

A_{crit} - kritični destruktivni efekat ($\text{kV} \times \mu\text{s}$).

Izraz za proračun površine može se izraziti na sledeći način:

$$DE = \int_{t_o}^{t_{crit}} [u(t) - E_{crit} \cdot d] dt \quad (7.90)$$

gde je: E_{crit} kritično električno polje pri kome dolazi do preskoka pri jednosmernom naponu, $E_{crit} = 495 \text{ kV/m}$.

7.5.3 Metoda progresivnog lidera

Metoda progresivnog lidera bazira se na modelovanju stvarnih fizičkih procesa u međuelektrodnom prostoru za vreme delovanja udarnih naponskih talasa. Metoda je posebno pogodna za velike međuelektrodne razmake. Vreme koje je potrebno da bi se između elektroda javio preskok može se računati preko izraza 7.91:

$$T_t = T_C + T_S + T_L \quad (7.91)$$

gde je:

T_C - vreme razvijanja korone $[\mu s]$, gde se pod koronom podrazumeva lokalna jonizacija vazduha u prostoru neposredno uz provodnik bez izraženog zagrevanja vazduha, sa impulsnim strujama amplitude ispod 1 mA,

T_S -vreme razvijanja strimera $[\mu s]$, koji predstavljaju duže jonizovane svetleće kanale koji mogu biti dužine više santimetara, sa strujama koje ne zagrevaju prostor i deluju impulsno i same se gase bez obzira na prisustvo napona.

T_L - vreme razvijanja lidera $[\mu s]$, koji predstavljaju jonizovane kanale sa značajnim strujama koje greju prostor i imaju tendenciju sa se produžavaju u skokovima. Struja lidera može biti od nekoliko od nekoliko A do više desetina A.

Prema [8] vreme T_C se najčešće može zanemariti. U skoro svim modelima koji se koriste se pretpostavlja da je faza razvijanja strimera završena kada jačina električnog polja dostigne vrednost E_0 [6], [34]. Trenutak kada jačina električnog polja dostigne vrednost E_0 dobija se kao $T_C + T_S$. Zbog toga će se u proračunima smatrati da dok je jačina električnog polja u međuelektrodnom prostoru manja od E_0 nema pojave lidera, a kada jačina električnog polja prevaziđe vrednost E_0 lider počinje da se razvija brzinom v koja će kasnije biti definisana. Pri tome, ako u bilo kom trenutku jačina električnog polja padne ispod vrednosti E_0 smatra se da nema daljeg razvoja lidera i da njegova dužina ostaje konstantna sve dok vrednost električnog polja ne poraste iznad E_0 . Kada vrednost jačine električnog polja ponovo poraste iznad vrednosti E_0 lider nastavlja da se izdužuje.

Brzina razvijanja lidera između elektroda se može modelovati preko izraza 7.92 za manje vrednosti jačine električnog polja E_0 i za konfiguraciju elektroda šiljak-šiljak.

$$v = K \cdot d \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] \quad (7.92)$$

gde su:

K - empirijska konstanta $K = 400$,

d -rastojanje između elektroda izraženo u [m],

$u(t)$ vremenski promenljiv napon na razmaku elektroda [kV],

x -nepremošćeni deo razmaka elektroda [m],

E_0 -jačina električnog polja pri kojoj počinje razvoj lidera, preporučena vrednost je $E_0=545$ [kV/ m].

Za veće vrednosti električnog polja koristi se sledeći izraz:

$$v = K_L \cdot u(t) \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] \quad (7.93)$$

gde su:

K_L - empirijska konstanta $K_L = 0,7785$,

E_0 -jačina električnog polja pri kojoj počinje razvoj lidera, preporučena vrednost je $E_0=535$ [kV/ m].

Izraz 7.93 može se koristiti za izolatore za nadzemne vodove, sa vrednostima koje su date u tabeli 7.2, prema [6].

Tabela 7.2: Vrednosti empirijskih konstanti za metodu progresivnog lidera prema izrazu 7.93

Oblik elektroda	Polaritet	$K_L[m^2/(kV^2s)]$	$E_0[kV/m]$
Potporni i štapni izolatori	+	0.8	600
	-	1	670
Kapasti izolatori	+	1.2	520
	-	1.3	600

Najčešće korišćen izraz za proračun brzine razvoja lidera je:

$$v = K \cdot d \cdot \left[\frac{u(t)}{x} - E_0 \right] e^{K_1 \cdot u(t)/d} \quad (7.94)$$

gde je:

K empirijska konstanta, usvojena vrednost $K = 170$,

K_1 empirijska konstanta, usvojena vrednost $K_1 = 0.0015$,

Suština proračuna je da se odredi brzina razvijanja lidera u pojedinim vremenskim intervalima korišćenjem nekog od izraza 7.92, 7.93 ili 7.94. Na osnovu brzine razvijanja lidera i proteklog vremena određuje se izduženje lidera u pojedinim koracima proračuna. Na osnovu izduženja lidera u pojedinim vremenskim periodima moguće je odrediti ukupnu dužinu lidera u datom momentu i oduzimanjem dužine lidera od dužine međuelektrodnog rastojanja dobija se nova vrednost nepremoštenog dela međuelektrodnog prostora x . Proračun se nastavlja sve dok dužina lidera ne postane jednaka dužini međuelektrodnog rastojanja, kada se smatra da je došlo do preskoka na izolaciji.

U svim prethodno definisanim izrazima za proračun brzine razvoja progresivnog lidera, u međuelektrodnom prostoru pojavljuje se jačina električnog polja pri kojoj počinje razvoj lidera, tzv. kritična vrednost jačine električnog polja (E_0). Određivanje vrednosti koeficijenta E_0 nije jednostavno jer ova vrednost zavisi od konfiguracije elektroda, polariteta primenjenog prenaponskog talasa i rastojanja između elektroda.

7.5.4 Vrednosti napona razornog pražnjenja

Pod razornim pražnjenjem se podrazumeva pojava da izolacija izgubi izolaciona svojstva prilikom delovanja napona višeg od određene vrednosti. Pri tome se trajan gubitak izolacionog svojstva naziva probojem i događa se kod čvrste izolacije. Taj tip izolacije nazivamo neobnovljivom izolacijom. U slučaju gasovitih ili tečnih dielektrika izolaciona svojstva se obnavljaju potpuno ili delimično i takve dielektrike nazivamo obnovljivim. Proces razornog pražnjenja u tom slučaju nazivamo preskokom.

Vrednost napona razornog pražnjenja ima slučajnu prirodu. Ponekad se pri procesu koordinacije izolacije slučajna priroda u statističkim proračunima uvažava, ali se značajno pojednostavljenje proračuna u tehničkim analizama postiže kada se definiše preskočni napon preko jedne reprezentativne vrednosti.

Prema obliku prenapona koji deluju na izolaciju prenaponi se dele na:

- prenapone dugog čela (sklopni prenaponi),

- prenapone kratkog čela (atmosferski prenaponi),
- prenapone vrlo kratkog čela (prenaponi unutar gasom izolovanih postrojenja usled sklopnih operacija).

Preskočni naponi zavise od oblika i strmine čela talasa atmosferskog pražnjenja. Pošto su naponi na izolaciji na stubovima nadzemnih vodova najčešće unipolarni (ne menjaju polaritet u toku delovanja), u laboratorijskim uslovima se simuliraju udarnim naponskim talasima veoma strmog čela koji postepeno opadaju na začelju. Standardni oblik ispitnog napona je sa trajanjem čela $T_f = 1.2 \mu s \pm 30\%$, a začelja (vremena da talas opadne na polovinu amplitude) $T_t = 50 \mu s \pm 20\%$.

Prema definiciji podnosivog napona [11], postoje dva tipa podnosivih napona:

- Konvencionalni podnosivi udarni naponi, koji podrazumevaju da je ukupan procenat razornih pražnjenja izolacije u odnosu na broj delovanja udarnih naponskih talasa nula. To znači da od ukupnog broja izlaganja ispitivanog objekta udarnim talasima, u 100 % slučajeva izolacija objekat mora da izdrži taj napon. Ovaj tip podnosivog napona se odnosi na neobnovljivu izolaciju kod koje je kvar izolacije trajan. Ovakav kvar nazivamo probojem izolacije.
- Statistički podnosivi napon je kada postoji određen broj razornih pražnjenja koji se toleriše. U ovom slučaju radi se o samoobnovljivoj izolaciji kod koje se razorno pražnjenje definiše kao preskok. Preskok na izolaciji u vazduhu je slučajan proces koji se može definisati kumulativnim zakonom raspodele verovatnoće, kao na slici 7.38. Na istoj slici prikazana je vrednost podnosivog napona koja iznosi 1425 kV za mrežu nazivnog napona 400 kV.

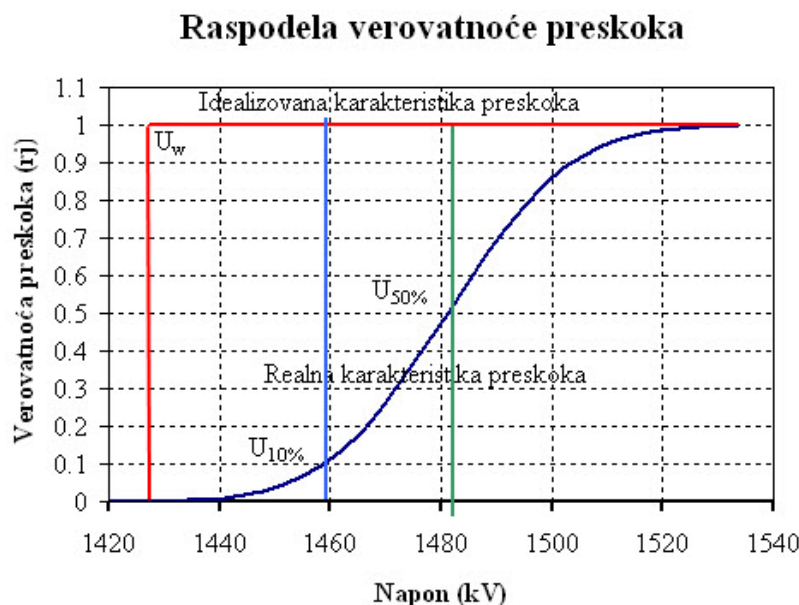
Kriva 7.39 dobijena je na osnovu eksperimentalnog istraživanja u laboratoriji za visoki napon [30] za slučaj jednostrukog izolatorskog lanca od 19 članaka za mrežu 400 kV. Mogu se definišati sledeće vrednosti preskočnih napona:

U_w -podnosivi napon, koji izolacija podnosi sa velikom verovatnoćom (dozvoljen je 1 preskok od 15 udara),

$U_{10\%}$ - napon koji izolacija podnosi u 10% udara, koji se naziva statistički podnosivi napon,

$U_{50\%}$ -napon koji izolacija podnosi u 50% udara,

$U_{90\%}$ - napon koji izolacija podnosi u 90% udara, koji se smatra preskočnim naponom.



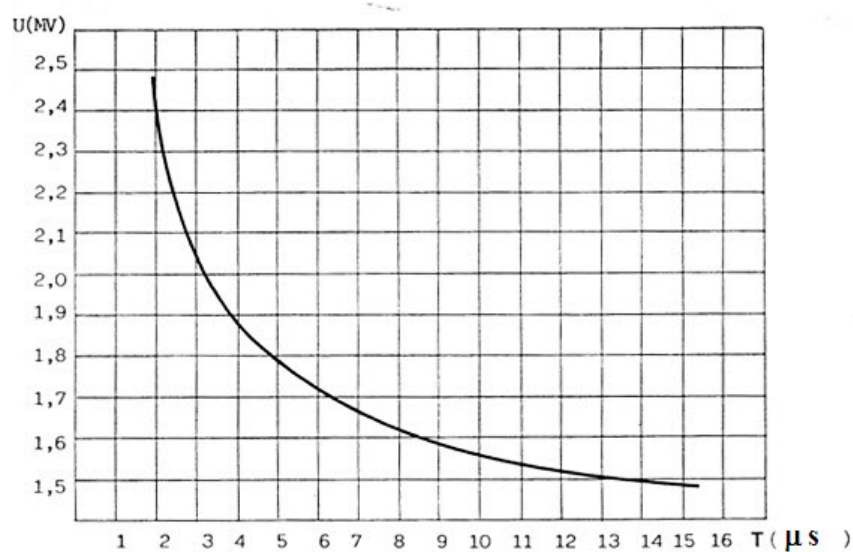
Slika 7.38: Kriva verovatnoće preskoka sa definisanim pojedinim vrednostima preskočnih napona

Kriva 7.39 dobijena je na osnovu eksperimentalnog istraživanja u laboratoriji za visoki napon [30] za slučaj jednostrukog izolatorskog lanca od 19 članaka opremljenih zaštitnim armaturama, za mrežu 400 kV. Određen je podnosivi napon izolacije od $U_w = 1425$ kV pri kome nije bilo ni jednog preskoka, izmereni su još naponi $U_{10\%} = 1462$ kV, i $U_{50\%} = 1485$ kV. Standardno odstupanje preskočnog napona je $\sigma = 1.2\%$. Na osnovu tih podataka nacrtana je teorijska kriva 7.38 normalne raspodele verovatnoće sa parametrima raspodele koji su eksperimentalno određeni.

Oblik volt-sekundne krive zavisi od konstrukcije lanaca i broja članaka, ali generalno ima sličan oblik.

Eksperimentalna istraživanja preskočnih karakteristika su složena, dugotrajna i skupa. Zog toga se eksperimentalno dobijene krive mogu koristiti kao osnova za pravljenje matematičkih modela, koji se mogu kalibrisati pomoću dobijenih eksperimentalnih rezultata.

Rezultati istraživanja preskočnih napona sa slike 7.39 iz [30] iskorišćeni su za kalibraciju modela datog izrazom 7.78. Izračunati su koeficijenti koji definišu hiperboličnu funkciju na bazi dve zadate tačke koje su očitane sa dijagrama 7.39. Očitane tačke su date u tabeli 7.3. Proračunate V-t krive na osnovu 7.78 izračunate su za 3 vrednosti ekponenta $A_n = 0.75$, $A_n = 0.9$ i $A_n = 1.05$. Upoređenjem dijagrama sa originalnom krivom zaključeno je da se najbolje slaganje krive sa slike 7.39 i izračunate krive dobija za $A_n = 0.9$. Izračunate krive su date na slici 7.40 za 3 vrednosti eksponenta A_n .

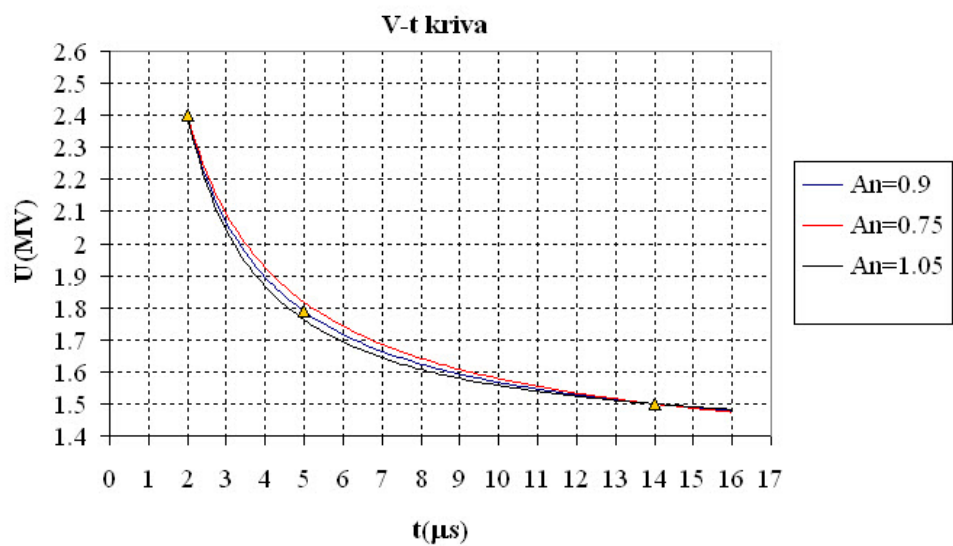


Slika 7.39: Eksperimentalno dobijena volt-sekundna preskočna karakteristika jednostrukog izolatorskog lanca sa 19 članaka

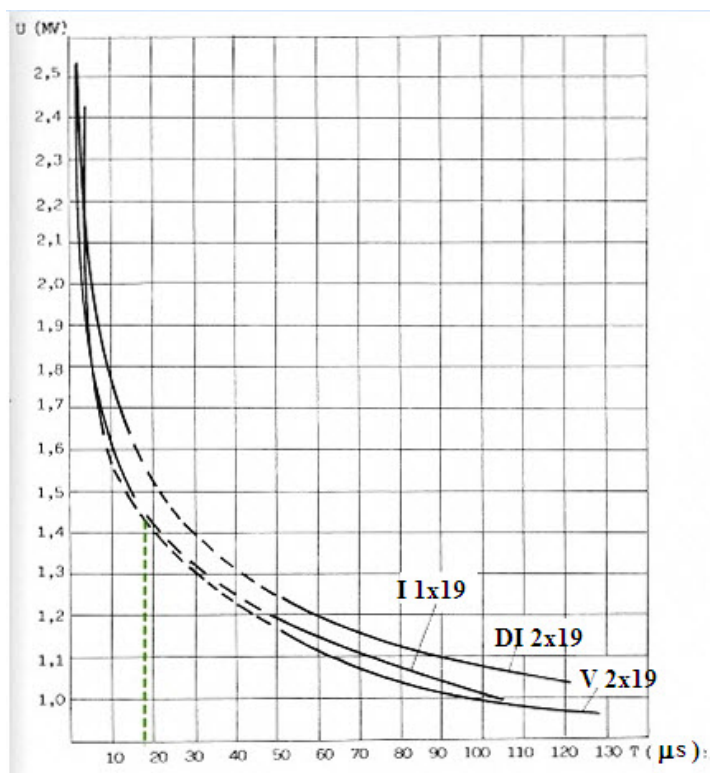
Tabela 7.3: Očitane tačke sa eksperimentalne V-t krive

$T(\mu s)$	$U(MV)$
2	2.4
14	1.5

Na slici 7.41 prikazano je više eksperimentalno dobijenih V-t karakteristika za različite konstrukcije izolatorskih lanaca za 400 kV na osnovu eksperimentalnih istraživanja u laboratoriji za visoki napon koja su opisana u izveštaju [30].



Slika 7.40: Izračunate krive V-t karakteristika za 3 vrednosti eksponenta A_n



Slika 7.41: Više volt-sekundnih preskočnih karakteristika izolatorskih lanaca za 400 kV ($I 1 \times 19$ jednostruki labac, $DI 2 \times 19$ dvostruki lanac, $V 2 \times 19$ dvostruki lanac u V spoju od 19 članaka)

7.5.5 Rizik kvara izolacije

U praktičnoj primeni razlikujemo dva pojma koja se odnose na procenu ugroženosti izolacije:

- broj preskoka na 100 km voda, u slučaju analize nadzemnih vodova sa obnovljivom izolacijom,
- broj godina bez kvara izolacije, u slučaju kvarova izolacije uređaja, koja je neobnovljiva.

Rizik kvara određenog izolacionog elementa koji je izložen prenaponu prema zemlji računa se korišćenjem izraza:

$$R = \int_0^{\infty} f(U_n) \times P(U_n) dU_n \quad (7.95)$$

gde su:

$f(U_n)$ - gustina verovatnoće pojave prenapona,

$P(U_n)$ - kumulativna verovatnoća preskoka pri udarnom naponu vrednostu U .

U gornjem izrazu se koristi normalizovana vrednost prenapona, odnosno:

$$U_n = \frac{U - U_{mo}}{\sigma_U} \quad (7.96)$$

gde su:

U - vrednost prenapona u (kV)

U_n - normirani prenapon u (rj)

U_{mo} - matematičko očekivanje prenapona (kV),

σ_U - srednje kvadratno odstupanje (kV).

Srednje kvadratno odstupanje σ se daje najčešće u %, pa u tom slučaju važi:

$$\sigma_U = \frac{\sigma}{100} \times U_{mo}$$

gde je σ srednje kvadratno odstupanje prenapona izraženo u procentima.

7.5.6 Primer proračuna rizika

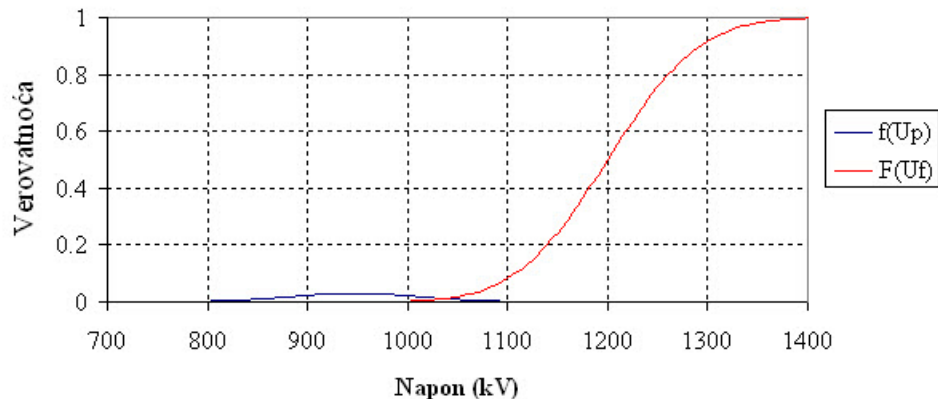
Izvršen je proračun rizika preskoka za sistem 400 kV, pri podacima datim u tabeli 7.4.

Tabela 7.4: Tabela podataka za proračun rizika preskoka

Naziv veličine	Oznaka	Vrednost
Očekivana vrednost prenapona	U_{mo} (kV)	950
Srednje kvadratno odstupanje prenapona	σ_p (%)	8
Očekivana vrednost preskočnog napona	U_f (kV)	1200
Srednje kvadratno odstupanje preskočnog napona	σ_f (%)	6

Na slici 7.42 prikazana je gustina raspodele prenapona $f(U_p)$ i kumulativna funkcija raspodele preskočnih napona $F(U_p)$ za 400 kV sistem u kome nastaju sklopni prenaponi, koji su po pretpostavci raspodeljeni po normalnom zakonu raspodele. Kumulativna funkcija verovatnoće preskoka prikazana je u punoj razmeri.

Proračun rizika preskoka na izolaciji usled sklopnih prenapona

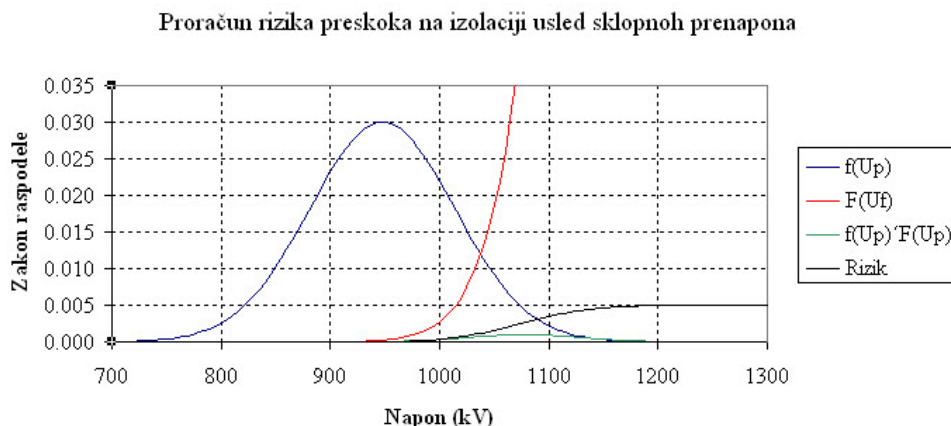


Slika 7.42: Gustina zakona raspodele prenapona $f(U_p)$ i funkcija verovatnoće u punoj razmeri

Na slici 7.43 prikazana je uvećana gustina raspodele, funkcija verovatnoće preskoka, kao i proizvod $f(U_p) \times F(U_p)$ i rizik preskoka izračunat po izrazu 7.95, koji predstavlja površinu ispod krive $f(U_p) \times F(U_p)$.

7.5.7 Sklopni preskočni napon

U slučaju sklopnih udarnih talasa kojima se ispituje izolacija za mreže visokih i vrlo visokih napona (400 kV i više), rastojanja između elektroda su veća, pa se mehanizam preskoka



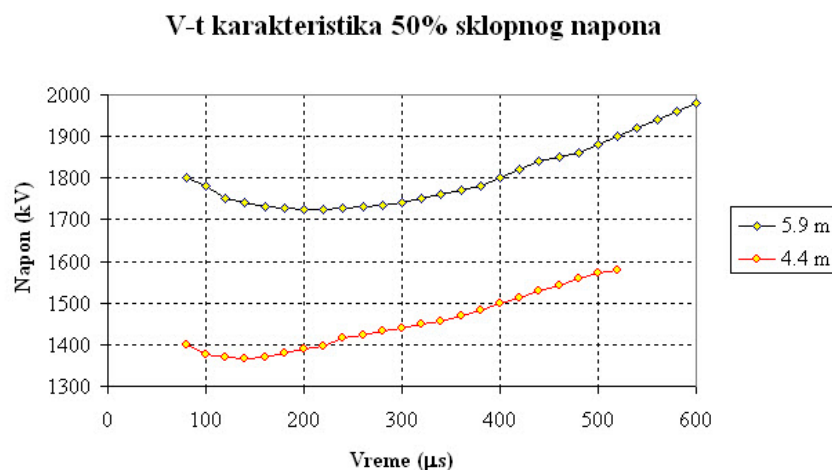
Slika 7.43: Uvećana gustina raspodele, funkcija verovatnoće preskoka, kao i proizvod $f(U_p) \times F(U_f)$ i rizik preskoka izračunat po izrazu 7.95

razlikuje u odnosu na atmosferske udarne talase. Jedan od standardnih oblika sklopnog udanog talasa ima oblik $250/2500 \mu s$. Kod sklopnog udarnog napona V-t karakteristika ima specifičan "U" oblik sa minimalnom vrednošću preskočnog napona koji nastaje u opsegu $150-300 \mu s$ trajanja čela. Minimum V-t krive naziva se "kritičan preskočni napon", kome odgovara "kritično vreme do preskoka", koje se produžava sa porastom rastojanja između elektroda. V-t kriva 50% preskočnog napona se uvek odeduje za pozitivne talase, kojima odgovara niži preskočni napon. U slučaju talasa koji izaziva preskok u oblasti minimalnog preskočnog napona, tada se preskok obično događa na začelju talasa.

Na slici 7.44 prikazane su dve V-t karakteristike za različita rastojanja između elektroda za pozitivan sklopni talas, na osnovu eksperimenata iz [105]. Tumačenje V-t krive može se vršiti za dva slučaja:

- Slučaj kada do preskoka dolazi pri delovanju strmih talasa, kada zbog brzine porasta napona proces jonizacije kasni za porastom električnog polja, pa se sa produženjem čela talasa smanjuje preskočni napon. Ovo je slučaj kod atmosferskih udarnih talasa.
- Slučaj kada je čelo talasa relativno sporo (sklopni prenaponi), a razmaci između elektroda dugački. U ovom slučaju razvoj strimera se usporava ukoliko je strmina talasa mala, jer se smanjuje struja kroz strimere koja se kapacitivno zatvara prema drugoj elektrodi. Zbog toga je potreban viši napon za izazivanje preskoka pri dužem vremenu čela kod dugih razmaka između elektroda.

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja za elektrodnu konfiguraciju štap-ploča predlaže se izraz za 50% preskočni napon za međuelektrodna rastojanja do 25 m u obliku koji je dat u [12].



Slika 7.44: V-t karakteristika za slučaj sklopnog udarnog talasa za dva različita preskočna razmaka

$$U_{50RP} = 500 \cdot d^{0.6} \quad (7.97)$$

gde je:

U_{50RP} - 50% preskočni napon (kV-temena vrednost) za elektrode štap-ploča (RP od engl. rod-plate),

d -međuelektrodno rastojanje (m).

Gornji izraz se odnosi za terene na nadmorskoj visini do 1000 m.

Za bilo koju drugu konfiguraciju elektroda koriste se koeficijenti oblika prema [12]. Na slici 7.45 prikazane su geometrije izolatora na konzoli (a) i provodnik unutar prozora (b).

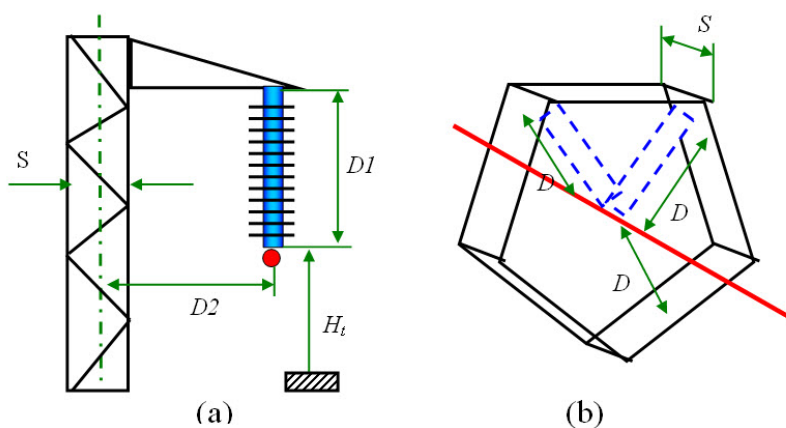
U Tabeli 7.5 prikazan je faktor oblika elektroda za proračun preskočnog napona za stubove nadzemnih vodova.

Dobijanje 50% preskočnog napona iz elektrodne konfiguracije šiljak-ploča u realne konstruktivne konfiguracije kod nadzemnih vodova vrši se na osnovu izraza 7.98.

$$U_{50\%} = U_{50RP} \times K \quad (7.98)$$

Statistički podnosivi napon $U_{10\%}$ se računa prema izrazu :

$$U_{10\%} = \frac{U_{50}}{1 - 1.3\sigma} \quad (7.99)$$



Slika 7.45: Parametri geometrija stuba sa izolatorima (a) izolator na konzoli, (b) provodniku unutar prozora

Tabela 7.5: Faktor oblika elektroda za proračun preskočnog napona

Slika	Parametar	Tipičan raspon vrednosti	Referentna vrednost
(a)	K	1,36 do 1,58	1,45
	$D2/D1$	1 do 2	1,5
	$H_t/D1$	3,34 do 10	6
	$S/D1$	0,167 do 0,2	0,2
(b)	K	1,22 do 1,32	1,25
	$H_t/D1$	6 do 6,7	6
	$S/D1$	0,4 do 0,1	0,2

Srednje kvadratno odstupanje kod usvojene normalne raspodele udarnih napona dato je u tabeli 7.6.

Tabela 7.6: Srednje kvadratno odstupanje kod normalne raspodele udarnih napona

Vrsta udarnog napona	Srednje kvadratno odstupanje σ u %
Atmosferski udarni napon	3
Sklopni udarni napon	6

7.6 Model odvodnika prenapona

7.6.1 Modelovanje nelinearnog otpornika

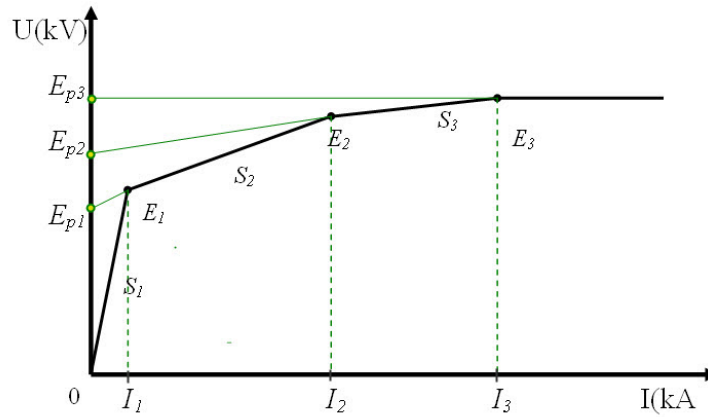
Odvodnik prenapona predstavlja osnovni zaštitni element izolacije visokonaponske opreme u postrojenju od prenapona. Na ovom mestu dato je matematičko modelovanje odvodnika

prenapona pri proceni ugroženosti izolacije od atmosferskih prenapona. Klasičan ili **SiC** odvodnik prenapona se sastoji od nelinearnog otpornika na kome se u širokom opsegu struja koje se pojavljuju pri atmosferskim pražnjenjima menja pad napona u relativno uskim granicama. Da bi se nelinearni otpornik odvojio od mreže u normalnom pogonu koriste se iskrišta. Iskrište reaguje pri pojavi prenapona, tako da se fazni provodnik preko nelinearnog otpornika spaja sa zemljom.

Novi tip odvodnika prenapona (metal-oksidni ili **ZnO** odvodnik) nema iskrišta, već samo nelinearni otpornik, koji ima znatno nelinearniju karakteristiku, tako da pri radnom naponu provodi vrlo malu struju u zemlju.

Volt-amperska karakteristika nelinearnog otpornika odvodnika prenapona može se prikazati u linearno-segmentnom obliku, kao na slici 7.46. Pojedini segmenti su označeni kao $s_1, s_2, \dots, s_n$.

Svaki linearni segment karakteristike preostalog napona je produžen do ordinatne ose. Svaka od prava nastalih produžavanjem segmenta predstavlja karakteristiku odvodnika u linearizovanom obliku na posmatranom segmentu. Odsečki pojedinih segmenata na ordinati obeleženi su sa $E_{p1}, E_{p2}, \dots, E_{pn}$.



Slika 7.46: Linearno-segmentni oblik volt-amperske karakteristike nelinearnog otpornika odvodnika prenapona

Karakteristika preostalog napona na proizvoljnom segmentu s_i može se napisati u obliku linearne funkcije:

$$u(i) = \frac{E_{j+1} - E_j}{I_{j+1} - I_j} \cdot i + E_{pj} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (7.100)$$

gde su:

i —trenutna vrednost struje kroz odvodnik,

$I_1, \dots, I_j, I_{j+1}$ —granice segmenata na kojima je volt-amperska karakteristika linearizovana.

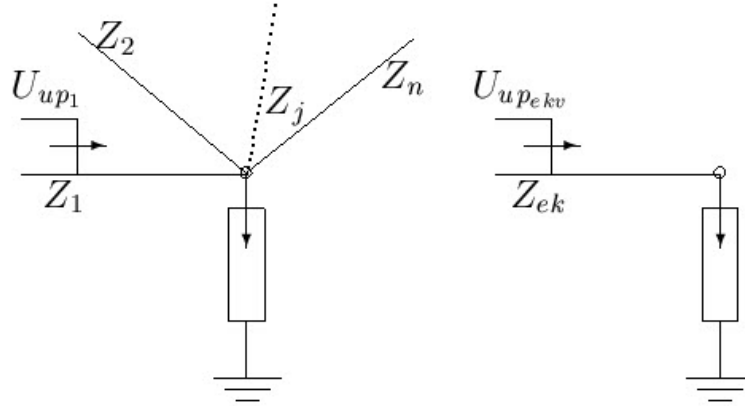
Ako se uvede oznaka:

$$R_{odv_j} = \frac{E_{j+1} - E_j}{I_{j+1} - I_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (7.101)$$

izraz 7.100 se može napisati u identičnom obliku kao inverzna karakteristika voda po Beržeronovoj grafoanalitičkoj metodi, odnosno:

$$u(i) = R_{odv_j} i + E_{p_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (7.102)$$

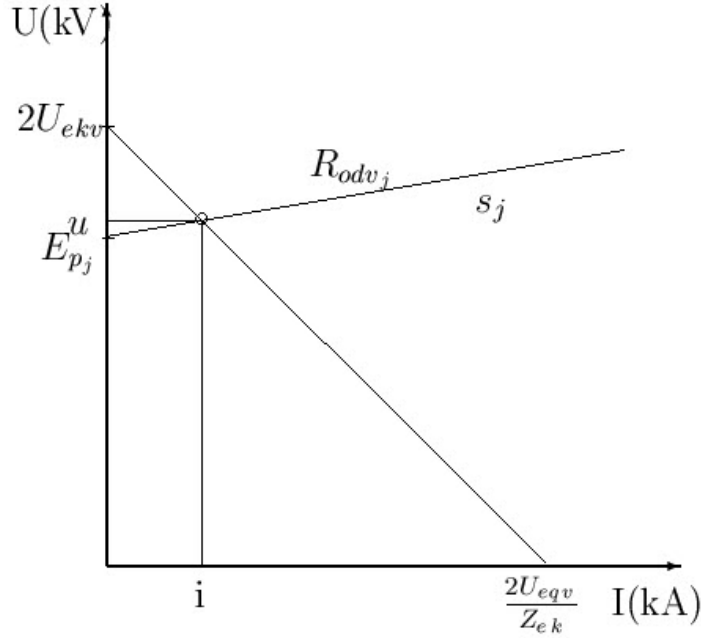
Na slici 7.47 je prikazano više vodova koji se sustiču u čvornu tačku u kojoj je priključen odvodnik prenapona (levo), kao i ekvivalentan vod kojim je zamenjeno više vodova (desno).



Slika 7.47: Odvodnik prenapona priključen na više vodova (levo) i ekvivalentan vod priključen na odvodnik (desno)

Na slici 7.48 prikazane su prave koje predstavljaju karakteristiku ekvivalentnog voda i karakteristiku odvodnika prenapona po Beržeronovoj metodi. Na slici je prikazana samo jedna od pravih koja reprezentuju odvodnik prenapona na segmentu s_j koji važi na opsegu struja između I_j i I_{j+1} .

Na osnovu dijagrama na slici 7.48 se može zaključiti da se odvodnik na segmentu s_j može modelovati kao neograničeno dugačak vod karakteristične impedanse R_{odv_j} po kome nailazi prenaponski talas čija je amplituda E_{p_j} , kao na slici 7.49 desno. Na slici 7.49 levo prikazan je nailazak prenaponskog talasa $U_{up_{ekv}}$ po ekvivalentnom vodu prema odvodniku prenapona.

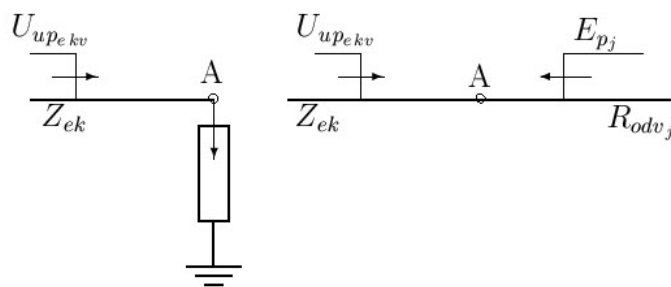


Slika 7.48: Beržeronov dijagram koji služi za modelovanje odvodnika prenapona na segmentu s_j

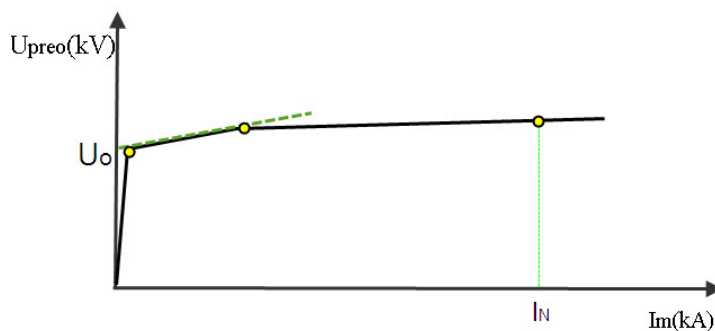
Pri proračunu prelaznog procesa potrebno je prvo odrediti segment na kome se seku karakteristika voda i karakteristika odvodnika, a nakon toga se preostali napon na odvodniku izračunava na osnovu preseka karakteristika. Posle izračunavanja napona u presečnoj tački rešavanjem dve linearne jednačine sa dve nepoznate, dobija se preostali napon na odvodniku na osnovu sledećeg izraza:

$$u_{odv} = U_{up_{ekv}} \frac{2R_{odvj}}{R_{odvj} + Z_{ekv}} + E_{p_j} \frac{2Z_{ekv}}{Z_{ekv} + R_{odvj}} \quad (7.103)$$

Ovim postupkom dobijen je jednostavan model nelinearnog otpornika odvodnika prenapona za koji je potrebno poznavati samo nekoliko tačaka na volt-amperskoj krivoj preostalog napona. Proizvođači najčešće daju podatke za odvodnik u obliku tabele preostalog napona za nekoliko vrednosti udarnih struja standardnog oblika, prema preporukama IEC (međunarodne elektrotehničke komisije) i to najčešće 50 %, 100 % i 200 % od nazivne struje odvođenja. Poželjno je izvršiti testiranje preostalog napona sa udarnom strujom istog oblika, ali niže amplitude (0,1 kA i 1 kA) da bi se sagledalo ponašanje odvodnika u režimu malih udarnih struja. Linearnom interpolacijom prvog segmenta do unapred usvojene vrlo male vrednosti struje mogu se dobiti realni rezultati, sa neznatno višim prenaponima, bez poznavanja tačne karakteristike preostalog napona u oblasti vrlo malih struja kao na slici 7.50.



Slika 7.49: Model odvodnika prenapona na segmentu s_j nelinearne volt-amperske karakteristike putem ekvivalentnih vodova

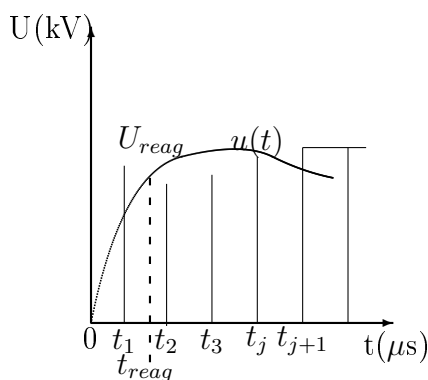


Slika 7.50: Aproksimacija karakteristike odvodnika u oblasti malih struja

7.6.2 Modelovanje iskrišta odvodnika prenapona

Iskrište odvodnika prenapona se modeluje samo kod odvodnika prenapona koji se rade sa iskrištem. To su stari odvodni prenapona sa otpornicima od silicijum karbida (SiC odvodnici) ili linijski odvodnici prenapona za vodove sa eksternim iskrištem. Iskrište odvodnika prenapona modeluje se na taj način što se odvodnik pre reagovanja zamenjuje beskonačno velikim otpornikom. Posle reagovanja se uvodi opisani postupak određivanja preostalog napona. U svakom koraku proračuna se pre nego što je odvodnik reagovao upoređuje napon u tački priključenja odvodnika sa naponom reagovanja na učitanoj volt-sekundnoj karakteristici napona reagovanja iskrišta. Kada napon u posmatranoj tački poraste iznad napona reagovanja, prelazi se na proračun preostalog napona odvodnika Beržeronovom metodom karakteristika. Na slici 7.51 prikazana je tipična volt-sekundna karakteristika napona reagovanja odvodnika prenapona predstavljena u linearno segmentnom obliku U_{reag} i talasni oblik napona $u(t)$. Trenutak reagovanja odvodnika t_{reag} se određuje linearnom interpolacijom. Napon reagovanja se određuje iz volt-sekundne karakteristike iskrišta u trenutku t_{reag} .

U slučaju metal-oksidnih odvodnika bez iskrišta metoda proračuna je identična,



Slika 7.51: Modelovanje reagovanja iskrišta SiC odvodnika prenapona

jedino se smatra da je napon reagovanja odvodnika jednak nuli, jer ovi odvodnici imaju nelinearni otpornik direktno uključen pod napon.

7.6.3 Modelovanje dinamičke karakteristike preostalog napona

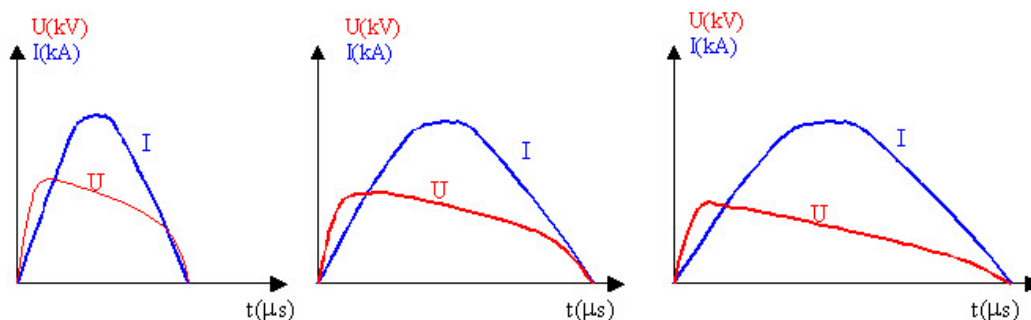
Uočeno je da preostali napon odvodnika zavisi od strmine čela primenjenog talasa, kao i od njegovog trajanja. Ova pojava je znatno izraženija kod **ZnO** odvodnika prenapona nego kod **SiC** odvodnika. Ova pojava nastaje iz dva razloga:

- uticaj grejanja nelinearnog otpornika, koji sa povećanjem temperature smanjuje svoju otpornost zbog negativnog temperaturnog koeficijenta materijala otpornika,
- uticaj induktivnosti stuba odvodnika, koji pri velikim strminama čela strujnih talasa dovodi do povećanog pada napona na rezistoru.

Na slici 7.52 prikazana su tri slučaja ispitivanja rezistora odvodnika prenapona udarnim strujama različitih strmina čela. Krajnji levi slučaj je ispitivanje strmim strujnim talasom, srednji slučaj ispitivanje standardnim strujnim talasom trajanja čela $8 \mu s$, a desno ispitivanje talasom dužeg čela (sklopni udarni strujni talas).

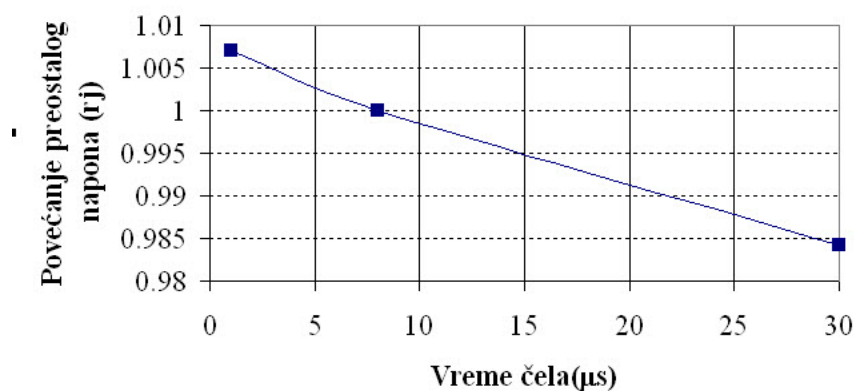
Oba uticaja se uzimaju u obzir preko dodatnog koeficijenta K_t kojim se množi preostali napon odvodnika za određenu vrednost struje, a koji zavisi od trajanja čela talasa. Zavisnost koeficijenta K_t od trajanja čela talasa prikazana je na slici 7.53.

Uticaj koeficijenta K_t se uzima u obzir samo kod **ZnO** odvodnika prenapona, dok se kod klasičnog odvodnika zanemaruje, jer kod odvodnika sa iskrištem presudnu ulogu ima volt-sekundna karakteristika reagovanja iskrišta, koja ima znatno izraženiju nelinearnost.



Slika 7.52: Tri slučaja ispitivanja odvodnika prenapona strujnim talasima različitog trajanja čela talasa.

Zavisnost preostalog napona od trajanja čela struje



Slika 7.53: Koeficijent promene preostalog napona u zavisnosti od trajanja čela talasa

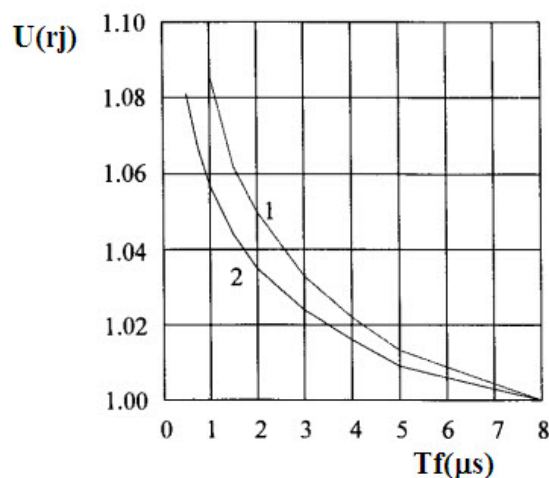
U tabeli 7.7 prikazane su tabelarne vrednosti koeficijenta povećanja prenapona dobijene standardnim ispitivanjem odvodnika sa 3 različita čela struje [49] za odvodnik naznačenog napona 55 kV.

U svakom koraku proračuna se određuje preostali napon na odvodniku primenom 7.103, koji se množi sa koeficijentom $K_t(\%)/100$ određenim sa dijagrama 7.53 za vreme t proteklo od nailaska prenaponskog talasa na odvodnik do posmatranog trenutka.

Prema [51] prikazana je kriva zavisnosti relativnog povećanja preostalog napona na rezistoru od čela talasa, na slici 7.54.

Tabela 7.7: Rezultati tipskih ispitivanja preostalih napona za 3 standardna strujna talasa različitih trajanja čela amplitude talasa 10 kA

U_R	U_C (kV)	Trajanje čela struje		
(kV)	(kV)	$1\mu s$	$8/20\ \mu s$	$30/60\ \mu s$
55	44	Preostali naponi (kV)		
		115.2	114.4	112.6
		Preostali naponi (rj) u odnosu na talas $8/20\ \mu s$		
		1.007	1.000	0.984

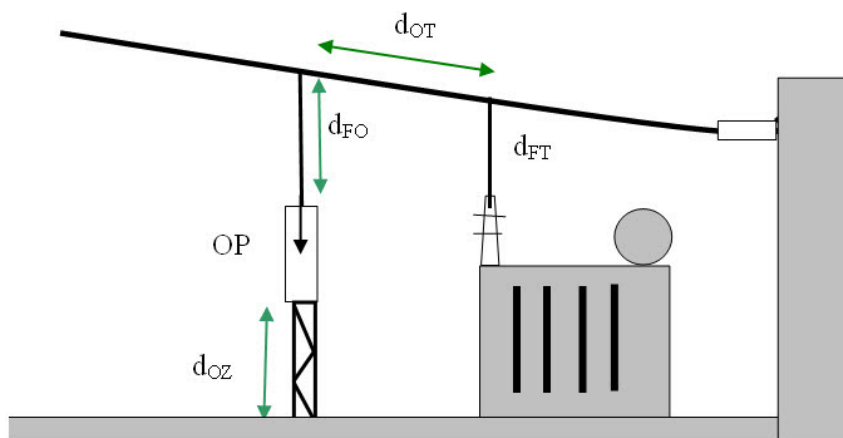


Slika 7.54: Zavisnosti relativnog povećanja preostalog napona na rezistoru od čela talasa (1-eksperimentalna kriva, 2 -teorijska kriva)

7.6.4 Modelovanje odvodnika prenapona za postrojenja

Najčešća uloga odvodnika prenapona je zaštita energetskih transformatora. U ranijoj praksi, iako se zna da je potrebno maksimalno približiti odvodnik prenapona objektu zaštite, zbog nepouzdanosti konstrukcije starijih tipova odvodnika prenapona u porculanskom kućištu, postojala je opasnost od eksplozije, koja je mogla da mehanički ošteti prolazne izolatore transformatora. Zbog toga se nalazilo neko optimalno rastojanje koje je dovoljno daleko da ne ugrožava objekat zaštite, a sa druge strane dovoljno blizu da formira zaštitni zonu u kojoj je štićeni objekat.

Na slici 7.55 prikazan je tipičan klasičan način razmeštaja prenaponske zaštite i energetskog transformatora. Odvodnik prenapona ima posebnu vezu od faznog provodnika do gornjeg priključka odvodnika prenapona, a transformator ima svoju vezu do priključka na prolaznom izolatoru.



Slika 7.55: Skica klasičnog prilaza nadzemnog voda transformatoru sa odvojenim spustevima za odvodnik prenapona i za priključak transformatora

Oznake na slici 7.55 imaju sledeće značenje:

d_{FO} - dužina veze od faze do gornjeg priključka odvodnika prenapona,

d_{OZ} - dužina zemljovoda od donjeg priključka odvodnika prenapona do uzemljivača,

d_{OT} - dužina faznog provodnika od konektora za vezu za odvodnik prenapona do konektora za vezu za energetski transformator,

d_{FT} - dužina veze od faze do prolaznog izolatora transformatora,

OP - oznaka za odvodnik prenapona.

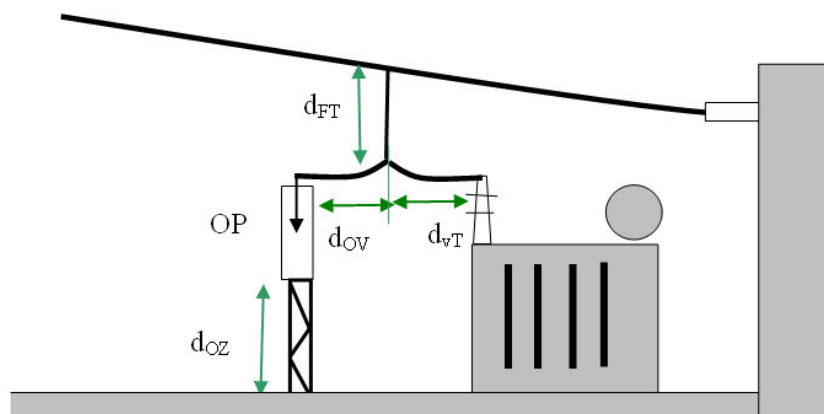
Uvođenjem metal-oksidnih odvodnika prenapona u kućištu od silikonske gume značajno se smanjila opasnost od razornih eksplozija odvodnika prenapona, pa se rastojanje između odvodnika i štice objekta mogla smanjiti na meru uslovljenu prostornim i konstruktivnim ograničenjima.

Na slici 7.56 prikazan je način skraćivanja električne veze između odvodnika prenapona i transformatora, a da se sačuva prostorna udaljenost koja može biti diktirana različitim projektantskim uslovima.

Oznake na slici 7.56 imaju sledeće značenje:

d_{FT} - dužina veze od faze do račve od koje se odvajaju veza za odvodnik i za transformator,

d_{OV} - dužina veze od račve do gornjeg priključka odvodnika prenapona



Slika 7.56: Mogućnost skraćivanja električne veze između odvodnika i transformatora

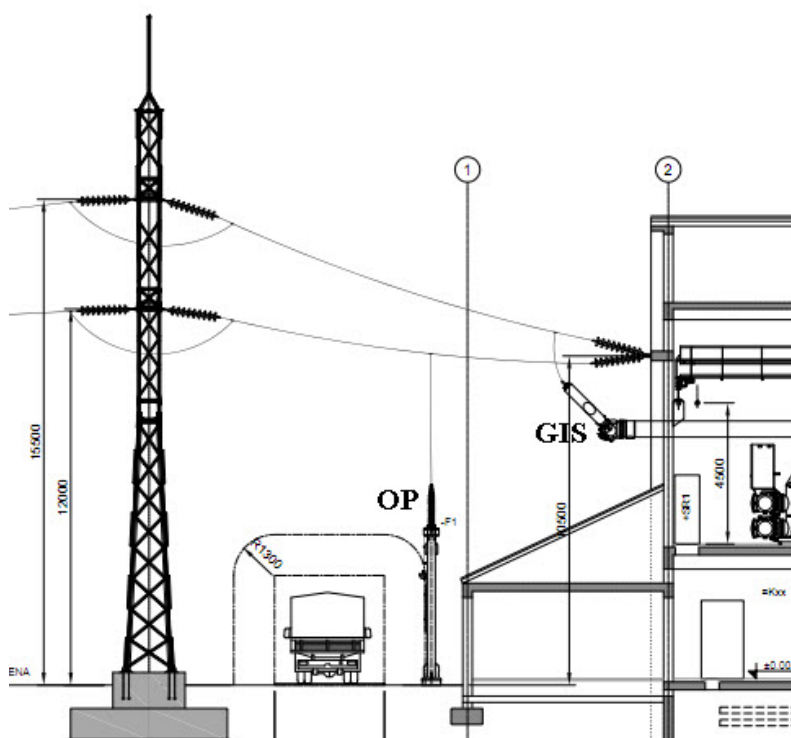
d_{OZ} - dužina zemljovoda od donjeg priključka odvodnika prenapona do uzemljivača,

Tipična dispozicija postrojenja sa odvodnikom prenapona za zaštitu transformatora prikazana je na slici 7.57. Na slici oznaka OP označava odvodnik prenapona, GIS gasom izolovano postrojenje.

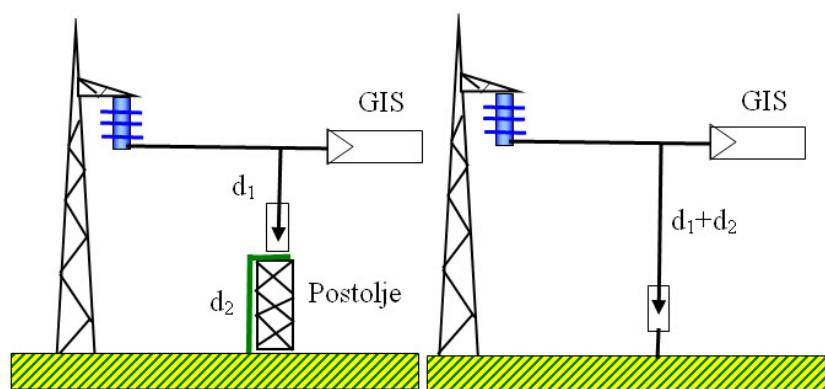
Na slici 7.58 prikazana je zamenska šema u kojoj je odvodnik prenapona spojen vezom za fazni provodnik dužine d_1 , a oznaka d_2 označava dužinu zemljovoda od donjeg priključka do spoja sa uzemljivačem. Metalno postolje koje nosi odvodnik se nikada ne koristi za odvođenje struje pražnjenja. Na slici desno spust do odvodnika je ekvivalentiran tako da se koristi model odvodnika sa jednom priključnom tačkom, dok je druga tačka direktno uzemljena.

Ovakav model odvodnika se naziva odvodnikom sa jednim priključkom.

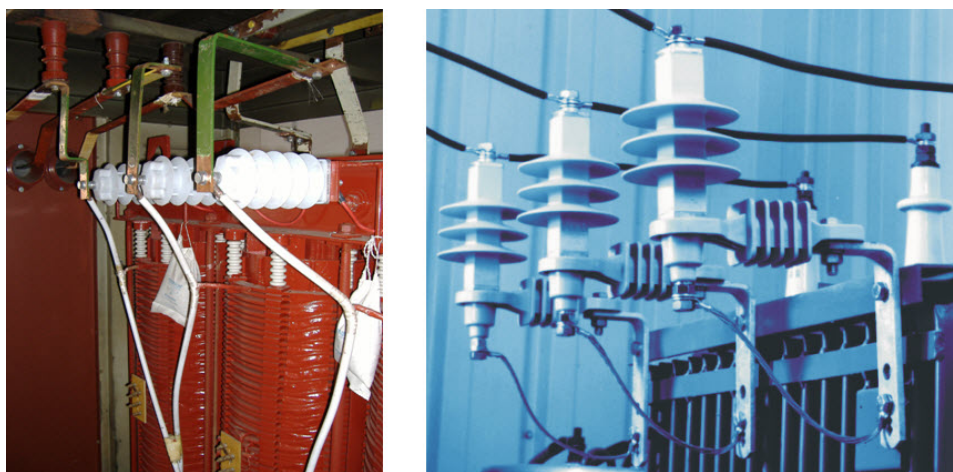
Specijalno izvođenje odvodnika prenapona je kada se odvodnici prenapona postave direktno na energetski transformator. Na slici 7.59 prikazana su dva slučaja primene. Levo je primenjen odvodnik prenapona na suvom transformatoru, a desno na uljnom. Važno je napomenuti da struja odvođenja mora da se vodi posebnim provodnikom, a ne sme da protiče kroz uzemljene delove transformatora kao što su magnetno kolo suvog transformatora ili kućište uljnog.



Slika 7.57: Skica prilaza nadzemnog voda



Slika 7.58: Ekvivalentiranje spoja odvonika sa faznim provodnikom



Slika 7.59: Primena odvodnika prenapona direktno na srednjenaponskim transformatorima (levo-suvi transformator, desno-uljni transformator)

7.6.5 Modelovanje odvodnika prenapona sa dva priključka

Kod do sada korišćenog modela odvodnika prenapona sa jednim priključkom u programu za analizu atmosferskih prenapona, upadni talasi se javljaju samo na jednom kraju odvodnika, a drugi kraj se nalazi na potencijalu zemlje. U praksi se uvek pojavljuje spojna veza od faze do gornjeg priključka odvodnika i od donjeg priključka veza koja se zove zemljovod, do spoja sa uzemljivačem. U ovom slučaju se može odvodnik modelovati da je vezan prema zemlji, a sa gornje strane se saberu dužina zemljovoda i dužina provodnika koja čini vezu faze do odvodnika, što daje identične rezultate. Međutim, postoje konfiguracije u kojima odvodnik prenapona mora da se modeluje sa dva priključka, Takav slučaj je kada se izolacija vodova štiti odvodnicima koji su postavljeni paralelno izolatorima. Ovakvi odvodnici se nazivaju linijskim odvodnicima, koji su opisani u poglavlju ???. Kod kod linijskih odvodnika prenapona, pri pojavi struja pražnjenja, oba kraja nalaze se na potencijalima različitim od potencijala zemlje, jer je jedan kraj na povišenom potencijalu konzole stuba, a drugi kraj na potencijalu faznog provodnika. Stoga se ovakav model odvodnika naziva modelom sa dva priključka. Kod ovog tipa odvodnika se na oba kraja javljaju upadni talasi, kao sto je prikazano na slici 7.60.



Slika 7.60: Model rednog odvodnika prenapona između dva elementa

Na slici 7.60 oznake imaju sledeće značenje:

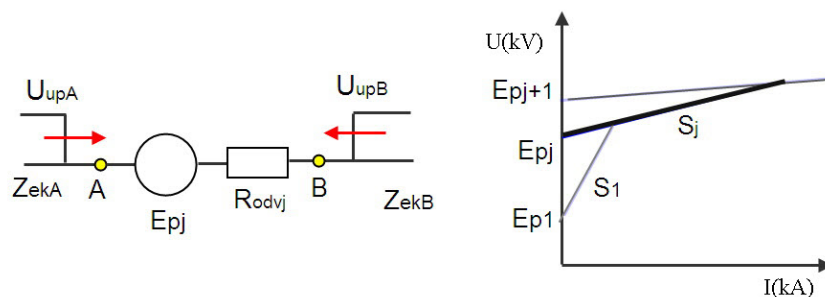
U_{upA} – upadni naponski talas koji se prostire ka tački A ,

U_{upB} – upadni naponski talas koji se prostire sa suprotne strane odvodnika prenapona ka tački B ,

Z_{ekA} , Z_{ekB} – ekvivalentne karakteristične impedanse vodova koji su priključeni na krajnjim tačkama odvodnika A i B .

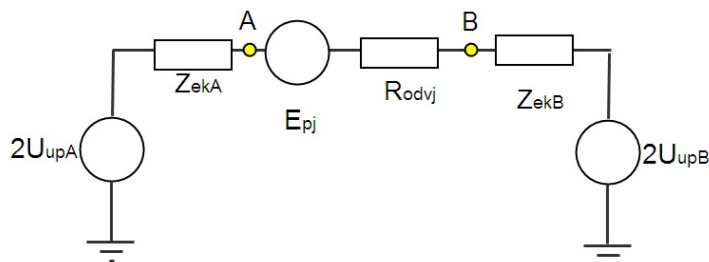
Zamenska šema modela odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona prikazan je na slici 7.61 (levo). Na istoj slici desno prikazana je linearizovana karakteristika preostalog napona odvodnika prenapona za segment j .

Sa slike 7.61 se može uočiti da se odvodnik prenapona modeluje rednim elementom koji sadrži izvor čija je elektromotorna sila E_{pj} koja odgovara preseku j -tog linearnog



Slika 7.61: Zamenska šema modela odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona (levo) i dijagram karakteristike preostalog napona u linearizovanoj formi (desno)

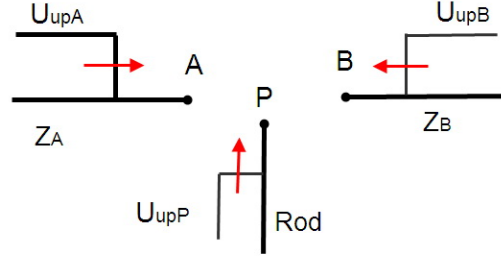
segmenta čiji je nagib S_j sa ordinatnom osom. Nagib j -tog linearnog segmenta definisan je dinamičkom otpornošću odvodnika prenapona na tom segmentu koji je dat izrazom 7.101. Za rešavanje šeme sa slike 7.61 može se koristiti Petersenovo pravilo [43], kojim se dobija šema kao na slici 7.62. U slučaju redne veze elemenata može se koristiti modifikacija



Slika 7.62: Šema modela odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona po Petersenovom pravilu

Petersenovog pravila koja je uvedena u [28], a koja se koristi u slučajevima kada se neki element koji se modeluje koncentrisanim elementima nalazi između dva voda koja su modelovana raspoređenim parametrima. U tom slučaju se uvodi treća (pomoćna) tačka P u koju je priključen redni element zamenjen beskonačnim vodom po kome se prostire upadna komponenta napona čija je amplituda $U_{upP} = E_{pj}/2$. Upadna komponenta napona po fiktivnom vodu jednaka je polovini elektromotorne sile ekvivalentnog generatora koji simulira preostali napon pri nultoj struji j tog segmenta odvodnika prenapona, jer napon E_{pj} predstavlja ukupnu elektromotornu silu ekvivalentnog generatora, a ne komponentu putujućeg talasa. Metoda modifikovanih koeficijenata prelamanja opisana je u poglavlju 3.4.

Koeficijenti prelamanja u tački A na sve ostale vodove za upadni talas koji nailazi



Slika 7.63: Ekvivalentna šema rednog odvodnika za jedan linearizovani segment karakteristike preostalog napona po metodi modifikovanih koeficijenata prelamanja

u tačku **A** su:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{AA} &= \frac{2(Z_B + R_{odj})}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{AB} &= \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{AP} &= \frac{2R_{odj}}{Z_A + Z_B + R_{odj}}
 \end{aligned} \tag{7.104}$$

Napuni u čvorovima A, B i P usled nailaska talasa U_{upA} samo u tačku A su:

$$\begin{aligned}
 U_A^1 &= \alpha_{AA} U_{upA} \\
 U_B^1 &= \alpha_{AB} U_{upA} \\
 U_P^1 &= \alpha_{AP} U_{upA}
 \end{aligned} \tag{7.105}$$

Koeficijenti prelamanja u tački B na sve ostale vodove za upadni talas koji nailazi u tačku **B** su:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{BB} &= \frac{2(Z_A + R_{odj})}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{BA} &= \frac{2Z_A}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\
 \alpha_{BP} &= -\frac{2R_{odj}}{Z_A + Z_B + R_{odj}}
 \end{aligned} \tag{7.106}$$

Napuni u čvorovima A, B i P usled nailaska talasa U_{upB} samo u tačku B su:

$$\begin{aligned}
 U_A^2 &= \alpha_{BA} U_{upB} \\
 U_B^2 &= \alpha_{BB} U_{upB} \\
 U_P^2 &= \alpha_{BP} U_{upB}
 \end{aligned} \tag{7.107}$$

Na kraju je posmatran upadni talas u pomoćnoj tački P obeležen kao U_{upP} , koji nailazi po ekvivalentnom vodu koji ima otpornost R_{odvj} koja odgovara j -tom segmentu odvodnika prenapona. Koeficijenti prelamanja u tom slučaju su:

$$\begin{aligned}\alpha_{PP} &= \frac{2(Z_A + Z_B)}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\ \alpha_{PA} &= \frac{2Z_A}{Z_A + Z_B + R_{odj}} \\ \alpha_{BP} &= -\frac{2Z_B}{Z_A + Z_B + R_{odj}}\end{aligned}\tag{7.108}$$

Napuni u čvorovima A, B i P usled nailaska talasa U_{upP} samo u pomoćnu tačku B su:

$$\begin{aligned}U_A^3 &= \alpha_{PA}U_{upP} \\ U_B^3 &= \alpha_{PB}U_{upP} \\ U_P^3 &= \alpha_{PP}U_{upP}\end{aligned}\tag{7.109}$$

Kada se superponiraju komponente izračunatih napona pri delovanju pojedinih komponenti upadnih talasa, dobijaju se stvarne vrednosti napona u tačkama A i B, kao i preostalog napona na odvodniku prenapona (odnosno u pomoćnoj tački P):

$$\begin{aligned}U_A &= U_A^1 + U_A^2 + U_A^3 \\ U_B &= U_B^1 + U_B^2 + U_B^3 \\ U_P &= U_P^1 + U_P^2 + U_P^3\end{aligned}\tag{7.110}$$

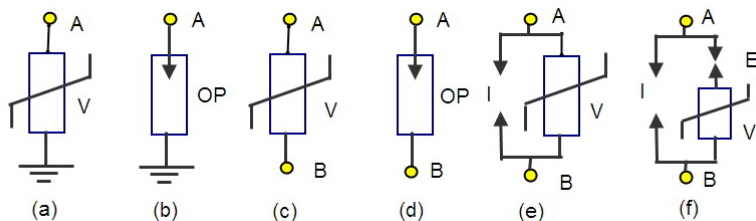
7.6.6 Opšti model odvodnika prenapona

Opšti model linijskog odvodnika prenapona se može podeliti na više opcija:

- (a) Model odvodnika bez iskrišta vezan prema zemlji,
- (b) Model odvodnika sa internim iskrištem vezan prema zemlji,
- (c) Model odvodnika bez iskrišta vezan redno između dve tačke,
- (d) Model odvodnika sa eksternim iskrištem vezan redno između dve tačke,
- (e) Model odvodnika bez eksternog iskrištem vezan redno između dve tačke, paralelno izolaciji modelovanoj kao ekvivalentno iskrište,

- (f) Model odvodnika sa eksternim iskrištem vezan redno između dve tačke, paralelno izolaciji modelovanoj kao ekvivalentno iskrište.

Na slici 7.64 prikazane su ekvivalentne šeme nabrojanih modela odvodnika.



Slika 7.64: Ekvivalentne šeme modela odvodnika

Oznake na ekvivalentnoj šemi 7.64 imaju sledeće značenje:

A, B –priključne tačke odvodnika prenapona,

V –varistor, ZnO odvodnik,

OP –odvodnik prenapona sa internim iskrištem, odnosno SiC odvodnik prenapona,

I – iskrište koje modeluje izolaciju paralelnu linijskom odvodniku prenapona,

EI – eksterno iskrište linijskog odvodnika prenapona.

U slučaju primene linijskih odvodnika prenapona bez eksternog iskrišta mogu se koristiti modeli (c) i (e). U slučaju primene odvodnika prenapona sa eksternim iskrištem mogu se koristiti modeli (d) i (f). Modeli (e) i (f) omogućavaju simulacije pojava preskoka na izolaciji na stubovima koji su snabdeveni odvodnicima prenapona kada je izabran pogrešan odvodnik prenapona čiji je zaštitni nivo viši od preskočnog napona izolacije.

Za modelovanje preskoka na izolaciji voda i na eksternom iskrištu mogu se koristiti sva tri modela preskoka, koji su opisani na strani 236. Preporučuje se primena istog modela za modelovanje preskoka na eksternom iskrištu i na izolaciji voda. Za uobičajene proračune model izolacije paralelan odvodniku ne treba uopšte uzimati u obzir, jer odvodnik mora da spreči pojavu preskoka na izolaciji stuba sa kojom je paralelno postavljen.

7.6.7 Izbor ZnO odvodnika prenapona

Izbor ZnO odvodnika prenapona prema [37] se vrši u tri koraka:

1. Određivanje parametara sistema
2. Provera nenormalnih uslova rada
3. Izbor naznačenog napona

Određivanje parametara sistema

Najvažniji parametar sistema je **maksimalni dozvoljeni radni napon** U_m , koji je obično 5 – 10 % viši od naznačenog napona sistema. Ovaj napon predstavlja efektivnu linijsku vrednost napona.

Drugi važan faktor je visina i trajanje privremenog prenapona U_t . Privremeni prenaponi se najčešće određuju kao prenapon na neoštećenom faznom provodniku pri zemljospoju u mreži. Ako se ne raspolaže tačnim podacima o podešenosti zaštite, prema IEC preporukama se usvaja da je trajanje zemljospoja u prenosnoj mreži do 3 s i u distributivnoj mreži do 10 s za sisteme sa uzemljenom neutralnom tačkom. Ako sistem radi sa izolovanom neutralnom tačkom, tada trajanje zemljospoja može biti od nekoliko sekundi do nekoliko sati. Opasnost kod privremenih prenapoma usled zemljospoja sa lukom je da jednopolni kvar preraste u dvopolni, koji zaštita isključuje i potrošači ostaju bez napajanja.

Provera nenormalnih uslova rada

Ponekad se mogu u sistemu pojaviti okolnosti pri kojima se u uzemljenom sistemu na nekim mestima mogu pojaviti viši naponi na neoštećenim faznim provodnicima od očekivanih (na primer pri razemljivanju neutralnih tačaka pojedinih transformatora koji rade paralelno), što čini ovaj sistem neefikasno uzemljenim.

Ako postoje uslovi za istovremeni nastanak i privremenih prenapona usled zemljospoja i ispada opterećenja, tada takav slučaj treba uzeti u obzir.

Izbor naznačenog napona odvodnika

Naznačeni napon odvodnika se određuje na dva načina:

1. Na osnovu trajnog radnog napona U_c koji je jednak faznoj vrednosti maksimalnog trajno dozvoljenog radnog napona U_m , odnosno: $U_c = U_m/\sqrt{3}$

2. Na osnovu privremenog prenapona pri zemljospoju $U_t = K_f \cdot U_c \cdot K_S$, gde je K_f faktor zemljospoja, koji se usvaja za direktno uzemljene sisteme da iznosi maksimalno 1,4, a za izolovane sisteme 1,73. K_S je faktor sigurnosti koji se najčešće usvaja da ima vrednost $K_S = 1,1$ za nazivne napone mreža $U_n \leq 110$ kV, a $K_S = 1,05$ za nazivne napone $U_n > 110$ kV.

Naznačeni napon na bazi trajnog radnog napona određuje se iz izraza:

$$U_{Ro} = \frac{U_c}{K_o} \quad (7.111)$$

gde su:

K_o –faktor izrade ili faktor proizvođača . Za odvodnike koje proizvodi ABB faktor izrade je $K_o = 0,8$.

U_{Ro} –naznačeni napon odvodnika određen na bazi trajnog radnog napona.

Naznačeni napon na bazi privremenog prenapona se određuje iz izraza:

$$U_{Rt} = \frac{U_t}{K_t} \quad (7.112)$$

gde je:

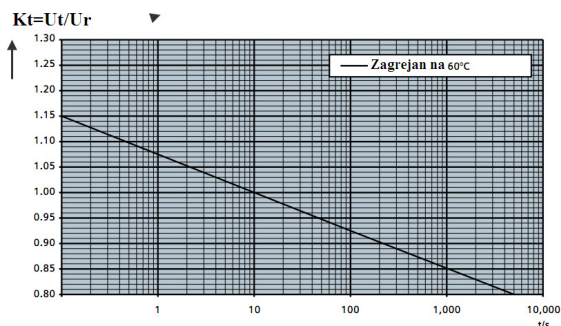
K_t –koeficijent koji uvažava sposobnost odvodnika da podnosi privremene prenapone. Ovaj koeficijent zavisi od privremenog prenapona koga odvodnik može određeno vreme da podnese i predstavlja multipl naznačenog napona odvodnika (ovaj koeficijent se izražava u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika). Na slici 7.65 prikazana je zavisnost sposobnosti podnošenja privremenih prenapona kao odnos U_t/U_r .

Koeficijent K_t se daje grafički u funkciji trajanja privremenog prenapona. Neki proizvođači definišu K_t kao multipl maksimalnog dozvoljenog trajnog napona odvodnika U_c . U tom slučaju se dobija na bazi privremenog prenapona U_t trajno dozvoljeni radni napon U_{ct} iz izraza:

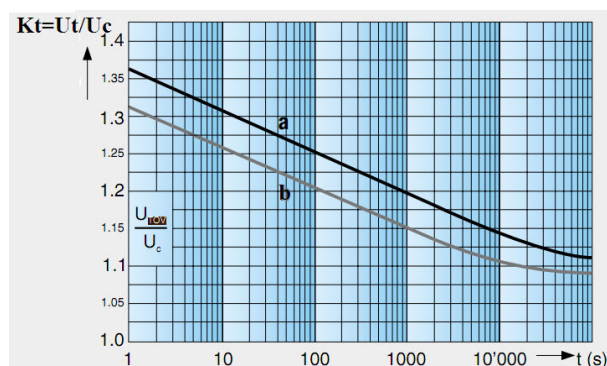
$$U_{ct} = \frac{U_t}{K_t} \quad (7.113)$$

Iz kataloga se za dobijeno U_{ct} određeno na bazi privremenog prenapona određuje naznačeni napon odvodnika U_{Rt} . Najčešće je odnos koji se naziva faktorom proizvođača $U_c/U_R = 0,8$, mada može imati i druge vrednosti.

Na slici 7.66 prikazan je dijagram u kome se K_t određuje na osnovu odnosa U_t/U_c .



Slika 7.65: Dijagram u kome se K_t određuje na osnovu odnosa U_t/U_r



Slika 7.66: Određivanje faktora sposobnosti izdržavanja privremenih prenapona na osnovu $K_t = U_t/U_c$

Koeficijent $K_t = U_t/U_c$ izdržljivosti odvodnika na privremene prenapone u odnosu na U_c kao funkcija njihovog trajanja t na temperaturi okoline (temperaturi vazduha izvan odvodnika) od 45°C . Kriva **a** se odnosi na odvodnik bez prethodnog opterećenja, kriva **b** na odvodnik, prethodno opterećen energijom E dobijenom izlaganjem udarnim strujnim talasima. t je vreme trajanja prenapona industrijske frekvencije.

Ukoliko postoje i drugi privremeni prenaponi, mogu se odrediti i drugi naznačeni naponi odvodnika u odnosu na te prenapone.

Finalni izbor odvodnika vrši se na bazi najvišeg naznačenog napona odvodnika između U_{Ro} i U_{Rt} .

$$U_R = \max\{U_{Ro}, U_{Rt}\} \quad (7.114)$$

7.6.8 Izbor karakteristika odvodnika prenapona

U tekstu su prikazane detaljno tehničke karakteristike prema standardu [38] sa objašnjenjima značenja tih karakteristika

Izbor klase odvodnika. Klasa odvodnika se obeležava sa 2 slova. Prvo slovo se odnosi na sistem u koji se ugrađuje, a drugo na očekivana energetska naprezanja.

1. -Klasa odvodnika D za distributivne mreže (naponi ispod 52 kV), S-postrojenja (naponi iznad 72 kV).
2. -Energetske klase H-(visoka), M-(srednja), L-niska).

Tabela 7.8: Klasifikacija odvodnika

Klasa odvodnika	Postrojenja			distribucija		
Oznake	SH	SM	SL	DH	DM	DL
Nazivna struja pražnjena u kA oblika 8/20 μ s	20	10	10	10	5	2.5

I_n -Nazivna struja odvođenja je atmosferska udarna struja oblika 8/20 μ s sa kojom se određuje preostali napon koji predstavlja zaštini nivo odvodnika. nazivni napon odvodnika

U_r -naznačeni napon odvodnika je maksimalno dozvoljeni 10-sekundni efektivni prenapon industrijske frekvencije koji se može primeniti između krajeva odvodnika. Približno se može dobiti kada se trajno podnosivi napon U_c podeli faktorm proizvođač, koji kod nekih proizvođača se definiše da iznosi 0.8 rj.

Q_{th} -Maksimalna specificirana količina elektriciteta koja termički može biti preneti kroz odvodnik u roku od 3 minuta u testu termičkog oporavka bez izazivanja termičkog pobega.

I_m -Temena vrednost atmosferske udarne struje oblika 4/10 μ s koja se koristi za ispitivanje podnosivosti struje na direktna atmosferska pražnjenja.

I_L -Amplituda dugotrajnog talasa za ispitivanje podnosivosti odvodnika na naprezanja pri višestrukim udarima, radi se pomoću posebnog generatora za pravougaone talase. Tipični oblici talasa su trajanja do 2ms i amplitude nekoliko stotina A. Danas se zamenjuje testom višestrukog (ponavljajućeg) prenosa naelektrisanja kroz odvodnik Q_{rs} . Preneto naelektrisanje se izražava u C.

Q_{rs} -Sposobnost ponavljajućeg prenosa količine naelektrisanja je definisana kao udarno strujno naprezanje koje MO otpornici odvodnika mogu da izdrže dvadeset puta bez mehaničkog ili neprihvatljivog električnog oštećenja. Oblik strujnog talasa kojim se vrši ispitivanje je atmosfrski udarni talas oblika 8/20 μ s.

U_{tov} -Podnosivi napon industrijske frekvencije pri privremenim prenaponima daje se grafički ili tablično. Pri izboru odvodnika prenapona treba koristiti krivu kada je odvodnik bio predhodno izložen udaima (odnosno ima povišenu temperaturu). U zavisnosti od trajanja privremenih prenapona (po pravilu jednoloni zemljospoj), sa krive se bira koeficijent podnosivog TOV, na osnovu koga se bira U_r , kao što je predhodno pokazano.

7.7 Model prekidača

Pri proračunima brzih elektromagnetnih prelaznih pojava u elektroenergetskim sistemima razlikujemo dva modela prekidača:

- Idealan prekidač
- Realan prekidač

Pod idealnim prekidačem podrazumeva se prekidač koji ima dva stanja:

Uključen -otpornost između kontakata je nula,

Isključen -otpornost između kontakata je beskonačno velika.

Kod trofaznog modela prekidača svaki pol može da ima uključeno ili isključeno stanje.

Realan prekidač uzima u obzir procese u električnom luku, tako da prelaz iz uključenog u isključeno stanje predstavlja složeni kontinualan proces, koji se može modelovati na različite načine. Postoje dva glavna pristupa modelovanju realnih prekidača:

Fizički model - Model električnog luka baziran na nelinearnim i nestacionarnim procesima koji se opisuju diferencijalnim jednačinama. Fizički procesi zavise od toga koji se mehanizam za gašenje luka koristi. Ti procesi su:

1. termodinamički procesi u luku,
2. hidraulični ili pneumatski procesi strujanja tečnosti ili gasova,
3. jonizacioni procesi,

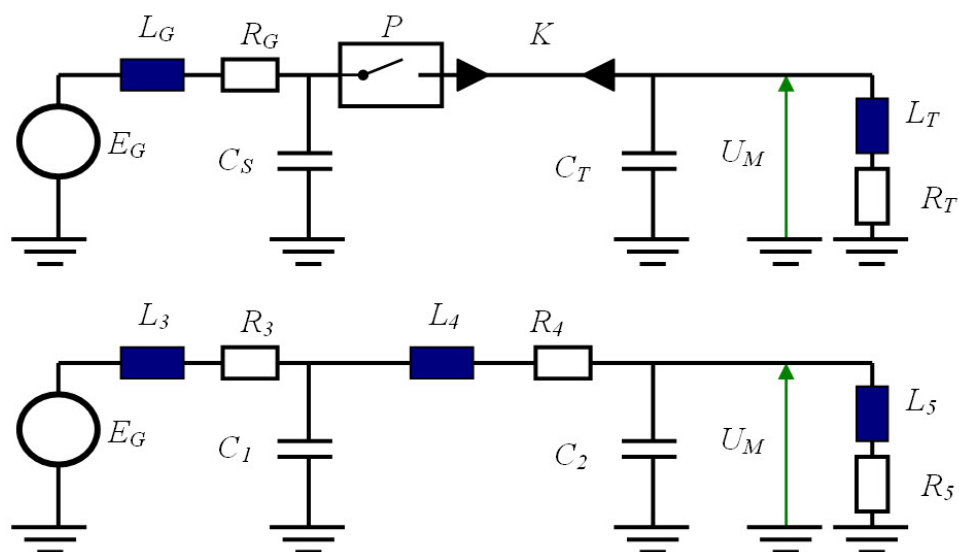
Model crne kutije (black box model) - matematički model baziran na spoljašnjim karakteristikama, ne ulazeći u fizičku prirodu procesa unutar prekidača. Model crne kutije se formira na osnovu eksperimentalnih istraživanja u laboratorijama velike snage, u kojima se prate spoljašnje karakteristike koje se mogu lako izmeriti (vremenske promene napona i struja na krajevima prekidača, koje zavise od karakteristika električnog luka).

U većini inženjerskih studija elektromagnetnih prelaznih režima koristi se model idealnog prekidača.

Razlikujemo dva modela idealnog prekidača u zavisnosti od mreže u kojoj je uključen.

7.7.1 Model prekidača u monofaznoj koncentrisanoj mreži

U mreži sa koncentrisanim parametrima ne uvodi se posebna grana koja modeluje prekidač, već se koristi postojeća induktivna grana ili kombinovano induktivno-otporna grana u tu svrhu. S obzirom da u modelovanju pasivnih delova elektroenergetskih mreža figurišu samo induktivno-otporne ili kapacitivne grane, zbog same prirode mreža uvek se može naći induktivna grana koja modeluje prekidač. Na primer, tipična jednopolna šema kojom se modeluje prekidanje malih induktivnih struja (na primer isključenje transformatora u praznom hodu), data je šemom kao na slici 7.67. Na slici gore prikazana je realna šema u kojoj je nacrtan prekidač i kabl, a na slici dole prekidač i kabl su zamenjen induktivno-otpornom granom koja zamenjuje prekidač. Oznake na gornjoj i donjoj slici



Slika 7.67: Monofazna šema za modelovanje prekidanja malih induktivnih struja

7.67 date su na dva načina. Na gornjoj slici oznaka elementa je data slovom koje asocira na prirodu elementa, a na donjoj slici su indeksi dati brojevima.

E_G -ekvivalentna elektromotorna sila napojnog sistema,

L_G, L_3 -ekvivalentna induktivnost napojnog sistema,

R_G, R_3 -ekvivalentna otpornost usled gubitaka u napojnom sistemu,

C_S, C_1 -kapacitivnost sabirnice,

P -prekidač

K -kabl koji spaja sabirnice sa indukivnim potrošačem (neopterećeni transformator),

C_T, C_2 -ekvivalentna kapacitivnost kabla i ulazna kapacitivnost namotaja transformatora,

U_M -mereni napon na transformatoru,

L_T, L_5 -induktivnost magnećenja transformatora,

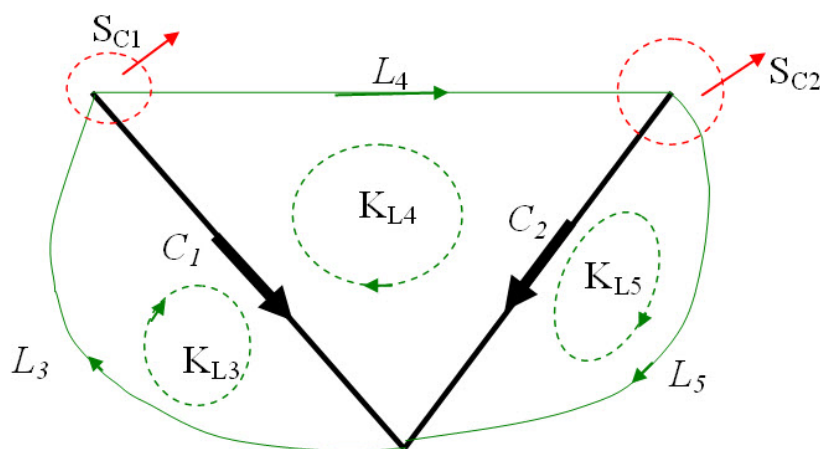
R_T, R_5 -ekvivalentna otpornost usled gubitaka u gvožđu transformatora u praznom hodu,

L_4 -induktivnost kablovske veze,

R_4 -otpornost kablovske veze.

Ukoliko je prekidač vezan za koncentrisanu induktivnost, onda se otvaranje prekidača modeluje brisanjem grane sa induktivnošću u modelu stanja mreže, dok se zatvaranje prekidača modelije uvođenjem grane sa induktivnošću. Prekidač u kolu na slici 7.67 prikazan je granom L_4 . Prekidanjem grane L_4 automatski se prekida i grana R_4 , tako da se ova grana može posmatrati kao jedan elemenat, što u realnosti i jeste.

Pri zatvorenom prekidaču u šemi na slici 7.67 graf mreže ima oblik kao na slici 7.68.



Slika 7.68: Graf mreže za modelovane isključenja male induktivne struje pri zatvorenom prekidaču

Za posmatrani graf se odredi jedno stablo. Pod osnovnim snopom se podrazumeva snop koji sadrži samo po jednu granu stabla, a sve ostale grane su grane ko-stabla. Ori-jentacija snopa se slaže sa orijentacijom grane stabla koja definiše osnovni snop. Grane odabranog stabla su prikazane debljim crnim linijama (grana C_1 i C_2), a grane ko-stabla tanjim zelenim linijama (grane L_3 , L_4 i L_5). Osnovne konture su označene zelenim isprekidanim linijama (K_{L3} , K_{L4} i K_{L5}). Osnovni snopovi su obeleženi crvenim isprekidanim krugovima sa oznakom grane koja definiše snop (SC_1 i SC_2).

Formiranje matrica incidencija

Matrica nezavisnih snopova prikazana je sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} Q_f \end{bmatrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & L_3 & L_4 & L_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_{C1} \\ S_{C2} \end{matrix} & \left[\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (7.115)$$

Matrica osnovnih kontura ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} B_f \end{bmatrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & L_3 & L_4 & L_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} K_{L3} \\ K_{L4} \\ K_{L5} \end{matrix} & \left[\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (7.116)$$

Matrica kapacitivnosti i induktivnosti ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 \end{array} \right] \quad (7.117)$$

Matrica otpornosti ima sledeći oblik:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_3 & 0 & 0 \\ 0 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \quad (7.118)$$

Matrica veza ima sledeći oblik:

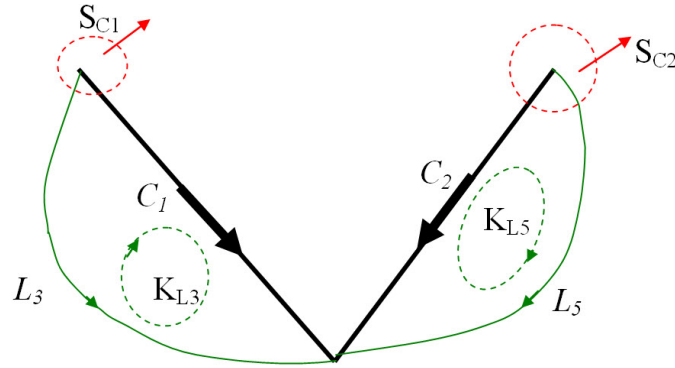
$$[K] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.119)$$

Jednačine stanja u konačnom obliku su:

$$\begin{bmatrix} du_1/dt \\ du_2/dt \\ di_3/dt \\ di_4/dt \\ di_5/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (7.120)$$

Vrsta i kolona u matricnom obliku jednačina stanja koje odgovaraju grani sa prekidačem (grana sa elementom L_4 , odnosno R_4) su uokvireni jer se u slučaju isključenja elementi matrice koji su uokvireni modifikuju.

U slučaju otvorenog prekidača graf mreže izgleda kao na slici 7.69. U ovom slučaju graf se raspada na dva subgrafa, koji su potpuno odvojeni.



Slika 7.69: Graf mreže u slučaju otvorenog prekidača

Sada u matricama incidencija u kolonama koje odgovaraju koloni u kojoj se nalazi prekidač se sada nalaze nule na mestu grane koja odgovara prekidaču. U našem slučaju u koloni koja odgovara elementu L_4 elementi postaju nula. Takođe i u vrsti koja odgovara elementu L_4 elementi postaju nula.

Jednačine stanja za slučaj isključenog prekidača imaju oblik:

$$\begin{bmatrix} du_1/dt \\ du_2/dt \\ di_3/dt \\ di_4/dt \\ di_5/dt \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \color{red}{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_5 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (7.121)$$

U matrici kapaciteta i induktiviteta umesto člana L_4 na glavnoj dijagonali trebalo bi da stoji 0. Međutim, prilikom inverzije dobila bi se singularna matrica. Član L_4 ne igra

nikakvu ulogu, jer kada se množi sa matricom proporcionalnih elemenata (provodnosti i otpornosti), svi elementi koloni koja odgovara članu $R_4 = 0$ su takođe nule, pa taj član nema uticaje na rezultate.

7.7.2 Modelovanje trofaznog prekidača u koncentrisanoj mreži

U slučaju trofaznog prekidača model se svodi na trofazni model induktivne grane sa sopstvenim i međusobnim induktivitetima, kao i sa otpornostima usled gubitaka.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_F & L_M & L_M \\ L_M & L_F & L_M \\ L_M & L_M & L_F \end{bmatrix} \quad (7.122)$$

Matrica otpornosti usled gubitaka redne induktivno-otporne grane ima oblik:

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (7.123)$$

Model stanja u pojednostavljenom obliku za opšti slučaj, samo za induktivnu granu koja modeluje prekidač data je u sledećem obliku:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_c}{dt} \\ \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_{B)}}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \\ \dots \\ \frac{di_n}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C & \vdots & 0 & \vdots \\ \vdots & L_F & L_M & L_M & \vdots \\ 0 & L_M & L_F & L_M & \\ \vdots & L_M & L_M & L_F & \vdots \\ \dots & & & & \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} G & K & 0 & \vdots \\ \vdots & R & 0 & 0 \\ -K^t & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{u_c}{i_A} \\ \frac{i_{B)}}{i_C)} \\ \dots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{j_G}{e_A} \\ \frac{e_B}{e_C} \\ \dots \\ e \end{bmatrix} \right\} \quad (7.124)$$

Predpostavka je da se otvaraju kontakti faze **C**. Zbog toga su označene liijama vrste i kolone koje odgovaraju fazi **C**.

Oznake u 7.124 imaju sledeće značenje:

du_c/dt - vektor izvoda napona na svim kondenzatorima u mreži napisan u sažetom obliku,

di_j/dt -vektor izvoda struja u fazama $j = A, B, C$ posmatranog prekidača koji komutira,

C - submatrica svih kapacitivnosti mreže,

G - submatrica svih provodnosti paralelnih kapacitivnostima mreže,

j_G - ekvivalentne struje strujnih generatora po metodi kompenzacije kod mešovitih mreža,

e_A, e_B, e_C - trenutne vrednosti elektromotornih sila u granama sa induktivnostima koje odgovaraju prekidačima,

e -vektor trenutnih vrednosti elektromotornih sila ostalih izvora.

Horizontalnim linijama su odvojeni vektori struja kroz tri faze koje odgovaraju prekidaču koji komutira, koji su jedini dati po fazama, od svih ostalih napona i struja. Isto važi i za elektromotorne sile u granama koje komutiraju, koje su horizontalnim linijama odvojene od ostalih

U slučaju kada se prekidač otvara na fazi **C** sistem jednačina stanja dobija sledeću formu:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_c/dt}{\frac{di_A/dt}{\frac{di_{B)/dt}}{\frac{di_C/dt}{\dots}}{\frac{di_n/dt}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C & \vdots & 0 & \vdots \\ \vdots & L_F & L_M & 0 & \vdots \\ 0 & L_M & L_F & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 1 & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} G & K & 0 & 0 \\ \vdots & R & 0 & 0 \\ -K^t & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{u_c}{i_A} \\ \frac{i_{B)}}{i_C)} \\ \dots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{j_G}{e_A} \\ e_B \\ e_C \\ \dots \\ e \end{bmatrix} \right\} \quad (7.125)$$

Može se uočiti da u vrstama i kolonama koje odgovaraju granama koje se prekidaju elementi se zamenjuju nulama, osim na glavnoj dijagonali matrice induktiviteta koja odgovara sopstvenoj induktivnosti faze, gde je stavljen broj 1, mada može biti bilo koji broj.

7.7.3 Modelovanje paljenja luka između kontakata prekidača

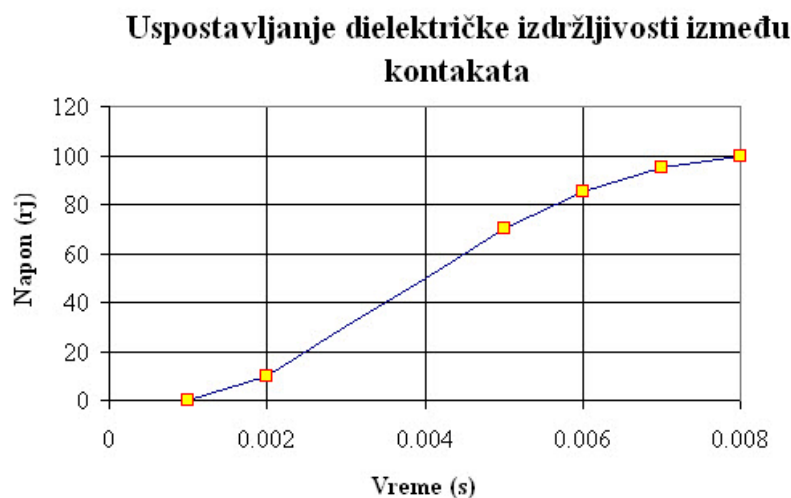
Iako je model idealnog prekidača veoma jednostavan, kada je prekidač otvoren, otpornost između kontakata je beskonačna, a kada je zatvoren, otpornost između kontakata je nula, a u kolo se ubacuje induktivna grana koja je prekinuta otvaranjem prekidača.

Ipak, modelovanje idealnog prekidača zahteva pažnju zbog određivanja uslova za otvaranje prekidača (gašenje luka između kontakata) i zatvaranje prekidača (paljenje luka između kontakata).

U slučaju otvaranja prekidača mogu se razlikovati sledeće pojave:

1. isključenje struje kratkog spoja,
2. isključenje radne struje,
3. isključenje struje praznog hoda transformatora ili reaktora (mala induktivna struja)
4. isključenje struje praznog hoda vodova, kablova ili kondenzatora (mala kapacitivna struja)

U svim ovim slučajevima nakon otvaranja kontakata počinje da se uspostavlja dielektrička izdržljivost između kontakata, čija brzina uspostavljanja zavisi od brzine razdvajanja kontakata, ali i od procesa hlađenja međukontaktne prostora, što zavisi od tipa sklopnog aparata i medijuma za gašenje luka. Porast dielektričke izdržljivosti se može samo grubo procenjivati ili odrediti kroz veoma složena laboratorijska ispitivanja u specijalnim laboratorijama velike snage. Na slici 7.70 prikazan je oblik krive uspostavljanja dielektričke izdržljivosti u linearno segmentnom obliku u međukontaktne prostoru prekidača. Kriva porasta dielektričke izdržljivosti se zadaje sa nekoliko tačaka u kojima je data dielektrička izdržljivost za vreme mereno od početka otvaranja kontakata. Dielektrička izdržljivost se između tačaka menja po linearnom zakonu. Napon na slici 7.70 je dat u relativnim jedinicama u odnosu na maksimalni podnosivi napon između kontakata kada su kontakti otvoreni.



Slika 7.70: Usvojen dijagram uspostavljanja dielektričke izdržljivosti u linearno segmentnom obliku

Simulacija eventualnog ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača se može vršiti pojednostavljeno tako što se porast dielektričke izdržljivosti aproksimira linearnom funkcijom na kompletnom vremenskom intervalu otvaranja kontakata.

$$U_{diel}(t) = v_k E_d(t - t_0) \quad (7.126)$$

gde je:

$U_{diel}(t)$ -dielektrička izdržljivost između kontakata,

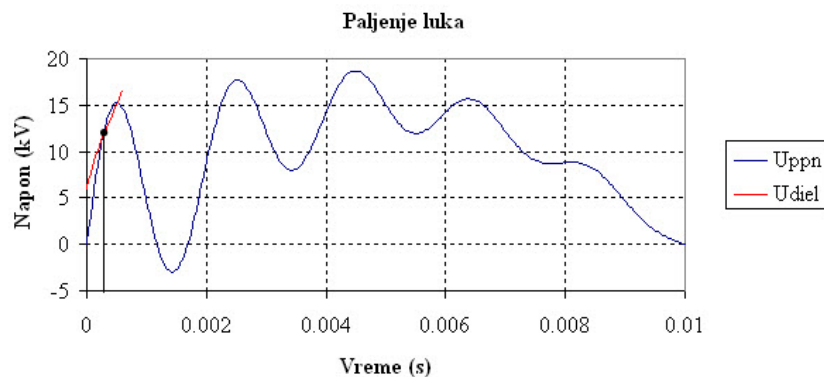
v_k - brzina razdvajanja kontakata, koja može da bude vremenski promenljiva, mada se najčešće usvaja da je konstantna,

E_d - probojni napon po jedinici dužine prostora između kontakata, koji je potrebno eksperimentalno odrediti,

t -vreme proteklo od početka otvaranja kontakata,

t_o -početak otvaranja kontakata.

Na slici 7.71 prikazan je proces određivanja trenutka ponovnog paljenja luka t_p kada dielektrička izdržljivost između kontakata U_{diel} postane manja od prelaznog povratnog napona koji se uspostavlja između kontakata U_{pp} .



Slika 7.71: Određivanje trenutka ponovnog paljenja luka

U toku proračuna se u svakom trenutku upoređuje dielektrička izdržljivost između kontakata U_{diel} sa izračunatim naponom između kontakata U_{pp} . U trenutku kada napon između kontakata postane veći od dielektričke izdržljivosti, smatramo da dolazi do ponovnog paljenja luka i matrice sistema jednačina stanja se vraćaju na prvobitni oblik.

U slučaju više prekidnih mesta u jednom prekidaču, takav se prekidač ekvivalentira sa jednim prekidnim mestom kod koga je brzina razdvajanja kontakata multipl broja prekidnih mesta. Ceo ostali postupak proračuna ostaje nepromenjen.

7.7.4 Kriterijum gašenja luka

Kod idealnog prekidača se prekidanje struje vrši pri prolazu struje kroz nulu ili u specijalnom slučaju prekidanja malih induktivnih struja moguće je da dođe do naglog prekidanja

struje pri vrednosti koja je različita od nule. Ovaj proces nazivamo sečenjem struje. Sečenje struje se modeluje na taj način što se unapred zadaje struja sečenja I_s . Ukoliko trenutna apsolutna vrednost struje kroz pol prekidača postane manja od struje sečenja, na tom polu prekidača se modeluje otvaranja kontakata, odnosno prekid grane u kolu. Uslov za isključenje je:

$$|i(t)| \leq I_s \Rightarrow \text{sečenje struje} \quad (7.127)$$

Razlikujemo dva slučaja:

- slučaj prvog sečenja struje industrijske učestanosti u ustaljenom stanju,
- slučaj gašenja luka za vreme trajanja prelaznog procesa nakon predhodnog sečenja struje.

Kada dođe do gašenja luka, grana u kojoj postoji električni luk se prekida, tako da se menjaju matrice koeficijenata u normalnom sistemu diferencijalnih jednačina stanja.

Prilikom isključivanja malih induktivnih struja svi tipovi sklopnih aparata teže da dejstvom otpora luka smanje struju do nule pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Pri tome neki aparati to uspevaju da učine efikasnije od drugih. Kod vakuumskih aparata se sečenje struje može povezati sa nestabilnošću emisije elektrona sa kontakta koji je u tom trenutku negativan, što izaziva sečenje struje. Kod ostalih tipova sklopnih aparata sečenje struje se povezuje sa intenzivnim strujanjem medijuma za gašenje luka, koji hladi električni luk i odnosi jonizovane čestice sa njegove površine, povećavajući otpornost luka na velike vrednosti i izazivajući nestabilnu interakcijom luka sa električnim kolom u kome se prekida struja, što izaziva raspirujuće oscilacije, prema [45]. Kada struja opadne ispod određenog nivoa, dolazi do nestabilnih oscilacija sa frekvencijom reda veličine 100 kHz. Oscilacije se vrlo brzo raspiruju, tako da se može smatrati da do sečenja struje dolazi gotovo odmah posle nastanka nestabilnih oscilacija. Vrednost komponente naizmenične struje industrijske učestanosti u trenutku kada dolazi do sečenja struje obeležena je kao i_s . Proces prekidanja sa karakterističnim veličinama prikazan je na slici 7.72, prema [45].

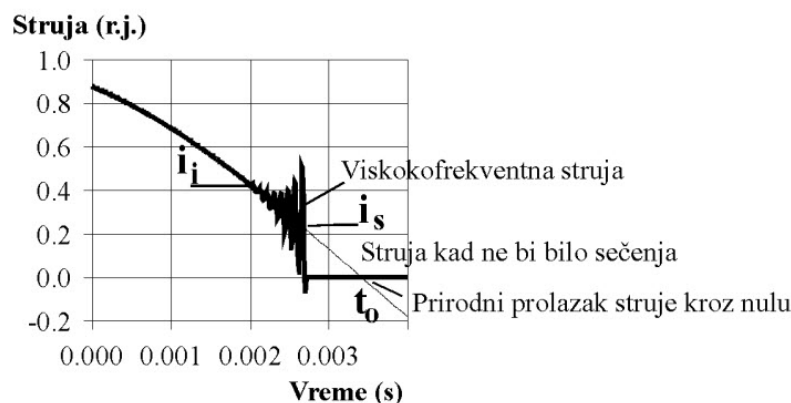
Na slici 7.72 oznake imaju sledeće značenje:

i_i -trenutak kada počinje proces nestabilnih oscilacija,

i_s -trenutna vrednost struje industrijske učestanosti neposredno pre sečenja, odnosno prolaska visokofrekventne komponente struje kroz nulu,

t_o - trenutak prirodnog prolaska struje industrijske učestanost kroz nulu.

Pri simulacijama prelaznih režima koristeći model idealnog prekidača, ne može se predvideti i simulirati nastanak visokofrekvencijskih raspirujućih oscilacija, čije je trajanje



Slika 7.72: Nestabilne oscilacije u kolu pre sečenja struje

jako kratko, tako da usvajamo model po kome se struje industrijske učestanosti, kada dostigne vrednost i_s , naglo prekida.

Posle gašenja luka usled sečenja male induktivne struje, između kontakata sklop-nog aparata uspostavlja se prelazni povratni napon U_{ppn} usled dejstva mreže u kojoj je sklopni aparat priključen. Prelazni povratni napon se sastoji iz dve komponente. Jednu komponentu čini napon na kontaktu aparata sa napojne strane, a drugu sa strane potrošača. Ukupan napon koji napreže međukontaktni prostor dobija se kao razlika ova dva napona. Između kontakata prekidača koji se razdvajaju uspostavlja se dielektrička izdržljivost. Ukoliko prelazni povratni napon raste brže od dielektričke izdržljivosti, dolazi do ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača. Na slici 7.73 prikazani su prelazni povratni naponi kada dolazi i kada ne dolazi do ponovnog paljenja luka pri različitoj brzini uspostavljanja dielektričke izdržljivosti.

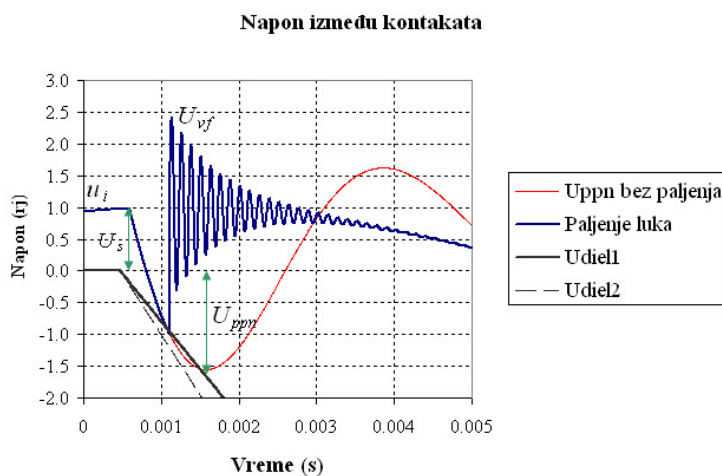
Mora se razlikovati proces prvog gašenja luka, kada dolazi do sečenja struje i kasnijih gašenja luka posle ponovnih paljenja luka. U prvom gašenju luka struja koja se prekida je industrijske frekvencije koja se sporo približava nuli, tako da kod prekidača sa nezavisnom karakteristikom gašenja luka kod koje intenzitet gašenja ne zavisi od struje koja se prekida, gašenje je olakšano zbog ohlađenosti i dejonizacije prostora zbog male struje. Kada su u pitanju visokofrekvencijske struje kod naknadnih paljenja luka, kada se struja visoke frekvencije približava nuli, prostor ne stiže da se ohladi i dejonizuje i zato je otežano gašenje luka visoke frekvencije.

Na slici 7.73 oznake imaju sledeće značenje:

u_i - trenutna vrednost napona sa strane izvora,

u_s - vrednost napona izvora u trenutku sečenja struje,

U_{ppn} -maksimalna vrednost prelaznog povratnog napona između kontakata prekidača na-



Slika 7.73: Vremenski tok napona između kontakata i porasta dielektričke izdržljivosti kada dolazi i kad ne dolazi do ponovnog proboja između kontakata

kon gašenja luka u slučaju kada ne bi bilo ponovnog paljenja luka,

u_{diel1} -promena dielektričke izdržljivosti međukontaktnog prostora u toku razmicanja kontakata,

u_{diel2} -promena dielektričke izdržljivosti međukontaktnog prostora za veću brzinu razmicanja kontakata,

U_{vf} -visokofrekvencijske oscilacije koje nastaju neposredno posle paljenja luka u konturi koju čine C_1 , L_4 i C_2 , odnosno grana sa prekidačem i okolnim kapacitivnostima opreme.

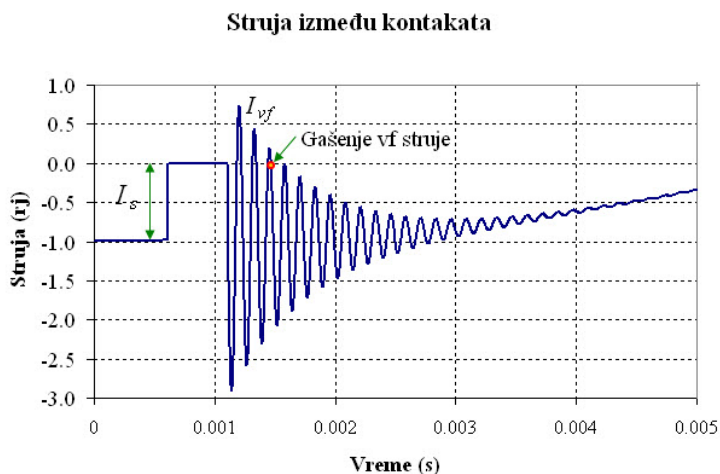
Na slici 7.74 prikazan je vremenski tok struje prilikom sečenja struje, kada ne dolazi do ponovnog paljenja luka.

Na slici 7.74 oznake imaju sledeće značenje.

I_s -trenutna vrednost struje u trenutku sečenja (struja sečenja),

I_{vf} - visokofrekvencijska struja u trenutku ponovnog paljenja luka.

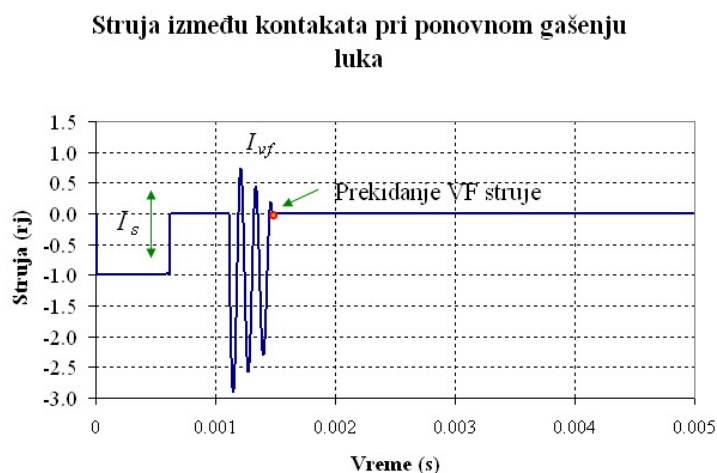
Gašenje luka visokofrekvencijske struje moguće je samo pod određenim uslovima kada ona prolazi kroz nulu. Gašenje luka visokofrekvencijske struje je otežano u odnosu na struju industrijske frekvencije zbog toga što se VF struja mnogo brže približava nuli, tako da hlađenje i dejonizacija električnog luka ne može zbog inercije da prati brzinu opadanja struje. Stoga postoje granične strmine struje pri približavanju nuli koje prekidač može da prekine. To se u praksi manifestuje tako da prekidač ne prekida visokofrekvencijsku



Slika 7.74: Vremenski tok struje između kontakata posle sečenja struje i ponovnog paljenja luka

struju u prvoj nuli, već kasnije kada se zbog prigušenja smanjila amplituda oscilacija, kao i strmina približavanja struje nuli.

Na slici 7.75 prikazan je slučaj kada dolazi do sečenja struje, ponovnog paljenja luka kada dielektrička izdržljivost postane veća od prelaznog povratnog napona, kao i kada dolazi do ponovnog gašenja visokofrekventne struje između kontakata pri prolazu kroz jednu od nula VF struje.

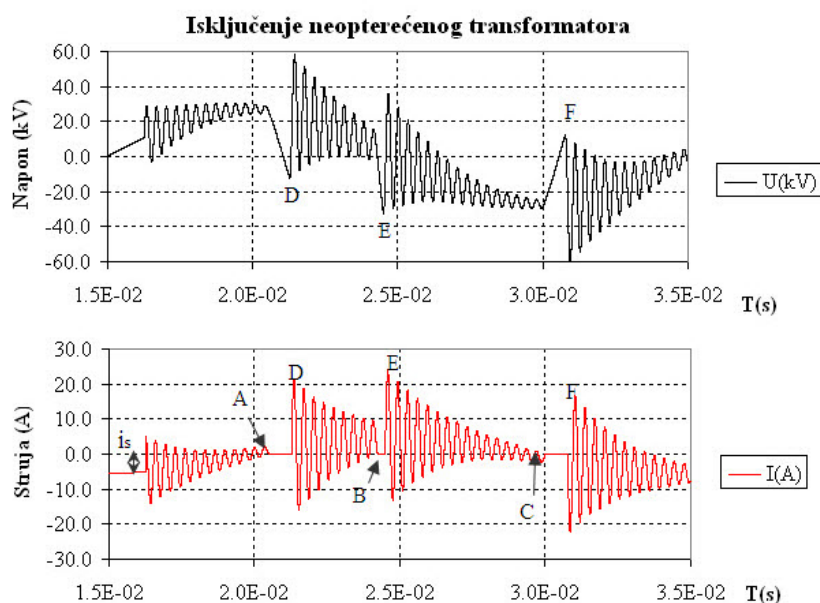


Slika 7.75: Vremenski tok struje između kontakata posle sečenja struje i ponovnog paljenja luka i gašenja luka u nuli VF struje

Na slici 7.74 označena je nula struje u kojoj VF struja može da bude prekinuta, a na slici 7.75 prikazana je VF struja koja se prekida.

Na slici 7.76 prikazan je numerički simuliran proces višestrukog gašenja i paljenja luka, koji je karakterističan za proces prekidanja malih induktivnih struja vakuumskim prekidačima. Usvojeni su sledeći kriterijumi gašenja luka:

- Luk se prvi put gasi u trenutku kada trenutna vrednost struje industrijske učestalosti koja se seče iznosi $i_s = 5$ A, koliko obično proizvođači vakuumski prekidača garantuju,
- pri narednim gašenjima luka usvojeno je da do prekida visofrekvencijske struje dolazi kada brzina opadanja struje prema nuli iznosi 20000 A/s.



Slika 7.76: Proces višestrukog paljenja i gašenja luka

Na slici 7.76 oznake imaju sledeće značenje:

i_s -vrednost sečene struje usvojena da iznosi 5 A,

A, B, C -trenutci gašenja luka, kada je brzina opadanja struje neposredno pre prolaska kroz nulu 20 kA/s,

D, E, F -trenutci ponovnog paljenja luka.

Zakon uspostavljanja dielektričke izdržljivosti usvojen je da ima oblik:

$$u_{diel}(t) = U_i + \Delta U \cdot (t - t_i) \quad (7.128)$$

gde su:

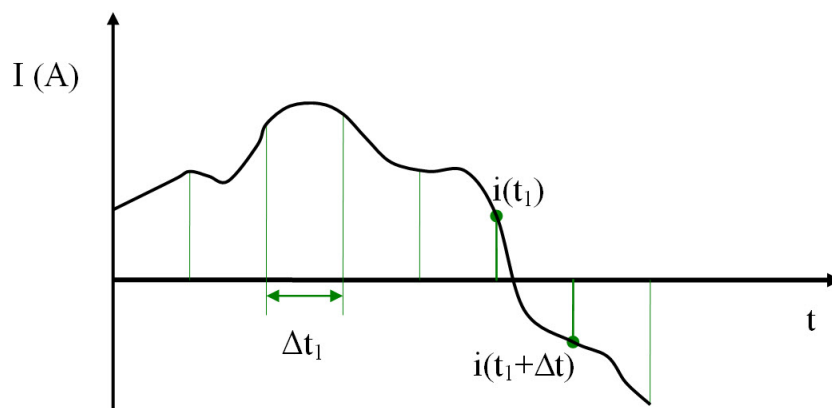
U_i -početna dielektrička izdržljivost nakon gašenja luka,

ΔU -brzina porasta dielektričke izdržljivosti u toku vremena zbog razdvajanja kontakata,

t_i -trenutak kada je došlo do gašenja luka.

Problem vremenskog koraka kod modelovanja prekidača

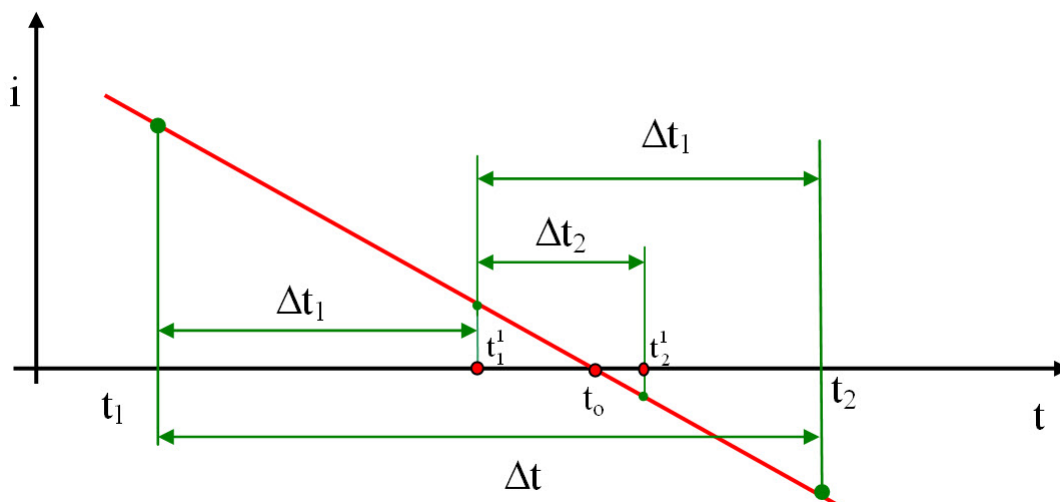
Kod numeričkog rešavanja prelaznog procesa prolazak struje kroz nulu detektuje se promenom znaka struje u dva susedna koraka proračuna. Ako se znaci struje razlikuju, znači da je do prolaska struje kroz nulu došlo između ta dva koraka. Ukoliko bi deklarirali da se u koraku pre ili u koraku posle stvarnog prolaska struje kroz nulu gasi luk i struji dodeljuje nulta vrednost, javili bi se prenaponi usled numeričkog sečenja struje, jer struja naglo sa vrednosti različite od nule dobija nultu vrednost. Na slici 7.77 prikazan je proces detekcije nule struje.



Slika 7.77: Detekcija nule struje na bazi promene polariteta i numeričko sečenje struje

Zbog toga se u blizini nulte vrednosti struje korak proračuna smanjuje da bi sa manjim korakom vršio proračun i detektovala nulta vrednost struje. Optimalna metoda za traženje nule struje je metoda polovljenja segmenata. Ova metoda je ilustrovan na slici 7.78.

Metoda polovljenja segmenata je iterativni postupak. Posmatramo struju u dva trenutka t_1 i $t_2 = t_1 + \Delta t$, gde interval Δt predstavlja korak proračuna. Ukoliko su struje u tim trenucima različitog znaka, znači da je između te dve tačke došlo do prolaska struje kroz nulu. Interval između t_1 i t_2 se polovi i za oba nova intervala vremena $\Delta t_1 = \Delta t/2$ se ispituje znak struje na krajevima intervala. Određuje se na kojim od intervala dužine Δt_1 struja ima različite predznake. Novi interval je određen između tačaka $t_1^1 = t_1 + \Delta t_1$ i t_2 . Sada se taj interval polovi i određuju novi intervali dužina $\Delta t_2 = \Delta t_1/2$. Struja menja predznak na intervalu dužine Δt_2 između tačaka t_1^1 i $t_2^1 = t_1^1 + \Delta t_2$.



Slika 7.78: Prikaz metode polovljenja segmenata

Postupak se ponavlja dok se ne nađe trenutak kada vrednost struje na granici intervala postane manja od unapred zadate vrednosti, kada se usvaja da u tom trenutku struja prolazi kroz nulu. Stvarni trenutak nule struje je t_o .

Mora se naglasiti da ovakav način određivanja nule struje može da se primeni samo u mreži sa koncentrisanim parametrima, gde se jednačine stanja mogu rešavati sa promenljivim korakom.

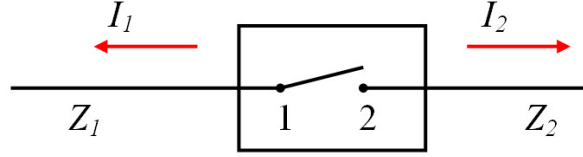
7.7.5 Model prekidača u mreži sa raspoređenim parametrima

Ukoliko se trofazna mreža može opisati sa dovoljnom tačnošću raspoređenim parametrima, tada bi se pojavio problem modelovanja prekidača u faznim koordinatama, sa pojedinačnim otvaranjem i zatvaranjem pojedinih polova, jer je ostatak mreže je modelovan u komponentnim sistemima. Zbog toga je razvijem model prekidača za kolo sa raspoređenim parametrima u komponentnim sistemima, koji može da vrši pojedinačne komutacije pojedinih polova prekidača. Jedino ograničenje modela je nemogućnost promene koraka proračuna pri približavanju struje nuli u procesu isključenja.

Na slici 7.79 je prikazan deo mreže sa prekidačem u monofaznoj predstavi. Oznake na slici 7.79 imaju sledeće značenje:

Z_1 -karakteristična impedansa voda levo od prekidača

Z_2 -karakteristična impedansa voda desno od prekidača



Slika 7.79: Monofazna zamenska šema prekidača sa oznakama smerova struja

Vodovi 1 i 2 mogu biti realni vodovi, a mogu biti i ekvivalentni vodovi pomoću kojih se zamenjuje koncentrisana induktivnost transformatora ili generatora. Između tačaka 1 i 2 nalazi se priključen prekidač, koji može biti u otvorenom ili zatvorenom položaju. Napon tačke 1 može se prikazati preko upadne i reflektovane komponente napona na sledeći način:

$$U_1 = U_{up1} + U_{od1} \quad (7.129)$$

gde su:

U_{up1} -upadna komponenta napona u tačku 1 po vodu 1,

U_{od1} -odbijena komponenta napona iz tačke 1 po vodu 1.

Ukupna struja na vodu 1, sa smerom kao na slici 7.79 je:

$$I_1 = \frac{U_{od1} - U_{up1}}{Z_1} \quad (7.130)$$

Napon u tački 1 na osnovu predhodnih izraza može se izraziti na sledeći način:

$$U_1 = 2U_{up1} + Z_1 I_1 \quad (7.131)$$

Na potpuno isti način može se izraziti napon u tački 2 na drugom priključku prekidača:

$$U_2 = 2U_{up2} + Z_2 I_2 \quad (7.132)$$

gde su:

U_{up2} -upadna komponenta napona u tačku 2 po vodu 2,

I_2 -struja na vodu 2 sa smerom kao na slici 7.79.

Umesto mreže u monofaznom sistemu mogu se posmatrati tri nezavisne mreže u komponentnim sistemima. Primenom trofazne matrice transformacije obeležene kao $[P]$ može se odrediti napon u komponentnim sistemima iz napona u faznim koordinatama na sledeći način:

$$[U_K] = [P][U_F] \quad (7.133)$$

gde je:

- $[U_K], (K = \alpha, \beta, 0)$ - vektor od tri elementa napona u komponentnim sistemima,
 $[U_F], (F = A, B, C)$ - vektor od tri elementa napona u faznim koordinatama,
 $[P]$ - kvadratna matrica transformacije trećeg reda data izrazom 4.22 u poglavlju 4.2.2.

Napon tačke 1 u komponentnim sistemima može se izraziti na sledeći način:

$$[U_{1K}] = 2[U_{up1k}] + [Z_{1K}][I_{1K}] \quad (7.134)$$

gde je:

- $[U_{1K}]$ - vektor napona tačke 1 u komponentnim sistemima,
 $[U_{up1k}]$ - vektor upadnih komponenti napona ka tački 1 u komponentnim sistemima,
 $[I_{1K}]$ - vektor struja na vodu 1 u komponentnim sistemima,
 $[Z_{1K}]$ - dijagonalna matrica karakterističnih impedansi voda 1 u komponentnim sistemima.

Pri proračunu se smatra da su karakteristične impedanse u sva tri komponentna sistema frekvencijski nezavisne.

Primenom inverzne transformacije u fazne koordinate može se odrediti napon tačke 1 u faznim koordinatama.

$$[U_{1F}] = 2[U_{up1F}] + [P]^{-1}[Z_{1K}][I_{1K}] \quad (7.135)$$

- $[U_{1F}]$ - vektor napona tačke 1 u faznim koordinatama,
 $[U_{up1F}]$ - vektor upadnih komponenti napona u tački 1 u faznim koordinatama.

Ukoliko je prekidač zatvoren, struje u komponentnim sistemima po vodu 1 mogu se izraziti preko napona u komponentnim sistemima u tački 2, uz uslov da je $I_{1K} = -I_{2K}$ prema smerovima struja na slici 7.79.

$$[I_{1K}] = [Z_{2K}]^{-1} \{2 \cdot [U_{up2K}] - [U_{2K}]\} \quad (7.136)$$

gde je:

- $[Z_{2K}]^{-1} = [1/Z_{2K}]$ - dijagonalna matrica čiji su elementi recipročne vrednosti karakterističnih impedansi u komponentnim sistemima za vod 2.

Struja u komponentnim sistemima može se izraziti preko faznih napona množenjem sa matricom transformacije.

$$[I_{1K}] = [Z_{2K}]^{-1} \cdot [P] \cdot [K] \cdot \{2[U_{up2F}] - [U_{2F}]\} \quad (7.137)$$

$[U_{2F}]$ -vektor napona tačke 2 u faznim koordinatama,

$[U_{up2F}]$ - vektor upadnih komponenti napona u tački 2 u faznim koordinatama,

$[K]$ - dijagonalna matrica trećeg reda sledećeg oblika:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_A & 0 & 0 \\ 0 & K_B & 0 \\ 0 & 0 & K_C \end{bmatrix} \quad (7.138)$$

elementi matrice $[K]$ imaju sledeće vrednosti:

$K_i = 0$, ($i = A, B, C$) -ako je prekidač na fazi i otvoren,

$K_i = 1$, ($i = A, B, C$) -ako je prekidač na fazi i zatvoren.

Sređivanjem predhodnih izraza dobija se:

$$[U_{1F}] = 2[U_{up1F}] + [K] \cdot [P]^{-1}[Z_{1K}][Z_{2K}]^{-1}[P][K] \cdot \{2[U_{up2F}] - [U_{2F}]\} \quad (7.139)$$

Ukoliko je prekidač na nekoj fazi zatvoren, ispunjen je uslov da su naponi u tačkama 1 i 2 identični, odnosno:

$$U_{1F} = U_{2F}, \text{ za faze } (F = A, B, C) \quad (7.140)$$

Ukoliko je prekidač na nekoj fazi otvoren, odgovarajući elemenat u matrici $[K]$ postaje jednak nuli, pa se na taj način eliminiše uticaj struje $[I_{2F}]$ na napon u tački 1 na fazi koja je otvorena. Kako se vektori napona $[U_{2F}]$ i $[U_{up2F}]$ množe matricom $[K]$, ako je prekidač na nekoj fazi otvoren, elementi vektora $[U_{2F}]$ i $[U_{up2F}]$ množe se nulom iz matrice $[K]$, pa time gube uticaj vrednosti na vektor $[U_{1F}]$.

Uvažavajući uslov $U_{1F} = U_{2F}$ za ($F = A, B, C$), može se umesto napona $[U_{2F}]$ pisati $[U_{1F}]$. Tada se napon može izraziti na sledeći način:

Zamenom vektora $[U_{2F}]$ sa $[U_{1F}]$ u izrazu 7.139 dobija se:

$$\begin{aligned} [U_{1F}] &= 2 \{ [I] + [K] \cdot [P]^{-1} [Z_{1K}] [Z_{2K}]^{-1} [P] [K] \}^{-1} \cdot [U_{up1F}] \\ &+ 2 \cdot [K] \cdot [P]^{-1} [Z_{1K}] [Z_{2K}]^{-1} [P] [K] \cdot [U_{up2F}] \end{aligned} \quad (7.141)$$

gde je $[I]$ jedinični vektor.

Umesto u faznim koordinatama, naponi u tački 1 mogu biti izraženi u komponentnim sistemima. U tom slučaju se dobija sledeći izraz:

$$\begin{aligned} [U_{1K}] &= 2 \{ [P] + [P] [K] \cdot [P]^{-1} [Z_{1K}] [Z_{2K}]^{-1} [P] [K] \}^{-1} [P]^{-1} \cdot [U_{up1k}] \\ &+ 2 [P] \cdot [K] \cdot [P]^{-1} [Z_{1K}] [Z_{2K}]^{-1} [P] [K] [P]^{-1} \cdot [U_{up2k}] \end{aligned} \quad (7.142)$$

Napon u komponentnim sistemima u tački 2 dobija se na isti način:

$$\begin{aligned} [U_{2K}] &= 2 \{ [P] + [P] [K] \cdot [P]^{-1} [Z_{2K}] [Z_{1K}]^{-1} [P] [K] \}^{-1} [P]^{-1} \cdot [U_{up2k}] \\ &+ 2 [P] \cdot [K] \cdot [P]^{-1} [Z_{2K}] [Z_{1K}]^{-1} [P] [K] [P]^{-1} \cdot [U_{up1k}] \end{aligned} \quad (7.143)$$

Opisanim postupkom mogu se odrediti naponi u komponentnim sistemima na krajevima prekidača kako pri otvorenim, tako i pri zatvorenim kontaktima prekidača na pojedinim fazama. Na taj način uopšte nije potrebno vršiti transformaciju napona iz komponentnih u fazne koordinate, već se celokupni proračun može vršiti u komponentnim sistemima. Matricom $[K]$ uvažena je nesimetrija.

Mogu se uvesti sledeće oznake kvadratnih matrica 3 reda:

$$\begin{aligned} [A_{12}] &= 2 \{ [P] + [P] [K] [P]^{-1} [Z_{1K}] [Z_{2K}]^{-1} [P] [K] \}^{-1} [P]^{-1} \\ [B_{12}] &= 2 [P] [K] [P]^{-1} [Z_{1K}] [Z_{2K}]^{-1} [P] [K] [P]^{-1} \\ [A_{21}] &= 2 \{ [P] + [P] [K] [P]^{-1} [Z_{2K}] [Z_{1K}]^{-1} [P] [K] \}^{-1} [P]^{-1} \\ [B_{21}] &= 2 [P] [K] [P]^{-1} [Z_{2K}] [Z_{1K}]^{-1} [P] [K] [P]^{-1} \end{aligned} \quad (7.144)$$

Sada se proračun vektora napona u komponentnim sistemima na krajevima prekidača sa proizvoljnim uključenim kontaktima po polovima može prikazati jednostavnim matričnim operacijama.

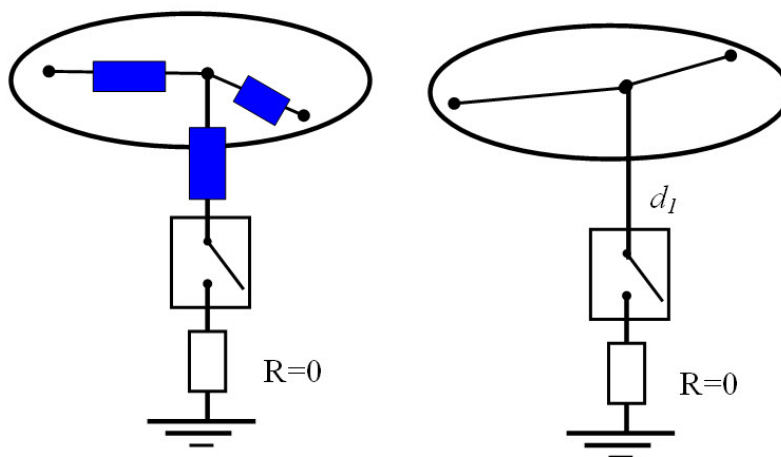
$$\begin{aligned} [U_{1K}] &= [A_{12}] [U_{up1k}] + [B_{12}] [U_{up2k}] \\ [U_{2K}] &= [A_{21}] [U_{up2k}] + [B_{21}] [U_{up1k}] \end{aligned} \quad (7.145)$$

Matrice kvadratnog oblika trećeg reda $[A_{12}]$, $[A_{21}]$, $[B_{12}]$, $[B_{21}]$ dobijene na osnovu izraza 7.144. Ove matrice se izračunavaju pre početka proračuna prelaznog procesa za određeno stanje prekidača. Ukoliko se u toku proračuna prelaznog procesa vrši zatvaranje ili otvaranje kontakata prekidača na nekoj od faza, vrši se ponovno izračunavanje matrica koje odgovaraju novom stanju prekidača. To znači da se gornje matrice izračunavaju onoliko puta koliko puta se određuje stanje prekidača. Najčešće se pri jednoj komutaciji sa rasipanjem trenutaka uključjenja ili isključenja na različitim fazama samo tri puta izračunavaju gornje matrice u koracima proračuna u kojima se vrši promena stanja prekidača. Uvođenjem matrice implicitno se postavlja uslov da je struja na fazi na kojoj je prekidač otvoren jednaka nuli.

Ovakav model idealnog prekidača pogodan je za proračune prelaznih procesa metodom ekvivalentnih vodova u svim slučajevima kada se može zanemariti uticaj električnog luka na tok prelaznog procesa i kada se ne posmatraju pojave pri kojima se javljaju prenaponi usled sečenih struja.

7.7.6 Modelovanje kvara

Modelovanje kvara se vrši postavljanjem prekidača otočno između faze i zemlje. Na slici 7.80 prikazan je prekidač u mreži sa koncentrisanim parametrima (levo) i raspoređenim parametrima (desno).



Slika 7.80: Modelovanje kvarova prema zemlji

Model kvara se modeluje uvek na kraju induktivne grane (u mreži sa koncentrisanim parametrima) ili pomoću voda dužine $d = \Delta t \cdot v$, gde je Δt elementarni korak proračuna, a v brzina prostiranja. Ukoliko se kvar događa na kraju voda, u tom slučaju ne treba umetati dodatni vod. Drugi kontakt prekidača prema zemlji vezan je za otpornik čija je otpornost nula. Dok su kontakti otvoreni, nema kvara. Kada se kontakti zatvore,

modeluje se kvar. U zavisnosti od broja kontakata koji su zatvoreni, zavisi da li će kvar biti jednopolni, dvopolni ili tropolni. Ne mogu se na ovaj način modelovati međufazni kvarovi bez dodira sa zemljom.

7.7.7 Rasipanje trenutaka uključenja kontakata

U procesu uključenja prekidača, posle dobijanja naloga za uključenje, mehanizam počinje da deluje na približavanje kontakata, koji se ubrzavaju, dostižu maksimalnu brzinu i pre završetka zatvaranja počinje njihovo kočenje da ne bi došlo do njihovog oštećenja usled udarca. Brzina zatvaranja kontakata zavisi od nazivnog napona prekidača, medijuma za gašenje luka i pogonskog mehanizma za pokretanje kontakata. Pri modelovanju zatvaranja prekidača razlikujemo tri bitna vremenska trenutka:

T_0 -početak zatvaranja prekidača (početak mehaničkog približavanja kontakata),

T_E -trenutak uspostavljanja električnog kontakata, odnosno trenutak kada dođe do predpaljenja električnog luka pre mehaničkog dodira,

T_M -trenutak mehaničkog dodira kontakata.

Na slici 7.81 prikazani su pojedini karakteristični vremenski trenuci posmatrani u toku jedne poluperiode [104] napona industrijske učestanosti. Pri tome je gustina raspodele trenutaka početka zatvaranja kontakata ravnomerna raspodeljena duž jedne poluperiode napona industrijske učestanosti, sa gustinom raspodele date izrazom:

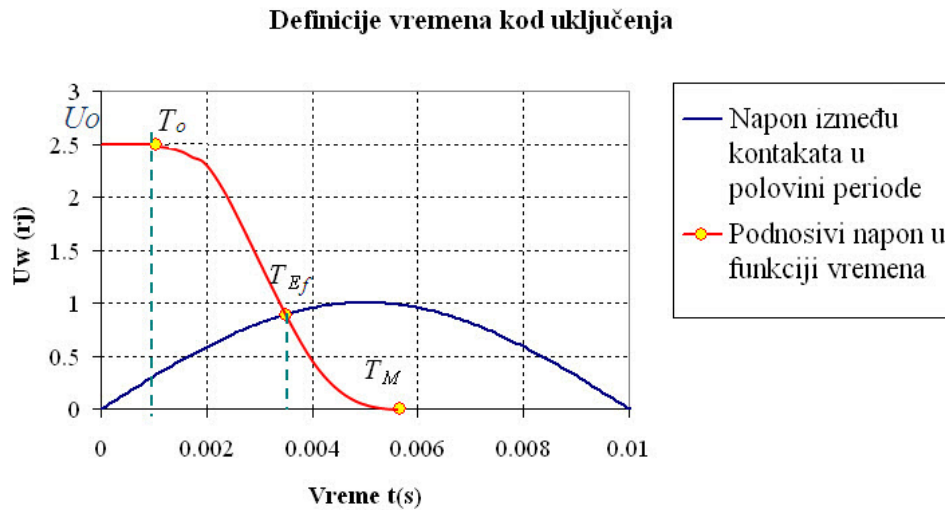
$$\omega(t) = \frac{1}{T/2} \text{ (1/s)}$$

gde je $T = 0.02$ s trajanje periode industrijske učestanosti. Na slici je prikazana jedna poluperioda napona koji vlada između kontakata, kao i opadanje podnosivog napona međukontaktne razmaka u toku približavanja kontakata.

Podnosivi napon između kontakata se smanjuje od konstantne vrednosti U_O kada su kontakti potpuno razdvojeni, do preseka sa krivom napona između kontakata. U trenutku T_E podnosivi napon seče krivu napona koji vlada između otvorenih kontakata. U tom trenutku dolazi do paljenja električnog luka između kontakata. Proces paljenja električnog luka pre galvanskog dodira kontakata se naziva predpaljenjem električnog luka. U daljem procesu prekidač se u modelu tretira kao zatvoren, postoji galvanska veza između kontakata preko luka, ali sami kontakti nastavljaju da se približavaju do mehaničkog dodira, [106].

Vreme zatvaranja kontakata se može prikazati u vidu sume 3 člana:

$$T_{zav} = T_o + T_{Ef} + \Delta t_f \quad (7.146)$$



Slika 7.81: Definicija pojedinih vremenskih trenutaka u toku procesa uključenja

gde su:

T_{zativ} - ukupno vreme zatvaranja do uključenja faze,

T_o - trenutak početka zatvaranja kontakata, koji ima uniformnu raspodelu, odnosno verovatnoća početka zatvaranja je identična u celoj periodu,

T_{Ef} - vreme od T_o do predpaljenja luka na fazi f , $f=A, B, C$,

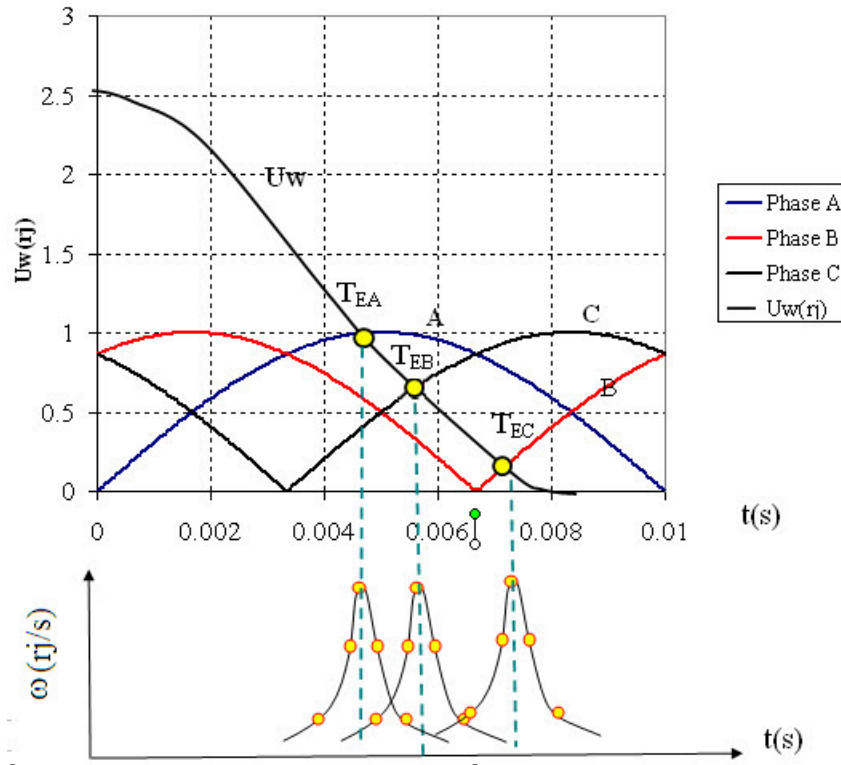
Δt_f - slučajno odstupanje trenutka paljenja oko trenutka T_{Ef} .

U slučaju trofaznih prekidača, pretpostavlja se da zatvaranje kontakata započinje u istom trenutku za sve tri faze, ali trenutci predpaljenja luka imaju slučajnu prirodu za koju pretpostavljamo da ima raspodelu prema Gausovom zakonu. Slučajno rasipanje mehaničkog kretanja kontakata se može obuhvatiti istim slučajnim procesom rasipanja zajedno sa preskočnim naponom. Na slici 7.82 prikazano je opadanje podnosivog napona između kontakata U_w i apsolutne vrednosti faznih napona između kontakata na fazama A, B i C (gore). Ispod su nacrtane gustine raspodele verovatnoća odstupanja preskoka od očekivanih tačaka predpaljenja električnog luka T_{Ef} na fazama A, B i C sa normalnom gustinom raspodele prema izrazu 7.147.

$$\omega(\Delta t_f) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_f}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (7.147)$$

Umesto kontinualne raspodele, odstupanja se u numeričkom proračunu definišu za određene diskretne vrednosti definisane neparnim brojem tačaka (tačka sa maksimalnom

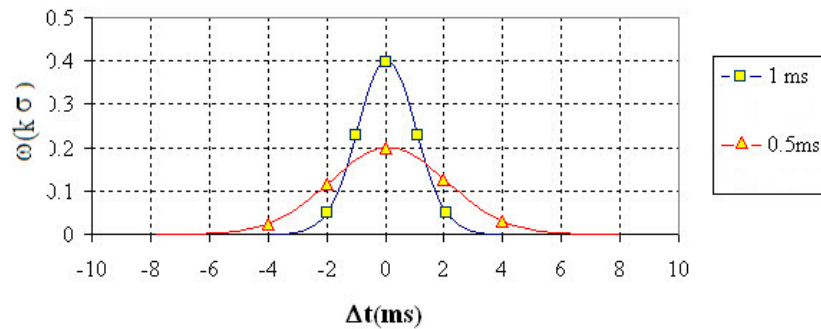
verovatnoćom pojavljivanja u trenutku preseka krive U_W sa faznim naponom T_{Ef} koja se naziva očekivanom tačkom paljenja luka i po nekoliko pari tačaka sa obe strane koje predstavljaju slučajno odstupanje od očekivanog trenutka paljenja luka. Kao optimalan broj tačaka se usvaja 5 ekvidistantnih tačaka $(-2\sigma, -1\sigma, 0, 1\sigma, 2\sigma)$, gde je σ srednje kvadratno odstupanje za normalnu raspodelu.



Slika 7.82: Model predpaljenja električnog luka pri zatvaranju trofaznog prekidača

Na slici 7.83 prikazana je gustina raspodele odstupanja trenutka paljenja električnog luka u odnosu na očekivani trenutak T_{Ef} .

Umesto kontinualne krive, gustine verovatnoće se definišu diskretnim tačkama koje su obeležene na dijagramu. Zbog transformacije gustine raspodele na vremenskom intervalu Δt u verovatnoću predpaljenja u jednoj tački, dolazi do malih grešaka zbog usrednjavanja, koje su utoliko manje ukoliko je uvedene veći broj odstupanja, odnosno ukoliko je vremenski interval Δt manji. U tabeli 7.9 su date vrednosti verovatnoće događaja uključenja u zadatom vremenu u funkciji vremenskog razmaka od očekivanog trenutka uključenja. Sabiranjem verovatnoća pojavljivanja predpaljenja luka u svakoj od faza dobija se vrednost 1. Date su krive za dve vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja $\sigma = 1$ ms i $\sigma = 0.5$ ms.



Slika 7.83: Gustina raspodele rasipanja trenutaka predpaljenja električnog luka u odnosu na očekivani trenutak paljenja T_{Ef} za 2 vrednosti srednjeg kvadratnog rasipanja σ

Tabela 7.9: Vrednosti verovatnoće uključenja $P(\Delta t)$ u funkciji vremenskog odstupanja od očekivanog trenutka uključenja ΔT_{Ef}

Δt (ms)	-2σ	-1σ	0	1σ	2σ
P(rj)	0.0511	0.241	0.417	0.241	0.0511

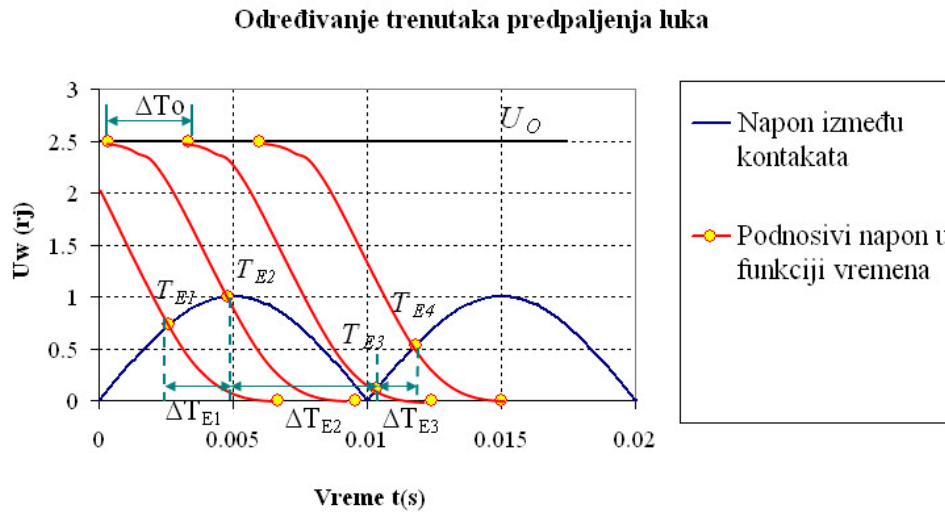
7.8 Računanje verovatnoće nastanka prenapona

Početak pokretanja kontakata, koji je direktna posledica dobijanja komande za zatvaranje prekidača, odvija se po uniformnoj raspodeli verovatnoće duž kompletne periode, jer je potpuno svejedno u kom se vremenskom trenutku u toku periode započinje proces uključenja. Ovo jedino ne važi ako je prekidač sa kontrolisanim trenutkom uključenja, što se primenjuje samo u specijalnim slučajevima. Raspodela verovatnoće predpaljenja električnog luka se ne odvija po uniformnoj raspodeli, što se može videti sa slike 7.84. Napon U_O je podnosivi napon kada su kontakti u otvorenom položaju. Ako se početak zatvaranja kontakata u ponovljenim simulacijama sistematski pomera za ΔT , dobijaju se tačke očekivanog predpaljenja električnog luka $T_{E1}, T_{E2} \dots T_{En}$ koje više nisu uniformno raspoređene.

Neka postoji n_{to} tačaka početka pokretanja kontakata pri zatvaranju prekidača T_0 unutar jedne poluperiode, prema slici 7.81, odnosno 7.84. U tom slučaju vremenski korak sa kojim se varira kriva opadanja dielektričke izdržljivosti je:

$$\Delta T_o = \frac{0.5T}{n_{to}} \quad (7.148)$$

gde je T perioda napona industrijske učestanosti koja iznosi $T = 0.02$ s. Dovoljno je razmatrati samo jednu poluperiodu, ali se mora voditi računa da ako je kretanje kontakata započeto u jednoj poluperiodi, zatvaranje kontakada se može desiti u drugoj poluperiodi napona između kontakata. Usvaja se da ne postoji razlika u preskočnim naponima između pozitivne i negativne poluperiode, pa se zato posmatra apsolutna vrednost napona između



Slika 7.84: Određivanje trenutaka predpaljenja luka za različite trenutke započinjanja zatvaranja kontakata

kontakata. Uobičajeni broj tačaka variranja krive podnosivog napona y poluperiodi je $n_{to} = 20$.

Na slici 7.85 prikazan je uprošćeni postupak određivanja verovatnoće predpaljenja električnog luka u međukontaktom prostoru, ukoliko smatramo da se smanjivanje međukontaktog rastojanja i podnosivog napona između kontakata vrši po linearnom zakonu. Ova pretpostavka ne utiče bitno na rezultate zbog toga što se predpaljenje luka najčešće događa na linearnom delu krive. Sa druge strane, teško je tačno odrediti krivu preskočnog napona, a hodograf brzine kontakata se jednostavno meri. Može se uvesti pretpostavka o proporcionalnosti podnosivog napona između kontakata u hladnom stanju (posle duge pauze nakon isključenja) i udaljenosti između kontakata.

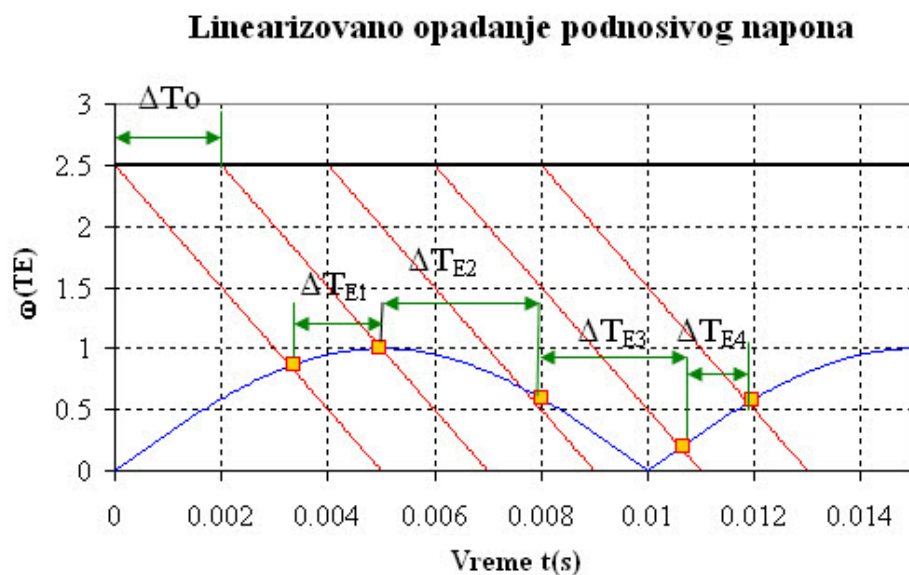
Iako su trenutci početka zatvaranja kontakata ekvidistantni, razlika vremena predpaljenja luka između dve susedne funkcije opadanja podnosivog napona između kontakata se razlikuju, kao na primer $\Delta T_{E1} < \Delta T_{E2}$, a $\Delta T_{E3} > \Delta T_{E4}$. Vremena paljenja električnog luka na delu poluperiode gde se napon smanjuje imaju manju verovatnoću nego da delu poluperiode gde napon između kontakata raste.

Verovatnoća predpaljenja električnog luka se može izračunati iz izraza:

$$P(T_o) = \frac{1}{0.5T} \times \frac{\Delta T_o}{\Delta T_{Ei}} \text{ za } i = 1, 2, 3, \dots, n_{to} \quad (7.149)$$

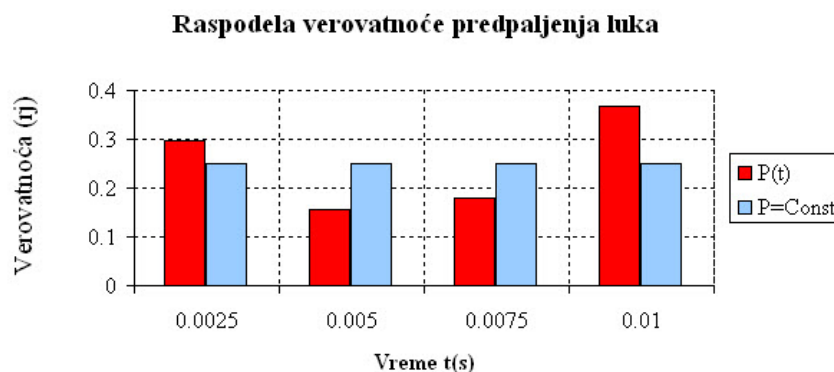
U izrazu 7.149 trenutak početka zatvaranja kontakata T_o se sistematski varira duž jedne poluperiode.

Na slici 7.86 prikazan je histogram raspodele uzimajući obzir razliku verovatnoće



Slika 7.85: Određivanja verovatnoće predpaljenja električnog luka u međukontaktnom prostoru za slučaj linearnog smanjivanje međukontaktne podnosive napona

predpaljenja luka za različite trenutke u toku poluperiode $P(t)$, kao i slučaj kada je ravnomerna raspodela trenutaka predpaljenja ($P = \text{const}$).



Slika 7.86: Histogram približnih verovatnoća paljenja luka u određenim intervalima $P(t)$ i ravnomerna raspodela verovatnoće paljenja $P = \text{Const}$.

Sklopni prenaponi su najviši kada do predpaljenja luka između kontakata dođe u trenutku kada je napon koji vlada između kontakata najviši. Zbog toga je važno modelovati trenutke paljenja luka vodeći računa o fizičkim zbivanjima između kontakata. Kod srednjenaponskih prekidača (na primer vakuumskih), kontakti se kreću velikom brzinom i imaju mali hod, a svi su pokretani iz jednog mehanizma, tako da možemo smatrati da se dielektrička izdržljivost gotovo vertikalno smanjuje od napona U_o to trenutka predpaljenja luka i fizičkog dodira kontakata.

Kod visokonaponskih prekidača hod kontakata je duži, pa su zato efekti predpaljenja luka izraženiji.

Visina prenapona pri uključenju prekidača zavisi najviše od razlike napona koja vlada između kontakata neposredno pre paljenja luka. Verovatnoća pojave prenapona je direktno funkcionalno vezana za verovatnoću pojava predpaljenja električnog luka između kontakata.

$$P(U_{max}) = P(T_0) \cdot P(\Delta t_A) \cdot P(\Delta t_B) \cdot P(\Delta t_C) \quad (7.150)$$

gde su:

$P(U_{max})$ - verovatnoća pojavljivanja prenapona,

$P(T_0)$ - verovatnoća očekivanih trenutaka paljenja luka P_{Ef} izračunata po izrazu 7.149 za faze $f = A, B, C$,

$P(n_{if} \cdot \Delta t)$ - verovatnoća odstupanja od trenutka predpaljenja luka T_{Ef} na fazi $f = A, B, C$ koja se dobija kao $\omega(n_{if} \cdot \Delta t)$, gde je $n_{if} = (-n_m, -n_{m-1}, -2, -1, 0, 1, 2, n_{m-1}, n_m)$ za posmatranu fazu f . Ukupan broj varijacija za svaku fazu je $2 \cdot n_m + 1$. Za slučaj 5 tačaka postoje 2 tačke sa obe strane i jedna u sredini krive raspodele, kada je odstupanje od očekivanog trenutka paljenja 0.

n_m - maksimalan broj elementarnih koraka odstupanja od očekivanog trenutka predpaljenja luka T_{Ef} , gde je $n_m \cdot \Delta t \leq 3\sigma$. n_m se odnosi na broj tačaka odstupanja sa jedne strane krive zakona raspodele, ne računajući tačku kada je odstupanje 0.

Δt - elementarni korak variranja vremena odstupanja od očekivanog paljenja luka T_{Ef} , koji je srazmeran srednjem kvadratnom odstupanju σ , odnosno $\Delta t = k\sigma$, pri čemu je na slici 7.82 $k = 1$.

Tabela 7.9 napravljena je za preporučeni slučaj kada su izabrani sledeći uslovi prelaska sa kontinualne raspodele vremena rasipanja oko očekivanih na diskretnu raspodelu verovatnoća:

$$\begin{aligned} k &= 1 \\ n_m &= 2 \\ \Delta t &= \sigma \end{aligned}$$

Proračuni zakona raspodele maksimalnih prenapona se mogu raditi na dva načina:

- Sistematskim variranjem trenutaka uključenja
- Slučajnim izvlačenjem trenutaka uključenja (Monte Karlo simulacija)

7.8.1 Sistematsko variranje trenutaka uključenja

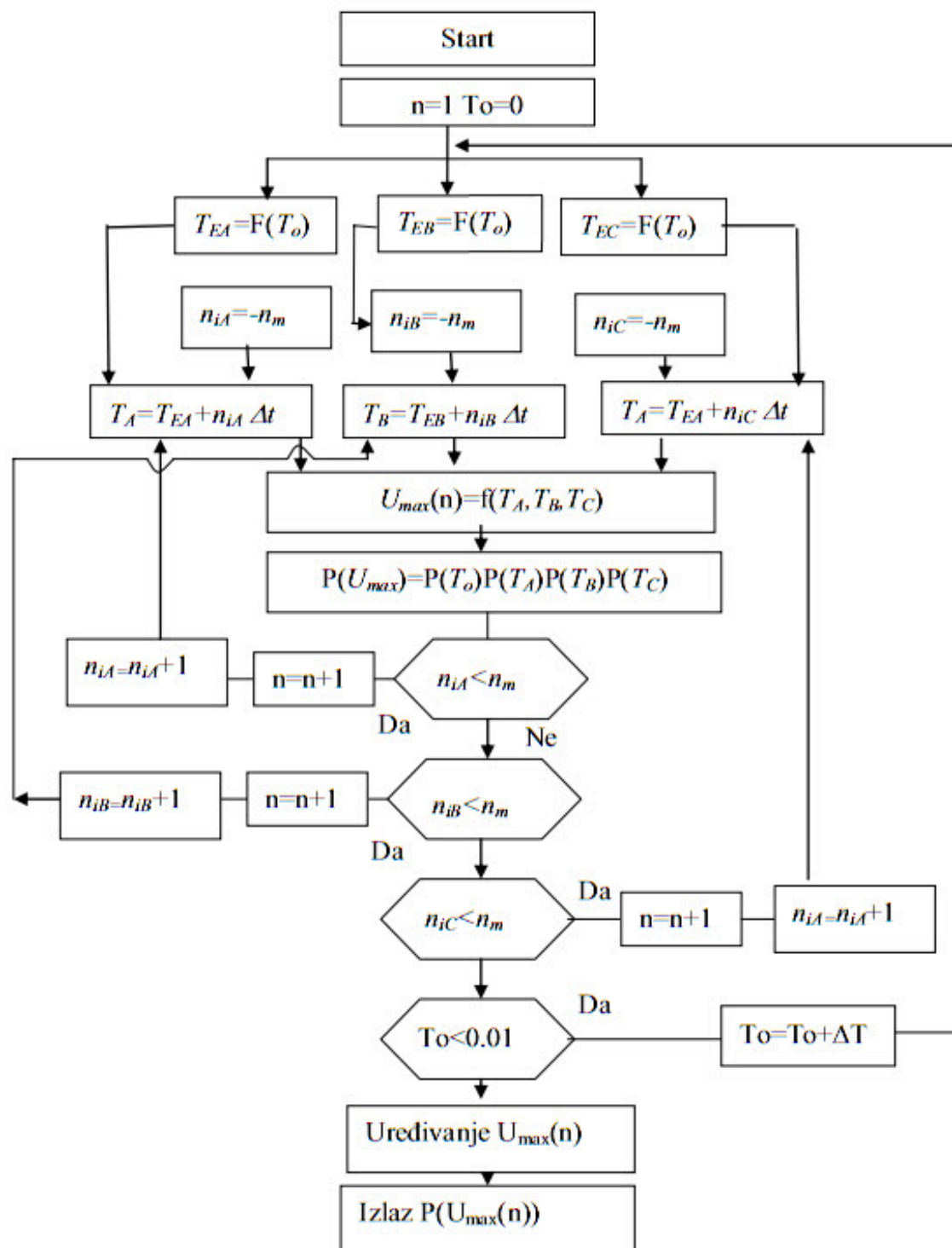
Pri sistematskom variranju trenutaka uključenja mogu se razlikovati sledeći koraci:

1. Variranje trenutka početka zatvaranja kontakata T_0 od 0 do 0.01 s sa korakom ΔT . Ukupan broj koraka je $n_{to} = 0.01/\Delta T$. Tekući trenutak početka zatvaranja kontakata $T_0 = n_T \cdot \Delta T$.
2. Za svako T_0 određivanje očekivanog trenutka predpaljenja luka na svakom od polova prekidača $T_{Ef}, f = A, B, C$.
3. Variranje slučajnog rasipanja oko očekivanog trenutka paljenja luka na fazi A T_{EA} . Trenutak paljenja luka je $T_A = n_{iA} \cdot \Delta T$. Varira se celobrojna promenljiva n_{iA} od vrednost $-n_m$ do vrednosti n_m .
4. Za svaki trenutak paljenja luka na fazi A $T_A = n_{iA} \cdot \Delta T$ iz predhodnog koraka, vrši se variranje slučajnog rasipanja oko očekivanog trenutka paljenja luka na fazi B T_{EB} . Trenutak paljenja luka je $T_B = n_{iB} \cdot \Delta T$. Na isti način se varira se celobrojna promenljiva n_{iB} od vrednost $-n_m$ do vrednosti n_m .
5. Postupak se ponavlja za fazu C na isti način varirajući celobrojnu promenljivu n_{iC} od vrednost $-n_m$ do vrednosti n_m , koja definiše trenutak paljenja luka na fazi C $T_C = n_{iC} \cdot \Delta T$.
6. Formirana je kombinaciju brojeva koji se variraju koja je bitna za proračun prenapona:

n_T -broj koji definiše trenutak početka zatvaranja kontakata T_0 i odgovarajućeg očekivanog trenutka paljenja luka na fazama T_{EA}, T_{EB} , i T_{EC} ,

n_{iA}, n_{iB}, n_{iC} - brojevi koji definišu trenutke predpaljenja luka na fazama A, B i C uvažavajući slučajno rasipanje.
7. Izračunavaju se maksimalni prenaponi $U_{max}(n)$, gde je n redni broj kombinacije brojeva n_T, n_{iA}, n_{iB} i n_{iC} .
8. Za predhodnu kombinaciju brojeva izračunava se verovatnoća pojave prenapona $P(U_{max}(n)) = P(n_T) \cdot P(n_{iA}) \cdot P(n_{iB}) \cdot P(n_{iC})$
9. Vektor maksimalnih napona $[U_{max}(i = 1..n)]$ se uređuje po rastućem redosledu, zajedno sa korespondentnim vektorom verovatnoća pojavljivanja maksimalnih napona $[P\{U_{max}(i = 1..n)\}]$.

Ukupan broj varijacija trenutaka uključenja je $n = n_T \cdot (2 \cdot n_m + 1)^3$. Na primer, za tipičan slučaj kada je $n_{To} = 20$, $n_m = 2$, $n = 20 \cdot 5^3 = 2500$. Na slici 7.87 prikazan je blok dijagram proračuna. Velika ušteda u vremenu proračuna, sa malim uticajem na rezultate,



Slika 7.87: Blok dijagram sistematskog proračuna

postize se kada se definiše da na fazi A ne postoji rasipanje trenutaka paljenja luka, već samo na fazama B i C u odnosu na fazu A. U tom slučaju bi broj kombinacija uglova bio $n = n_T \cdot (2 \cdot n_m + 1)^2$. U tom slučaju bi bilo potrebno samo 500 simulacija.

7.8.2 Monte Karlo simulacija

Pri primeni Monte Karlo simulacije koristi se generator slučajnih brojeva iz kojeg se dobija slučajna promenljiva. Kao generator slučajnih brojeva koriste se programi koji proizvode pseudo-slučajne brojeve koji se sastoje od dugačkih nizova slučajnih brojeva. Program za generisanje pseudo-slučajnih brojeva ima jednu inicijalnu promenljivu (seme), od koje zavisi slučajni niz koji nastaje. Za jednu vrednost inicijalne promenljive dobija se isti niz slučajnih brojeva. Ako se za seme koristi računarski sat, tada se generiše niz slučajnih brojeva koji se nikada ne ponavlja.

Po pravilu generatori slučajni brojeva generišu u opsegu od 0 do 1 sa ravnomernom raspodelom verovatnoće. Ukoliko želimo ravnomernu raspodelu brojeva u opsegu od a do b , gde je $b > a$, tada se rezultat iz generatora slučajnih brojeva koji generiše slučajan broj X_{rnd} iz opsega $[0,1]$ dobija slučajan broj X_{ab} iz opsega $[a,b]$ na sledeći način:

$$X_{ab} = a + X_{rnd} \cdot (b - a) \quad (7.151)$$

U slučaju kada želimo da dobijemo slučajan broj raspoređen po određenoj raspodeli, na primer normalnoj, definisanoj kumulativnom funkcijom $y = F(x)$, gde je y izlazna veličina koja se kreće od 0 do 1, tada se koristi metoda inverzne transformacije $x = F(y)^{-1}$.

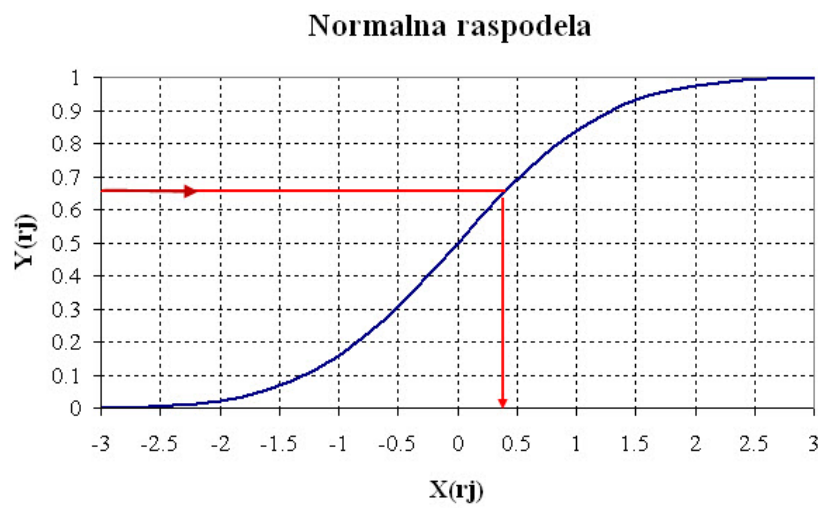
Kumulativna Gausova raspodela verovatnoće je data izrazom:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right) dt \quad (7.152)$$

Na slici 7.88 prikazan je način dobijanja normalizovane slučajne veličine x_n raspoređene po Gausovoj, odnosno normalnoj raspodeli, prema sledećem izrazu.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot t_n^2\right) dt \quad (7.153)$$

Za slučajno izabranu izabranu veličinu y koja je ravnomerno raspoređena u opsegu od 0 do 1, sa kumulativne funkcije verovatnoće se određuje na apscisnoj osi slučajna promenljiva x raspoređena po normalnoj raspodeli u opsegu od -3 do +3. Ako je izabrana ulazna slučajna promenljiva $y = 0.654$, izlazna slučajna promenljiva raspoređena



Slika 7.88: Postupak inverzne transformacije za dobijanje normalizovane slučajne promenljive sa normalnim zakonom raspodele

po normalnom zakonu je $x = 0.4$. Na ovaj način se može generisati proizvoljan broj normalizovanih slučajnih promenljivih.

U slučaju kada promenljiva x nije normirana, tada se slučajna promenljiva x dobija iz normalizovane promenljive x_n pomoću izraza:

$$x = x_n \cdot \sigma + \mu \quad (7.154)$$

gde su:

σ - srednje kvadratno odstupanje,

μ -matematičko očekivanje.

7.8.3 Primena Monte Karlo simulacije na određivanje raspodele prenapona

Postupak proračuna u slučaju primene Monte Karlo simulacije za proračun sklopnih prenapona sastoji se iz sledećih koraka.

- Slučajan izbor trenutka početka zatvaranja kontakata $T_o = 0.01 \cdot X_{rnd}$, gde je X_{rnd} slučajna promenljiva iz opsega od 0 do 1,
- određivanje trenutka paljenja električnog luka T_{Ef} na fazama $f = A, B, C$, na osnovu slike 7.81,

- Određivanje trenutaka paljenja luka $T_f = T_{Ef} + \Delta t_{rnd}$, za faze $f=A, B$ i C , gde je Δt_{rnd} slučajno rasipanje trenutaka predpaljenja luka,
- Proračun prenapona za slučajno izabrane T_o i trenutke paljenja luka na pojedinim fazama T_f .
- registrovanje maksimalnih prenapona i ponavljanje postupka sve dok se ne ustaovi konvergencija izračunatih maksimalnih prenapona U_{max} .

U gornjem tekstu se slučajno rasipanje trenutaka paljenja luka na pojedinim fazama određuje preko izraza za uniformnu raspodelu promenljive Δt_{rnd} na opsegu od -3σ do 3σ .

$$\Delta t_{rnd} = -3 \cdot \sigma + 6 \cdot \sigma \cdot X_{rnd} \quad (7.155)$$

Proračuni se ponavljaju i izračunavaju se maksimalne vrednosti prenapona, koje se upoređuju sa srednjim vrednostima predhodno izračunatih prenapona. Kada je razlika $U_{max}(n)$ između rezultata u n -tom koraku i srednje vrednosti $U_{max}(mean)$ manja od unapred odabrane dozvoljene razlik ε , proračun se prekida i prikazuje se frekvencija pojava prenapona u pogodno izabranim opsezima.

Poglavlje 8

Rizik kvara usled atmosferskih prenapona

Danas je razvijeno više metoda za procenu rizika kvara izolacije elektroenergetske opreme u postrojenjima i godišnjeg broja preskoka na vazdušnoj izolaciji vodova usled atmosferskih pražnjenja. Pri primeni ovih metoda neophodno je poznavati zakone raspodele amplitude i strmine čela struje atmosferskog pražnjenja.

Pri primeni bilo koje metode za određivanje rizika kvara izolacije potrebno je ponoviti veći broj simulacija prelaznog procesa usled atmosferskih pražnjenja da bi se sagledao statistički uticaj slučajnih parametara atmosferskog pražnjenja na rizik kvara izolacije.

U praksi se najčešće određuje rizik kvara izolacije energetskih transformatora u postrojenju ili na stubnim transformatorskim stanicama, usled atmosferskih pražnjenja u prilazne nadzemne vodove, mada se često vrši procena rizika kvara mernih transformatora, kablovskih završnica ili opreme u gasom izolovanim postrojenjima (SF₆ postrojenja). Drugi problem koji se postavlja u praksi je da se proceni godišnji broj preskoka na vodovima.

8.1 Metoda opasnih parametara

8.1.1 Metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje

Metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje skraćeno ćemo zvati **VSS**. Ovom metodom se određuje verovatnoća premašenja amplitude i strmine struje atmosferskih pražnjenja koje izazivaju kvar izolacije analiziranog objekta. Proračun prelaznog procesa

usled atmosferskog udara se vrši linearno rastućim strujnim talasom čija amplituda nije ograničena (odnosno vreme čela struje nije ograničeno), što je dato sledećom relacijom:

$$i(t) = S \cdot t \quad (8.1)$$

gde je S strmina čela struje, a t vreme mereno od trenutka nailaska talasa na posmatranu tačku pražnjenja. Strmina struje S se izražava u kA/ μ s, a vreme u μ s.

Proračun se ponavlja za veći broj strmina čela strujnih talasa atmosferskog pražnjenja ravnomerno raspoređenih od neke minimalne strmine S_{min} do maksimalne strmine S_{max} . Vrednosti za ove granične strmine struja atmosferskog pražnjenja se biraju tako da je verovatnoća pojavljivanja strmine čela manje od S_{min} , odnosno veće od S_{max} manja od 2%.

Ukoliko je jedna simulacija prelaznog procesa izvršena sa strminom čela struje S_j i posle vremena t_j napon na ispitivanom elementu izolacije je postao veći od podnosivog napona izolacije U_{iz} u toj tački, tada se smatra da je prenapon izazvao kvar izolacije. Par vrednosti $(S_j; I_j)$ predstavlja koordinate jedne tačke krive opasnih parametara. Amplituda struje atmosferskog pražnjenja koja izaziva kvar izolacije izračunava se iz posmatrane strmine čela talasa i vremena do kvara t_j , odnosno:

$$I_j = S_j \times t_j \quad (8.2)$$

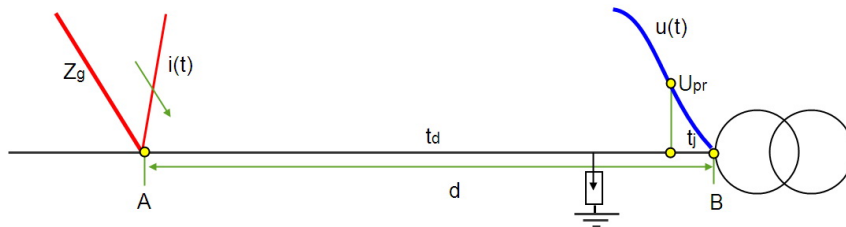
Vreme do kvara izolacije t_j zavisi od tipa pražnjenja u vod. Razlikujemo sledeće slučajeve za koje se primenjuju različiti načini izračunavanja vremena do proboja izolacije analiziranog elementa t_j :

- proračun rizika kvara izolacije opreme u postrojenju usled atmosferskog udara u vod ispred postrojenja, kada vod nije zaštićen zaštitnim užetom,
- proračun rizika kvara izolacije opreme u postrojenju usled atmosferskog udara u vod ispred postrojenja kada je vod zaštićen zaštitnim užetom,
- proračun godišnjeg broja preskoka na izolaciji vodova bez zaštitnog užeta usled atmosferskih pražnjenja,
- proračun godišnjeg broja preskoka na izolaciji vodova sa zaštitnim užetom usled atmosferskih pražnjenja,

8.1.2 Kriva opasnih parametara za postrojenje usled udara u vod bez zaštitnog užeta

Ako se računa rizik kvara izolacije elemenata postrojenja (posebno energetskog transformatora) usled direktnog udara atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, onda je t_j

relativno vreme od trenutka prvog nailaska talasa na posmatrani element do proboja izolacije, jer je upravo to vreme potrebno da strujni talas strmine S_j naraste do kritične amplitude koja izaziva proboj. Absolutno vreme od trenutka atmosferskog udara u vod do proboja izolacije je duže za vreme neophodno za prostiranje talasa od mesta udara A do posmatrane tačke B na udaljenosti d u kojoj se traži rizik proboja izolacije. Ovo vreme je označeno kao t_d . Proces je ilustrovan na slici 8.1.



Slika 8.1: Određivanje vremena do kvara izolacije za slučaj analize objekta u postrojenju kada talas dolazi po vodu bez zaštitnog užeta

Naponski talas prouzrokovan linearno rastućom strujom $i(t)$ putuje od od tačke udara A do tačke B, gde je postavljen objekat čiji se rizik kvara izolacije određuje, za vreme t_d . U tački B određuje se napon $u(t)$. U trenutku t_j od nailaska talasa u tačku B, napon $u(t)$ prevazilazi podnosivi napon izolacije U_{pr} . Vreme do proboja izolacije t_j je vreme od nailaska talasa na objekat do postizanja napona na objektu koji izaziva proboj. Ovo vreme je potpuno nezavisno od vremena putovanja od mesta udara A do tačke u kojoj je objekat B. Amplituda struje dovoljna za postizanje probojnog napona izolacije U_{pr} pri delovanju strmine talasa S_j je:

$$I_j = S_j \cdot t_j \quad (8.3)$$

Ukoliko obeležimo oznakom $t_o = 0$ trenutak atmosferskog udara u elemenat nadzemne elektroenergetske mreže (referentno vreme), a vreme putovanja od tačke udara do mesta na kome se posmatra rizik kvara izolacije je t_d , tada se računa vreme proboja izolacije t_j kao

$$t_j = t_{jo} - t_d \quad (8.4)$$

gde je:

t_j -relativno vreme postizanja probojnog napona u odnosu na trenutak nailaska talasa na objekat na kome se izračunava rizik preskoka,

t_{jo} -absolutno vreme postizanja probojnog napona u odnosu na trenutak atmosferskog udara u nadzemnu elektroenergetsku mrežu,

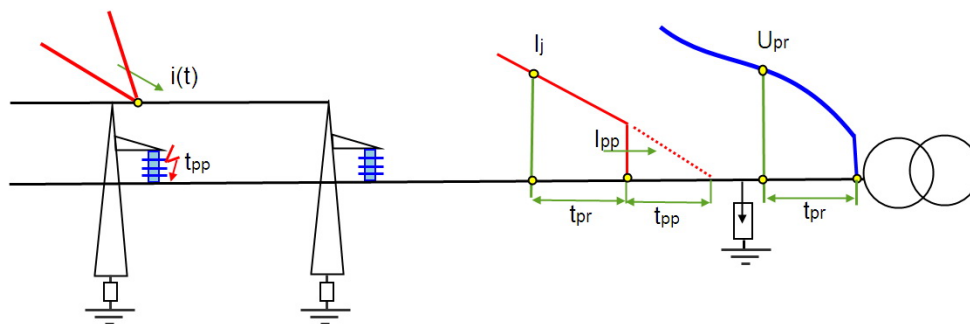
t_d -vreme prostiranja od mesta udara do objekta na kome se izračunava rizik preskoka.

Par vrednosti $(S_j; I_j)$ čine jednu tačku krive opasnih parametara. Za strmine čela struje $S(j)$, $(j = 1, \dots, n)$ se postupak ponavlja i dobijaju se parovi strmina struje i odgovarajuće amplitude struje pri kojima dolazi do kvara izolacije. Proračun prelaznog procesa se prekida za posmatranu strminu struje $S(j)$ kada nastane proboj na posmatranoj izolaciji i ponavlja se za sledeću vrednost strmine struje S_{j+1} . Spajanjem većeg broja dobijenih tačaka dobija se kriva opasnih parametara. Svako pražnjenje sa amplitudom struje iznad te krive izaziva proboj izolacije. Ukoliko amplituda struje u atmosferskog kanalu pražnjenja pređe određenu graničnu vrednost (usvaja se da je to vrednost koja može da bude prevaziđena sa 0.1% verovatnoće), proračun se prekida, a smatra se da je potrebna struja za izazivanje proboja izolacije beskonačno velika $I(j) = \infty$. Posle toga započinje se proračun za sledeću vrednost strmine struje S_{j+1} .

8.1.3 Kriva opasnih parametara za postrojenje usled udara u vod sa zaštitnim užetom

Proračun amplitude struje koja dovodi do proboja izolacije objekta, ako se atmosfersko pražnjenje odvija zaštitno uže voda ispred postrojenja, u ovom slučaju je složenije. Na ovom mestu će biti opisana dva postupka proračuna struje I_j dovoljne da izazove postizanja probojnog napona U_{pr} pri delovanju linearnog talasa strmine S_j .

Pojednostavljeni postupak Ovaj postupak je pogodan za slučaj kada su otpornosti uzemljenja stubova male. U tom slučaju proces proračuna potrebne amplitude struje pražnjenja ilustrovan je na slici 8.2. Ovaj postupak je opisan u [7].



Slika 8.2: Određivanje vremena do kvara izolacije za slučaj objekta u postrojenju kada talas dolazi po vodu sa zaštitnim užetom

Oznake na slici 8.2 imaju sledeće značenje:

t_{pp} –vreme potrebno da linearni strujni talas poraste do vrednosti koja izaziva povratni preskok,

I_{pp} –amplituda struje pražnjenja koja izaziva povratni preskok,

U_{pr} –probojni napon izolacije objekta,

t_{pr} –vreme potrebno da linearni strujni talas poraste do vrednosti koja izaziva proboj izolacije na posmatranom objektu,

I_j –amplituda struje pražnjenja koja izaziva proboj na posmatranom objektu pri delovanju strujnog talasa strmine S_j .

Ako se posmatra proces pražnjenja na uzemljene delove voda (zaštitno uže ili vrh stuba) koji izaziva povratni preskok na izolaciji voda, stvara se naponski talas koji se prostire po faznom provodniku do postrojenja, gde može da izazove kvar izolacije. Vreme do proboja izolacije t_j računa iz sledećeg izraza:

$$t_j = t_{pp} + t_{pr} \quad (8.5)$$

Vreme do proboja izolacije predstavlja zbir vremena potrebnog da struja poraste toliko da na stubu izazove povratni preskok i vremena da naponski talas nastao povratnim preskokom, od trenutka kada je stigao do posmatrane izolacije elementa postrojenja poraste do probojnog napona te izolacije. Vreme prostiranja od mesta atmosferskog pražnjenja do stuba na kome se odvija povratni preskok i od stuba do tačke u kojoj se računa rizik proboja izolacije ne ulaze u vreme do proboja računato izrazom 8.5. Linearno rastuće čelo talasa strmine S_j treba da ima trajanje najmanje t_j da bi se na posmatranoj izolaciji uspostavio napon dovoljan da izazove proboj izolacije. Posle proboja izolacije proračun se prekida i započinje novi proračun sa strminom strujnog talasa S_{j+1} .

Da bi uopšte moglo da dođe do povratnog preskoka, napon mora da postigne vrednost preskočnog napona izolacije voda, što se postiže posle vremena t_{pp} . Napon na stubu, ukoliko je otpor uzemljenja mali, može i dalje da raste, izazivajući dalji porast napona na faznom provodniku posle povratnog preskoka.

Usled povratnog preskoka dolazi do pojave naglog skoka napona na faznom provodniku. Od tog trenutka potrebno je da prođe još vreme t_{pr} da napon poraste do probojnog napona izolacije. U realnom sistemu talasni oblik na transformatoru je izobličen dejstvom višestrukih refleksija na elementima postrojenja i postojanjem odvodnika prenapona. Amplituda struje dovoljna da izazove preskok izolacije data je izrazom:

$$I_j = S_j \cdot (t_{pr} + t_{pp}) \quad (8.6)$$

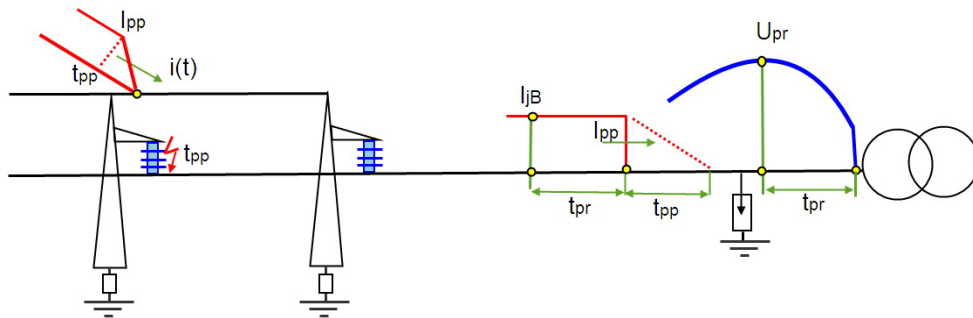
Par vrednosti $(S_j; I_j)$ čine jednu tačku krive opasnih parametara, kao i u predhodnom slučaju.

Tačan postupak Ovaj postupak primene metode opasnih parametara je razvijen u cilju tačnijeg proračuna vremena do proboja izolacije bez obzira na otpornost uzemljenja stubova i vrednost preskočnog napona izolacije stubova. Postupak je opisan u [23]. Za svaku strminu struje atmosferskog pražnjenja S_j proračun prelaznog procesa se odvija u 2 ciklusa. Prvi ciklus obeležen kao postupak *A* identičan je predhodno opisanom **pojednostavljenom postupku**. Struja koja izaziva kvar izolacije u ciklusu *A* je obeležena sa I_{jA} , a vreme potrebno da se postigne ova struja je:

$$I_{jA} = S_j \cdot (t_{jA} + t_{pp}) \quad (8.7)$$

gde je t_{jA} vreme potrebno da napon na razmatranom objektu poraste do probojnog napona U_{pr} .

U drugom ciklusu obeleženom kao *B* proračun se radi na potpuno isti način kao i u slučaju pojednostavljenog postupka, samo struja atmosferskog pražnjenja u kanalu pražnjenja nema neograničeno trajanje čela, nego je vreme čela jednako vremenu potrebnom da struja izazove preskok na izolaciji stuba u trenutku t_{pp} , nakon čega struja ima konstantnu vrednost, kao na slici 8.3. Struja koja izaziva povratni preskok može biti do-



Slika 8.3: Određivanje vremena do kvara izolacije za slučaj objekta u postrojenju kada strujni talas ima konstantnu vrednost nakon nastanka povratnog preskoka

voljna da izazove kvar izolacije na analiziranom objektu, ali se može desiti da ta struja ograničene amplitude ne može da izazove proboj izolacije. Tada usvajamo da je ta struja beskonačno velika.

U slučaju kada je struja dovoljna da izazove proboj izolacije, tada se ona obeležena kao I_{jB} . Amplituda struje koja izaziva proboj u ovom slučaju je:

$$I_{jB} = S_j \cdot t_{pp} \quad (8.8)$$

Struja dovoljna da izaziva kvar izolacije analiziranog objekta jednaka je struji koja izaziva povratni preskok I_{pp} , jer nakon nastanka povratnog preskoka struja više ne raste.

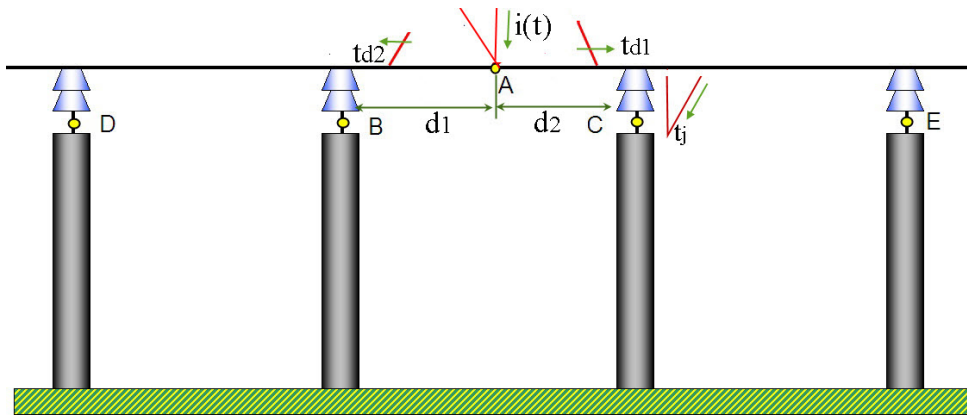
Na kraju se određuje struja koja izaziva proboj na izolaciji objekta kao manja od struja izračunata po postupku *A* i postupku *B*, odnosno.

$$I_j = \min(I_{jA}, I_{jB}) \quad (8.9)$$

Krivu opasnih parametara i u ovom slučaju čini par $(S_j; I_j)$. Svi udari groma čija je amplituda struje I_j za zadatu strminu S_j iznad krive opasnih parametara ugrožavaju izolaciju u posmatranoj tački postrojenja.

8.1.4 Kriva opasnih parametara za vod bez zaštitnog užeta

Kada se određuje godišnji broj preskoka na vodovima bez zaštitnog užeta, tada je objekat na kome se određuje verovatnoća kvara, **izolacija samog voda**. Sam metod detekcije preskoka na izolaciji voda bez zaštitnog užeta je prva pojava napona na tački izolatora koja je sa strane uzemljenja. Na slici 8.4 prikazan je proces pražnjenja u fazu voda bez zaštitnog užeta. Radi jednostavnosti razmatrana je samo jedna faza. Tačke u kojima se detektuje pojava atmosferskog prenapona, što je znak da je došlo do preskoka, su B i C koje su najbliže mestu udara. Struja atmosferskog pražnjenja $i(t)$ je linearno rastuća



Slika 8.4: Određivanje vremena do preskoka na izolaciji voda bez zaštitnog užeta

neograničenog trajanja slično kao kod analize opreme u postrojenju. Od tačke udara A prostiru se po faznim provodnicima dva naponska talasa linearno rastućeg čela čija je vremenska promena:

$$u(t) = \frac{i_G(t)}{4 \cdot Z_f} \quad (8.10)$$

gde je Z_f karakteristična impedansa faznog provodnika, a $i_G(t)$ vremenska promena struje u kanalu groma, koja izaziva upadne komponente struja koja se kreću levo i desno od mesta udara, čije su amplitude $I_{up} = I_G/4$, gde je I_G amplituda struje pražnjenja prema sekciji 7.3.

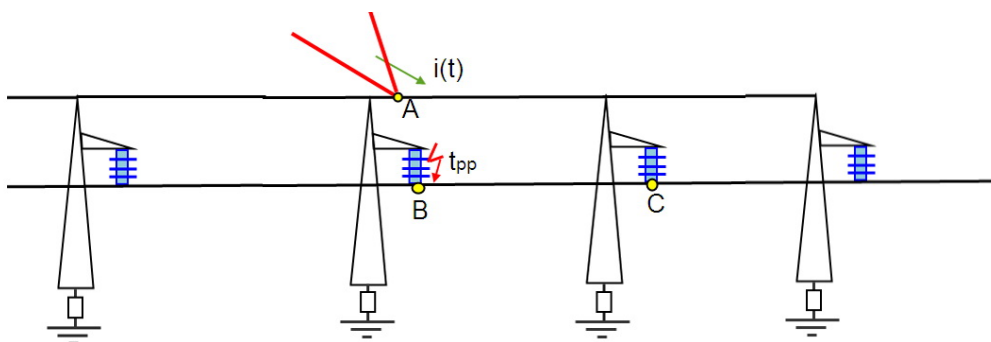
U trenutku t_{d1} stiže talas do desnog stuba. Napon raste linearno do trenutka t_j u odnosu na trenutak atmosferskog udara u vod, kada dolazi do preskoka na izolaciji na stubu C. Naponski talasi stižu do stubova levo ili desno od udara u trenutcima t_{d1} i t_{d2} , a u zavisnosti koji stub je bliži tački udara A, prvo nastaje na tom stubu preskok. Trenutak t_j prvog preskoka pri strmini struje pražnjenja S_j definiše amplitudu struje koja izaziva preskok na izolaciji (u našem slučaju desnog stuba), pod pretpostavkom da je ovaj stub bliži tački udara:

$$I_j = S_j \cdot (t_j - t_{d1}) \quad (8.11)$$

Prilikom proračuna vreme t_j je absolutno vreme mereno u odnosu na trenutak kada se događa atmosferski udar u vod i kada započinje proces proračuna. Na ovaj način formiran je par tačaka $(S_j; I_j)$ krive opasnih parametara. Kada nastane prvi preskok na stubu bližem mestu udara, smatra se da je nastao kvar na vodu i prekida se proračun. Započinja se nov proračun sa sledećom strminom čela S_{j+1} .

8.1.5 Kriva opasnih parametara za vod sa zaštitnim užetom

Određivanje godišnjeg broja preskoka na vodovima sa zaštitnim užetom je identično postupku koji se primenjuje kod vodova bez zaštitnog užeta, jedina razlika je u tački u kojoj se detektuje preskok na izolaciji voda. U ovom slučaju prati se prva pojava napona na tački izolatora koja je sa strani faznog provodnika. Na slici 8.5 prikazan je proces pražnjenja u zaštitno uže voda. Radi jednostavnosti razmatrana je samo jedna faza. Tačke u kojima se detektuje pojava atmosferskog prenapona, što je znak da je došlo do preskoka, su B i C koje su najbliže mestu udara.



Slika 8.5: Određivanje vremena do preskoka na izolaciji voda sa zaštitnim užetom

Kada dođe do preskoka sa konzola najbližih stubova prema faznom provodniku, pojavljuje se u tačkama B ili C naponi. Trenutak t_{pp} povratnog preskoka u odnosu

na trenutak nailaska talasa na posmatrani izolator, odnosno $t_j = (t_{pp} - t_d)$ u odnosu na referentni trenutak udara u vod, pri strmini struje pražnjenja S_j , definiše amplitudu struje koja izaziva preskok na izolaciji stuba na kome je preskok prvo nastao:

$$I_j = S_j \cdot (t_{pp} - t_d) \quad (8.12)$$

Par parametara $(S_j; I_j)$ definišu jednu tačku krive opasnih parametara.

8.1.6 Varijacija strmine i amplitude struje

Pored predhodno opisane metode formiranja krive opasnih parametara tako što se varira strmina struje **VSS** i određuje amplituda struje koja izaziva preskok, razvijema je metoda po kojoj se variraju strmina i amplituda struje **VSAS**.

Proračun se ponavlja za veći broj strmina čela strujnih talasa groma ravnomerno raspoređenih od neke minimalne strmine S_{min} do maksimalne strmine S_{max} . Vrednosti za ove granične strmine struja groma se biraju tako da je verovatnoća pojavljivanja strmine čela manje od S_{min} , odnosno veće od S_{max} dovoljno mala, na primer 2%. Talasni oblik struje može da bude trougaoni, sa linearno rastućim strmim čelom i linearno opadajućim začeljem relativno dugog trajanja, mada se mogu primenjivati dvostruko eksponencijalni talasi i talasi drugih oblika, koji se mogu naći, na primer u [13].

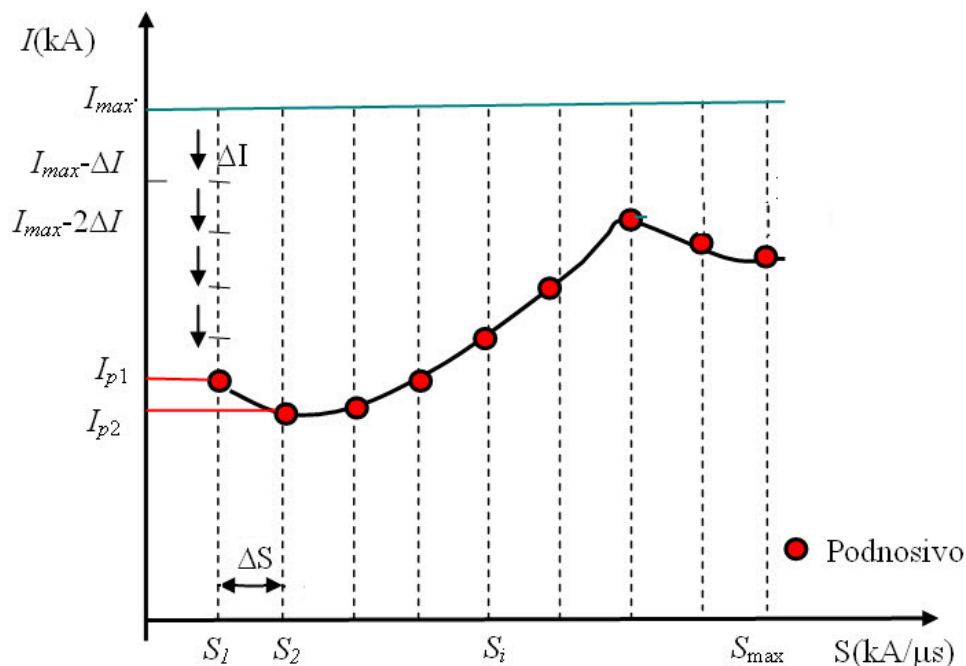
Za svaku strminu S_j se varira amplituda struje pražnjenja, počevši od dovoljno velike amplitude, koja sigurno izaziva kvar izolacije $I_{j,1} = I_{max}$. Za svaku amplitudu i strminu struje se simulira prelazni proces. Ukoliko dolazi do proboja, struja se smanjuje za vrednost ΔI , odnosno:

$$\begin{aligned} I_{j,2} &= I_{j,1} - \Delta I \\ I_{j,3} &= I_{j,2} - \Delta I \\ &= \\ I_{j,m} &= I_{j,m-1} - \Delta I \end{aligned} \quad (8.13)$$

Proračun se ponavlja sve dok se ne dogodi da izolacija posmatranom objektu izdrži atmosferski prenapon pri struji $I_{j,n}$. Tada se usvaja da je predhodna amplituda struje koju izolacija nije izdržala granična struja, odnosno:

$$I_j = I_{j,n} + \Delta I \quad (8.14)$$

Amplituda struje I_j zajedno sa strminom čela S_j čini par opasnih parametara označen kružićem na dijagramu. Zatim se povećava strmina za $S_{j+1} = S_j + \Delta S$ i ponavlja se proračun prelaznog procesa. Prikaz krive opasnih parametara dat je na slici 8.6.



Slika 8.6: Metoda variranja i strmine i amplitude struje atmosferskog pražnjenja

Na ovaj način se formiraju parovi tačaka $(S_j; I_j)$ krive opasnih parametara.

Osnovna razlika između metode opasnih parametara sa variranjem strmine struje i sa variranjem i strmine i amplitude struje je u sledećim karakteristikama:

- Metoda **VSS** je približna jer podrazumeva da naponski talas linearno raste na objektu čiji se rizik kvara istražuje, što realno nije ispunjeno zbog uticaka kapacitivnosti transformatora i višestrukih refleksija. Jedino pri analizi broja ispada vodova je to ispunjeno.
- Metoda **VSAS** primenljiva je za sve slučajeve analiza (analiza ugroženosti vodova i postrojenja se vrše na isti način).
- Metoda **VSS** je značajno brža od metode **VSAS**. Po obe metode broj varijacija strmina je isti, n_s , ali kod **VSAS** taj broj se množi brojem varijacija amplituda struje n_I , koji može biti različit za različite strmine.

Trajanje proračuna metodom **VSAS** se može skratiti sledećim postupkom:

1. Prvi proračun se radi pod sledećim uslovima:

- (a) Početna vrednost struje pražnjenja I_{poc} treba da bude značajno veća od očekivane struja koje izazivaja proboj izolacije.
- (b) Usvajanjem velikog koraka smanjivanja struje ΔI (na primer 10 kA), što omogućava približno određivanje kritične struje koja izaziva kvar.
- (c) Može se koristiti metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje **VSS** da bi se odredila maksimalna struja pražnjenja I_{max} koja izaziva kvar izolacije.

2. Drugi proračun se radi pod sledećim uslovima:

- Početna vrednost struje pražnjenja se izračunava na osnovu predhodno izračunate maksimalne struje uvećane za korak proračuna $I_{poc} = I_{max} + \Delta I$
- Korak smanjivanja struje je značajno manji $\Delta I_a = \Delta I/n$, na primer 1 kA.

8.1.7 Uprošćena metoda prema IEC standardu

Predložena je metoda prema [13] po kojoj se varira samo amplituda struje, a usvaja se funkcionalna veza između amplitude i strmine struje.

$$T_m = a \times I_m^b \quad (8.15)$$

gde su empirijske konstante date izrazom:

$$\begin{aligned} a &= 0.154 \\ b &= 0.624 \end{aligned} \quad (8.16)$$

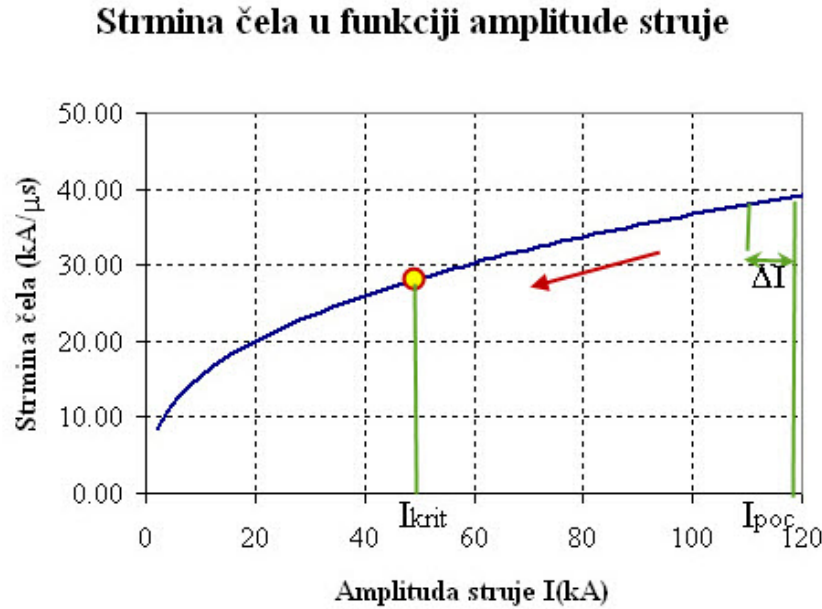
Na osnovu izračunatog vremena trajanja čela, za svaku amplitudu struje atmosferskog pražnjenja I_j određuje se strmina čela struje S_j :

$$S_j = \frac{I^{1-b}}{a} \quad (8.17)$$

Na slici 8.7 prikazana je zavisnost strmine od amplitude, kao i način određivanja kritične amplitude.

Proračun kritičnih parametara se svodi na smanjivanje struje od početne dovoljno velike vrednosti I_{poc} koja sigurno izaziva kvar izolacije, sa korakom ΔI do vrednosti amplitude struje I_{krit} pri kojoj ne dolazi do kvara izolacije. Par (S_{krit}, I_{krit}) čini kritične parametre definisane samo jednom vrednošću struje.

Proračuni se rade sa talasom linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja.



Slika 8.7: Zavisnost strmine od amplitude, kao i način određivanja kritične amplitude

8.2 Proračun verovatnoće pojave kritičnih parametara

Na slici 8.8 prikazan je oblik krive opasnih parametara. Za strmine struja manje od S_1 smatra se da je struja koja izaziva proboj izolacije $I_1 = \infty$.

Verovatnoća kvara se određuje integraljenjem funkcije gustine raspodele strmine struje groma u oblasti iznad krive opasnih parametara, odnosno:

$$P = \int_D \omega(I, S) dI dS \quad (8.18)$$

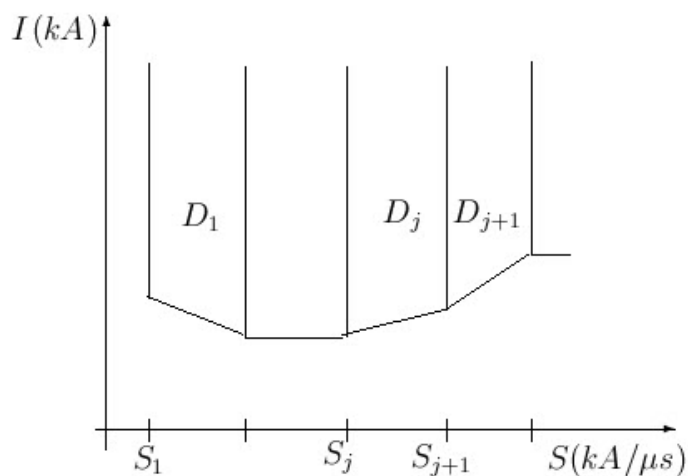
gde je: $\omega(I, S)$ – gustina raspodele amplitude i strmine struje groma.

Ukoliko se zakon raspodele amplitude i strmine struje groma daje logaritamsko - normalnom raspodelom, tada izraz za ovu raspodelu ima sledeći oblik:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.19)$$

Oznake u izrazu 8.19 imaju sledeće značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.20)$$



Slika 8.8: Kriva opasnih parametara atmosferskih pražnjenja

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{\ln S}} \quad (8.21)$$

gde su:

I – slučajna amplituda struje groma,

I_{sr} – srednja vrednost amplitude struje groma,

S – strmina linearizovanog čela struje groma,

S_{sr} – srednja vrednost strmine linearizovanog čela struje groma,

$\sigma_{\ln I}$ – standardno odstupanje logaritma struje groma,

$\sigma_{\ln S}$ – standardno odstupanje logaritma strmine čela struje groma,

ρ – koeficijent korelacije između amplitude i strmine struje groma.

Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma date su u tabeli 8.1, prema tabeli 6.2.

Tabela 8.1: Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele parametara struje groma

I_{sr} (kA)	S_{sr} (kA/ μ s)	$\sigma_{\ln I}$	$\sigma_{\ln S}$	ρ
30	14	0,68	0,55	0,38

Vrednosti iz tablice 8.1 su dobijene analizom rezultata izmerenih na televizijskim tornjevima na brdu Monte San - Salvatore od strane profesora Bergera.

Dvojna raspodela parametara atmosferskih pražnjenja se pokazuje kao vrlo pogodna za detaljnije procene ugroženosti objekata od atmosferskih pražnjenja, mada se parametri raspodele moraju stalno korigovati u skladu sa novim rezultatima merenja od strane raznih autora.

Integraljenje se može izvršiti numeričkim postupkom podelom krive opasnih parametara na segmente, kao na slici 8.8.

Podelom krive opasnih parametara na linearne segmente dobijene su podoblasti opasnih parametara $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$. Za svaku podoblast moguće je odrediti rešenje integrala 8.18. Numeričko izračunavanje integrala 8.18 za sve podoblasti se sprovodi primenom metode trapeznog pravila.

Verovatnoća atmosferskog pražnjenja sa parametrima u oblasti D_i iznad krive opasnih parametara, za zakon raspodele amplitude i strmine struje dat logaritamsko-normalnom raspodelom je:

$$P_{D_i} = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \int_{x(y)}^{\infty} \omega(x, y) dx dy \quad (8.22)$$

Transformacijom izraza u eksponentu u relaciji 8.19 dobija se sledeći izraz za gustinu raspodele $\omega(x, y)$:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{y^2}{2}} e^{-\frac{(x-\rho y)^2}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.23)$$

Može se uvesti nova promenljiva z definisana na sledeći način:

$$z = \frac{x - \rho y}{\sqrt{1 - \rho^2}} \quad (8.24)$$

Uvođenjem nove promenljive gustina raspodele slučajnih veličina y i z može se izraziti u sledećem obliku:

$$\omega(y, z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{y^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (8.25)$$

Sada se integraljenje u podoblasti D_i iznad krive opasnih parametara može izvršiti razdvajanjem podintegralne funkcije na dve nezavisne funkcije, odnosno:

$$P_{D_i} = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \omega(y) \int_{z(x,y)}^{\infty} \omega(z) dz dy. \quad (8.26)$$

gde su:

$$\omega(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (8.27)$$

$$\omega(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (8.28)$$

Sada se prvi integral u izrazu 8.26 može rešiti trapeznim pravilom, odnosno:

$$P_{D_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2\sqrt{2\pi}} \{e^{-\frac{y_i^2}{2}} \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) dz + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} \int_{z(y_{i+1}, x)}^{\infty} \omega(z) dz\} \quad (8.29)$$

Posle analitičkog izračunavanja integrala i povratka na promenljive x i y se dobija:

$$P_{D_i} = \frac{\Delta y}{2\sqrt{2\pi}} \{e^{-\frac{y_i^2}{2}} Q(\frac{x_i - \rho y_i}{\sqrt{1 - \rho^2}}) + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} Q(\frac{x_{i+1} - \rho y_{i+1}}{\sqrt{1 - \rho^2}})\} \quad (8.30)$$

U izrazu 8.30 funkcija $Q(z)$ ima sledeće značenje:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8.31)$$

odnosno:

$$Q(z) = 0,5 - \Phi(z) \quad (8.32)$$

gde je $\Phi(z)$ Laplasova funkcija ili **funkcija greške** definisana na sledeći način:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8.33)$$

Rizik pojavljivanja opasnih parametara u oblasti D_1 određuje se smatrajući da struje strmine manje od S_1 ne mogu da prouzrokuju kvar izolacije, što može da utiče na smanjenje vrednosti rizika pri proračunu. Stoga je amplituda struje $I_1 = \infty$, pa je verovatnoća pojavljivanja ove struje jednaka nuli.

Rizik pojavljivanja opasnih parametara u poslednjoj oblasti D_n se može zanemariti zato što je verovatnoća pojava strmina talas od maksimalne strmine S_{max} zanemarljiva.

Ukupna verovatnoća kvara izolacije dobija se sumiranjem pojedinačnih verovatnoća po podoblastima:

$$P = \sum_{i=1}^n P_{D_i} \quad (8.34)$$

Broj P predstavlja verovatnoću da će pri jednom udaru groma u neku tačku na vodu napon na posmatranoj izolaciji prevazići podnosivi udarni napon izolacije U_{iz} .

Obično je dovoljno proračun izvršiti sa 15 do 20 strmina struja atmosferskih pražnjenja.

8.3 Elektrogeometrijski model kod atmosferskog udara

Osnovna pretpostavka u elektrogeometrijskom modelu je da je dužina poslednjeg skoka skokovitog lidera srazmerna amplitudi struje pražnjenja. Naime, neposredno pre poslednjeg skoka se javljaju uzlazni strimeri sa objekata na zemlji i silazni strimeri iz glave skokovitog lidera. Njihovim razvojem stvara se povezni lider koji obrazuje kanal glavnog pražnjenja. Ukoliko je električno polje izazvano prisustvom glave skokovitog lidera dovoljno jako, doći će do spajanja silaznih i uzlaznih strimera i obrazovaće se glavno pražnjenje. Ako polje nije dovoljno jako, tada će skokoviti lider imati još jedan skok u slobodan prostor, pre finalnog skoka do objekta na zemlji. Maksimalno rastojanje koje skokoviti lider može da pređe u svom poslednjem skoku naziva se **udarnim rastojanjem** i obeležava sa $R_u(m)$. Očigledno je da dužina udarnog rastojanja zavisi od električnog polja usled prisustva glave skokovitog lidera u blizini objekata na zemlji. Intenzitet električnog polja je srazmeran količini elektriciteta koju nosi kanal skokovitog lidera, a očekivana amplituda struje pražnjenja takođe zavisi od količine naelektrisanja u kanalu skokovitog lidera. U [52] je predložen sledeći izraz koji daje vezu između napona glave skokovitog lidera neposredno pred zadnji skok $V_l(MV)$ i amplitude struje glavnog pražnjenja u idealno uzemljen objekat $I_o(kA)$:

$$V_l = 3,7 \cdot I_o^{2/3} \quad (8.35)$$

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja izolacionih razmaka sklopnim naponima, za koje se smatra da su po obliku slični naponima između glave skokovitog lidera i zemlje pre poslednjeg skoka, došlo se u [52] do izraza:

$$R_u = 1,4 \cdot V_l^{1,2} \quad (8.36)$$

Zamenom se dobija opšti izraz za udarno rastojanje u funkciji amplitude struje glavnog pražnjenja:

$$R_u = k \cdot I_o^n \quad (8.37)$$

gde su k i n empirijske konstante koje prema [52] imaju vrednost $k = 6,72$, a $n = 0,8$. Razni autori su davali različite empirijske vrednosti za konstante k i n . Vrednost konstante k se kreće od 6 do 10, a n od 0,65 do 0,8. U [53] se predlaže izraz za udarno rastojanje koji zavisi od visine voda, što uzima u obzir uticaj intenziteta električnog polja na provodnicima i zaštitnom užetu na proces poslednjeg skoka. Na osnovu većeg broja fotografija atmosferskih pražnjenja i simultanog snimanja struja empirijski se došlo do numeričkih podataka o konstantama koje definišu udarno rastojanje.

Generalni izraz za udarno rastojanje za istaknute objekte (stubove, gromobranske štapove, tornjeve), ima sledeći oblik:

$$R_u = I_o^{0.64} \cdot H^{(0.66+2 \cdot I_o \cdot 10^{-4})} \quad (8.38)$$

gde su:

H —visina objekta,

I_o —očekivana struja groma u dobro uzemljeni objekat.

Izraz 8.38 važi za objekte visine do 500 m i za struje atmosferskih pražnjenja do 200 kA.

Za praktičnu primenu za objekte čija je visina u opsegu 10 m do 60 m prema [53], može se koristiti pojednostavljeni izraz:

$$R_u = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I_o^{0,74} \quad (8.39)$$

Izraz 8.39 se odnosi na istaknute objekte. Fazni provodnici i zaštitna užad predstavljaju horizontalne cilindrične objekte za koje je raspodela električnog polja drugačija nego kod istaknutih objekata. Na osnovu laboratorijskih istraživanja opisanih u [66] se uvodi za horizontalne provodnike smanjenje udarnog rastojanja na 80 % od udarnog rastojanja istaknutih objekata. Posle uvođenja ove korekcije izraz za udarno rastojanje faznih provodnika i zaštitnog užeta ima oblik:

$$R_u = 0,67 \cdot H^{0,6} \cdot I_o^{0,74} \quad (8.40)$$

Obično se usvajaju identična udarna rastojanja za fazne provodnike i za zaštitnu užad, mada ima autora koji uvode izvesne razlike u udarnim rastojanjima zbog većeg intenziteta električnog polja na zaštitnim užadima zbog njihovog manjeg preseka. Usvajanjem identičnih udarnih rastojanja za fazne provodnike i zaštitnu užad se dobijaju kritičniji rezultati.

Ukoliko je dalekovod okružen drvećem ili drugim objektima na kojima može doći do pojačavanja intenziteta polja, tada ti objekti ekraniraju vod i smanjuje se atraktivna zona voda, dok okolni objekti imaju svoju atraktivnu zonu.

Za primenu elektroteometrijskog modela važno je poznavanje udarnog rastojanja od glave skokovitog lidera do zemlje. Obično se usvajaju nešto manje vrednosti udarnog rastojanja prema ravnoj površini zemlje u odnosu na sistem faznih provodnika ili zaštitnu užad:

$$R_z = k_z \cdot R_u \quad (8.41)$$

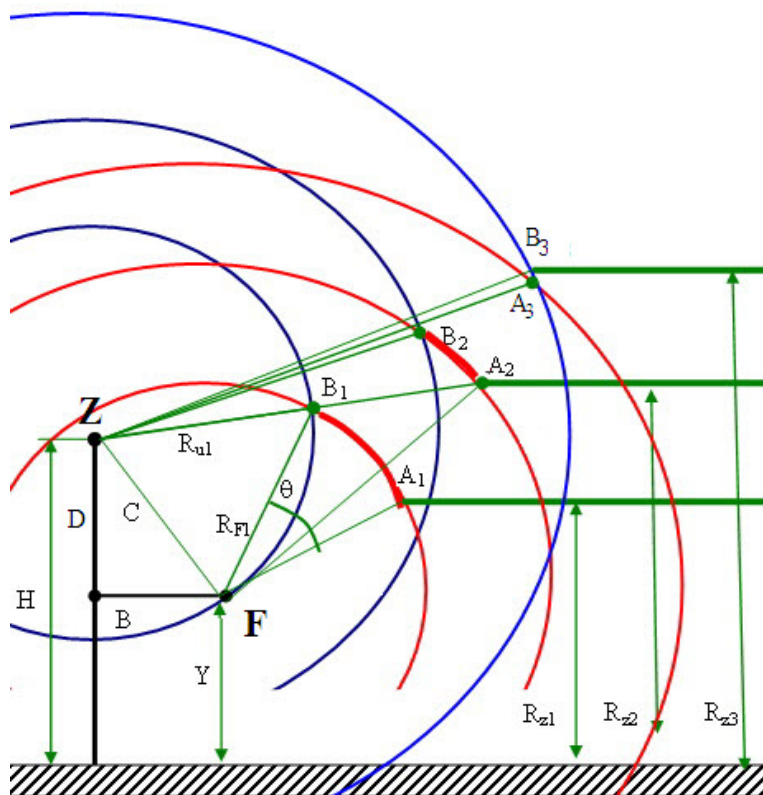
gde su:

R_z —udarno rastojanje prema zemlji u m,

$k_z = 0,64 \div 1$ —korekcija udarnog rastojanja prema zemlji.

Na slici 8.9 prikazana je dispozicija dalekovodnog stuba za koji se određuje zaštitna zona zaštitnog užeta za slučaj voda sa jednim, odnosno za slučaj spoljašnjeg provodnika voda sa dva zaštitna užeta.

Oznake na slici 8.9 imaju sledeće značenje:



Slika 8.9: Geometrija stuba za objašnjenje elektro-geometrijskog modela

H – efektivna visina zaštitnog užeta,

Y – efektivna visina faznog provodnika,

F – fazni provodnik,

Z – zaštitno uže,

R_{u1} – udarno rastojanje do faznog provodnika, odnosno zaštitnog užeta za slučaj amplitude struje pražnjenja I_{o1} ,

R_{z1} – udarno rastojanje do zemlje za slučaj amplitude struje pražnjenja I_{o1} ,

C – rastojanje između zaštitnog užeta i faznog provodnika,

B – horizontalna projekcija rastojanja faznog provodnika od zaštitnog užeta,

D –vertikalna projekcija rastojanja faznog provodnika od zaštitnog užeta.

Tačke A_1, A_2 i A_3 definisane su presekom kruga sa centrom u tački F u centru faznog provodnika i poluprečnika koji je jednak udarnom rastojanju za odgovarajuće amplitude

struje I_{o1} , I_{o2} i I_{o3} sa horizontalnom pravom na visini koja je jednaka udarnom rastojanju prema zemlji za odgovarajuću amplitudu struje.

Tačke B_1, B_2 i B_3 definisane su presekom kruga sa centrom u tački F u centru faznog provodnika, poluprečnika koji je jednak udarnom rastojanju za odgovarajuće amplitude struje I_{o1} , I_{o2} i I_{o3} sa krugom u centru zaštitnog užeta u tački Z , poluprečnika koji je jednak udarnom rastojanju za iste amplitude struje.

Luk A_1B_1 predstavlja presek cilindrične površine sa koje se očekuje atmosfersko pražnjenje u fazni provodnik pri struji groma I_{o1} . Svako atmosfersko pražnjenje čija je očekivana struja I_{o1} , a čija se glava skokovitog lidera nađe u kružnom isečku FA_1B_1 uvek dovodi do pražnjenja u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta.

Obično se šrafirana površina definisana lukom A_1B_1 naziva izloženom površinom faznog provodnika za amplitudu struje pražnjenja I_{o1} . Za amplitudu struje pražnjenja I_{o2} koja je veća od I_{o1} izložena površina faznog provodnika definisana je kraćim lukom A_2B_2 , a za još veću struju I_{o3} definisana je još manjim lukom A_3B_3 .

Na osnovu slike 8.9 se može zaključiti da sa povećanjem amplitude struje pražnjenja izložena površina označena šrafiranim lukom postaje sve manja i manja. To znači da postoji granična amplituda struje pražnjenja preko koje je izložena površina faznog provodnika jednaka nuli, što znači da je udar u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta pri toj i većim amplitudama struja nemoguć.

Efektivne visine zaštitnog užeta i faznog provodnika koje uvažavaju uticaj ugiba duž raspona se izračunavaju prema tablici 8.3. Oznake u tablici 8.3 imaju sledeće značenje:

Tabela 8.2: Efektivne visine zaštitnog užeta i faznog provodnika u zavisnosti od reljefa terena

Vrsta terena	Efektivna visina zaštitnog užeta	Efektivna visina faznog provodnika
Ravno tlo	$H = H_{max} - 2/3f_u$	$Y = Y_{max} - 2/3f_p$
Valovito tlo	$H = H_{max}$	$Y = Y_{max}$
Brdovito tlo	$H = H_{max} - 2/3f_u + 2/3f_z$	$Y = Y_{max} - 2/3f_p + 2/3f_z$

H_{max} —maksimalna visina zaštitnog užeta na mestu vešanja na stubu,

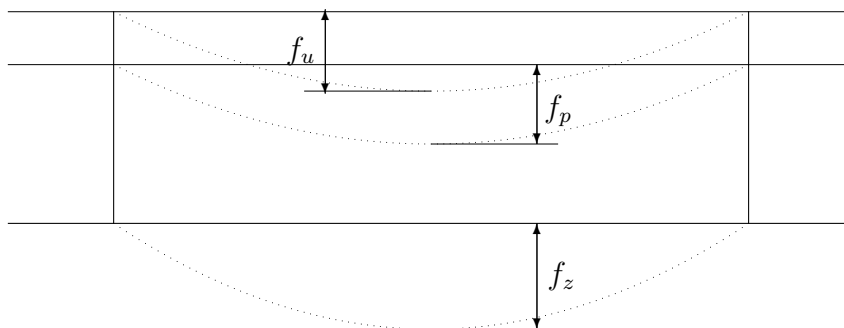
Y_{max} —maksimalna visina faznog provodnika na mestu vešanja na stubu,

f_u —ugib zaštitnog užeta,

f_p —ugib faznog provodnika,

f_z -ekvivalentni ugib zemlje koji uzima u obzir parametre terena.

Na slici 8.10 objašnjen je pojam ekvivalentnog ugiba zemlje. U slučaju ravničarskog



Slika 8.10: Objašnjenje ekvivalentnog ugiba zemlje f_z , ugiba faznog provodnika f_p i ugiba zaštitnog užeta f_u

terena horizontalna površina u odnosu na koji se računa ekvivalentna visina faznog i zaštitnog užeta poklapa se sa stvarnom površinom provodnika. U slučaju valovitog tla ekvivalentni ugib zemlje identičan je sa ugibom provodnika, odnosno zaštitnog užeta, tako da možemo da smatramo kao da fazni provodnik i zaštitno uže uopšte nemaju ugib u odnosu na zemlju, jer se ekvivalentni ugib zemlje, faznog provodnika i zaštitnog užeta međusobno kompenzuju. U slučaju brdovitog terena povećanje visine zbog udolina na zemlji je takvo da se mora uzeti u obzir ekvivalentni ugib zemlje, koji povećava efektivnu visinu provodnika i zaštitnog užeta.

8.4 Kriterijum preskoka na izolaciji voda

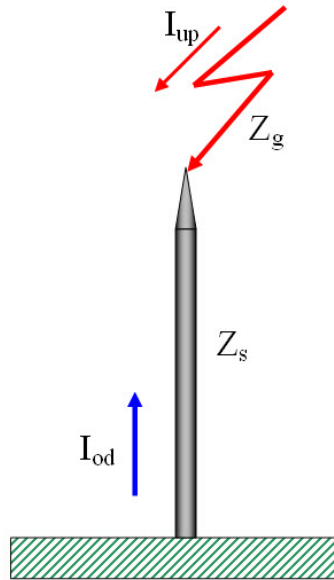
Po pojednostavljenom postupku procene ugroženosti faznog provodnika od pražnjenja mimo zaštitnog užeta, prvo se određuje minimalna struja atmosferskog pražnjenja koja može da izazove preskok na izolaciji na najbližem stubu.

Prilikom direktnog atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, struja koja se prostire po kanalu groma I_g se deli na dva dela koji se prostiru levo i desno od mesta udara. Pri tome amplituda naponskog talasa koji se prostire po faznom provodniku ima vrednost:

$$U = Z_g \frac{I_g}{2} \quad (8.42)$$

Umesto stvarne struje groma I_g po kanalu groma uvodi se pojam **očekivane struje groma u dobro uzemljeni objekat**. Očekivana struja groma u dobro uzemljeni objekat se dobija pri registraciji atmosferskih pražnjenja na uzemljenim stubovima i tornjevima, na kojima se vrši sistematsko praćenje parametara atmosferskih pražnjenja.

Ukupna struja po kanalu groma se može rastaviti na dve komponente struje. Jedna komponenta se kreće u vidu putujućeg talasa od oblaka ka objektu pražnjenja, a druga komponenta, koja se odbija od uzemljivača, kreće se ka oblaku. Ukupna struja se dobija superpozicijom, kao na slici 8.11.



Slika 8.11: Tumačenje određivanja struje groma u dobro uzemljene objekte

Smatra se da je karakteristična impedansa stuba Z_s po svojoj vrednosti bliska karakterističnoj impedansi kanala groma Z_g . U tom slučaju po kanalu groma dolazi upadni talas amplitude I_{up} koji se prostire bez izobličenja po stubu, dolazi do uzemljivača stuba i totalno se odbija, jer je otpor uzemljenja stuba mnogo manji nego karakteristična impedansa stuba (bar 20 puta). Zbog toga je ukupna amplituda struje groma u dobro uzemljeni objekat:

$$I_m = I_{up} + I_{od} \quad (8.43)$$

odnosno:

$$I_m \approx 2I_{up} \quad (8.44)$$

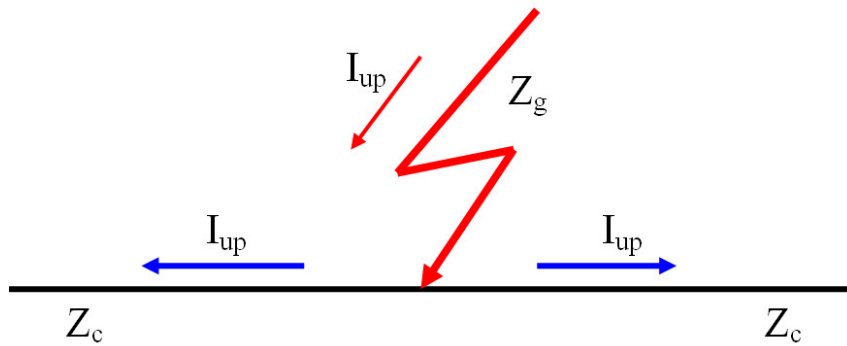
Ako je poznata amplituda struje I_m u dobro uzemljeni objekat, tada se može odrediti vrednost upadne komponente struje po kanalu groma:

$$I_{up} \approx \frac{I_m}{2} \quad (8.45)$$

Vidi se da je upadna komponenta struje približno jednaka polovini ukupne struje groma u dobro uzemljeni objekat.

Ako je do pražnjenja došlo u fazni provodnik, tada se može smatrati da je karakteristična impedansa kanala groma približno jednaka polovini karakteristične impedanse

faznog provodnika. Od mesta udara groma protežu se fazni provodnici na obe strane, pa strujni talas nailazi na ekvivalentan fazni provodnik čija je karakteristična impedansa jednaka polovini karakteristične impedanse faznog provodnika. Zbog približno iste karakteristične impedanse kanala groma i ekvivalentnog faznog provodnika, od tačke udara groma ne dolazi do refleksije strujnog talasa jer je koeficijent odbijanja jednak nuli. Struja groma se deli na dve grane, prema slici 8.12.



Slika 8.12: Tumačenje određivanja amplitude strujnog talasa kod udara u fazni provodnik

Po faznim provodnicima se prostire strujni talas čija je amplituda:

$$I_f = \frac{I_{up}}{2} = \frac{I_m}{4} \quad (8.46)$$

Vidi se da se po faznim provodnicima prostire talas čija je amplituda jednaka četvrtini amplitude struje u dobro uzemljeni objekat. Prenaponski talas koji nastaje na faznim provodnicima ima amplitudu:

$$U_f = Z_c I_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (8.47)$$

Pri prostiranju ovoga talasa duž voda dolazi do njegovog prigušenja i izobličenja usled gubitaka na vodu i na povratnom putu kroz zemlju i usled korone. Ovaj talas može da izazove preskok prema konzoli stuba ukoliko vrednost prenapona premaši vrednost preskočnog napona izolacije na stubu. Minimalna (granična) struja groma koja izaziva prenapon koji premašuje udarni podnosivi napon izolacije U_{iz} je:

$$I_{gran} \geq \frac{4U_{pod}}{Z_c} \quad (8.48)$$

Ova vrednost napona treba da bude veća ili jednaka (granična vrednost) od podnosivog napona izolacije, odnosno $U_f > U_{pod}$ da bi došlo do preskoka. Odatle se može odrediti granična struja groma I_{gran} koja izaziva napon jednak podnosivom naponu izolacije.

$$I_{gran} = \frac{4 \cdot U_{pod}}{Z_c} \quad (8.49)$$

Za izračunatu graničnu struju pražnjenja se određuje granično udarno rastojanje:

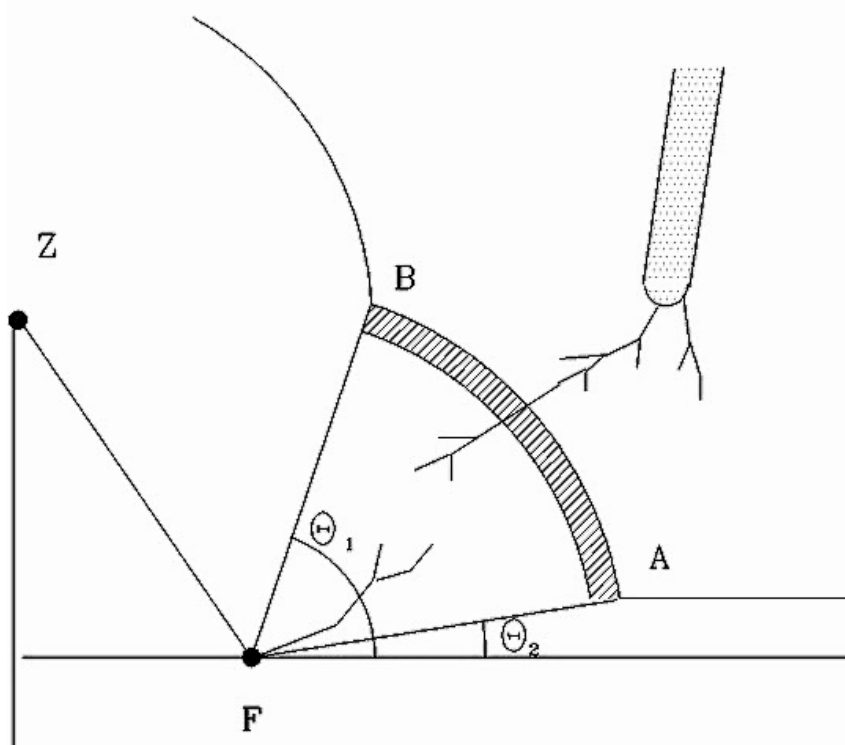
$$R_{gran} = kI_{gran}^n \quad (8.50)$$

Kada se nacrtaju izložene površine faznog provodnika i zaštitnog užeta sa poluprečnikom R_{gran} , kao i horizontalna površina na visini koja je jednaka graničnom udarnom rastojanju prema zemlji, može se videti ugroženost faznog provodnika od pražnjenja mimo užeta na osnovu dužine luka AB koji definiše izloženu površinu faznog provodnika za graničnu struju koja izaziva peskok.

8.4.1 Verovatnoća prodora groma mimo užeta

Bitno pojednostavljenje proračuna uz nešto kritičnije rezultate se dobija uvođenjem pretpostavke da do usmeravanja lidera dolazi neposredno pred poslednji skok.

Na slici 8.13 prikazan je skokoviti lider koji se zaustavio ispred izložene površine faznog provodnika, na rastojanju koje je veće od udarnog rastojanja. Sa vrha skokovitog lidera kreću strimeri. Oni su najintenzivniji upravo u pravcu izložene površine faznog provodnika, tako da sa najvećom verovatnoćom dolazi do razvoja pražnjenja upravo u tom pravcu.



Slika 8.13: Hipoteza o usmeravanju lidera pred izloženom površinom

U ovom slučaju upadni ugao lidera poklapa se sa uglom potega od centra faznog provodnika do tačke na izloženoj površini kroz koju prodire lider.

U ovom slučaju broj pražnjenja u izloženu površinu se dobija na osnovu sledećeg izraza:

$$N = N_G R \int_{\Theta_2}^{\Theta_1} d\Theta = N_G R (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (8.51)$$

U ovom slučaju broj pražnjenja je srazmeran samo veličini luka $\widehat{AB}$ koji definiše izloženu površinu faznog provodnika, dok je uticaj upadnih uglova potpuno zanemaren, a gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje se izjednačava sa gustinom pražnjenja u pravcu normale na izloženu površinu. R predstavlja udarno rastojanje za određenu struju pražnjenja, a N_G je godišnja gustina pražnjenja po km².

Ovakav pojednostavljeni pristup daje nešto veći broj pražnjenja od tačnijeg modela koji uvažava upadne uglove lidera.

Pod verovatnoćom prodora groma mimo zaštitnog užeta se podrazumeva odnos broja pražnjenja u fazni provodnik u prisustvu zaštitnog užeta i broja pražnjenja bez zaštitnog užeta.

$$P = \frac{N_u}{N_{bu}} \quad (8.52)$$

gde su:

N_u —broj pražnjenja u fazni provodnik zaštićen užetom,

N_{bu} —broj pražnjenja u fazni provodnik bez zaštitnog užeta.

Na slici 8.14 prikazan je bočni presek izložene površine faznog provodnika, zaštitnog užeta i površine zemlje. Pri tome je razmatran opšti slučaj kod koga postoji određeni nagib površine zemlje θ_z u odnosu na horizontalu. U tački A se nalazi presek izložene površine faznog provodnika i zaštitnog užeta, a u tački B presek izložene površine faznog provodnika i zemlje. Ugao θ_1 definiše ugao potega od centra faznog provodnika do gornje granice izložene površine faznog provodnika u tački B . Ugao θ_2 definiše ugao potega od centra faznog provodnika do donje granice izložene površine faznog provodnika u tački A .

Uglovi θ_1 i θ_2 određuju veličinu izložene površine faznog provodnika. Ovi uglovi se mogu odrediti iz geometrijskih odnosa:

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad (8.53)$$

gde su:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c}{2R_u}\right) \quad (8.54)$$

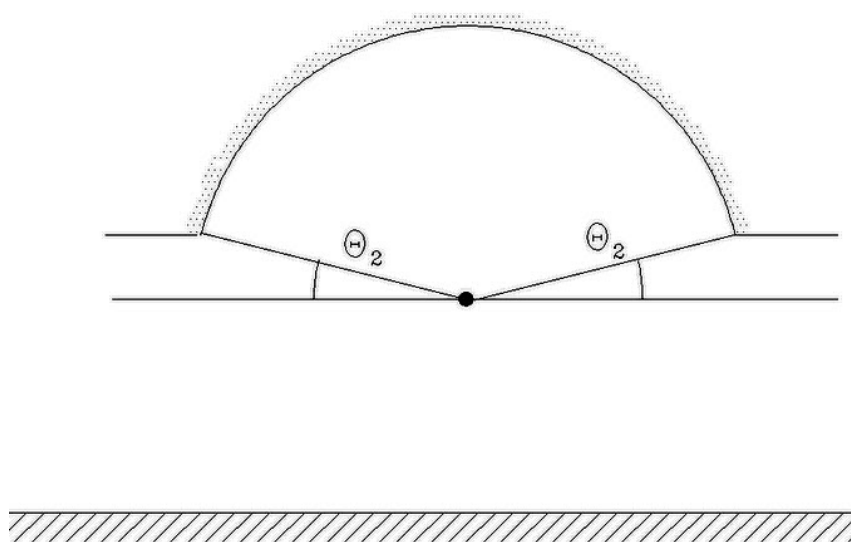
odnosno

$$x = \frac{\theta_1}{\pi} \text{ za } \theta_2 > 0 \quad (8.59)$$

Stepen izloženosti faznog provodnika predstavlja odnos izložene površine faznog provodnika u prisustvu zaštitnog užeta i izložene površine faznog provodnika bez zaštitnog užeta.

Na slici 8.15 prikazana je izložena površina faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta.

Atraktivna površina faznog provodnika



Slika 8.15: Izložena površina faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta

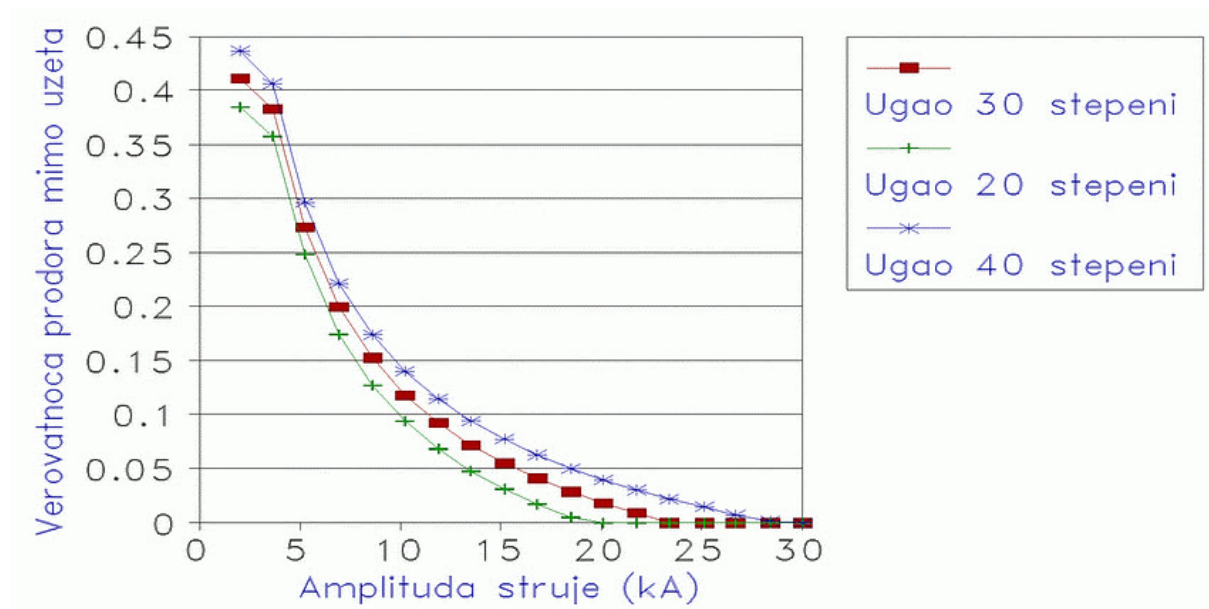
U posmatranom modelu su uzete sledeće aproksimacije:

- Pri definisanju izložene površine faznog provodnika nije uziman u obzir uticaj susednih faznih provodnika, koji jednim delom ekraniraju posmatrani provodnik,
- Usvojeno je da se skokoviti lider uvek približava normalno na izloženu površinu, mada se on može približavati pod različitim uglovima. Na ovaj način se dobija nešto veća verovatnoća prodora mimo zaštitnog užeta nego kada se uzima slučajan ugao približavanja skokovitog lidera.
- Teorijski je moguće da udarno rastojanje ispunjava uslov $R_u \leq c/2$, gde je c rastojanje između faznog provodnika i zaštitnog užeta. U ovom slučaju fazni provodnik nije zaštićen. U praksi se ovakav slučaj ne može pojaviti jer su udarna rastojanja uvek znatno veća.

Ukoliko je ispunjen uslov da je stepen izloženosti faznog provodnika $x \leq 0$, to znači da je dalekovod apsolutno zaštićen. U tom slučaju se proglašava da je $x = 0$. Koeficijent izloženosti zavisi od amplitude struje groma i smanjuje se sa povećanjem amplitude. Smatra se da je fazni provodnik potpuno izložen kada je $x = 1$.

Za ilustraciju elektrogeometrijske metode izvršena je analiza uticaja promene zaštitnog ugla i visine stuba na verovatnoću prodora pražnjenja različitih amplituda struja. Amplitude struje pražnjenja su varirane od 2 kA do 30 kA i određivana je verovatnoća prodora groma za svaku od tih struja.

Na slici 8.16 prikazana je zavisnost verovatnoće prodora groma mimo zaštitnog užeta u funkciji amplitude struje. Efektivna visina zaštitnog užeta je $H = 40 \text{ m}$, a efektivna visina faznog provodnika je $Y = 34 \text{ m}$. Zaštitni ugao je variran po sledećim koracima: $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 40^\circ$.



Slika 8.16: Verovatnoća prodora groma za zaštitne uglove od $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 40^\circ$

Za određivanje rizika kvara izolacije usled atmosferskih pražnjenja mimo zaštitnog užeta primenjuje se sledeći izraz:

$$R = \int_D \omega(I, I') x(I) dI \quad (8.60)$$

gde su:

$\omega(I, I')$ – gustina raspodele amplitude i strmine struje groma,

$x(I)$ - koeficijent izloženosti pri amplitudi struje groma I ,

D – oblast opasnih parametara (amplitude i strmine struje groma).

Na ovaj način koeficijent izloženosti utiče na smanjenje verovatnoće pražnjenja mimo zaštitnog užeta, a samim tim i na smanjenje rizika kvara izolacije usled pražnjenja mimo užeta.

8.4.2 Procena verovatnoće pražnjenja mimo zaštitnog užeta

Pri modelovanju prodora groma mimo zaštitnog užeta način modelovanja upadnog ugla lidera u zadnjem skoku prema faznom provodniku može da ima izvesnog uticaja na rezultate.

a) Skokoviti lider prilazi faznom provodniku pod slučajnim uglom

Model sa slučajnim upadnim uglom skokovitog lidera predstavlja najsloženiji model, na osnovu kojeg se mogu izvesti jednostavniji. Neka je upadni ugao lidera prema vertikali obeležen uglom ψ . Ako je poznata godišnja gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje N_G , tada je broj pražnjenja dN_ψ u elementarnu površinu dA_ψ koja je pod uglom ψ nagnuta u odnosu na horizontalnu ravan zemlje, prema slici 8.17:

$$dN_\psi = \frac{N_G dA_\psi}{\cos \psi} \quad (8.61)$$

gde su:

dA_ψ – elementarna nagnuta površina,

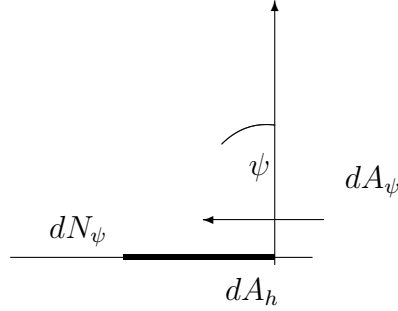
dA_h – horizontalna površina zemlje u koju bi bio isti broj pražnjenja pod upadnim uglom ψ kao u nagnutu elementarnu površinu dA_ψ .

Upadni ugao lidera na izloženu površinu objekta je slučajna veličina koja može biti opisana nekom gustinom raspodele $g(\psi)$. U [52, 53] se preporučuje zakon raspodele u obliku trigonometrijske funkcije sledećeg oblika:

$$g(\psi) = K_m \cos^m(\psi) \quad (8.62)$$

gde je m empirijski eksponent, a K_m se određuje tako da bude ispunjen uslov:

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} K_m \cos^m(\psi) d\psi = 1 \quad (8.63)$$



Slika 8.17: Skica elementarne površine u koju se odvija pražnjenje

jer se smatra da upadni ugao lidera mora biti u opsegu:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (8.64)$$

Na taj način se dobija konstanta K_m :

$$K_m = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^m(\psi) d\psi} \quad (8.65)$$

Verovatnoća da će upadni ugao lidera biti u opsegu $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$ data je izrazom:

$$P_{\psi_1}^{\psi_2} = \int_{\psi_1}^{\psi_2} K_m \cos^m(\psi) d\psi \quad (8.66)$$

Autori u [52, 53] predlažu da koeficijent m bude između 1 i 2. Do ovog zaključka se došlo na osnovu studije u kojoj je praćen broj pražnjenja mimo užeta.

U tablici 8.3 date su celobrojne vrednosti za koeficijent m i odgovarajuće konstante K_m koje su od praktičnog interesa.

U tablici 8.3 oznaka $\delta(\psi)$ ima sledeće značenje:

$$\delta(\psi) = \begin{cases} \infty & \text{ako je } \psi = 0 \\ 0 & \text{ako je } \psi \neq 0 \end{cases} \quad (8.67)$$

Pojedini slučajevi u tablici imaju sledeće značenje:

1. Ravnomerna raspodela upadnih uglova,
2. Kosinusna raspodela upadnih uglova,
3. Kvadratna kosinusna raspodela upadnih uglova,
4. Vertikalni udari $\psi = 0$.

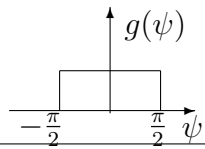
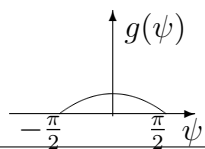
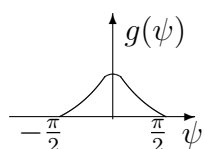
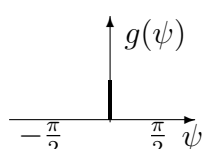
1	$m = 0$	$K_m = \frac{1}{\pi}$	$g(\psi) = \frac{1}{\pi}$	
2	$m = 1$	$K_m = \frac{1}{2}$	$g(\psi) = \frac{1}{2} \cos \psi$	
3	$m = 2$	$K_m = \frac{2}{\pi}$	$g(\psi) = \frac{1}{\pi} \cos^2 \psi$	
4	$m = \infty$	$K_m \rightarrow \infty$	$g(\psi) = \delta(\psi)$	

Tabela 8.3: Vrednosti parametara raspodele upadnih uglova lidera

Na slici 8.18 prikazana je izložena površina jednog faznog provodnika definisana uglovima Θ_1 i Θ_2 prema horizontali i udarnim rastojanjem R .

Na slici 8.19 prikazana je uvećana elementarna izložena površina dA_Θ definisana uglom $d\Theta$.

Oznake na slikama 8.18 i 8.19 imaju sledeće značenje:

Θ_1 i Θ_2 —Uglovi koji definišu izloženu površinu,

Θ —proizvoljan ugao ($\Theta_2 \leq \Theta \leq \Theta_1$) za koji se definiše elementarna izložena površina,

R —udarno rastojanje,

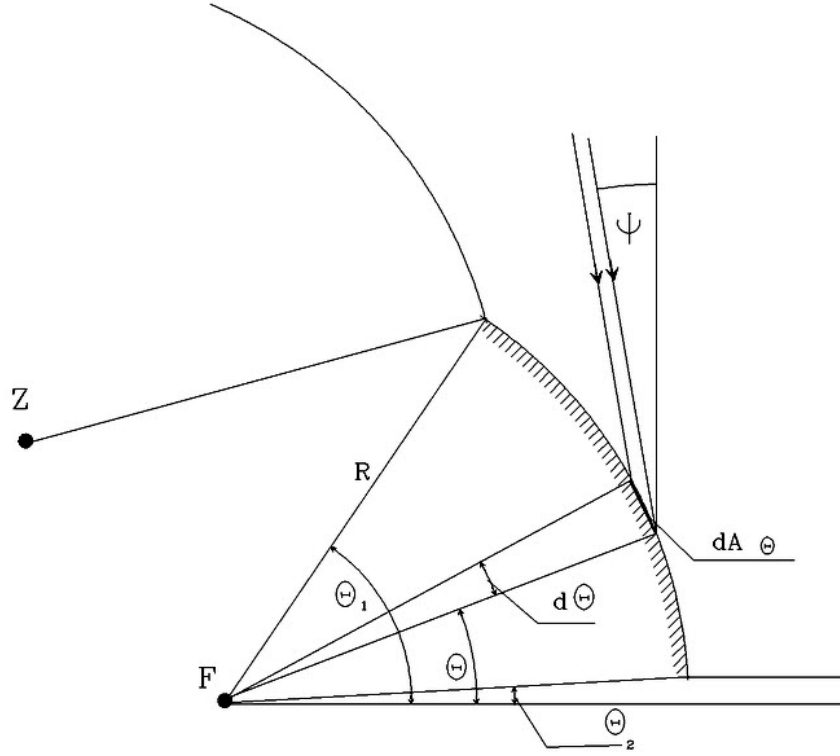
ψ —upadni ugao lidera u odnosu na vertikalu.

Elementarna podužna izložena površina faznog provodnika definisana je centralnim uglom $d\Theta$:

$$dA_\Theta = R d\Theta \quad (8.68)$$

Elementarna podužna izložena površina koja je normalna na pravac nailaska skokovitog lidera obeležena je sa dA_ψ :

$$dA_\psi = dA_\Theta \sin(\Theta - \psi) \quad (8.69)$$



Slika 8.18: Uvažavanje upadnog ugla lidera u poslednjem skoku

Godišnji broj pražnjenja u elementarnu površinu dA_ψ u funkciji godišnje gustine pražnjenja N_G je:

$$dN_\psi = N_G \frac{dA_\psi}{\cos \psi} \quad (8.70)$$

Posle zamene 8.69 i 8.68 u 8.70 se dobija:

$$dN_\psi = N_G \frac{R \sin(\Theta - \psi) d\Theta}{\cos \psi} \quad (8.71)$$

Znajući da je verovatnoća pražnjenja groma u elementarnom opsegu uglova $d\psi$ prema vertikali data izrazom:

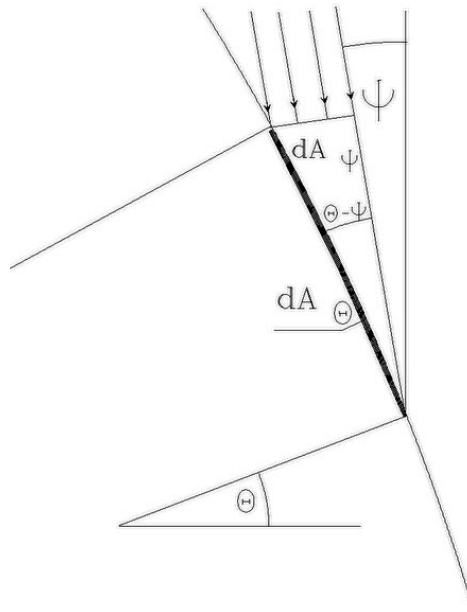
$$P(\psi) = g(\psi) d\psi \quad (8.72)$$

dobija se ukupan broj pražnjenja za sve upadne uglove iz opsega $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$:

$$dN = N_G \left\{ \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi \right\} R d\Theta \quad (8.73)$$

Ukupan broj pražnjenja za celu izloženu površinu se dobija integraljenjem od graničnih uglova Θ_2 do Θ_1 , odnosno:

$$N = N_G R \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi d\Theta \quad (8.74)$$



Slika 8.19: Uvećan detalj elementarne izložene površine

Granični upadni uglovi lidera u poslednjem skoku ψ_1 i ψ_2 zavise od centralnog ugla Θ . Ukoliko bi fazni provodnik bio usamljen u prostoru, ovi uglovi bi imali vrednosti $\psi_1 = \pi/2$ i $\psi_2 = -\pi/2$. To znači da ne postoje silazni skokoviti lideri koji bi se u zadnjem skoku usmeravali naviše. Granični upadni ugao ψ_2 ima uvek vrednost $-\pi/2$, dok je granični upadni ugao ψ_1 potrebno odredjivati u funkciji ugla Θ kada postoji zaštitno uže. Pri tome se mogu razlikovati dva slučaja:

- Slučaj kada je centralni ugao $\Theta > \alpha$, gde je α zaštitni ugao dalekovoda,
- Slučaj kada je ugao $\Theta < \alpha$.

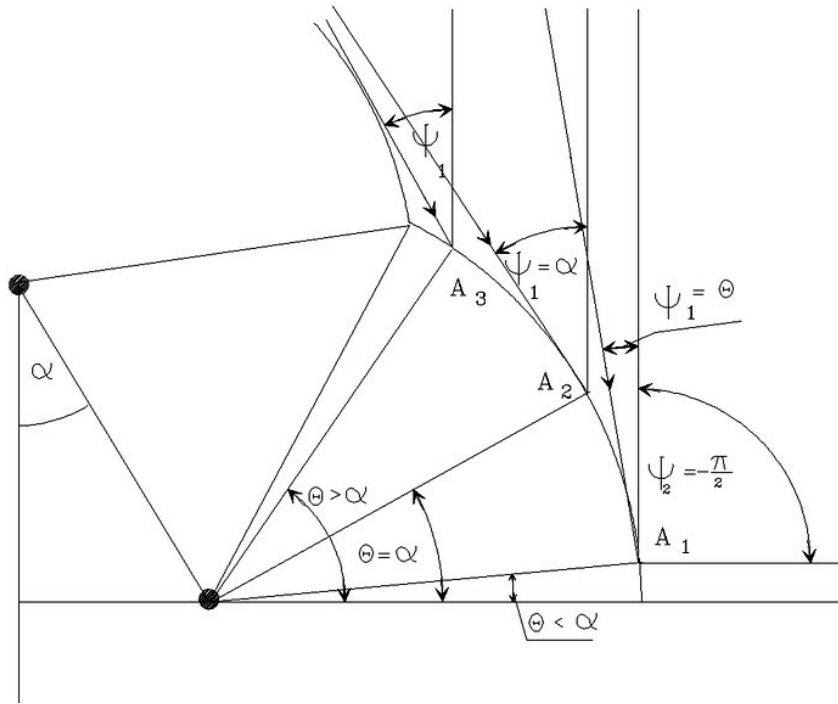
Na slici 8.20 prikazana su ova dva slučaja upadnih uglova, kao i granični slučaj kada je posmatrani centralni ugao Θ jednak zaštitnom uglu α .

Kada je $\Theta < \alpha$, lider se približava tački A_1 pod uglom $\psi = \Theta$. Ako bi se lider približavao pod većim uglom, on bi već ranije prošao kroz izloženu površinu faznog provodnika. Drugi granični ugao je uvek $\psi_2 = -\pi/2$ zbog pretpostavke da silazni lider ne može u poslednjem skoku da se kreće naviše.

Ako se lider približava pod takvim uglom da je $\theta > \alpha$, tada se odredjuje granični ugao ψ_2 na osnovu slike 8.21.

Sa slike se može videti da postoji sledeći odnos uglova:

$$\psi_1 + \beta_1 + \beta_2 - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (8.75)$$



Slika 8.20: Dva različita upadna ugla lidera i graničan slučaj

odakle se dobija:

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_1 - \beta_2 \quad (8.76)$$

gde su:

$$\beta_1 = \arctan \frac{X_3}{X_2} \quad (8.77)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{R}{\sqrt{X_1^2 - R^2}} \quad (8.78)$$

Duž X_1 se određuje na osnovu kosinusnog pravila za trougao ZFA :

$$X_1 = \sqrt{C^2 + R^2 - 2 R C \cos \gamma} \quad (8.79)$$

gde se ugao γ određuje iz relacije:

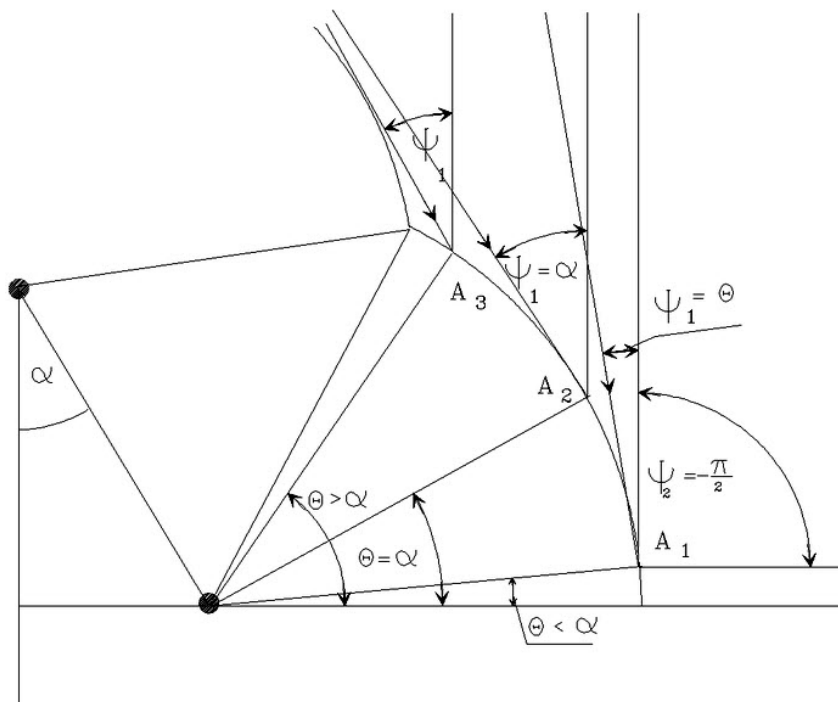
$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \Theta + \alpha \quad (8.80)$$

Duž X_2 se određuje na sledeći način:

$$X_2 = R \cos \gamma \quad (8.81)$$

Duž X_3 se određuje na sledeći način:

$$X_3 = C - R \cos \gamma \quad (8.82)$$

Slika 8.21: Odredjivanje graničnog ugla π_2 kada je $\Theta > \alpha$

Za sve upadne uglove lidera $\psi > \psi_1$ lider prvo preseca zonu izloženosti zaštitnog užeta, tako se pražnjenje odvija u zaštitno uže. Zato su jedino pražnjenja sa upadnim uglovima lidera $\psi \leq \psi_1$ opasna za fazni provodnik jer se glava lidera pred poslednji skok nalazi u prostoru ispod izložene površine faznog provodnika.

8.4.3 Uticaj mesta udara groma na rizik kvara izolacije

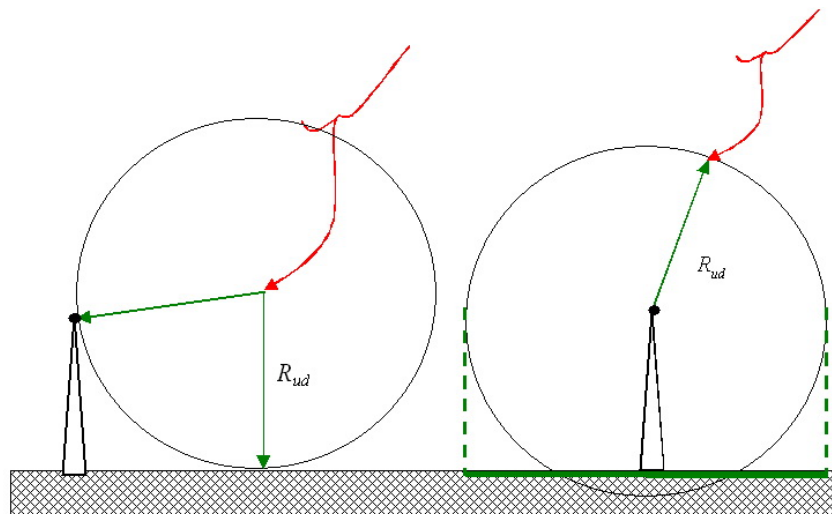
Broj pražnjenja u nadzemne vodove (incidencija pražnjenja)

U analizi broja preskoka na izolaciji nadzemnih vodova veoma veliki značaj ima godišnji broj pražnjenja u vod dužine 100 km. Ova veličina se određuje na bazi atraktivne zone voda (površina ravne zemlje ispod voda u koju bi se odvijala pražnjenja kada voda ne bi bilo). Postoje dva moguća pristupa proračunu atraktivne zone voda:

- strujno nezavisni pristup,
- strujno zavisni pristup.

Kod strujno nezavisnog pristupa se usvaja da je udarno rastojanje (rastojanje poslednjeg skoka skokovitog lidera pre konačnog udara u objekat na zemlji) zavisno jedino

od visine objekta. Na slici 8.22 objašnjen je pojam udarnog rastojanja. Na slici 8.22



Slika 8.22: Objašnjenje definicije atraktivne zone voda

levo prikazan je krug sa centrom u vrhu skokovitog lidera u trenutku pred poslednji skok. Poluprečnik kruga označen sa R_{ud} predstavlja rastojanje koje skokoviti lider može da pređe u poslednjem skoku. Ovo rastojanje se naziva udarnim rastojanjem i prema elektro-geometrijskom modelu opisanom u [43] može se izraziti u obliku:

$$R_{ud} = kI^a \quad (8.83)$$

gde su:

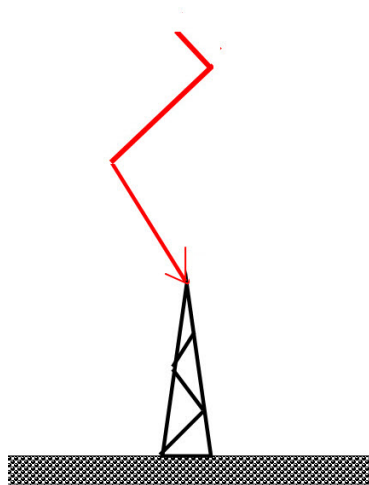
k i a –empirijske konstante. Vrednosti konstanti k i a su različite prema raznim autorima.

$I(kA)$ – očekivana struja pražnjenja, odnosno ona struja koja će se pojaviti nakon završetka poslednjeg skoka skokovitog lidera i uspostavljanja glavnog pražnjenja.

Na slici 8.22 (desno) objašnjeno je određivanje atraktivne zone voda. Umesto opisanje kružnice poluprečnika R_{ud} sa centrom u tački na vrhu skokovitog lidera neposredno pred poslednji skok, nacrtana je kružnica poluprečnika koji odgovara udarnom rastojanju R_{ud} sa centrom na mestu najvišeg provodnika voda (zaštitnog užeta ili najvišeg provodnika ako je vod bez zaštitnog užeta). Projekcija kružnice na ravnu zemljinu površinu ispod voda ima širinu $2 \cdot R_{ud}$ i predstavlja širinu atraktivne zone.

Na dužinu poslednjeg skoka, odnosno udarno rastojanje R_{ud} , pored intenziteta električnog polja koje deluje sa vrha skokovitog lidera usled količine elektriciteta unutar njegovog kanala, veliki uticaj ima i visina objekta na zemlji, sa kojeg se može pojaviti povezni

lider, čiji je značaj veći kod objekata veće visine. Smatra se da kod objekata preko 60 m postaje dominantniji uticaj uzlaznog lidera od silaznog, pa se češće javljaju uzlazna pražnjenja. Na slici 8.23 je objašnjen nastanak poveznog lidera.



Slika 8.23: Objašnjenje nastanka poveznog lidera

Izračunavanje udarnog rastojanja je detaljno objašnjeno u poglavlju 8.3.

Da bi se u inženjerskim proračunima pojednostavio postupak, izvršeno je određivanje udarnog rastojanja za srednju vrednost amplitude struje glavnog pražnjenja od 35 kA prema [13, 66]. Izračunavanje udarnog rastojanja urađeno je pomoću izraza 8.39. Na taj način je dobijen strujno nezavistan model udarnog rastojanja.

$$R_{ud} = 14 \cdot H^{0,6} \quad (8.84)$$

Ako se posmatra vod sa dva zaštitna užeta na međusobnom rastojanju b , atraktivna zona voda dužine d za atmosferska pražnjenja iznosi:

$$A_d = d \cdot (b + 2 \cdot R_{ud}) \times 10^{-3} \quad (8.85)$$

gde je b razmak između zaštitnih užadi izražen u [m], a A_d se izražava u km^2 .

Atraktivna površina voda dužine 1 km obeležena kao A_{1km} se izražava u km^2 . Atraktivna površina svedena na $d=100$ km voda iznosi:

$$A_{100km} = 0,1 \cdot (b + 2 \cdot R_{ud}) \quad (8.86)$$

Ukoliko je vod sa jednim zaštitnim užetom, tada je $b = 0$. Ukoliko je vod bez zaštitnih užadi, tada je b horizontalno rastojanje između najudaljenijih faznih provodnika.

Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja N_G za određenu teritoriju predstavlja godišnji broj pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje od 1 km^2 . Godišnja gustina pražnjenja se danas određuje pomoću sistema za lokaciju atmosferskih pražnjenja, koji se primenjuje i u našoj zemlji. Za područja za koje još ne postoje rezultati akvizicije podataka iz sistema za lokaciju atmosferskih pražnjenja, u upotrebi je izraz za određivanje godišnje gustine pražnjenja na osnovu godišnjeg broja grmljavinskih dana (kerauničkog nivoa T_d) prema [6, 67].

$$N_G = 0,04 \times T_d^{1,25} \quad (8.87)$$

Konačan izraz za broj atmosferskih pražnjenja u vod dužine 100 km u toku jedne godine je po strujno nezavisnom modelu:

$$N_{100\text{km},1\text{god}} = N_G \cdot A_{100\text{km},1\text{god}} \quad (8.88)$$

gde je:

$$A_{100\text{km},1\text{god}} = 0,1 \cdot (b + 28 \cdot H^{0,6}) \quad (8.89)$$

U slučaju strujno zavisnog modela izraz za godišnji broj udara u vod dužine 100 km ima oblik ima identičan oblik kao 8.88, ali se atraktivna zona voda računa po sledećem izrazu:

$$A_{100\text{km},1\text{god}} = 0,1 \cdot (b + 84 \cdot H^{0,6} I^{0,74}) \quad (8.90)$$

Na osnovu 8.88 može se odrediti godišnji broj pražnjenja na 100 km voda po strujno nezavisnom modelu, a po 8.90 po strujno zavisnom. Preporučuje se korišćenje strujno nezavisnog modela zbog bolje primenljivosti na širi dijapazon struja pražnjenja.

Obuhvatanje ugiba provodnika

U slučaju analize vodova sa dugačkim rasponima, ugib provodnika može da ima uticaj na godišnji broj pražnjenja u vod.

Efektivna visina voda je postupak koji je predložen prilikom uvođenja Elektrogeometrijskog modela [52]. Predloženi postupak je omogućavao približno uzimanje u obzir konfiguracije terena podelom terena na ravne, brdovite i planinske. Kod brdovitih i planinskih terena uziman je u obzir "ugib terena", odnosno visinu podnožja stuba u odnosu na najnižu tačku površine zemlje između stubova. Uobičajena praksa u procesu koordinacije izolacije je da se uzimaju srednji geometrijski parametri vodova u odnosu na ravnu

površinu zemlje. Efektivna visina voda se u tom slučaju izračunava na sledeći način:

$$H_{ef} = H - \frac{2}{3}f \quad (8.91)$$

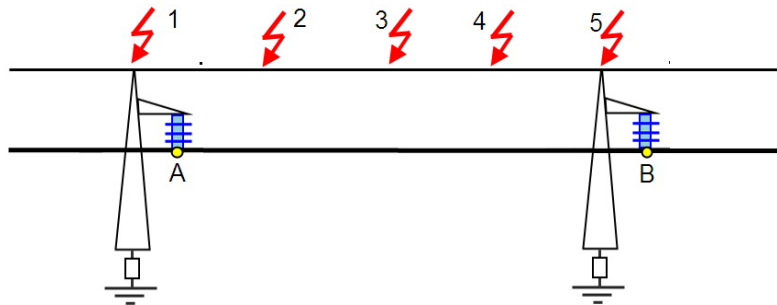
gde su:

H –visina vešanja najvišeg provodnika na stubu,

H_{ef} –efektivna visina provodnika pomoću koje se izračunava atraktivna zona voda,

f –maksimalni ugib provodnika na sredini raspona.

U dosadašnjoj praksi proračuna godišnjeg ispada vodova [43] raspon je deljen na n segmenata, od kojih se prvi i poslednji odnose na segmente neposredno uz stub, a ostali su na rasponu, kao na slici 8.24. Razmatraju se pražnjenja u vrh stuba ili u njegovu neposrednu blizinu, kao i na $n-2$ lokacije duž raspona i u stub na drugom kraju raspona. Iskustveno se došlo do optimalnog broja lokacija pražnjenja $n=5$. Zahvaljujući sistematskom variranju



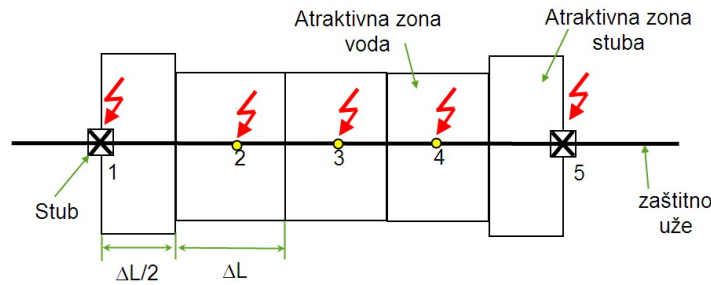
Slika 8.24: Variranje mesta atmosferskog udara u vod duž raspona

mesta udara duž raspona može se obuhvatiti smanjenje verovatnoće nastanka preskoka kada do udara dolazi na sredini raspona, jer oba stuba dele struju pražnjenja, u odnosu na slučaj kada do udara dolazi u stub ili u njegovu blizinu. Osnovna pretpostavka kod primenjene metode je da kada se jedan raspon podeli na $n - 1$ segmenata, tada se pretpostavlja da je verovatnoća preskoka konstantna bez obzira u kom delu segmenta dužine ΔL je došlo do udara. Na slici 8.25 prikazane su atraktivne zone pojedinih segmenata. Smatra se da je nešto veća verovatnoća pražnjenja u stub nego u raspon, pa se zato povećava za korekcionni faktor K_s atraktivna zona stuba u odnosu na raspon. Broj pražnjenja u segmente raspona dužine ΔL je:

$$N_{\Delta L,1\text{ god}} = N_G \cdot A_{\Delta L} \quad (8.92)$$

gde je:

$$A_{\Delta L} = \frac{\Delta L}{1000} \cdot (b + 28 \cdot H^{0,6}) \quad (8.93)$$



Slika 8.25: Uvođenje korekcije atraktivne zone usled dalekovodnih stubova

Usvojen je koeficijent korekcije atraktivne zone stuba $K_s = 1.2$. Posmatrana dužina segmenta uz stub je $0.5 \cdot \Delta L$, zbog toga što druga polovina segmenta pripada drugom rasponu. Atraktivna zona polovine segmenta raspona uz stub je:

$$A_{\Delta L/2} = 0,5 \cdot K_s \cdot \frac{\Delta L}{1000} \cdot (b + 28 \cdot H^{0,6}) \quad (8.94)$$

Tačan model ugiba na rasponu je uveden da bi se povećala tačnost proračuna atraktivne zone voda, uvažavajući promenu visine najvišeg provodnika duž raspona. Ovaj model nije toliko važan za određivanje ugroženosti vodova od atmosferskih pražnjenja, odnosno određivanje broja preskoka usled atmosferskih pražnjenja na 100 km voda, već kod analize ugroženosti opreme u postrojenjima. U nekim slučajevima je geometrija raspona od prvog stuba ispred transformatorske stanice do ulaznog portala takva da postoji velika razlika u visini stubova. Otpori uzemljenja prvog stuba voda i ulaznog portala takođe mogu da budu veoma različiti.

Fazni provodnici i zaštitna užad usled težine dobija oblik lančanice, koja se može matematički opisati jednačinom lančanice u sledećem obliku:

$$y = A_0 \cdot \cosh\left(\frac{x - C_1}{A_0}\right) + C_2 \quad (8.95)$$

gde su:

x – rastojanje posmatrane tačke na rasponu od leve tačke vešanja [m],

y – visina tačke na rasponu u odnosu na tlo [m],

A_0 – vrednost konstante koja se izračunava preko sledećeg izraza:

$$A_0 = \frac{d^2}{8 \cdot f} \quad (8.96)$$

C_1 i C_2 – Konstante koje se izračunavaju preko sledećih izraza:

$$C_1 = \frac{d - 2 \cdot A_0 \cdot \log(B + \sqrt{B^2 + 1})}{2} \quad (8.97)$$

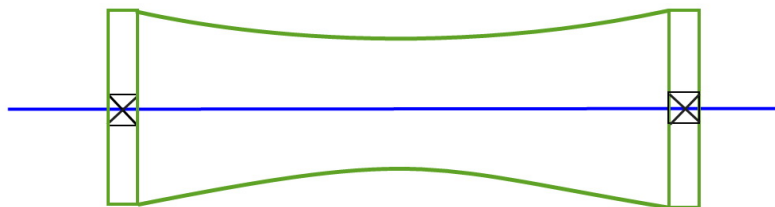
$$C_2 = H_1 - A_0 \cdot \cosh(B) \quad (8.98)$$

gde je:

$$B = \frac{H_1 - H_2}{2 \cdot A_0 \cdot \sinh(-\frac{d}{2 \cdot A_0})} \quad (8.99)$$

H_1 i H_2 –visina tačke vešanja užeta na početku i na kraju posmatranog raspona.

Na slici 8.26 prikazana je atraktivna zona voda kada se uzme u obzir uticaj ugiba provodnika, smatrajući da je atraktivna zona vrha stuba nešto veća nego atraktivna zona užeta na rasponu zbog geometrije stuba. Prilikom proračuna ugroženosti nadzemnog voda



Slika 8.26: Izgled atraktivne zone voda vodeći računa o uticaju ugiba provodnika

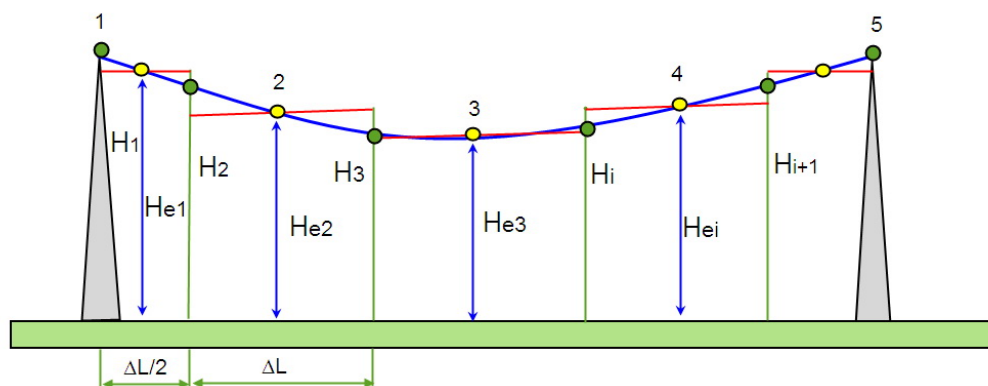
od atmosferskih prenapona lokacija atmosferskog pražnjenja se ne varira kontinualno duž raspona, već se proračun vrši za n diskretnih tačaka udara, kao na slici 8.25

Proračun se radi kao da se udar dogodio u sredinu segmenta dužine ΔL , smatrajući da je razlika u prenaponima mala ako se kvar dogodio bilo gde duž segmenta ΔL . Zbog toga se kompletan raspon deli na n segmenata i za svaki segment se određuje atraktivna zona, zanemarujući promenu visine provodnika duž segmenta ΔL , već modelujući visinu provodnika da se menja stepenasto, kao na slici 8.27.

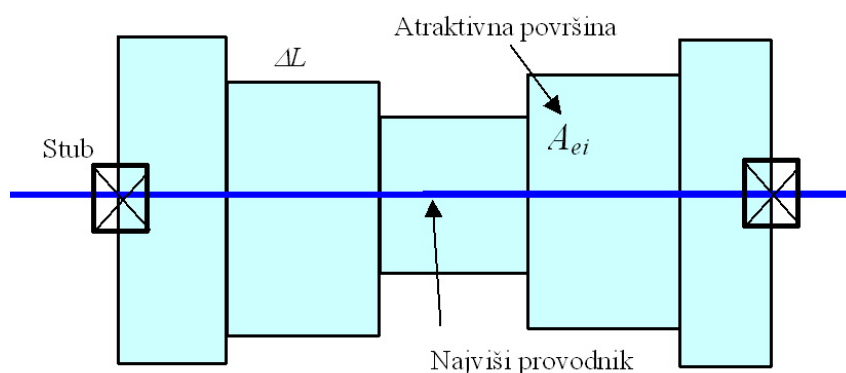
Srednja visina provodnika na segmentu raspona i se određuje kao aritmetička sredina visina graničnih tačaka segmenata raspona, odnosno:

$$H_{ei} = \frac{H_i + H_{i+1}}{2} \quad (8.100)$$

Na slici 8.28 prikazane su atraktivne zone koje odgovaraju pojedinim srednjim visinama segmenata raspona H_{ei} .



Slika 8.27: Određivanje srednje visine povodnika za svaki segment raspona



Slika 8.28: Atraktivne zone pojedinih segmenata raspona

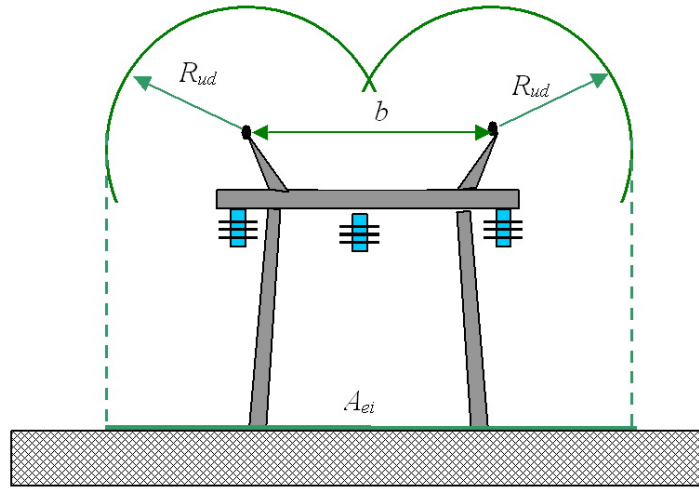
U slučaju kada je vod sa dva zaštitna užeta, atraktivna zona se računa na osnovu 8.93 za segment na rasponu, odnosno 8.94 za segment uz stub, uzimajući u obzir i razmak dva zaštitna užeta, kao na slici 8.29

Opisanim postupkom se modeluje atmosfersko pražnjenje u pojedinim tačkama duž raspona, uzimajući u obzir oblik lančanice najvišeg faznog provodnika.

Metodom opasnih parametara se određuje rizik da pri udara groma na sredini segmenta raspona dođe do preskoka na izolaciji voda ili proboja unutrašnje izolacije transformatora. U realnom sistemu je mesto udara groma slučajna veličina, čija učestanost zavisi od atraktivne površine segmenta voda koji se razmatra.

Da bi se uvažio slučajan efekat mesta udara u uzemljene delove pri simulaciji pojave povratnog preskoka, potrebno je varirati mesto udara groma duž raspona.

Ukoliko do udara groma dolazi na i -tu deonicu raspona nadzemnog voda dužine ΔL , uzima se srednja visina posmatrane deonice raspona H_{ei} i određuje atraktivna zona



Slika 8.29: Određivanje atraktivne zone voda sa dva zaštitna užeta

deonice $A_{\Delta Li}$ za i -tu deonicu raspona. Metodom opasnih parametara može se izračunati verovatnoća pojave amplitude struje I pri različitim strminama S iznad krive opasnih parametara. Za i -tu deonicu raspona je verovatnoća pojave parametara atmosferskih pražnjenja koji premašuju kritične usvojena da je konstantna na celoj deonici dužine ΔL i iznosi P_i . P_i predstavlja verovatnoću preskoka usled atmosferskog pražnjenja u sredinu i -te deonice raspona.

Godišnji broj preskoka na deonici i dužine ΔL usled atmosferskih prenapona je:

$$N_{1god,\Delta Li} = P_i \cdot A_{\Delta Li} \cdot N_G \quad (8.101)$$

gde je:

N_G -godišnji broj udara groma po km^2 , odnosno godišnja gustina pražnjenja.

$A_{\Delta Li}$ -atraktivna površina i -tog segmenta raspona.

P_i -verovatnoća kvara izolacije (preskoka ili proboja) pri atmosferskom pražnjenju u i -ti segment voda.

Godišnji broj udara u stub i njegovu okolinu se uvećava zbog povećane atraktivne zone stuba, koja se uzima u obzir pomoću koeficijenta privlačenja stuba K_s . U proračunima je usvojeno da je $K_s = 1,2$. Kada se računa broj pražnjenja u stub, tada se dužina posmatranog segmenta uzima upola manja nego što je to za raspon, jer druga polovina segmenta pripada susednom rasponu. Broj udara u stub, odnosno u njegovu okolinu na dužini $0,5 \cdot \Delta L$ iznosi:

$$N_{1god,0.5\Delta L} = 0,5 \cdot A_1 K_s \cdot N_G \quad (8.102)$$

U izrazu 8.102 veličina A_1 predstavlja atraktivnu zonu stuba i segmenta raspona uz stub dužine $0.5\Delta L$. To je atraktivna površina u okolini stuba u kojoj atmosferska pražnjenja imaju isti efekat kao da su se dogodila u vrh stuba. To znači da bilo koji udar groma unutar površine A_1 izaziva proticanje struje kroz stub i refleksije talasa od uzemljivača kao da se udar dogodio u sam vrh stuba.

Izraz za srednji godišnji broj preskoka na jednom rasponu voda dužine L , koji je podeljen na n_L deonica, ima oblik:

$$N_{1god,L} = (0,5 \cdot P_{s1} K_s A_1 + \sum_{i=2}^{n_L-1} P_i A_i + 0,5 \cdot P_{sn_L} K_s A_{n_L}) \cdot N_G \quad (8.103)$$

gde su:

P_{s1}, P_{sn_L} – verovatnoća preskoka usled atmosferskih pražnjenja u tačke 1 i n_L na vrhovima stubova koji definišu raspon,

A_1, A_{n_L} – atraktivne zone stubova koji definišu raspon,

P_i – verovatnoća preskoka usled atmosferskih pražnjenja u tačku i na rasponu,

K_s – koeficijent povećanja verovatnoće udara u stub, odnosno povećanje atraktivne površine stuba u odnosu na raspon.

Sumiranjem broja preskoka usled pražnjenja u sve deonice voda dobija se ukupna verovatnoća preskoka usled udara groma u zaštitno uže ili u stub na celoj dužini voda $L_v = \sum L_j$, gde je L_j dužina j -tog raspona voda, izražena u [km].

$$N_{1god,L_v} = \sum_{j=1}^m N_{1god,L_j} \quad (8.104)$$

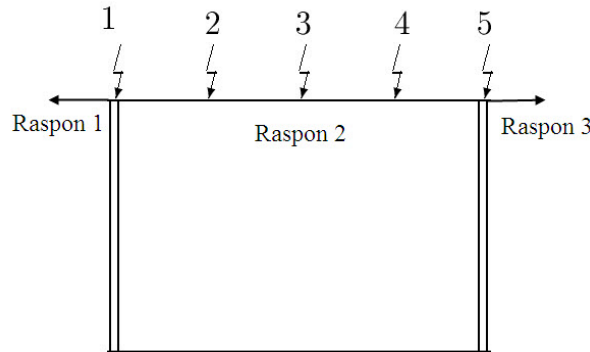
gde je m ukupan broj raspona voda.

Godišnji broj preskoka na 100 km voda usled atmosferskih prenapona $N_{1god,100km}$ se može izračunati svođenjem broja ispada na 100 km, odnosno:

$$N_{1god,100km} = \frac{100 N_{1god,L_v}}{L_v} \quad (8.105)$$

Ako se smatra da vod ima identične karakteristike duž cele trase, odnosno istu geometriju stuba i otpor uzemljenja, tada se može odrediti ugroženost voda od atmosferskih prenapona samo na osnovu proračuna rizika preskoka u nekoliko tačaka na polovini jednog

raspona. U tom slučaju zbog potpune simetrije bi udari groma sa istom verovatnoćom izazvali preskok na susednom stubu. U opštem slučaju se računa rizik preskoka u nekoliko tačaka duž celog raspona, kao na slici 8.30. Pokazuje se da je za tačnost proračuna koja je u tehnički prihvatljivim granicama dovoljno uzeti 5 tačaka, kao na slici 8.30.



Slika 8.30: Variranje mesta udara duž raspona voda identičnih karakteristika stubova

Levo i desno od analiziranog raspona potrebno je dodati beskonačno dugačke provodnike koji se modeluju koncentrisanim otpornicima čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi provodnika. U slučaju kratkih raspona potrebno je susedne raspone modelovati uzimajući u šemu i susedne stubove. Što je otpornost uzemljenja stubova veća i dužina raspona kraća, potrebno je uzeti veći broj raspona u model. Minimalan broj raspona se može empirijski odrediti za određenu otpornost uzemljenja stuba, probajući više varijanti determinističkim postupkom.

8.4.4 Proračun broja godina bez kvara transformatora

Na veoma sličan način se može vršiti proračun ugroženosti transformatora od nailazećih talasa po vodovima usled povratnog preskoka na prilazu postrojenju. Raspon j dužine L_j ispred postrojenja se deli na $n_L - 1$ elementarnih deonica. Verovatnoća kvara izolacije transformatora se računa za udare gromova u n_L tačaka koje ograničavaju elementarne deonice dužine $\Delta L = L_j / (n_L - 1)$. Srednji godišnji broj kvarova transformatora $N_{Tj,1god}$ za atmosferska pražnjenja unutar posmatranog raspona j može se izračunati primenom trapeznog pravila u sledećoj formi:

$$N_{Tj,1god} = \left[0,5 \cdot K_s \cdot A_1 \cdot P_{s1} + \sum_{i=1}^{n_L-1} A_i \cdot P_i + 0,5 \cdot K_s \cdot A_{n_L} \cdot P_{sn_L} \right] \cdot \frac{N_G}{100} \quad (8.106)$$

gde su:

P_{s_i} , ($i = 1, n_L$) – verovatnoća prevazilaženja podnosivog napona transformatora ako do udara groma dolazi u tačke 1, odnosno n_L na vrhovima stubova,

P_i , ($i = 2, 3, \dots, n_L - 1$ – verovatnoća prevazilaženja podnosivog napona transformatora ako do udara groma dolazi u neku od tačaka $2, 3, \dots, n_L - 1$ duž raspona.

Ukupan očekivani godišnji broj proboja izolacije transformatora usled atmosferskih pražnjenja u zaštitno uže ili vrh stuba na prvih m raspona ispred transformatorske stanice se dobija sabiranjem očekivanog godišnjeg broja kvarova usled pražnjenja po pojedinim rasponima, odnosno:

$$N_{T,1god} = \sum_{j=1}^m N_{Tj,1god} \quad (8.107)$$

gde su:

$N_{T,1god}$ – ukupan očekivani broj kvarova izolacije transformatora usled nailazećih atmosferskih prenapona prouzrokovanih povratnim preskokom na prilaznom vodu ispred transformatorske stanice,

m – broj posmatranih raspona ispred postrojenja. Analiza je pokazala da je kod visokonaponskih postrojenja dovoljno proračun raditi za samo prva dva raspona ispred ulaza u postrojenje, jer je udar groma u dalje raspone bezopasan zbog toga što udari velikih amplituda struja groma izazivaju preskoke pri prostiranju talasa duž voda smanjujući energiju talasa koji dolazi do samog postrojenja. Kod mreža nižih nazivnih napona, naročito ako su otpori uzemljenja stubova veliki (na primer veći od 20Ω), tada treba uzeti veći broj raspona u obzir. Pri tome treba uraditi analizu osetljivosti rezultata varirajući broj raspona. Rastojanje ispred transformatora koje se uzima da može da bude kritično sa stanovišta ugroženosti transformatora usled atmosferskih prenapona se naziva **graničnim rastojanjem**.

Očekivani broj godina bez kvara izolacije transformatora usled atmosferskih prenapona prouzrokovanih povratnim preskocima na prilaznim vodovima dobija se kao recipročna vrednost ukupnog očekivanog godišnjeg broja kvarova, odnosno:

$$N_{god} = \frac{1}{N_{T,1god}} \quad (8.108)$$

Vrlo često se sreće oznaka u literaturi za srednji broj godina bez kvara **MTBF** od engleske oznake Mean Time Between Failures.

8.4.5 Verovatnoća pražnjenja mimo zaštitnog užeta

Prilikom određivanja verovatnoće atmosferskog pražnjenja mimo zaštitnog užeta se za svaku graničnu vrednost struje groma I koja izaziva kvar izolacije, može primenom elektrometrijskog modela odrediti verovatnoća prodora groma mimo zaštitnog užeta $X(I)$,

koja predstavlja odnos atraktivne površine faznog provodnika kod voda koji je zaštićen užetom i atraktivne površine faznog provodnika kod voda koji nije zaštićen užetom, za jednu određenu struju groma I . Rizik kvara izolacije se dobija integraljenjem gustine raspodele amplitude i strmine struje groma što daje verovatnoću pojavljivanja kritičnih parametara (amplitude struje I i strmine struje S koji izazivaju kvar izolacije), što se množi verovatnoćom da se takvi parametri pojave prodorom groma mimo zaštitnog užeta.

$$R = \int_D \omega(I, S) X(I) dI dS \quad (8.109)$$

Proračun izraza 8.109 numeričkim putem za logaritamsko-normalnu raspodelu amplituda i strmina struja groma može se uraditi modifikacijom izraza 8.29 na strani 320 množenjem svake promenljive x koja predstavlja normalizovanu vrednost amplitude struje sa odgovarajućom verovatnoćom prodora te struje kroz gromobransku zaštitu, odnosno:

$$P_{D_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) X dz + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} \int_{z(y_{i+1}, x)}^{\infty} \omega(z) X dz \right\} \quad (8.110)$$

gde x označava verovatnoću prodora groma u funkciji amplitude struje groma. Integral:

$$I(i) = \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) X dz \quad (8.111)$$

se izračunava numeričkim postupkom primenom trapeznog pravila. Celokupni opseg amplituda struja atmosferskih pražnjenja od neke minimalne vrednosti I_{min} do maksimalne vrednosti struje groma I_{max} se diskretizuje na m ekvidistantnih vrednosti amplituda struja, za koje se izračunava verovatnoća prodora mimo zaštitnog užeta $X(I)$. Numeričko izračunavanje integrala $I(i)$ vrši se na sledeći način:

$$\begin{aligned} I(i) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[\frac{x(j) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} X(j) + \frac{x(j+1) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} X(j+1) \right] \times \\ &\times \left[\frac{x(j+1) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} - \frac{x(j) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} \right] \end{aligned} \quad (8.112)$$

gde su:

i -indeks koji odgovara i -toj strmini struje sa krive opasnih parametara,

j -indeks koji odgovara j -toj amplitudi struje groma, koja se varira sa nezavisnim korakom ΔI od neke minimalne vrednosti I_{min} do maksimalne vrednosti I_{max} ,

$X(j)$ -verovatnoća prodora groma čija je amplituda struje $I(j)$ mimo zaštitnog užeta,

m - broj diskretnih vrednosti amplituda struja groma koje se koriste pri numeričkom integraljenju.

Minimalna vrednost struje I_{min} predstavlja struju koja se pojavljuje sa nekom dovoljno malom verovatnoćom, tako da se pojava manje struje može zanemariti (obično 2-3 kA). Maksimalna amplituda struje atmosferskog pražnjenja I_{max} se bira tako da bude malo veća od najveće struje koja može da prođe mimo zaštitnog užeta. To je obično između 20 i 30 kA. Obično je dovoljno posmatrati 15 do 20 različitih amplituda struja pražnjenja od minimalne do maksimalne struje koje mogu da prođu mimo zaštitnog užeta.

Jedina razlika u proračunu rizika kvara izolacije pri razmatranju pojave pražnjenja mimo zaštitnog užeta i pojave pražnjenja u uzemljene delove koje izaziva povratni preskok ili pražnjenja u fazni provodnik voda bez zaštitnog užeta je ta što se kod pražnjenja mimo zaštitnog užeta integral 8.111 mora rešavati numerički, a u ostalim slučajevima se može rešavati analitički primenom Laplasove funkcije 8.32.

8.4.6 Rizik kvara izolacije po uprošćenoj IEC metodi

U slučaju primene uprošćene IEC metode za određivanje kritičnih parametara određuje se samo jedna kritična tačka definisana amplitudom struje iznad koje nastaju kvarovi izolacije I_g . Ovoj amplitudi struje odgovara kritična strmina čela S_g . Verovatnoća premašenja kritične amplitude se može odrediti primenom izraza za kumulativnu verovatnoću Gausove raspodele prema 6.8, odnosno kao komplementarna verovatnoća premašenja struje u obliku:

$$\overline{P(x)} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (8.113)$$

gde je: $x = \frac{\ln \frac{I_g}{I_{sr}}}{\sigma_{lnI}}$

8.4.7 Numerički postupak integraljenja gustine raspodele

Za numerički proračun integrala logaritamskom-normalbe raspodele se mogu koristiti standardne funkcije koje se nalaze u numeričkim paketima, na primer programima MatLab, Fortran, Microsoft Excel i drugi.

Verovatnoća dostizanja temene vrednosti struje I_g , odnosno normalizovane promenljive x :

$$P(x) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \text{ERF}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (8.114)$$

gde je ERF funkcija greske, standardna funkcija većine numeričkih paketa, odnosno:

$$\text{ERF}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (8.115)$$

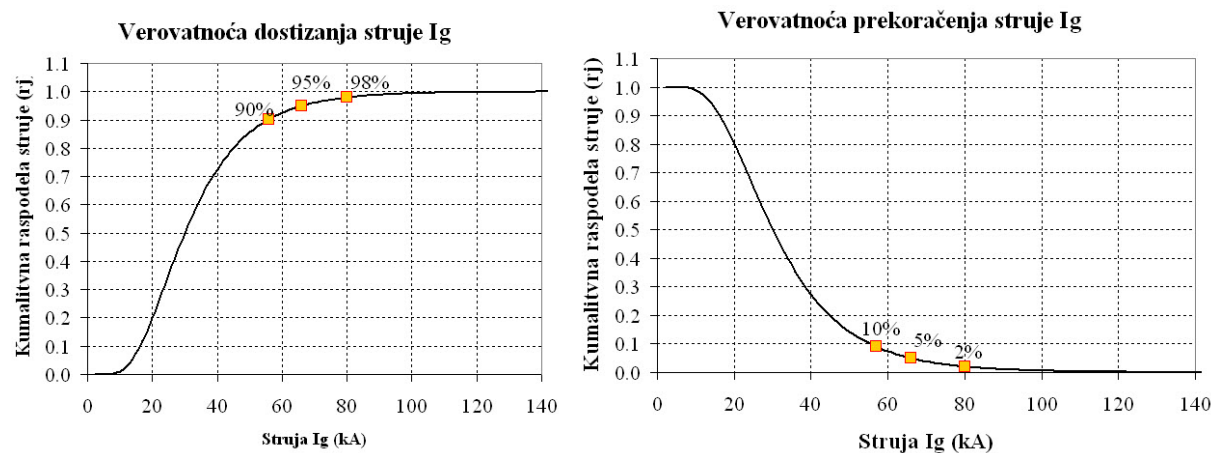
Normalizovana promenljiva x ima značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I_g}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.116)$$

Komplementarna funkcija greške je:

$$\text{ERFC}(x) = 1 - \text{ERF}(x) \quad (8.117)$$

Na slici 8.31 prikazane su log-normalne kumulativne krive dostizanja vrednosti struje pražnjena I_g (levo) i prevazilaženja struje I_g (desno).



Slika 8.31: Kumulativna logaritamsko-normalna kriva dostizanja struje pražnjenja (levo) i kriva prekoračenja struje I_g (desno)

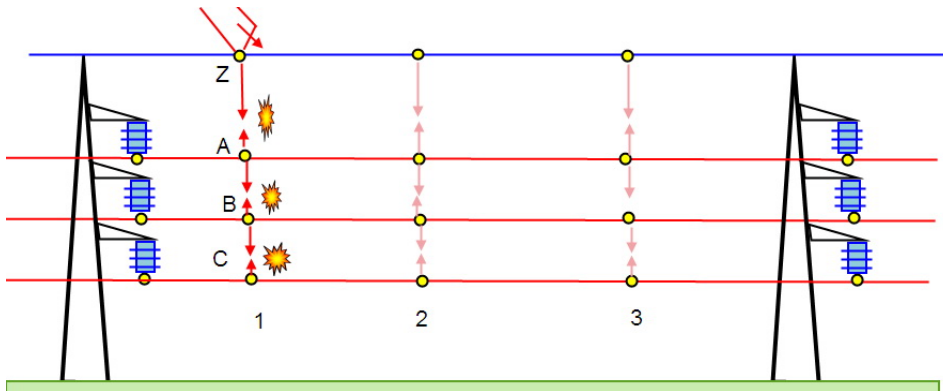
Za koordinaciju izolacije je povoljnije koristiti krivu verovatnoće prekoračenja struje, jer ona pokazuje verovatnoću da će struja preći vrednost dozvoljene struje i izazvati kvar izolacije.

Oznake 90 %, 95 % i 98 % pokazuju struje koje mogu biti dostignute sa 90 %, 95 % i 98 % verovatnoće, na slici levo. Na slici desno oznake 10 %, 5 % i 2 % označavaju struje koje mogu biti prevaziđene sa verovatnoćama 10 %, 5 % i 2 %.

8.4.8 Analiza uticaja mesta udara kod trofaznih vodova

U slučaju analize trofaznih vodova mogu se razlikovati jednopolni kvarovi i višefazni kvarovi usled preskoka prouzrokovanih atmosferskim pražnjenjima u nadzemne vodove. U slučaju jednopolnih kvarova može se tehnikom jednopolnog APU-a električni luk usled preskoka ugasiti i kvar eliminisati posle kratke beznaponske pauze i na taj način trajan

kvar pretvoriti u prolazan kvar. U slučaju višefaznih kvarova tehnika jednopolnog APU-a ne može eliminisati kvar sa lukom koji je nastao preskokom usled atmosferskih pražnjenja. Da bi se višefazni preskok isključio mora se primeniti trofazno APU, koje ima znatno veći uticaj na pogon elektroenergetskog sistema kada se primenjuje u visokonaponskim mrežama. Analiza atmosferskih prenapona na trofaznim nadzemnim vodovima se vrši da bi se utvrdio procenat jednofaznih preskoka u odnosu na ukupan broj preskoka. Osim toga, moguće je odvojeno računati broj preskoka na rasponu i broj preskoka na izolaciji stubova. Ukoliko se primene odvodnici prenapona na vodovima, tada oni nemaju bitan uticaj na broj preskoka na rasponu. Na slici 8.32 prikazan je model trofaznog voda na kome se varira mesto udara atmosferskog pražnjenja. Osnovna pretpostavka na modelu trofaznog



Slika 8.32: Model trofaznog voda na kome se varira mesto udara atmosferskog pražnjenja

voda na slici 8.32 je da će na rasponu uvek doći do preskoka baš u tački atmosferskog pražnjenja. Kada razlika potencijala između zaštitnog užeta (tačka Z) i faze A poraste iznad podnosivog preskočnog napona, određenog po nekoj od metoda opisanih na strani 236, tada nastaje preskok pri struji i_{iA} pri delovanju linearnog talasa strmine S_i koja se određuje iz izraza:

$$i_{iA} = S_i \cdot t_{iA} \quad (8.118)$$

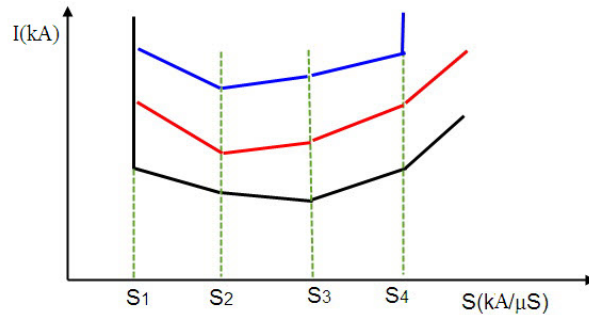
gde je t_{iA} vreme potrebno da talas strmine S_i poraste iznad podnosivog napona između tačaka Z i A , odnosno da budu zadovoljeni uslovi da nastane preskok. Nakon preskoka sa zaštitnog užeta ka fazi A , naponaska razlika između faza A i B raste dok ne budu zadovoljeni uslovi za nastanak preskoka, u vremenskom trenutku t_{iB} merenog od atmosferskog pražnjenja, odnosno posle vremena Δt_{AB} od nastanka preskoka sa zaštitnog užeta ka fazi A . Struja koja izaziva preskok na fazi B je:

$$i_{iB} = S_i \cdot (t_{iA} + \Delta t_{AB}) \quad (8.119)$$

Posle preskoka ka fazi B raste razlika napona između faza B i C . Ukoliko budu ispunjeni uslovi za preskok, posle vremena Δt_{BC} merenog od trenutka preskoka sa faze A na fazu B , struja koja izaziva preskok na fazi C je:

$$i_{iC} = S_i \cdot (t_{iA} + \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC}) \quad (8.120)$$

Znajući potrebne struje koje izazivaju preskok od zaštitnog užeta ka fazi A , od faze A do faze B i od faze B do faze C , mogu se formirati 3 krive opasnih parametara, gde svakoj strmini talasa S_i odgovaraju 3 vrednosti struje i_{iA} , i_{iB} i i_{iC} . Na slici 8.33 prikazane su 3 krive opasnih parametara koje odgovaraju kvarovima na fazama A , B i C .



Slika 8.33: Tri krive opasnih parametara koje odgovaraju kvarovima na fazama A , B i C

Prilikom atmosferskog udara u zaštitno uže, javljaju se putujući talasi ka stubovima koji ograničavaju posmatrani raspon. Ukoliko do povratnog preskoka prema fazi A dođe na najbližem stubu u trenutku $t_{ipA} < t_{iA}$, to znači da će do preskoka na fazi A doći prvo na stubu, pa tek kasnije na rasponu. U tom slučaju se verovatnoća povratnog preskoka računa u odnosu na struju koja izaziva preskok:

$$I_{ipA} = S_i \cdot (t_{iA}) \quad (8.121)$$

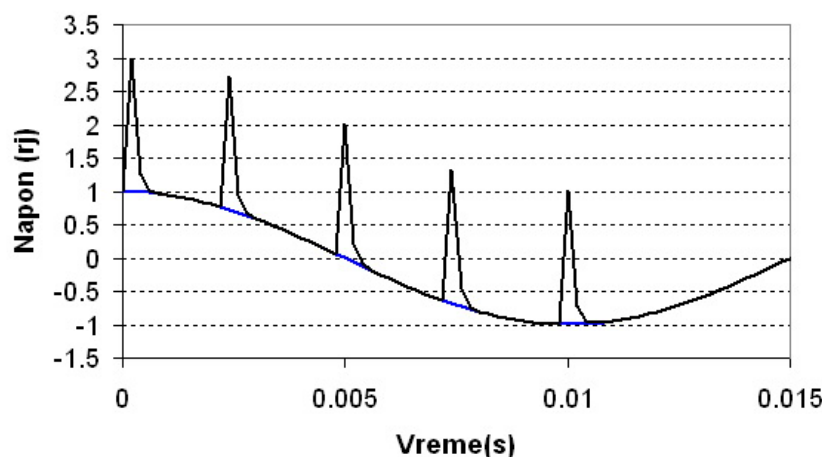
Pod **mestom kvara** podrazumeva se kvar na stubu ili na rasponu. Kada se vrši proračun metodom opasnih parametara strminom S_i , prvi put dođe do kvara na fazi J , ($J = 1, 2, 3$) na stubu, deklariše se da je kvar na fazi J izazvala struja I_{ipJ} usled povratnog preskoka, bez obzira što daljom simulacijom može nastati kvar na rasponu. Kada nastanu kvarovi na sve 3 faze, proračun za strminu talasa S_i se prekida započinje proračun sa novom strminom S_{i+1} . Na ovaj način se formira kriva opasnih parametara. Pri formiranju krive opasnih parametara se razdvajaju krive opasnih parametara za povratne preskoke na stubovima i krive opasnih parametara za tačke na rasponu. Tačka atmosferskog pražnjenja se sistematski varira, a mesto preskoka na rasponu se uvek poklapa sa tačkom atmosferskog pražnjenja.

8.4.9 Uticaj trenutne vrednosti radnog napona

Pri analizi atmosferskih prenapona u niskonaponskim i srednjenaponskim sistemima trenutna vrednost radnog faznog napona nema bitnog uticaja na rizik kvara izlacijske. Međutim, kod elektroenergetskih mreža visokih i vrlo visokih napona prenaponi atmosferskog

porekla na vodovima su uporedivi sa radnim naponom koji postoji na faznim provodnicima u trenutku pražnjenja. U slučaju udara groma u uzemljene delove voda (vrh stuba ili zaštitno uže na rasponu), naprezanje izolacije na stubu srazmerno je razlici napona na konzoli i trenutne vrednosti radnog napona faznog provodnika.

Udar groma se može dogoditi u bilo kom trenutku periode radnog napona. Stoga se može smatrati da je fazni ugao Θ ravnomerno raspoređena slučajna veličina u opsegu $[0, 2\pi]$, kao na sl. 8.34.



Slika 8.34: Slučajni trenutak atmosferskog pražnjenja u okviru periode radnog napona

Da bi se uvažio uticaj trenutne vrednosti radnog napona na očekivani godišnji broj kvarova izolacije, potrebno je da se proračun vrši za određenu trenutnu vrednost radnog napona, koja se može smatrati konstantnom za vreme trajanja prenapona atmosferskog porekla. Trenutna vrednost radnog napona za fazni ugao Θ_i iznosi:

$$U_{rad_i} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n \cos \Theta_i \quad (8.122)$$

gde su:

U_n – efektivna linijska vrednost napona na vodu, koja se može usvojiti da je jednaka nazivnom naponu voda ili najvišem radnom naponu sistema,

Θ_i – i -ta vrednost slučajnog faznog ugla u trenutku pražnjenja.

Godišnji broj kvarova izolacije izračunat za posmatrani ugao Θ_i ima vrednost R_{Θ_i} . Proračun očekivanog godišnjeg broja kvarova se mora ponoviti za n različitih vrednosti faznih uglova u intervalu $[0, \pi]$. Dovoljno je posmatrati samo jednu poluperiodu radnog napona

u kojoj se trenutna vrednost napona menja od maksimalne do minimalne, jer se u drugoj poluperiodi ponavljaju iste trenutne vrednosti radnog napona.

Očekivani broj kvarova, uvažavajući i uticaj trenutne vrednosti radnog napona u trenutku pražnjenja dobija se kao srednja vrednost broja kvarova koji je izračunat za određene fazne uglove u trenutku pražnjenja.

$$N_u = \frac{\sum_1^n N_{\Theta_i}}{n} \quad (8.123)$$

gde su:

n – broj simuliranih trenutaka pražnjenja u okviru poluperiode. Optimalno je usvojiti da je $n = 5$, jer se na taj način uzimaju najreprezentativnije trenutne vrednosti radnog napona oba polariteta.

N_u – Očekivani broj kvarova izolacije sa uvažavanjem trenutne vrednosti radnog napona.

8.4.10 Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji vazdušnog voda bez zaštitnog užeta

Na ovom mestu je data jednostavna analitička metoda za grubu procenu broja preskoka na vodovima ili broja kvarova izolacije opreme usled atmosferskih pražnjenja. Metoda je bazirana na primeni eksponencijalnog zakona raspodele parametara struje groma

Pri direktnom udaru groma u fazni provodnik vazdušnog voda bez zaštitnog užeta se na faznom provodniku pojavljuje maksimalan prenapon dat ranije izvedenim izrazom:

$$U_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (8.124)$$

gde su:

Z_c – karakteristična impedansa faznog provodnika,

I_m – temena vrednost očekivane struje groma u dobro uzemljeni objekat,

U_f – napon na faznom provodniku.

Da bi nastupio preskok na izolaciji, potrebno je da napon na vodu generisan atmosferskim pražnjenjem bude viši od podnosivog udarnog napona izolacije U_{iz} . U slučaju zanemarenog radnog napona u trenutku pražnjenja kriterijum preskoka ima oblik:

$$Z_c \frac{I_m}{4} > U_{iz} \quad (8.125)$$

odakle se može odrediti kritična amplituda struje groma koja izaziva napon na vodu koji je viši od podnosivog udarnog napona izolacije.

Iz izraza 8.125 se dobija kritična struja koja izaziva preskok.

$$I_m > \frac{4 U_{iz}}{Z_c} \quad (8.126)$$

Verovatnoća pojavljivanja amplitude struje koja je veća od I_m može se odrediti na osnovu ranije opisanog eksponencijalnog zakona raspodele amplitude struje groma:

$$\overline{P}(I_m) = e^{-I_m/a} \quad (8.127)$$

gde koeficijent a ima vrednost:

- $a = 26,1 \text{ kA}$ za ravničarske predele sa malim otporom zemlje,
- $a = 13,0 \text{ kA}$ za planinske predele,

$\overline{P}(I_m)$ –verovatnoća da će se pojaviti struja groma I veća od struje I_m ,

I –slučajna amplituda struje groma.

Verovatnoća da će doći do preskoka jednaka je verovatnoći da granična struja groma koja izaziva preskok bude prevaziđena, odnosno:

$$P(U_{iz}) = e^{-\frac{4 U_{iz}}{Z_c a}} \quad (8.128)$$

Ako je srednja visina faznog provodnika H , tada se godišnji broj pražnjenja na 100 km voda može proceniti na osnovu ranije datog izraza:

$$n_{1god,100km} = 2 \times 3 H 10^{-3} 100 N_G = 0,6 H N_G \quad (8.129)$$

gde su:

H – prosečna visina voda (m)

N_G – godišnja gustina pražnjenja po km^2 .

Kada se pomnoži godišnji broj pražnjenja u vod sa verovatnoćom preskoka, dobija se godišnji broj preskoka na vodu:

$$N_p = 2 \times 3 H 10^{-3} 100 N_G P(U_{iz}) = 0,6 H N_G e^{-\frac{4 U_{iz}}{a Z_c}} \quad (8.130)$$

U izrazu 8.130 N_p predstavlja ukupan broj preskoka na izolaciji voda usled atmosferskih pražnjenja u fazni provodnik voda bez zaštitnog užeta. Ako je η stepen uspešnosti brzog automatskog ponovnog uključenja (APU), i ako je vod snabdeven odgovarajućom automatikom, tada je broj ispada voda usled direktnih pražnjenja u fazni provodnik:

$$N_{isp} = (1 - \eta) \cdot N_p \quad (8.131)$$

gde je $1 - \eta$ stepen neuspešnosti operacije APU. U našim mrežama se η kreće od 0,5 do 0,9.

8.4.11 Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji vazdušnog voda sa zaštitnim užetom

Povratni preskok može nastati usled udara groma u vrh stuba ili njegovu neposrednu okolinu ili usled udara groma u zaštitno uže. Smatra se da je udar u stub i onda kada se pražnjenje dogodi u zaštitno uže u blizini stuba tako da na amplitudu struje kroz stub nema uticaja odvođenje struje pražnjenja kroz susedne stubove. Smatra se da se oko 40% pražnjenja mogu tretirati kao da su se dogodila u vrh stuba, a ostalih 60 % u zaštitno uže, tako da i susedni stubovi utiču na prelazni proces na posmatranom stubu.

Ukoliko je vod snabdeven zaštitnim užetom i udar groma je u stub, tada se smatra da veći deo struje protiče kroz stub, a manji deo odlazi po zaštitnim užadima levo i desno od posmatranog stuba, odnosno:

$$I_{st} = K_{st} \cdot I_g \quad (8.132)$$

gde su:

I_g —amplituda struje groma (kA),

I_{st} —amplituda struje kroz stub (kA),

K_{st} —koeficijent koji pokazuje koji deo struje ide kroz stub.

Obično se usvaja da je $K_{st} = 0,8$, što pokazuje da 80 % struje atmosferskog pražnjenja prolazi kroz najbliži stub, a po 10 % protiče sa svake strane po zaštitnim užadima.

Naprotiv, ako je udar u zaštitno uže na rasponu, tada samo polovina ukupne struje groma putuje ka jednom stubu, pa je koeficijent koji pokazuje koji deo struje ide kroz stub upola manji, jer susedni stub preuzima jednak deo struje pražnjenja. U ovom slučaju je struja kroz stub:

$$I_{st} = 0,5 K_{st} I_g \quad (8.133)$$

U ovom slučaju se može usvojiti da je $K_{st} = 0,9$. Proračun verovatnoće povratnog preskoka usled proticanja struje kroz stub može se izvršiti metodom opasnih parametara. Kriterijum povratnog preskoka uz zanemaren uticaj radnog napona je:

$$U_{iz} < R_{uz} \cdot I_{st} + L_{st} \cdot S_{st} \quad (8.134)$$

Kada se zameni struja kroz stub ukupnom strujom atmosferskog pražnjenja, dobija se:

$$U_{iz} < R_{uz} \cdot K_{st} \cdot I_g + L_{st} \cdot K_{st} \cdot S_g \quad (8.135)$$

gde su:

I_g —amplituda struje groma (kA),

I_{st} —amplituda struje kroz stub (kA),

S_g —strmina struje groma ($kA/\mu s$),

S_{st} —strmina struje kroz stub ($kA/\mu s$),

L_{st} —induktivnost stuba (μH),

R_{uz} —otpornost uzemljenja stuba (Ω).

U razmatranom modelu je pretpostavljeno da je struja linearno rastućeg čela, čime se proračun značajno pojednostavljuje.

Kriterijum povratnog preskoka se na osnovu izraza 8.135 može pisati u sledećoj formi:

$$\frac{I_g}{I_M} + \frac{S_g}{S_M} > 1 \quad (8.136)$$

gde su:

$$I_M = \frac{U_{iz}}{R_{uz} K_{st}} \quad (8.137)$$

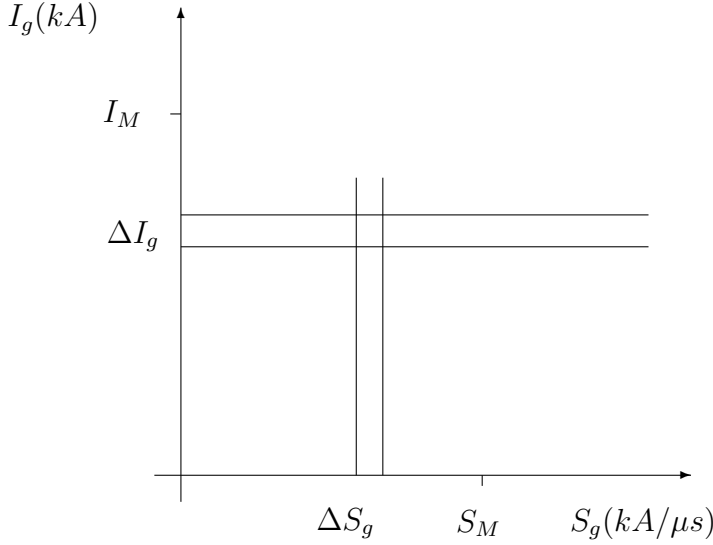
$$S_M = \frac{U_{iz}}{L_{st} K_{st}} \quad (8.138)$$

Na osnovu kriterijuma povratnog preskoka koji je dat izrazom 8.136 formirana je kriva opasnih parametara, koja je prikazana na slici 8.35. Sva atmosferska pražnjenja čija je amplituda iznad krive opasnih parametara izazivaju povratni preskok.

Verovatnoća pojave atmosferskog pražnjenja sa amplitudom u opsegu I_g i $I_g + \delta I_g$ i sa strminom u opsegu S_g i $S_g + \delta S_g$, što odgovara elementarnoj površini iznad krive opasnih parametara, iznosi:

$$dP = \omega_1(I_g) \cdot \omega_2(S_g) \cdot \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.139)$$

gde su:



Slika 8.35: Kriva opasnih parametara za slučaj udara groma u vrh stuba

$\omega_1(I_g)$ —gustina raspodele amplitude struje groma data eksponencijalnom funkcijom:

$$\omega_1(I) = -\frac{1}{a} e^{-\frac{I_g}{a}} \quad (8.140)$$

$\omega_2(S_g)$ —gustina raspodele strmine struje groma data eksponencijalnom funkcijom, odnosno:

$$\omega_2(I) = -\frac{1}{b} e^{-\frac{S_g}{b}} \quad (8.141)$$

Verovatnoća da će jedno atmosfersko pražnjenje u stub izazvati povratni preskok je:

$$P_{ps} = \int_D \omega_1(I_g) \cdot \omega_2(S_g) \cdot \delta I_g \delta S_g \quad (8.142)$$

Oblast D iznad krive opasnih parametara je data sledećim granicama:

- Za strminu struje koja se menja od 0 do S_M amplituda struje se menja od prave $i = (1 - \frac{S_g}{S_M})I_M$ do ∞ ,
- Za strminu struje koja se menja od S_M do ∞ amplituda struje se menja od 0 do ∞ .

Posle zamene u izraz za verovatnoću povratnog preskoka 8.142 se dobija:

$$P_{ps} = \int_0^{I_M} \int_i^\infty \frac{1}{ab} e^{-\frac{I}{a}} e^{-\frac{S_g}{b}} \delta I_g \cdot \delta S_g + \int_{I_M}^\infty \int_0^\infty \frac{1}{ab} e^{-\frac{I}{a}} e^{-\frac{S_g}{b}} \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.143)$$

U izrazu 8.143 P_{ps} predstavlja verovatnoću povratnog preskoka usled atmosferskog pražnjenja u vrh stuba ili u njegovu blizinu, što se može tretirati kao pražnjenje u vrh stuba.

Posle izvršenog integraljenja, vodeći računa da je donja granica u prvom integralu $i = (1 - \frac{S_g}{S_M})I_M$, dobija se sledeći analitički izraz:

$$P_{ps} = \frac{bI_M e^{-S_M/b} - aS_M e^{-I_M/a}}{bI_M - aS_M} \quad (8.144)$$

Verovatnoća povratnog preskoka usled pražnjenja u sredinu raspona se dobija potpuno identičnim postupkom, jedino je deo struje koji ide kroz svaki stub upola manji.

Ukupan broj povratnih preskoka na posmatranom vodu se može izračunati podelom ukupne dužine voda na dva dela. Jedan deo voda se odnosi na okolinu stubova, kada se pražnjenje u zaštitno uže posmatra kao pražnjenje u stub, a drugi deo se posmatra kao pražnjenje u raspon kada oba stuba dele struju pražnjenja. Pri pražnjenjima u sredinu raspona se mora voditi računa da pri nailasku upadnog strujnog talasa po kanalu groma u tački udara talas nailazi na zaštitno uže koje se produžava sa obe strane mesta udara simetrično, tako da je njegova ekvivalentna karakteristična impedansa istog reda veličine kao i kod kanala groma, pa se može smatrati da su i amplituda i strmina struje groma u ovom slučaju dva puta manje nego kod udara u vrh stuba, koji se može smatrati dobro uzemljenim objektom.

Kriterijum preskoka, koji je bio dat izrazom 8.144 sada postaje:

$$\frac{I_g}{2 \cdot I_M} + \frac{S_g}{2 \cdot S_M} > 1 \quad (8.145)$$

Kada se, sa novim granicama izračuna verovatnoća povratnog preskoka, usled pražnjenja u raspon, obeležena sa P_{pr} , dobija se:

$$P_{pr} = \frac{bI_M e^{-2S_M/b} - aS_M e^{-2I_M/a}}{bI_M - aS_M} \quad (8.146)$$

Ako je za posmatranu deonicu voda verovatnoća atmosferskog pražnjenja u stub (ili u okolinu stuba sa efektima kao da je do pražnjenja došlo u stub) P_{st} , tada je verovatnoća pražnjenja u raspon $P_{ras} = 1 - P_{st}$. Pri tome se smatra da postoji ravnomerna raspodela verovatnoće mesta pražnjenja, tako da je verovatnoća pražnjenja u stub ili u raspon srazmerna dužini voda u okolini stuba na kojoj se pražnjenje smatra da je u stub, odnosno preostaloj dužini voda na rasponu.

Ukupan broj povratnih preskoka na posmatranom vodu dužine d se može izračunati kao zbir povratnih preskoka usled udara u stub ili u njegovu okolinu, sa efektima kao da je do udara došlo u stub, kao i usled udara u raspon, odnosno:

$$N_{pp} = 6 N_G H_{ef} \cdot 10^{-3} d [P_{st} P_{ps} + P_{ras} P_{pr}] \quad (8.147)$$

gde su:

N_G —godišnja gustina pražnjenja u zemlju ($1/km^2, 1god$)

H_{ef} —efektivna visina zaštitnog užeta (m).

Izraz 8.147 je dobijen na bazi najjednostavnije relacije za atraktivnu površinu dalekovoda kao pojasa širine $3 H_{ef}$ sa obe strane voda. Pražnjenja koja bi se dogodila u zemlju u tom pojasu događaju se u vod, a ostala pražnjenja se događaju u zemlju.

Broj povratnih preskoka na 100 km voda se dobija na osnovu sledećeg izraza:

$$N_{pp100km} = N_{pp} \frac{100}{d} \quad (8.148)$$

8.5 Monte - Karlo simulacija

8.5.1 Teorijsko objašnjenje

Monte - Karlo simulacija predstavlja veoma često korišćenu metodu za statističku analizu atmosferskih prenapona. Po ovoj metodi se svi slučajni parametri koji se uzimaju u obzir pri analizi uticaja atmosferskih prenapona na izolaciju uvažavaju metodom izvlačenja slučajnih brojeva. Za određeni skup slučajnih parametara se izvrši analiza atmosferskih prenapona da bi se utvrdilo da li analizirani prenaponi premašuju izolacioni nivo ili su ispod njega. Rizik kvara izolacije je:

$$R = \frac{N_{kvar}}{N_{uk}} \quad (8.149)$$

gde su:

N_{kvar} — broj simulacija pri kojima je došlo do kvara izolacije,

N_{uk} — ukupan broj simulacija.

Ukupan broj simulacija treba izabrati tako da bude zadovoljen kriterijum željene tačnosti.

Osnovni slučajni parametri koji se uzimaju u obzir su slučajna amplituda I i strmina struje groma S . Može se pretpostaviti da su amplituda i strmina struje groma raspoređeni po logaritamsko - normalnom zakonu raspodele koji je dat izrazom 8.150:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.150)$$

gde su:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.151)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{\ln S}} \quad (8.152)$$

slučajne promenljive raspoređene po normalnom zakonu raspodele.

Slučajna veličina x koja je raspoređena po normalnom zakonu se može izvlačiti metodom slučajnih brojeva. Slučajna vrednost amplitude struje groma se u tom slučaju dobija iz izraza 8.151:

$$I = I_{sr} e^{x \sigma_{\ln I}} \quad (8.153)$$

Ako se uvede promenljiva $z = \frac{y - \rho x}{\sqrt{1 - \rho^2}}$ koja se može smatrati nezavisnom slučajnom veličinom raspoređenom po normalnom zakonu, tada se slučajna strmina struje S može odrediti na osnovu slučajne amplitude struje I koja je ranije izračunata i slučajne veličine z . Slučajna veličina y je:

$$y = z \sqrt{1 - \rho^2} + \rho x \quad (8.154)$$

Zamenom se dobija na osnovu slučajnih veličina x i y raspoređenih po normalnom zakonu da slučajna strmina struje ima vrednost datu sledećom relacijom:

$$S = S_{sr} e^{y \sigma_{\ln S}} \quad (8.155)$$

Slučajna vrednost faznog ugla Θ određuje se izvlačenjem slučajne veličine a iz intervala $[0, 1]$ i množenjem sa faktorom π .

Slučajno mesto udara groma duž određenog raspona se takođe može simulirati izvlačenjem slučajne ravnomerno raspoređene veličine b iz intervala $[0, 1]$. Deonica od stuba do mesta udara Δd_1 dobija se kao:

$$\Delta d_1 = b d_j \quad (8.156)$$

a deonica od mesta udara do drugog stuba:

$$\Delta d_2 = (1 - b) d_j \quad (8.157)$$

gde je d_j dužina j -tog raspona.

Metodom Monte - Karlo simulacije se može obuhvatati slučajna priroda preskočnog napona pri modelovanju preskoka na vazdušnoj izolaciji. Ako je poznata volt - sekundna karakteristika izolacije $U_{50\%}(t)$, koja predstavlja zavisnost 50 % preskočnog napona u funkciji vremena do preskoka za različite strmine talasa, tada je verovatnoća preskoka u trenutku t_i data izrazom:

$$P(U_{t_i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{U_{t_i}} e^{-\frac{[u-U_{50\%}(t)]^2}{2\sigma^2}} du \quad (8.158)$$

gde je σ srednje kvadratno odstupanje.

Slučajna vrednost preskočnog napona u trenutku t_i je U_{t_i} . Ona se dobija izvlačenjem slučajne promenljive $x = \frac{U_{t_i} - U_{50\%}(t)}{\sigma}$ koja je raspoređena po normalnom zakonu. Na osnovu slučajno određene veličine x određuje se slučajna vrednost napona:

$$U_{t_i} = x \cdot \sigma + U_{50\%}(t) \quad (8.159)$$

U svakom koraku se upoređuje napon na izolaciji sa slučajnom vrednošću preskočnog napona na izolaciji. Ukoliko je ovaj napon manji od preskočnog napona, ne javlja se preskok, a ako je veći, preskok se modeluje kratkim spajanjem konzole i faznog provodnika. Ukoliko se nije dogodio preskok, u narednom koraku se izvlači nova vrednost slučajne veličine x i izračunava nova vrednost preskočnog napona data izrazom 8.159.

8.5.2 Procena potrebnog broja simulacija

Pretpostavimo da se vrši n simulacija atmosferskih pražnjenja. Neka je rezultat svake simulacije ishod X , koji može imati vrednost 1 ako je došlo do kvara razmatranog izolacionog sistema, ili 0 ako nije došlo do kvara izolacionog sistema. Srednja vrednost ishoda računata po izrazu:

$$\overline{X_n} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (8.160)$$

predstavlja rizik kvara izolacije računat po izrazu 8.149.

Prema **centralnoj graničnoj teoremi** [71], ako je X slučajna promenljiva sa matematičkim očekivanjem $M(X)$ i standardnim odstupanjem σ , a $\overline{X_n}$ srednja vrednost slučajne veličine određena na uzorku od n simulacija, tada zakon raspodele veličine:

$$\frac{\overline{X_n} - M(X)}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (8.161)$$

teži ka normalnoj raspodeli kada $n \rightarrow \infty$.

U slučaju nezavisnih simulacija može se izračunati verovatnoća da razlika između matematičkog očekivanja $M(X)$ slučajne veličine X i njene srednje vrednosti $\overline{X_n}$ ispunjava uslov:

$$P \left\{ |M(X) - \overline{X_n}| < \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right\} \approx \gamma \quad (8.162)$$

gde su:

γ -nivo poverenja koji se računa kao $\gamma = 2 \Phi(\beta)$

Φ -tablična funkcija normalne raspodele u kumulativnom obliku,

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (8.163)$$

β -parametar od koga zavisi nivo poverenja.

Standardno odstupanje σ se može približno odrediti iz n eksperimenata na osnovu izraza:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}_n)^2} \quad (8.164)$$

U tablici 8.5.2 date su vrednosti parametara β za nekoliko karakterističnih vrednosti nivoa poverenja γ prema [81].

γ	0,80	0,85	0,9	0,95	0,995
β	1,281	1,440	1,645	1,960	2,801

Tabela 8.4: Vrednost parametra β za različite nivoe poverenja

Matematičko očekivanje slučajne veličine X nalazi se, sa verovatnoćom γ , u granicama:

$$\bar{X}_n - \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq M(X) \leq \bar{X}_n + \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8.165)$$

Krajnje granice određuju nivo poverenja.

Može se uočiti da se sa porastom broja simulacija sužava interval poverenja, odnosno povećava tačnost postupka. Postoji više kriterijuma za procenu minimalnog broja simulacija radi dobijanja rezultata sa zadovoljavajućom tačnošću.

Kada se radi o diskretnim slučajnim promenljivima, kao što je promenljiva $X = 1$ kada je došlo do kvara izolacije, odnosno $X = 0$ kada nema kvara izolacije, tada se takav zakon raspodele može opisati **Bernulijevom raspodelom**. Verovatnoća nastupanja događaja X je p , a verovatnoća nenastupanja $q = 1 - p$. Ako se izvrši aproksimacija Bernulijeve raspodele normalnom raspodelom za veliki broj simulacija n , tada je matematičko očekivanje $M(X) = np$, a srednje kvadratno odstupanje $\sigma = \sqrt{npq}$.

Jedna od mogućih formula za procenu broja simulacija da bi se dobila relativna razlika ε između srednje vrednosti slučajne promenljive $\overline{X_n}$ za n simulacija i matematičkog očekivanja $M(X)$ data je u [81]:

$$n \geq \left\{ \frac{\beta}{\varepsilon} \right\}^2 \frac{1 - \overline{X_n}}{\overline{X_n}} \quad (8.166)$$

Na osnovu gornje formule ili sličnih izraza baziranih na drugim aproksimacijama može se proceniti broj potrebnih simulacija. Međutim, za izračunavanje broja simulacija potrebno je poznavati procenjenu srednju vrednost slučajne promenljive $\overline{X_n}$ na bazi prethodnih n simulacija.

Poglavlje 9

Indukovani prenaponi

9.1 Nastanak indukovanih prenapona

Indukovani prenaponi na faznim provodnicima elektroenergetskog voda su posledica atmosferskih pražnjenja u objekte ili zemlju u blizini voda. Ovaj tip prenapona ugrožava izolaciju vodova srednjeg i niskog napona. Amplituda indukovanih prenapona je uvek znatno niža od podnosivih napona izolacije mreža visokog napona (110 kV i više).

Procena visine i talasnog oblika indukovanih atmosferskih prenapona je znatno složenija od analize prenapona pri direktnim atmosferskim pražnjenjima. Sve teorije koje tumače nastanak indukovanih atmosferskih prenapona na vodovima usled atmosferskih pražnjenja mogu se podeliti u sledeće grupe prema efektu koji se smatra dominantnim:

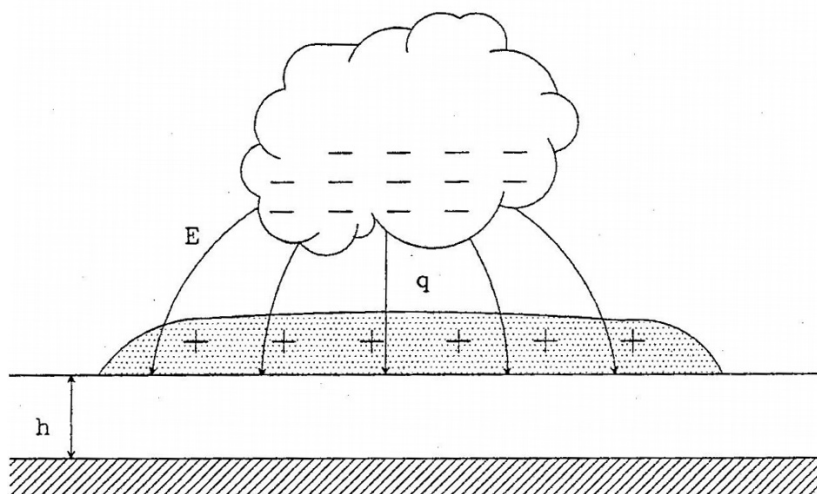
1. Elektrostatički uticaj oblaka
2. Elektrostatički uticaj skokovitog lidera
3. Magnetni uticaj glavnog udara
4. Elektromagnetni uticaj glavnog udara

Na ovom mestu će biti opisane samo teorije elektrostatičkog uticaja oblaka (koja je najstarija) i elektromagnetnog uticaja glavnog pražnjenja koja je najnovija i najkompletnija.

9.2 Elektrostatika teorija indukovanih prenapona

U [3] opisana je elektrostatika teorija nastanka indukovanih prenapona, na osnovu koje se mogu veoma jednostavno proceniti vrednosti putujućih prenaponskih talasa na faznim provodnicima nastalih nakon pražnjenja. Na slici 9.1 prikazan je naelektrisan grmljavinski oblak iznad nadzemnog voda visine h .

Usled dejstva električnog polja $\mathbf{E}$ izmedju oblaka i zemlje dolazi do indukovanja električnog naelektrisanja q suprotnog polariteta od naelektrisanja oblaka nad provodnicima voda. Pri tome se pretpostavlja da su fazni provodnici na neki način galvanski vezani za zemlju (preko mernih naponskih transformatora ili energetskih transformatora u postrojenjima na kraju voda ili preko nesavršene izolacije samog voda), što omogućava migraciju naelektrisanja. Na slici 9.1 prikazan je način formiranja indukovanih opterećenja na provodnicima voda usled dejstva oblaka.



Slika 9.1: Indukovano naelektrisanje na provodnicima voda usled elektrostatikog dejstva oblaka

Posle rasterećenja oblaka usled pražnjenja u zemlju ili izmedju oblaka električna opterećenja nisu više vezana elektrostatikom indukcijom. Potencijal provodnika na visini h iznad zemlje usled postojanja naelektrisanja dejstvom vektora električnog polja $\mathbf{E}$ iznosi:

$$\varphi = \mathbf{E}h \quad (9.1)$$

Očigledno je da potencijal faznog provodnika u odnosu na zemlju zavisi od jačine električnog polja $\mathbf{E}$ i visine provodnika h iznad zemlje.

Indukovani napon na provodniku voda se može razložiti na dva putujuća talasa koja se prostiru u direktnom i inverznom smeru duž voda. Amplituda oba putujuća talasa je identična i jednaka polovini amplitude indukovano prenapona φ , odnosno:

$$U_d(v_o t - x) = U_i(v_o t + x) = 0.5 h E \quad (9.2)$$

gde su:

$U_d(v_o t - x)$ —direktni talas koji se prostire ka kraju voda brzinom v_o ,

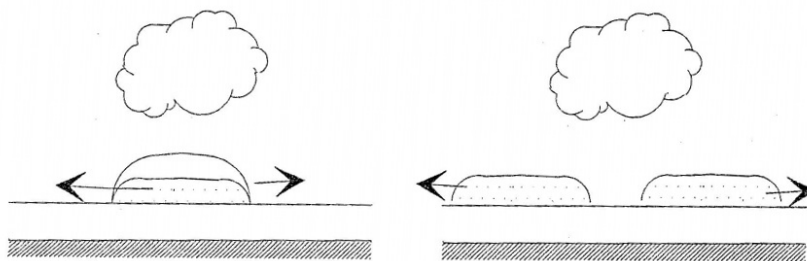
$U_i(v_o t + x)$ —inverzni talas koji se prostire ka početku voda brzinom v_o ,

v_o —brzina svetlosti,

x — posmatrano mesto na vodu,

t —posmatrani vremenski trenutak.

Na slici 9.2 prikazana je raspodela naelektrisanja nakon rasterećenja oblaka u dva različita vremenska trenutka.



Slika 9.2: *

Ukupni potencijal provodnika u odnosu na zemlju dat je zbirom direktnog i inverznog talasa, kao na slici, odnosno:

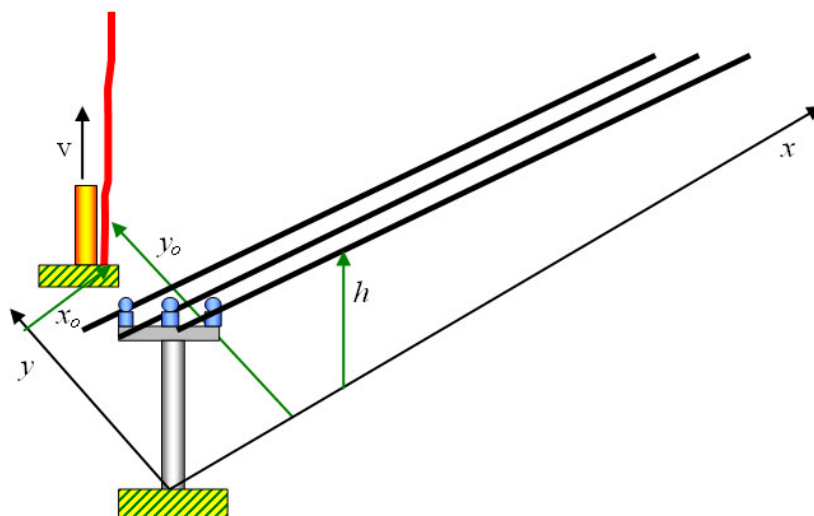
$$\varphi(x, t) = U_d(v_o t - x) + U_i(v_o t + x) \quad (9.3)$$

Putujući talasi nastali oslobađanjem indukovanih naelektrisanja se prostiru duž voda, izazivajući naprezanje izolacije, koje može da izazove preskok ako je amplituda talasa veća od podnosivog napona izolacije.

9.3 Elektromagnetna teorija indukovanih prenapona

Za procenu amplitude i oblika indukovanih prenapona na osnovu elektromagnetne teorije uticaja glavnog udara uvode se određene pretpostavke prema modelu prikazanom na slici 9.3.

Oznake na slici 9.3 imaju sledeće značenje:



Slika 9.3: Pojednostavljeni model za proučavanje indukovanih prenapona

y_o – najkraće rastojanje od mesta udara groma do faznog provodnika,

h – srednja visina faznog provodnika,

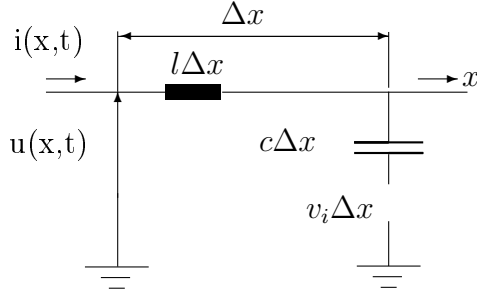
I – amplituda struje glavnog udara,

v – brzina prostiranja naelektrisanja povratnog udara.

Pretpostavke u ovom modelu su sledeće:

- Kanal groma je vertikalalan,
- strujni talas se kreće naviše brzinom v manjom od brzine svetlosti (odnos $\beta = v/v_o < 1$, gde je v_o brzina svetlosti),
- smatra se da je zemlja homogena idealno provodna sredina,
- amplituda struje groma se usvaja da je jednaka dvostrukoj vrednosti amplitude upadnog talasa zbog refleksije od idealno provodne zemlje,
- gubici na vodu se zanemaruju,
- fazni radni napon se zanemaruje u odnosu na indukovane prenapone.

U modelu se pretpostavlja da su sva tri fazna provodnika dovoljno blizu da se na njima indukuju identični prenaponi, pa se svi provodnici zamenjuju jednim na visini h i rastojanju y_o od mesta udara. Vod se može podeliti na elementarne segmente, čija je zamenska šema data na slici 9.4 prema [100].



Slika 9.4: Elementarna deonica voda na kojoj postoji indukujući napon

Na slici 9.4 izvor čija je elektromotorna sila v_i predstavlja indukujući napon na vodu usled dejstva atmosferskog pražnjenja. Prema zamenskoj šemi na slici 9.4 se mogu napisati parcijalne diferencijalne jednačine sa pobudom, sledećeg oblika:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x = l \frac{\partial i}{\partial t} \Delta x \quad (9.4)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = c \frac{\partial (u - v_i)}{\partial t} \Delta x \quad (9.5)$$

gde su:

u –indukovani napon na vodu,

i –indukovana struja,

v_i –indukujući (pobudjujući) napon usled elektromagnetskog dejstva atmosferskog pražnjenja,

l –podužna induktivnost voda,

c –podužna kapacitivnost voda.

U parcijalnim diferencijalnim jednačinama je zanemaren uticaj otpornosti i odvodnosti voda, jer se vod smatra idealnim.

Eliminisanjem struje i iz sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina 9.4 i 9.5 dobija se jedna parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda sledećeg oblika:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 v_i}{\partial t^2} \quad (9.6)$$

Član na desnoj strani predstavlja indukujući napon koji nastaje zbog delovanja atmosferskog pražnjenja u blizinu voda. Ukoliko se pretpostavi da strujni talas atmosferskog

pražnjenja ima oblik odskočne funkcije, tada se indukujući napon može izraziti u sledećem obliku:

$$v_i = -\frac{60I_o h}{\beta} \left[\frac{1 - \beta^2}{\sqrt{(\beta v_o t)^2 + (1 - \beta^2)r^2}} - \frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - t_o) \quad (9.7)$$

gde su:

I_o —amplituda struje pražnjenja,

h —visina faznog provodnika iznad zemlje,

$\beta = v/v_o$, odnos brzine prostiranja glavnog pražnjenja od zemlje ka oblaku i brzine svetlosti, koji se kreće od 0,1–0,5.

$r = \sqrt{x^2 + y_o^2}$ —udaljenost posmatrane tačke x na vodu od mesta udara,

h_c —srednja visina oblaka,

$t_o = r/v_o$ —trenutak kada se indukovani prenapon prvi put pojavljuje na mestu x na vodu.

Diferencijalna jednačina 9.6 se može rešavati analitički ili numerički.

9.3.1 Analitičko računanje indukovanih prenapona

Analitičko rešavanje diferencijalne jednačine 9.6 prikazano je u [82],[97],[98]. U slučaju odskočne funkcije struje, prema [82] dobija se sledeća vremenska promena napona na mestu x na vodu:

$$u(x, t) = (u_{11} + u_{12} + u_{21} + u_{22})h(t - t_o) \quad (9.8)$$

gde su:

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= \frac{30I_o h(1-\beta^2)}{\beta^2(v_o t - x)^2 + y_o^2} \left[\beta(v_o t - x) + \frac{(v_o t - x)x - y_o^2}{\sqrt{(v_o t)^2 + \frac{1-\beta^2}{\beta^2}(x^2 + y_o^2)}} \right] \\
 u_{12} &= -\frac{30I_o h}{\beta} \left(1 - \frac{1}{1+k^2} - \beta^2\right) \frac{1}{v_o t - x} \\
 u_{21} &= \frac{30I_o h}{\beta^2(v_o t + x)^2 + y_o^2} \left[\beta(v_o t + x) - \frac{(v_o t + x)x + y_o^2}{\sqrt{(v_o t)^2 + \frac{1-\beta^2}{\beta^2}(x^2 + y_o^2)}} \right] \\
 u_{22} &= \frac{30I_o h}{\beta} \left(1 - \frac{1}{1+k^2} - \beta^2\right) \frac{1}{v_o t + x} \\
 k &= \frac{h_c}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \\
 t_o &= \frac{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}}{v_o} \\
 x_o &= \frac{(v_o t - x)^2 - y_o^2}{2(v_o t - x)}
 \end{aligned} \tag{9.9}$$

$$\tag{9.10}$$

U slučaju struje proizvoljnog talasnog oblika $i(t)$ primenjuje se konvolucionni integral u sledećem obliku:

$$u_1(x, t) = i(0)u_o(x, t) + \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} i(t - \tau) u_o(\tau) d\tau \tag{9.11}$$

gde su:

$u_o(x, t)$ —odziv voda na mestu x usled indukovanog prenapona nastalog atmsosferskim pražnjenjem sa strujom pravougaonog čela,

$u_1(x, t)$ —odziv voda na mestu x usled indukovanog prenapona nastalog atmsosferskim pražnjenjem sa strujom proizvoljnog talasnog oblika $i(t)$.

Konvolucionni integral se može analitički rešiti za slučaj talasa linearno rastućeg čela. Posle izvršenog integraljenja dobija se sledeći analitički izraz za indukovani napon na vodu prema [98]:

$$u_1(x, t) = -\frac{30ah}{\beta v_o} \left[(1 - \beta^2)(s_{11} + s_{12} + s_{21} + s_{22}) + s_{13} + s_{23} \right] h(t - t_o) \tag{9.12}$$

gde su:

$$\begin{aligned}
s_{11} &= \ln(z_{11} + \sqrt{1 + z_{11}^2}) \\
z_{11}(x) &= \frac{x + \beta^2(v_o t - x)}{\sqrt{(1 - \beta^2)[y_o^2 + \beta^2(v_o t - x)^2]}} \\
s_{12} &= \ln(z_{12} + \sqrt{1 + z_{12}^2}) \\
z_{12}(x) &= -\frac{y_o^2 + (2\beta^2 - 1)(v_o t - x)^2}{2(v_o t - x)\sqrt{(1 - \beta^2)[y_o^2 + \beta^2(v_o t - x)^2]}} \\
s_{13} &= \ln(z_{13} + \sqrt{1 + z_{13}^2}) \\
z_{13}(x) &= \frac{y_o^2 - (v_o t - x)^2}{2(v_o t - x)\sqrt{y_o^2 + h_c^2}} \\
s_{21} &= \ln(z_{21} + \sqrt{1 + z_{21}^2}) \\
z_{21}(x) &= z_{11}(-x) \\
s_{22} &= \ln(z_{22} + \sqrt{1 + z_{22}^2}) \\
z_{22}(x) &= z_{12}(-x) \\
s_{23} &= \ln(z_{23} + \sqrt{1 + z_{23}^2}) \\
z_{23}(x) &= z_{13}(-x) \\
t_o &= \frac{\sqrt{x^2 + y_o^2}}{v_o}
\end{aligned} \tag{9.13}$$

(9.14)

Oznake imaju sledeće značenje:

t_o – trenutak kada talas stiže u posmatranu tačku x voda,

a –strmina čela strujnog talasa u $kV/\mu s$.

Primenom izraza 9.13 može se odrediti talasni oblik indukovnog napona u proizvoljnoj tački x neograničeno dugog voda koji je na rastojanju y_o od mesta udara. Članovi s_{11} , s_{12} i s_{13} u kojima figuriše argument $(v_o t - x)$ predstavljaju komponente indukovnog napona koji se prostire u pravcu porasta x -koordinate. Članovi s_{21} , s_{22} i s_{23} u kojima figuriše argument $(v_o t + x)$ predstavljaju komponente indukovnog napona koji se prostire u pravcu smanjivanja x -koordinate.

Ova metoda se može primenjivati za talasne oblike struja atmosferskih pražnjenja proizvoljnog oblika. U tom slučaju se primenjuje princip superpozicije na više talasa različitih strmina čela, koji se pojavljuju u različitim trenucima.

9.4 Numeričko računanje indukovanih napona na vodu

Parcijalne diferencijalne jednačine 9.4 i 9.5 se mogu rešavati numeričkim putem, podelom voda na elementarne deonice čija je zamenska šema data na slici 9.4.

Ako se u izraze 9.4 i 9.5 zameni da je brzina prostiranja:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \text{ i } Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

tada se parcijalne diferencijalne jednačine mogu transformisati u sledeći oblik:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} Z \frac{\partial i}{\partial t} \quad (9.15)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o Z} \left[\frac{\partial(u - v_i)}{\partial t} \right] \quad (9.16)$$

Ako se napon i struja u tački x na vodu izraze preko direktnih, odnosno inverznih talasa:

$$u = u_d + u_i$$

$$i = \frac{u_d}{Z} - \frac{u_i}{Z}$$

tada se izrazi 9.15 i 9.16 mogu napisati u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_d}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} + \frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} \\ \frac{\partial u_d}{\partial x} - \frac{\partial u_i}{\partial x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} - \frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \end{aligned}$$

Gornji sistem jednačina se može rešiti sabiranjem, odnosno oduzimanjem, nakon čega se dobija:

$$-\frac{\partial u_d}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} + \frac{1}{2v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (9.17)$$

$$-\frac{\partial u_i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{2v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (9.18)$$

Analitičko rešenje parcijalnih diferencijalnih jednačina 9.17 i 9.18 predstavljaju dva putujuća talasa koji se prostiru duž voda u suprotnim smerovima. Vrednost napona pojedinih talasa se može izračunati metodom konačnih razlika, ako se izaberu ekvidistantne tačke po vremenskoj i prostornoj koordinati:

$$\begin{aligned} x_j &= x_o + j\Delta x \text{ za } j = 1, 2, \dots, J \\ t_k &= t_o + k\Delta t \text{ za } k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (9.19)$$

gde je J ukupan broj tačaka na vodu, a K broj vremenskih trenutaka u kojima se naponi računaju.

Parcijalni izvodi direktnog naponskog talasa u_d mogu se približno izraziti preko konačnih razlika:

$$\frac{\partial u_d}{\partial x}(j, k-1) = \frac{u_d(j, k-1) - u_d(j-1, k-1)}{\Delta x} \quad (9.20)$$

$$\frac{\partial u_d}{\partial t}(j, k-1) = \frac{u_d(j, k) - u_d(j, k-1)}{\Delta t} \quad (9.21)$$

Na isti način se izražavaju i parcijalni izvodi inverznog naponskog talasa u_i , vodeći računa jedino o suprotnom smeru prostiranja. Zbog toga koordinata $j+1$ predstavlja tačku iz prethodnog koraka proračuna.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x}(j, k-1) = \frac{u_i(j+1, k-1) - u_i(j, k-1)}{\Delta x} \quad (9.22)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}(j, k-1) = \frac{u_i(j, k) - u_i(j, k-1)}{\Delta t} \quad (9.23)$$

U prethodnim izrazima je usvojen sledeći skraćeni način obeležavanja napona u funkciji vremenske, odnosno prostorne koordinate:

$$\begin{aligned} u_d(x_j, t_k) &= u_d(j, k) \\ u_i(x_j, t_k) &= u_i(j, k) \end{aligned}$$

Ovakav način obeležavanja je pogodan za direktnu primenu pri numeričkom modelovanju pojava.

Posle zamene parcijalnih izvoda predstavljenih preko konačnih razlika u parcijalne diferencijalne jednačine 9.17 i 9.18, dobija se sledeći sistem jednačina:

$$\begin{aligned} \frac{u_d(j, k-1) - u_d(j-1, k-1)}{\Delta x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{u_d(j, k) - u_d(j, k-1)}{\Delta t} \\ + \frac{1}{2v_o} \frac{v_i(j, k) - v_i(j, k-1)}{\Delta t} \\ \frac{u_i(j, k-1) - u_i(j+1, k-1)}{\Delta x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{u_i(j, k) - u_i(j, k-1)}{\Delta t} \\ + \frac{1}{2v_o} \frac{v_i(j, k) - v_i(j, k-1)}{\Delta t} \end{aligned}$$

Ako se usvoji da prostorni korak Δx odgovara vremenskom koraku Δt , odnosno da za jedan vremenski korak talas predje jedan prostorni korak $\Delta x = \pm v_o \Delta t$ u direktnom,

odnosno inverznom smeru, tada se gornji sistem jednačina može napisati u jednostavnijoj formi:

$$u_d(j, k) = u_d(j - 1, k - 1) + \frac{1}{2} [v_i(j, k) - v_i(j, k - 1)] \quad (9.24)$$

$$u_i(j, k) = u_i(j + 1, k - 1) + \frac{1}{2} [v_i(j, k) - v_i(j, k - 1)] \quad (9.25)$$

U slučaju struje groma linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja se indukujući napon u funkciji vremena $V_i(t)$ može izračunati kao zbir dve komponente:

$$V_i = V_{i1} + V_{i2} \quad (9.26)$$

gde su:

- V_{i1} –komponenta usled dejstva čela talasa,
- V_{i2} –komponenta usled dejstva začelja talasa.

$$\begin{aligned} V_{i1} &= -\frac{60h_v}{\beta} s_1 \left[\frac{1 - \beta^2}{\beta v_o} \ln \frac{f(t)}{f(t_o)} - \frac{t - t_o}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - t_o) \\ V_{i2} &= -\frac{60h_v}{\beta} s_2 \left[\frac{1 - \beta^2}{\beta v_o} \ln \frac{f(t - T_f)}{f(t_o)} - \frac{t - T_f - t_o}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - T_f - t_o) \end{aligned} \quad (9.27)$$

Oznake u izrazu 9.27 imaju sledeće značenje:

$$f(t) = \beta v_o t + \sqrt{(\beta v_o t)^2 + (1 - \beta^2)r^2}$$

$s_1 = I_{max}/T_c$ – strmina čela struje,

$s_2 = I_{max}/(2T_z - T_c)$ – strmina začelja struje,

$r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}$ – udaljenost tačke na vodu date koordinatama (x, y) od udara groma sa koordinatama (x_o, y_o) ,

$\beta = v/v_o$ – odnos brzine povratnog udara i brzine svetlosti,

I_{max} – temena vrednost struje goma,

T_c – vreme čela talasa,

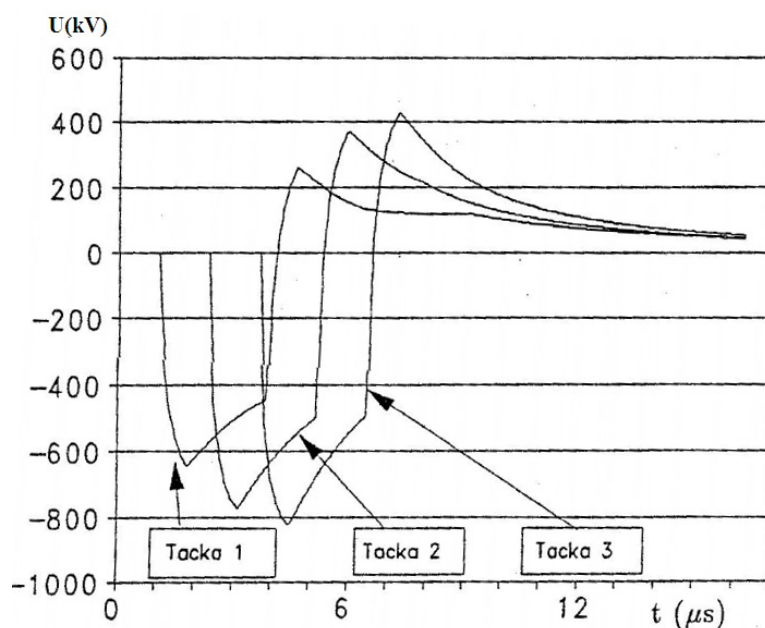
T_z – vreme začelja talasa,

h_c – visina oblaka,

h_v – visina provodnika voda.

Na početku i kraju voda treba definisati granične uslove. Granični uslovi na početku i kraju voda se definišu relacijom prelamanja talasa po diskretnoj metodi. Talasi indukovanih napona $U_d(j, k)$ i $U_i(j, k)$ koji se kreću ka početku, odnosno kraju voda tretiraju se kao upadni talasi za te tačke. Ukoliko su u graničnim tačkama vezani vodovi po kojima se ne vrši indukovanje prenapona, ili se nalaze drugi elementi koji se modeluju ekvivalentnim vodovima, tada se u graničnim tačkama vrši proračun napona uvažavajući indukovane talase kao upadne, kao i sve ostale talase koji dolaze u te granične tačke. Na taj način se može primeniti jedinstveni postupak za modelovanje indukovanih prenapona i procesa prostiranja talasa u složenoj mreži. Korak proračuna se i u ovom slučaju bira da bude manji ili jednak vremenu prostiranja po najkraćem vodu u sistemu.

Na slici 9.5 prikazan je talasni oblik napona na vodu čiji su provodnici visine 20 m iznad ravne površine tla. Udar groma se dogodio u zemlju na rastojanju 100 m od voda. Odnos brzine povratnog udara i brzine svetlosti je $\beta = 0,3$. Vod je tretiran kao beskonačno dugačak, a napon je računat u tački koja je na mestu najbliže tački udara (tačka 1), 200 m desno od te tačke (tačka 2) i 400 m desno od te tačke (tačka 3).



Slika 9.5: Talasni oblik indukovanih napona računat u tački 1 koja je najbliža mestu udara, tački 2 koja je 200 m udaljena i tački 3 koja je 400 m udaljena od mesta najbližeg tački udara

Može se uočiti da je indukovani talas napona bipolarnog karaktera, (u početnom periodu je negativan, a kasnije pozitivan), i da ima tendenciju porasta amplitude sa udaljavanjem od mesta udara. To je posledica superpozicije indukovanog talasa na mestu koje je bliže mestu udara koji se prostire po vodu, na koji se nadgrađuju talasi koji se indukuju u tačkama koje su dalje od mesta udara.

9.4.1 Procena visine indukovanih prenapona

Numerički proračuni daju talasni oblik prenapona, na osnovu koga se može detaljno sagledati ugroženost izolacije, vodeći računa o njenoj volt-sekundnoj karakteristici, prisustvu odvodnika prenapona, uticaja kapacitivnosti pojedine opreme itd. Međutim, za grubu procenu maksimalne vrednosti indukovanih prenapona se može koristiti jednostavan empirijski izraz 9.28:

$$U_{Max} = k \frac{I_m h}{y_o} \quad (9.28)$$

gde su:

k —empirijski faktor koji ima vrednost od 30 do 60, s tim što se u našoj praksi koristi vrednost $k = 30$,

h —visina faznog provodnika (m),

y_o —udaljenost mesta udara groma od voda (m),

I_m —amplituda struje pražnjenja.

Gornji izraz može da posluži za grubu procenu prenapona, ali se može koristiti i za procenu godišnjeg broja ispada usled indukovanih prenapona, o čemu će kasnije biti više reči.

9.4.2 Procena uticaja zaštinog užeta

Eksperimentalno je utvrđeno da zaštino uže ima povoljan uticaj smanjujući indukovane prenapone na faznim provodnicima. Ovaj uticaj se obuhvata kroz empirijski koeficijent sprege između faznog provodnika i uzemljenog provodnika. On ima vrednost 0.3 do 0.4 za srednjenaponske mreže i 0,6-0.9 za niskonaponske mreže sa uzemljenim neutralnim provodnikom na svakom stubu. Indukovan prenapon se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$U_{ind} = U_{ind_o}(1 - k_s) \quad (9.29)$$

gde je:

U_{ind} – indukovani prenapon na faznom provodniku kada se uvažava uticaj sprege,

U_{ind_o} – indukovani prenapon na faznom provodniku kada se ne uvažava uticaj sprege,

k_s – koeficijent sprege.

Kada su bliski fazni provodnik i uzemljeni provodnik, kao što je to slučaj kod niskonaponskih vodova sa uzemljenim neutralnim provodnikom na svakom stubu, indukovana struja u neutralnom provodniku gotovo potpuno poništava uticaj fluksa koji indukuje elektromotornu silu na faznom provodniku, pa se zato indukovani prenapon redukuje na veoma nisku vrednost.

9.5 Statistički proračun indukovanih prenapona

9.5.1 Metoda opasnih parametara

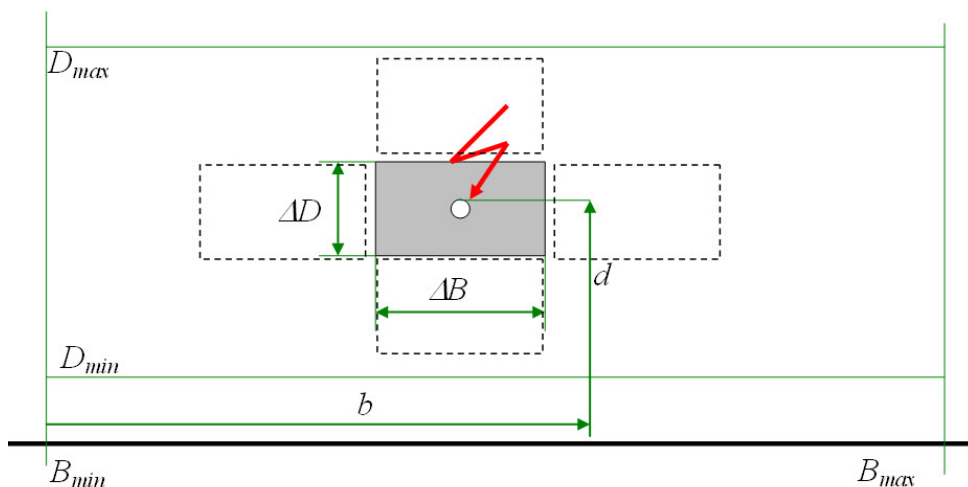
Proračun indukovanih prenapona je značajno dužeg trajanja od proračuna usled direktnih udara zbog numeričkog integraljenja po deonicama analiziranog voda. Za deterministički proračun to nije od velike važnosti, međutim kod statističkog proračuna produženje trajanja proračuna nije zanemarljivo. Stoga se preporučuje metoda opasnih parametara identična kao kod direktnih pražnjenja.

Strmina struje se varira od maksimalne strmine S_{max} postepeno je smanjujući za dekrement ΔS do vrednosti S_{min} . Ukupan broj simulacija za jednu tačku pražnjenja je:

$$N_S = \frac{S_{max} - S_{min}}{\Delta S} + 1 \quad (9.30)$$

Statistički proračun se obavlja za jednu tačku udara definisanu sa dve koordinate: uzdužna b i poprečna obeležena sa d . Ceo analizirani prostor se deli na pravougaonike u čijem centru se analizira atmosferski udar. Smatra se da svi udari unutar posmatranog pravougaonika izazivaju identičnu visinu prenapona. Lokacija atmosferskog udara se varira duž voda od koordinate B_{min} do B_{max} i na udaljenosti normalno na vod od D_{min} do D_{max} , kao na slici 9.6.

Za svaku strminu struje se proračunava vrednost napona u tačkama registracije. Kada napon prevaziđe podnosivi napon u svim tačkama registracije, određuje se vrednost



Slika 9.6: Variranje mesta udara duž voda i okomito na vod

struje koja izaziva preskok u svakoj od tačaka registracije, na isti način kao u slučaju direktnog pražnjenja u fazni provodnik, što je prikazano u poglavlju 8.1.1 na strani 306.

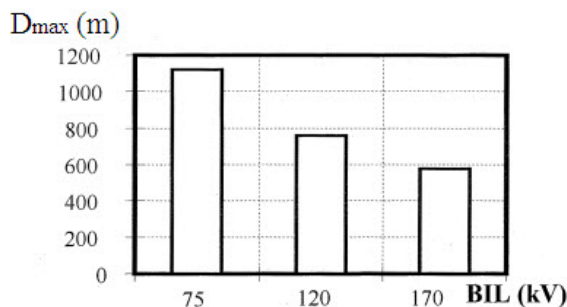
Trenutak preskoka na izolaciji se izračunava kada indukovani napon premaši podnosivi napon izolacije na osnovu nekog od modela za određivanje preskočnog napona.

9.5.2 Proračun godišnjeg broja preskoka

Metoda opasnih parametara atmosferskih pražnjenja se koristi za izračunavanje verovatnoće prevazilaženja parametara za udar unutar pravougaonika definisanog prema slici 9.6 određenom tačkom udara, u slučaju kada je čelo struje pražnjenja predstavljeno linearno rastućom funkcijom, dok prenapon na posmatranom objektu ne pređe podnosivi napon izolacije. Minimalna amplituda struje pražnjenja koja je dovoljna da izazove kvar izolacije može se izračunati kao proizvod vremena do preskoka i strmine čela struje. U slučaju indukovnog prenapona, isti princip se može primeniti tokom vremenskog intervala porasta struje koja izaziva indukovr prenapone [99].

Varijacija mesta atmosferskog udara okomito na vod se vrši od minimalne udaljenosti D_{min} . Zona bliža od D_{min} predstavlja atraktivnu zonu voda, koja se određuje prema sekciji 6.2.2 na strani 191, odnosno prema slici 6.5. Obično se usvaja da je $D_{min} = 3 \times H_{ef}$, gde je H_{ef} efektivna visina najvišeg faznog provodnika. Efektivna visina faznog provodnika računa se prema izrazu 8.91 na strni 343, Udaljenost D_{max} se usvaja tako da je verovatnoća preskoka i pri najkritičnijim parametrima atmosferskog pražnjenja (maksimalna strmina i amplituda struje) veoma mala.

Na slici 9.7 prikazana je maksimalna udaljenost D_{max} do koje indukovani prenaponi usled atmosfrski pražnjenja imaju uticaja, u funkciji podnosivog napona izolacije (BIL), odnosno odgovarajućeg radnog napona sistema.



Slika 9.7: Maksimalna zona uticaja indukovanih prenapona D_{max} u funkciji podnoivog atmosferskog prenapona BIL

Godišnji broj preskoka izolacije nadzemnih vodova izazvanih pražnjenjima u elementarne pravougaone površine na nivou tla dimenzija (izraženih u km) je gde je verovatnoća preskoka izolacije u slučaju pražnjenja groma u tačku u centru posmatrane elementarne pravougaone površine $A_{\Delta D \Delta B} = \Delta D \cdot \Delta D$ data je izrazom 9.31.

$$N_{\Delta D \Delta B} = N_g \cdot A_{\Delta D \Delta B} \cdot P_i \quad (9.31)$$

gde je:

N_g -godišnji broj udara groma po km^2 u ravnu površinu zemlje, odnosno godišnja gustina pražnjenja.

$A_{\Delta D \Delta B}$ -atraktivna površina posmatranog elementarnog pravougaonika sa koordinatom centralne tačke u koju se događa pražnjenje b i d .

$P_{b,d}$ -verovatnoća kvara izolacije (preskoka ili proboja) pri atmosferskom pražnjenju u tačku sa koordinatom $P_{b,d}$.

Ukupan broj kvarova izolacije dobija se kada se saberu brojevi kvarova kada se lokacija pražnjenja variraju duž ose paralelne vodu od B_{min} do B_{max} sa korakom Δb i po osi normalnoj na vod sa korakom Δd od D_{min} do D_{max} .

$$N_{ukup} = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_d} N_{\Delta D \Delta B} \quad (9.32)$$

Ukupan broj varijacija duz voda i normalno na vod se računa iz izraza:

$$\begin{aligned} n_b &= \frac{B_{max} - B_{min}}{\Delta b} \\ n_d &= \frac{D_{max} - D_{min}}{\Delta d} \end{aligned} \quad (9.33)$$

Broj varijacija strmine struje pražnjenja je obleležen oznakom n_s .

U tabeli 9.1 dat je optimalan broj varijacija duž voda n_b , okomito na vod n_d i broj varijacija strmina struje na čelu talasa n_s . Usvojene su referentne vrednosti broja varijacija, koji je dovoljno velik, da se mogu proračuni sa tim vrednostima smatrati tačnim. Zatim je variran broj varijanti tako da razlika u izračunatom broju ukupnih kvarova za usvojen referentni slučaj i optimalan broj bude manja od 5%, prema [99].

Tabela 9.1: Optimalan broj varijacija duž voda n_b , okomito na vod n_d i broj varijacija strmina struje na čelu talasa n_s

Oznaka	Referentna vrednost	Optimalna vrednost
n_b	10	7
n_b	20	14
n_s	20	12

Optimalan ukupan broj varijacija prelaznih režima je 1176, za razliku od referentnog broja koji je 4000.

Veoma važan parametar pri statističkom pristupu proceni broja preskoka usled induktivnog delovanja struje atmosferskog pražnjenja je vremenski korak proračuna ΔT pri simulacije prelaznog procesa.

Izvršene su analize osetljivosti izračunatog indukovano prenapona za nadzemne vodove bez refleksije od krajeva (stavljani su otpornici čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi faznih provodnika) za različite dužine vodova ma kojima se događa indukovanje. Empirijska relacija za optimalni vremenski korak proračuna koja daje grešku izračunavanja manju od 5% u poređenju sa izračunatim prenaponom dobijenim sa vremenskim korakom od 10 ns izvedena je u sledećem obliku:

$$\Delta T = 0.1 \frac{D_{ind}}{c} \quad (9.34)$$

gde je:

D_{ind} -minimalna dužina voda na kome se javlja efekat indukcije (m),

c -brzina svetlosti (m/s).

Skraćivanje trajanja proračuna se može postići na taj način što se usvaja da minimalna strmina struje S_{min} ne bude strmina čela struje koja se pojavljuje sa verovatnoćom manjom od 5%, kao što je uobičajeno, već da to bude strmina struje koja može izazvati preskok na udaljenosti mesta udara D_{min} od analiziranog voda.

Poglavlje 10

Šeme za proračun atmosferskih prenapona

10.1 Proračun ugroženosti transformatorske stanice

10.1.1 Proračun ugroženosti visokonaponske transformatorske stanice

Napajanje transformatorskih stаница u mrežama nazivnog napona iznad 35 kV po pravilu se vrše vodovima sa zaštitnim užadima. Prilikom atmosferskih pražnjenja u zaštitno uže, ukoliko su impedanse stubova dovoljno velike, a struja pražnjenja dovoljnog intenziteta, dolazi do povratnog preskoka. Zamenska šema za proračun ugroženosti visokonaponske transformatorske stanice prikazana je na slici 10.1. Šema prikazuje postrojenje sa dva transformatorska polja. Drugo transformatorsko polje je prikazano umanjenih dimenzija radi bolje preglednosti crteža.

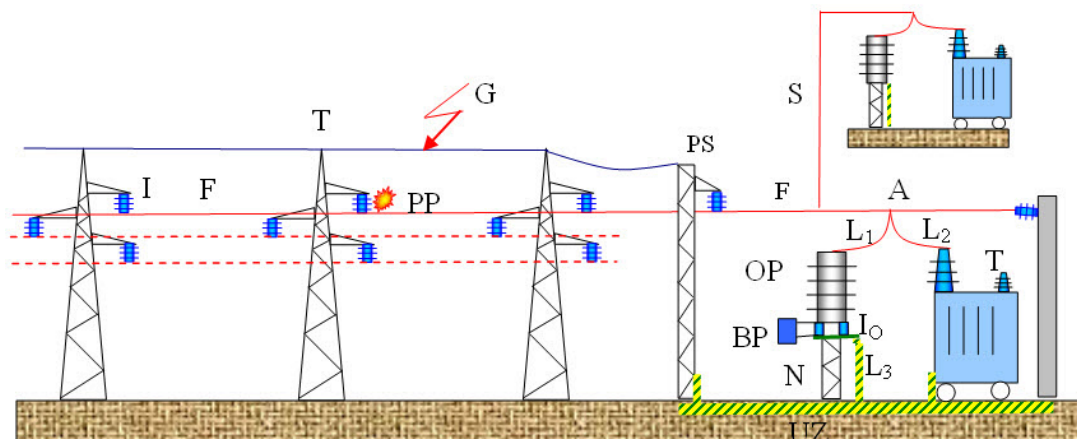
Na slici 10.1 tačkastim linijama su označeni fazni provodnici koji se ne uključuju u šemu, jer samo faza **F** ulazi u ekvivalentnu šemu. Oznake na slici 10.1 imaju sledeće značenje:

I izolator, koji se modeluje iskrištem na kome se događa preskok,

F - najviši fazni provodnik ili fazni provodnik najbliži metalnom stubu kod horizontalnog rasporeda provodnika,

T - metalni stub, čija se samo gonja konzola uzima u obzir pri kreiranju zamenske šeme,

PP - povratni preskok,



Slika 10.1: Zamenska šema za proračun ugroženosti visokonaponske transformatorske stanice od povratnog preskoka na vodu

G - model atmosferskog pražnjenja, po pravilu izvor trougaonog talasa koji nailazi po vodu karakteristične impedanse 300-400 Ω koja simulira kanal pražnjenja,

PS - ulazni stub u postrojenje, po pravilu portalni stub,

L₁ - dužina veze od čvorne tačke **A** do gornjeg priključka odvodnika prenapona,

L₂ - dužina veze od čvorne tačke **A** do priključka energetskog transformatora,

OP - odvodnik prenapona,

BP - brojač pražnjenja koji se u savremenim postrojenjima često koristi, koji nema nikakvu ulogu u samoj ekvivalentnoj šemi,

I_o - izolacioni odstoynici koji odvajaju podnožje odvodnika prenapona od metalnog nosača odvodnika, sa svrhom da sva struja pražnjenja kroz odvodnik prolazi kroz brojač,

L₃ - dužina veze od podnožja odvodnika prenapona do spojnice za uzemljivač,

N - metalni nosač odvodnika prenapona,

T - energetski transformator,

UZ - uzemljivač postrojenja, koji je spojen sa ulaznim portalom **PS**, spustom od odvodnika prenapona do uzemljivača i uzemljivačkom vezom za transformator,

S - sabirnice postrojenja.

Napomene:

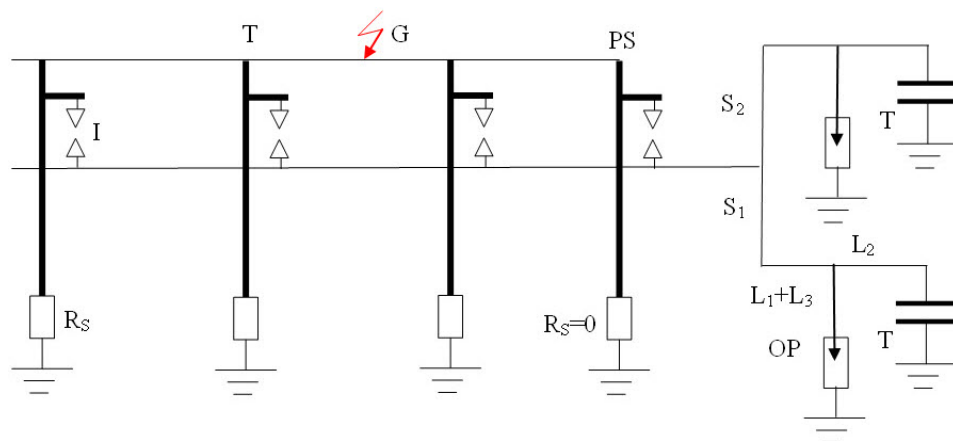
1. Nekada se odvodnik prenapona direktno uzemljavao od donjeg priključka za uzemljenje do stezaljke na samom uzemljivaču. Danas se donji priključak odvodnika vodi na brojač pražnjenja **BP**, a drugi priključak brojača pražnjenja se vodi do uzemljivača. Da bi brojač mogao da registruje impulsne struje pražnjenja koje prolaze kroz njega, mora da postoji izolacija između donjeg kraja odvodnika i postolja za odvodnik **N**.
2. Smatra se da je uzemljivačka traka **UZ** ekvipotencijalna celom dužinom, jer nije razvijen adekvatan model delova uzemljivača koji povezuju odvodnik i transformator ispod zemlje, za analizu brzih prelaznih režima.
3. Metalni nosač odvodnika prenapona se nikada ne koristi kao veza sa uzemljivačem, već mora da se koristi poseban zemljovodni provodnik.
4. Radi pojednostavljenja proračuna, dužina veze između čvorne tačke **A** i gornjeg priključka odvodnika prenapona se ekvivalentira zajedničkom dužinom $L_e = L_1 + L_2$, a donji kraj odvodnika prenapona je direktno uzemljen.
5. Energetski transformatori se pri proračunu atmosferskih prenapona zamenjuju ulaznim kapacitivnostima.
6. Broj raspona ispred ulaska u transformatorsku stanicu koji može da ima uticaja zavisi od impedansi uzemljenja stubova, naponskog nivoa i dužine raspona. Za visokonaponske mreže 110 kV i više broj raspona je 3 do 4, a za sredjenaponske mreže može biti i više od 6.
7. Broj transformatorskih polja značajno utiče na ugroženost transformatora od prenapona. Najkritičniji slučaj je kada je samo jedan transformator uključen, tako da se preporučuje ta šema za proračun. Ukoliko je takva konfiguracija jako retka, tada se modeluju i sabirnice i više transformatorskih polja.

Zamenska šema koja se koristi u proračunu ima oblik kao na slici 10.2. Razlika je u odnosu na predhodnu šemu je što su izbačeni svi nepotrebni elementi koji su služili samo za tumačenje.

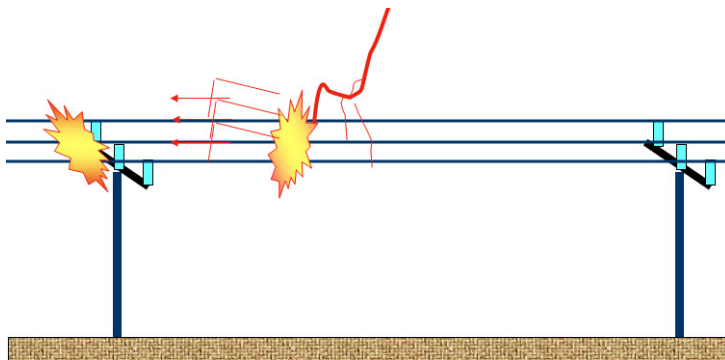
10.1.2 Analiza stubne transformatorske stanice

Napajanje transformatorskih stanica u mrežama između 10 kV i 20 kV po pravilu se vrše vodovima bez zaštitnih užadi. Smatra se da se svaki udar u jednu fazu prenese na sve 3 faze usled malog rastojanja, kao na slici 10.3.

Na slici 10.4 prikazana je fotografija dve tipične stubne transformatorske stanice. Na slici (a) prikazana je 10 kV stubna transformatorska stanica sa rasporedom elemenata rastavljač i osigurač ispred transformatora, a sa suprotne strane stuba najudaljenije



Slika 10.2: Ekvivalentna šema za proračun atmosferskih prenapona na transformatoru usled povratnog preskoka



Slika 10.3: Objašnjenje nastanka preskoka između faza kod srednjenaponskih vodova

od transformatora je odvodnik prenapona. Na slici (b) prikazan je povoljniji raspored elemenata. Odvodnik prenapona je najbliži transformatoru kao šticeom objektu, a udaljeniji elementi su topljivi osigurači i iznad njih rastavljač. Kod stubnih transformatorskih stanica je veoma važno odabrati povoljan raspored elemenata sa stanovišta prenaponske zaštite. Na slici (a) napajanje se vrši golim provodnicima. Na slici (b) napajanje transformatorske stanice se vrši samonosivim kablovskim snopom u koga atmosferski udar dovodi do proboja i prostiranja talasa po sve 3 faze.

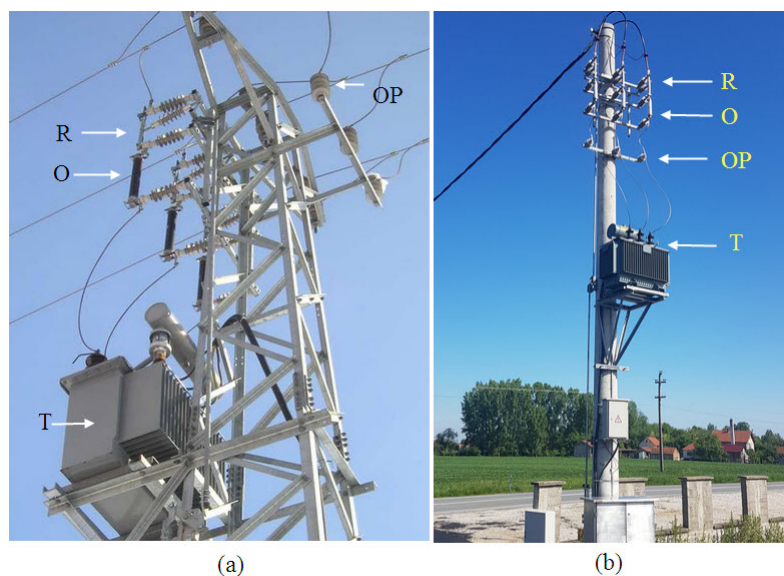
Oznake na slici 10.4 imaju sledeće značenje:

R - rastavljač,

O - osigurač,

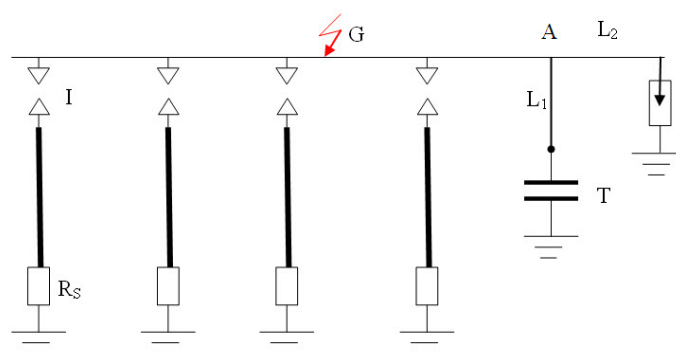
OP - odvodnik prenapona,

T - transformator.



Slika 10.4: Fotografija 2 stubne transformatorske stanice: (a) Neispravno postavljene odvodnici, (b) ispravno postavljene odvodnici prenapona

Zamenska šema za proračun ugroženosti visokonaponske transformatorske stanice za slučaj srednjenaponske mreže prema slici 10.4 prikazana je na slici 10.5 za slučaj (a).



Slika 10.5: Zamenska šema za proračun ugroženosti stubne transformatorske stanice kada je odvodnik udaljen od transformatora

Oznake na slici 10.5 imaju sledeće značenje:

L_1 - rastojanje od vrha stuba do štice transformatora,

L_2 - rastojanje od vrha stuba do odvodnika prenapona.

Analiza ugroženosti trofaznih vodova

Kada se analizira ugroženost visokonaponskih vodova od atmosferskih prenapona, tada je od interesa određivanje godišnjeg broja jednopolnih kvarova koji se mogu eliminisati tehnikom brzog automatskog ponovnog uključanja APU koje većina potrošača ne oseća i broja dvopolnih ili trolnih zemljospojeva, koji se trolno isključuju i pretstavljaju prekid napajanja. Takođe je od interesa da li postoji mogućnost preskoka na rasponu u slučaju voda sa dugim rasponima.

390

Na rasponu se preskok modeluje tačno na mestu atmosferskog udara kratkim vodom koji simulira kanal luka koji je jednak rastojanju u vazduhu između provodnika na red sa iskrištem. Predpostavka je da će preskok na rasponu nastati upravo na mestu udara atmosferskog pražnjenja zbog intenzivnih jonizacionih procesa na tom mestu. Zbog toga se model pojednostavljuje, jer se pri analizi variranja lokacije pražnjenja sinhronizovano varira i mesto preskoka na rasponu. Na slici je model preskoka na rasponu modelovan sledećim granama:

$Z - Z_A$, $A - A_B$, $B - B_C$ - grane koje modeluje dužinu luka koja je jednaka rastojanju između zaštitnog užeta i faze A, između faza A i B i između B i C na rasponu mestu udara u zaštitno uže.

$Z_A - A$, $A_B - B$, $B_C - C$ - iskrište koje modeluje preskok između zaštitnog užeta i faze A, preskok između faze A i faze B i preskok između faze B i faze C na mestu atmosferskog udara u zaštitno uže.

Obično su rastojanja između provodnika toliko mala u odnosu na dužine raspona da se modeluju kratkim vodom koji je jednak karakterističnoj impedansi faznog provodnika, a dužina odgovara vremenu prostiranja po vodu koje je jednako jednom vremenskom koraku proračuna.

$$L_{Luka} = \Delta t \times v_o \quad (11.1)$$

gde je:

L_{Luka} -dužina razmaka između provodnika,

Δt -elementarni korak proračuna,

v_o -brzina svetlosti u vakuumu (vazduhu)

Karakteristična impedansa luka je promenljiva veličina koja ima neznatan uticaj na rezultate proračuna, pa se radi jednostavnosti izjednačuje sa karakterističnom impedansom faznog provodnika. Model bi se mogao i pojednostaviti bez te grane, ali je najčešće fizika procesa takva da se preskok kaskadno širi na sve tri faze. Iz tog razloga se može smatrati da je dužina luka za sve razmake između provodnika u većini slučajeva jednaka:

$$L_{Luka} = Z - Z_A = A - A_B = B - B_C = B_C - C \quad (11.2)$$

Do preskoka može da dođe sa mnogo većom verovatnoćom na izolatorima na stubovima, jer su preskočna rastojanja mnogo manja nego na rasponu. Za razmatrani slučaj nadzemnog voda sa vertikalnim rasporedom provodnika (stubovi tipa "jela" kod jednosistemskih ili tipa "bure" kod dvosistemskih vodova), ukupan broj preskočnih mesta je 2 x 3 preskočna mesta na izolatorima na stubovima koji se nalaze na krajevima posmatranog

raspona i 3 preskočna mesta na rasponu. U slučaju dvosistemskih vodova, na stubovima se posmatraju samo 3 izolatora na kojima može da dođe do preskoka, jer je drugi sistem potpuno simetričan. Prilikom variranja mesta udara menja se potrebna struja pražnjenja koja izaziva preskok na pojedinim mestima.

Kriterijum preskoka je kada nastupi prvi preskok prema određenoj fazi. Ukoliko je udar blizu stuba, sigurno je da će preskok nastupiti na izolaciji stuba, jer je tu daleko niži preskočni napon zbog manjeg preskočnog rastojanja nego na rasponu. U tom trenutku se registruje presko n toj fazi. Međutim, ako se udar događa na rasponu, tada se može desiti da preskok nastupi pre na rasponu nego na stubovima zbog toga što nakon udara polovina struje pražnjenja ide prema svakom od stubova na krajevima raspona. U tom slučaju se tretira da je prvi preskok na rasponu prema određenoj fazi.

U slučaju vodova sa horizontalnim rasporedom provodnika dovoljno je razmatrati samo dva provodnika (jedan bočni i srednji), jer je drugi bočni provodnik pod identičnim uslovima, pa će na njemu nastupati preskok u isto vreme kada i na prvom bočnom provodniku zbog simetrije.

11.2 Metoda opasnih parametra trofaznog voda

Kreiranje krive opasnih parametra parametra atmsferskog pražnjenja (LLP-od engl. Lightning Limiting Parameters) zasniva se na pretpostavci da se čelo talasa struje atmosferskog pražnjenja može aproksimirati linearno rastućom funkcijom koja ima strminu S (kA/ μ s) u tacki pražnjenja. Struja u funkciji vremena na mestu pražnjenja ima vrednost:

$$i(t) = S \times t \quad (11.3)$$

gde je:

$i(t)$ -struja atmosferskog pražnjenja u kanalu groma,

S -strmina čela struje koja se smatra konstantnom,

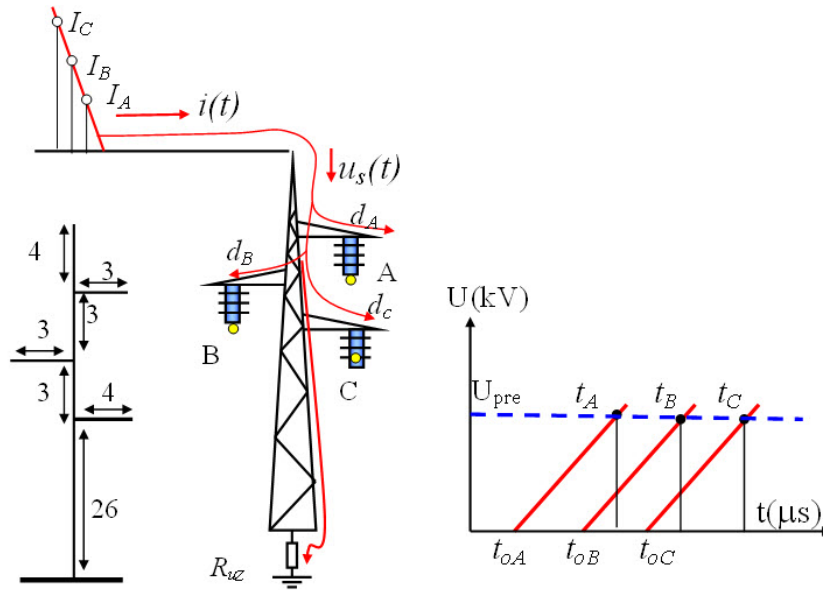
t -vreme računato od trenutka udara u zaštitno uže.

Ukoliko je karakteristična impedansa zaštitnog užeta Z_z , tada se struja deli po zaštnom užetu na 2 dela, pa se može smatrati da je naponski talas koji se prostire po zaštitnom užetu rezultat polovine struje pražnjenja, odnosno:

$$u(t) = \frac{Z_z \cdot i(t)}{2} \quad (11.4)$$

Kada naponski talas dođe do vrha stuba, prelama se u skladu sa odnosom karakterističnih impedansi zaštitnih užeta i stuba. Naponski talas stiže do kraja najviše konzole posle vremena t_{0A} , do kraja srednje konzole posle vremena t_{0B} i do kraja najniže konzole posle vremena t_{0C} od trenutka udara. Naponi na konzolama za faze A , B i C rastu uz postojanja višestrukih refleksije talasa od uzemljivača i od vrha stuba, zbog čega napon na konzolama nije linearno rastući.

Na slici 11.2 prikazana je skica stuba sa putanjama prostiranja struja od mesta udara do vrha stuba i duž elemenata stuba, što izaziva različita vremena pristizanja talasa do pojedinih konzola (levo), skica uspostavljanja napona na najvišem izolatoru faze A , srednjem izolatoru faze B i najnižem izolatoru faze C u cilju određivanja trenutaka preskoka (desno). U levom donjem uglu date su dimenzije izražene u (m) konkretnog analiziranog stuba.



Slika 11.2: Određivanje trenutaka preskoka na izolatorima na fazama A , B i C

Napon na izolatorima između konzole stuba i faze, u slučaju kada je zanemaren radni napon na fazama, napreže izolaciju od trenutka nailaska na konzolu, odnosno:

$$u_j(t) = f(t - t_{0j}) \text{ za faze } j = A, B, C$$

gde je:

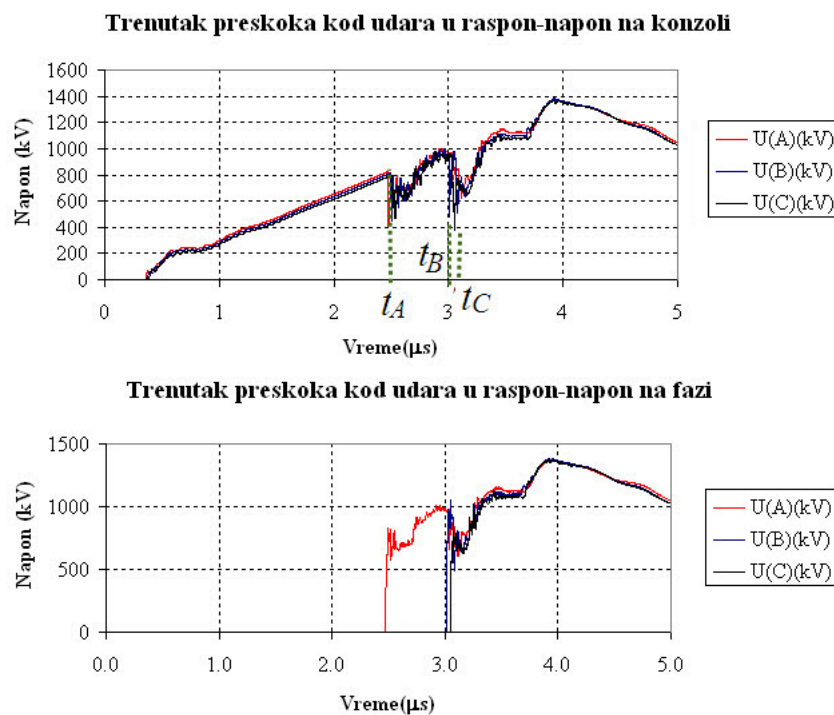
$u_j(t)$ -napon između konzole stuba i faza A , B ili C . Prepostavljeno je da je radni napon na fazi na potencijalu nula, ukoliko je zanemaren radni napon. Uticaj radnog napona je beznačajan za sisteme nižeg napona od 400 kV. Za sisteme iznad 400 kV radni napon ima uticaja, ali statistički gledano ne utiče bitno na godišnji broj preskoka jer u zavisnosti od trenutka udara u odnosu na trenutnu vrednost radnog napona može da poveća ili smanji naprezanje, što je opisano u tački 8.4.9 na strani 355.

$f(t - t_{0j})$ -funkcionalna zavisnost napona od trenutka nailaska na izolator faze $j = A, B, C$ do trenutka t , koja predstavlja meru naprezanja izolacije koja zavisi od visine napona, talasnog oblika i ukupnog trajanja od nailaska napona na izolator.

t_{0j} -vreme prostiranja talasa od mesta udara do trenutka nailaska na vrh konzole gde se nalazi izolatorski lanac, za faze $j = A, B, C$.

11.2.1 Primer proračuna struje koja izaziva preskok na pojedinim fazama kada je udar u sredinu raspona

Na slici 11.3 prikazan je talasni oblik napona na konzoli (gore) i na faznom provodniku (dole) pri atmosferskom udaru u raspon sa amplitudom struje 121 kA i trajanjem čela $T = 2.8 \mu s$, odnosno strminom struje $S = 43 \text{ kV}/\mu s$. Dužina raspona je 200 m, karakteristična impedansa užeta 579 Ω , a karakteristična impedansa stuba 129 Ω , otpornost rasprostiranja uzemljenja stuba je usvojena da iznosi $R_{uz} = 20 \Omega$. Na slici 11.2 u levom donjem uglu date su na skici stuba njegove dimenzije. Ostali podaci nisu bitni za proračun.



Slika 11.3: Talasni oblik napona na konzoli (gore) i na faznom provodniku (dole) pri atmosferskom udaru u raspon

Na osnovu proračuna prelaznog procesa i određivanja trenutaka preskoka na fazama

A , B i C , određene su linearno rastuće struje u kanalu pražnjenja I_A , I_B i I_C u trenucima $t_A - t_{0A}$, $t_B - t_{0B}$ i $t_C - t_{0C}$ koje su dovoljne da izazovu preskoke na određenim fazama. Vreme do preskoka se računa od trenutka nailaska talasa na konzolu faze j obeleženom kao t_{oj} do trenutka preskoka t_j , za $j = A, B, C$.

U tabeli 11.1 data su vremena do pojave napona na konzoli za pojedine faze, vremena do preskoka računata od trenutka udara kao referentnog vremena do trenutka preskoka, vremena uspostavljanja napona na izolatoru na kome se razmatra preskok, kao i vrednost struja koja je dovoljna da izazove preskok, za strminu struje $S_1 = 43 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

Tabela 11.1: Izračunavanje struje dovoljne da izazove preskok na pojedinim fazama za udar u sredinu raspona i strminu struje $43 \text{ kA}/\mu\text{s}$

Vreme do pojave napona na konzoli	t_{0A}	t_{0B}	t_{0C}
Vreme u (μs)	0.357	0.366	0.378
Vreme od udara do preskoka	t_A	t_B	t_C
Vreme u (μs)	2.478	3.012	3.051
Vreme od nailaska talasa do preskoka	$t_A - t_{0A}$	$t_B - t_{0B}$	$t_C - t_{0C}$
Vreme u (μs)	2.121	2.646	2.673
	I_A (kA)	I_B (kA)	I_C (kA)
Struja koja izaziva preskok	91.20	113.78	114.93

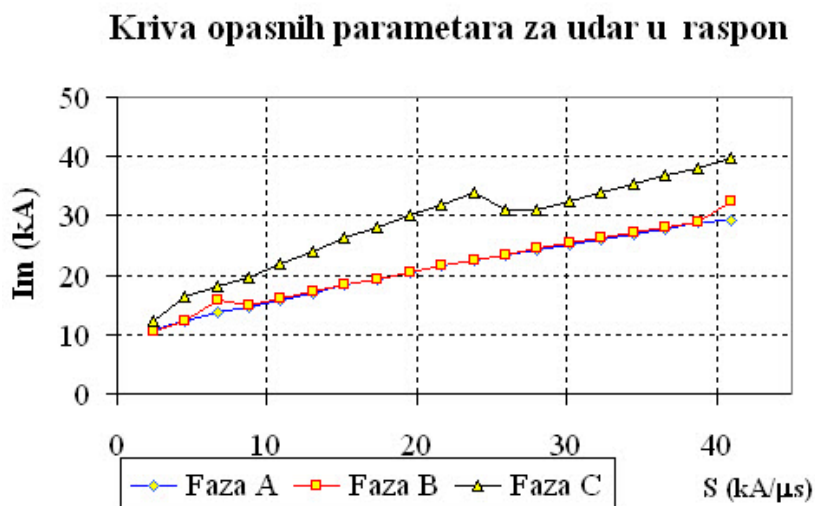
Parovi struja I_A, S_1 , I_B, S_1 i I_C, S_1 predstavljaju 3 tačke za 3 krive opasnih parametara za faze A , B i C . Proces dobijanja krive opasnih parametara se nastavlja tako što se proračun ponavlja za strmine struja:

$$\begin{aligned}
 S_2 &= S_1 - \Delta S \\
 S_3 &= S_2 - \Delta S \\
 &\vdots \\
 S_n &= S_{n-1}
 \end{aligned} \tag{11.5}$$

gde je: $S_1 = S_{max}$, $S_n = S_{min}$, $\Delta S = (S_{max} - S_{min})/n$.

n predstavlja broj simulacija sa različitim ekvidistantno raspoređenim strminama, koji je empirijski ustanovljen da treba da bude oko 20, što optimalno sa stanovišta tačnosti sa jedne strane, i trajanja proračuna sa druge strane.

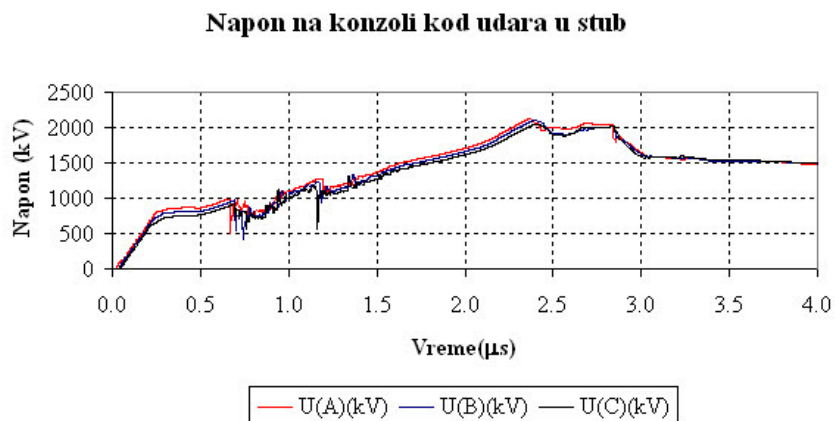
Na slici 11.4 prikazana je kriva opasnih parametara za slučaj kada je udar u sredinu raspona. za vod napona 110 kV.



Slika 11.4: Kriva opasnih parametara za slučaj kada je udar u sredinu raspona

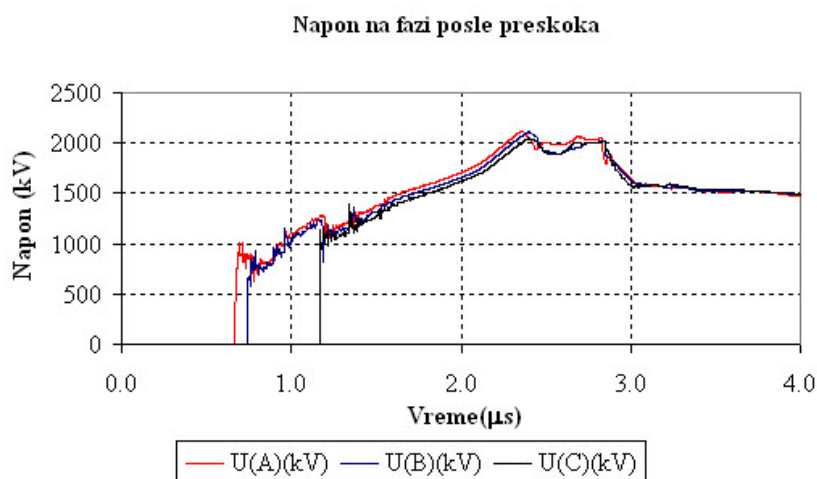
11.2.2 Primer proračuna struje koja izaziva preskok na pojedinim fazama kada je udar u stub

Proračun ponovljen kada se udar dogodio u stub. Talasni oblici napona na krajevima konzole i na faznim provodnicima prikazani su na slikama 11.5 i 11.6.



Slika 11.5: Talasni oblik napona na konzoli kod udara u stub

U tabeli 11.2 data su vremena do pojave napona na konzoli za pojedine faze, vremena do preskoka računata od trenutka udara kao referentnog vremena do trenutka preskoka, vremena uspostavljanja napona na izolatoru na kome se razmatra preskok, kao i vrednost struja koja je dovoljna da izazove preskok, za strminu struje $S_1 = 43 \text{ kA}/\mu\text{s}$, kada se udar dogodio u vrh stuba.



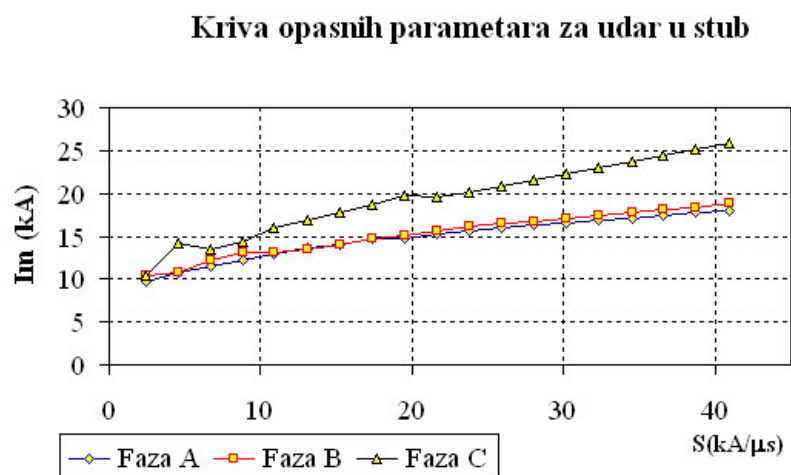
Slika 11.6: Talasni oblik napona na konzoli kod udara u stub

Tabela 11.2: Izračunavanje struje dovoljne da izazove preskok na pojedinim fazama za udar u vrh stuba i strminu struje $43 \text{ kA}/\mu\text{s}$

Vreme do pojave napona na konzoli	t_{0A}	t_{0B}	t_{0C}
Vreme u (μs)	0.0240	0.0360	0.040
Vreme od udara do preskoka	t_A	t_B	t_c
Vreme u (μs)	0.672	0.744	1.168
Vreme od nailaska talasa do preskoka	$t_A - t_{0A}$	$t_B - t_{0B}$	$t_C - t_{0C}$
Vreme u (μs)	0.648	0.744	1.128
	I_A (kA)	I_B (kA)	I_C (kA)
Struja koja izaziva preskok	27.86	30.44	48.60

Na slici 11.7 prikazana je kriva opasnih parametara za udar u stub.

Može se uočiti upoređivanjem slika 11.4 i 11.7 da se za male strmine čela talasa struja dobijaju veoma slične amplitude struja koje prouzrokuju preskok pri udaru u raspon i stub, dok se za velike strmine amplitude struja veoma razlikuju, odnosno dobijaju se mnogo veće amplitude struja pri udaru u raspon. To se može protumačiti uticajem krive preskočnog napona na izolaciji stuba, kod koje za velike strmine napona je potreban mnogo veći preskočni napon nego u slučaju malih strmina talasa.



Slika 11.7: Kriva opasnih parametara za slučaj udara u stub

Poglavlje 12

Energija oslobođena u odvodniku prenapona

12.1 Energetska naprezanja pri radu odvodnika prenapona

Osnovna razlika u ponašanju visokonaponskih i srednjenaponskih metal-oksidnih odvodnika prenapona je u apsorbiranoj energiji u toku perioda pražnjenja kada su napregnuti različitim vrstama prenapona. Visokonaponski metal-oksidni odvodnici prenaponi su najviše napregnuti sklopnim prenaponima koji prouzrokuju protok velike količine elektriciteta kroz odvodnik u toku celokupnog perioda trajanja prenapona. U slučaju mreže sa dugaćkim nadzemnim vodovima ili kablovima, pri nastanku sklopnog prenapona dolazi do protoka zaostalog električnog opterećenja sa vodova kroz odvodnik, koji mora da podnese tu energiju. Najkritičnija sklopna operacija je ponovno uključenje na vod na kojem postoji zaostali napon suprotnog polariteta od napona sa strane izvora, usled električnih opterećenja koja se nisu rasteretila za vreme beznaponske pauze (APU bez kvara ili trofazno APU pri jednopolnom kvaru). Sa druge strane, srednjenaponski odvodnici prenapona su najviše napregnuti direktnim atmosferskim pražnjenjem u blizinu štice objekta. Naprezanja su u ovom slučaju kratkotrajna, ali su struje koje protiču kroz odvodnik znatno veće. Zbog toga se vrši laboratorijsko testiranje odvodnika prenapona u pogledu energetske sposobnosti sa dve vrste testova:

- sposobnost podnošenja višestrukog transfera elektriciteta Q_{rs} , što se radi strujnim talasima relativno male amplitude i dugog trajanja (pravougaoni talasi trajanja od 2 ms do 4 ms za odvodnike za postrojenja (station class arresters) koji su predviđeni za energetske teže uslove rada. Mogu se koristiti i talasi oblika jedne poluperiode sinusnog oblika ekvivalentnog trajanja 2 do 4 ms. Za distribucijske odvodnike (distrib-

nution class arresters koji su predviđeni za manja energetska naprezanja) ispitivanja se rade sa serijom strujnih impulsa oblika $8/20 \mu s$.

- Ispitivanje odvodnika u radnim uslovima vrši se kratkotrajnim atmosferskim udarnim strujnim talasima velike amplitude (talasi oblika $4/10$ ili $8/20 \mu s$).

Pod ispitivanjem u radnim uslovima vrši se naknadno izlaganje ispitivanih uzoraka povišenom naponu industrijske učestanosti da bi se proverila sposobnost termičkog oporavka posle ispitivanja.

Za visokonaponske metal-oksidne odvodnike prenapona postoje standardne metode za izbor energetske apsorpcione moći koje su zasnovane na proceni energije pražnjenja akumulirane u nadzemnim vodovima koja izaziva protok dugotrajne struje kroz odvodnik. Apsorbovana energija sredjenaponskih odvodnika prenapona prouzrokovana atmosferskim pražnjenjem može se proceniti analitički i numeričkom metodom koja je opisana na ovom mestu.

12.2 Procena energije oslobođene u odvodniku

Apsorbovana energija u odvodniku prenapona je izračunata u toku simulacije prelaznog procesa usled atmosferskog prenapona na osnovu sledeće relacije:

$$W = \int_{t_o}^t u_A(t) i_A(t) dt \quad (12.1)$$

gde su:

W - energija oslobođena u odvodniku prenapona u toku procesa pražnjenja, izražena u džulima,

$u_A(t)$ - trenutna vrednost napona na odvodniku (trenutna vrednost preostalog napona) izražena u voltima,

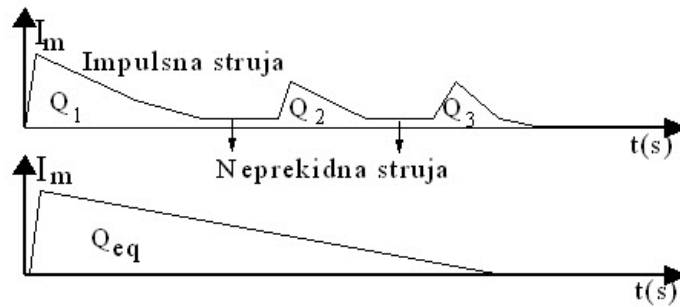
$i_A(t)$ - trenutna vrednost struje pražnjenja kroz odvodnik izražena u amperima,

t_o - trenutak prvog pojavljivanja atmosferskog prenapona na krajevima odvodnika,

t - vreme izraženo u sekundama.

Simulacija prelaznog procesa se vrši strujnim talasom linearno opadajućeg začelja amplitude I_{max} , bez uvažavanja čela talasa koje je zanemarljivo kratko u odnosu na trajanje talasa. Za energetska naprezanja odvodnika prenapona pri negativnim udarima,

koji su oko 10 puta češći od pozitivnih, vrši se ekvivalentiranje višestrukog negativnog pražnjenja sa jednim udarom amplitude koja odgovara maksimumu prvog udara, a trajanja da količina elektriciteta koja protekne kroz kanal groma bude identična za višestruki udar i za ekvivalentni jednostruki, kao na slici 12.1. Pri proračunu ekvivalentne količine elektriciteta uzima se u obzir samo udarna količina elektriciteta za vreme proticanja impulsne struje, a ne uzima u obzir uticaj neprekidne struje pražnjenja koja ima malu amplitudu, ali dugo trajanje i može da prenese značajnu količinu elektriciteta kroz kanal groma. Neprekidna struja pražnjenja ima amplitudu nekoliko stotina ampera, koja ne može da izazove naprezanje odvodnika prenapona, jer ne može da prouzrokuje porast napona na odvodniku iznad kolena u U-I karakteristike kada počinje naglo povećanje struje odvođenja, tako da neprekidna struja nema uticaja na naprezanje odvodnika.



Slika 12.1: Ekvivalentiranje višestrukog negativnog pražnjenja sa jednim udarom amplitude koja odgovara maksimumu prvog udara, a trajanja da količina elektriciteta koja protekne kroz kanal groma bude identična kao kod višestrukog pražnjenja

Količina elektriciteta koja protekne kroz kanal groma prilazana je u tabeli 6.5. Za potrebe determinističkog proračuna smatra se da je talas atmosferskog pražnjenja trougaonog oblika čije je trajanje čela zanemarljivo, na začelju linearno opada, a ima amplitudu struje I_{max} , kao na slici 12.2:

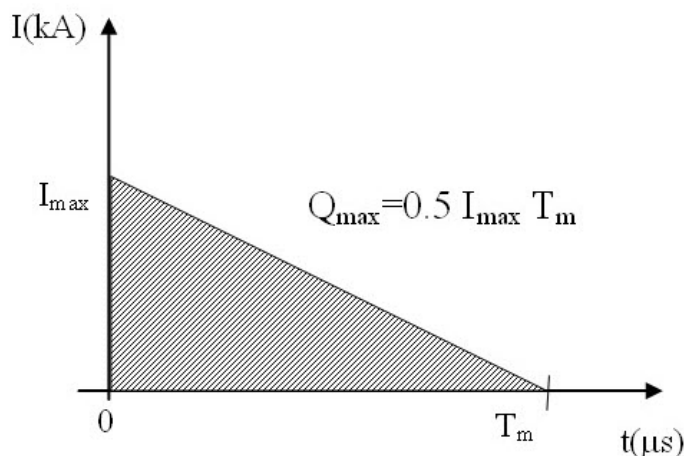
U tabeli 12.1 prikazano je trajanje ekvivalentnog talasa koji zamenjuje višestruki negativni udar čija je količina elektriciteta Q_{max}^- , odnosno pozitivni udar čija je količina elektriciteta Q_{max}^+ , na osnovu izraza:

$$Q_{max} = \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot T_m \quad (12.2)$$

gde je Q_{max} zajednička oznaka za ekvivalentno opterećenje. Iz 12.2 se dobija da je:

$$T_m = \frac{2 \cdot Q_{max}}{I_{max}} \quad (12.3)$$

Usvojene su maksimalne amplitude struja i udarnih količina elektriciteta koje mogu biti premašene sa verovatnoćom od 5 % prema standardu [15], tabela A.1. U tabeli 12.1 pri-



Slika 12.2: Oblik strujnog talasa za deterministički proračun absorbovane energije

kazano je trajanje talasa pri dejstvu struje čija amplituda može da bude premašena sa verovatnoćom 5 %, a udarna količini elektriciteta takođe može biti premašena sa verovatnoćom 5 %.

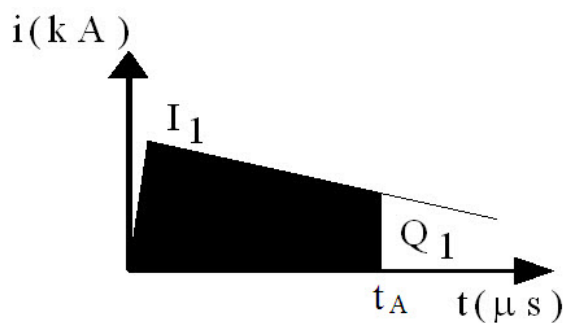
Tabela 12.1: Određivanje ekvivalentnog trajanja talasa

Polaritet	$I_{\max}$ (kA)	$Q_{\max}$ (C)	T_m (μs)
Negativni talasi	90	24	533
Pozitivan talas	250	150	1200

12.3 Verovatnoće premašenja energetske moći odvodnika

Na slici 12.3 prikazana je količina elektriciteta koja protekne kroz kanal pražnjenja do trenutka premašenja energetske apsorpcione moći odvodnika.

U svakom koraku proračuna oslobodjena energija u odvodniku prenapona W je upoređivana sa energetsom apsorpcionom moći A . U vremenskom trenutku t_A kada oslobodjena energija W postane veća od energetske apsorpcione moći A , simulacija se prekida. Izračunava se ukupna količina elektriciteta oslobodjena od početka procesa pražnjenja do trenutka t_A . Metoda proračuna je zasnovana na izračunavanju ukupne količine elektriciteta oslobodjene atmosferskim pražnjenjem sve do premašenja energetske apsorpcione moći odvodnika prenapona. Ukupna količina elektriciteta oslobodjena do kvara odvodnika prenapona se može izračunati na osnovu sledeće relacije:



Slika 12.3: Količina elektriciteta koja protekne kroz kanal pražnjenja do trenutka premašnje energetske apsorpcione moći

$$Q = \int_{t_o}^{t_A} i(t - t_o) dt \quad (12.4)$$

gde su:

Q - količina elektriciteta protekla kroz kanal groma do tačke pražnjenja,

t_o - trenutak u kome atmosferski prenapon stiže do odvodnika, računat od trenutka udara,

t - vremenski trenutak računat od trenutka udara,

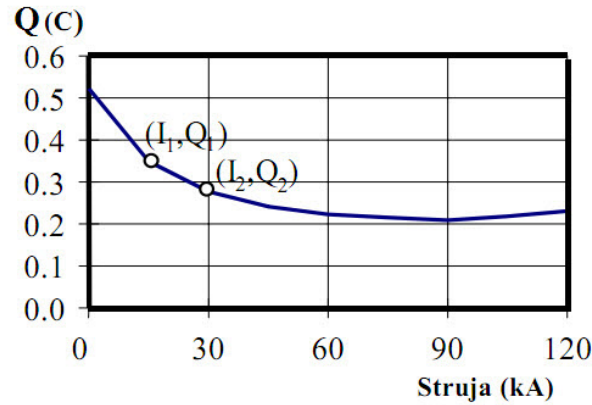
$i(t - t_o)$ - trenutna vrednost struje atmosferskog pražnjenja računata od trenutka nailaska atmosferskog prenapona do odvodnika do tekućeg trenutka t ,

t_A - trenutak u kome je premašena energetska apsorpciona moć odvodnika prenapona, na osnovu relacije 12.4.

Statistički proračun se vrši na taj način što se varira amplituda strujnog talasa zanemarljivo kratkog čela i linearnog opadanjanja ekvivalentnog talasa na začelju, vršeći proračun količine naelektrisanja na osnovu izraza 12.4 sve dok se ne dostigne oslobođena energija u odvodniku izračunata pomoću izraza 12.1 do granice energetske apsorpcione moći odvodnika W_{max} . Obrazuje se kriva opasnih parametara na kojoj je na apscisnoj osi amplituda struje I_m , a na ordinatnoj kritična količina elektriciteta koja izaziva premašnje energetske apsorpcione moći. Teorijski primer krive opasnih parametara dat je na slici 12.4

Verovatnoća premašnja količine elektriciteta Q_{krit} može se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$P = \int_D \omega(x, y) dIdQ \quad (12.5)$$



Slika 12.4: Kriva opasnih parametara I-Q

gde je D oblast iznad krive opasnih parametara. $\omega(x, y)$ je zajednicka gustina raspodele raspodele po dve slučajne promenljive raspoređeno po logaritamsko-normalnoj raspodeli, odnosno:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2 - 2xy}{2(1 - \rho^2)}\right] \quad (12.6)$$

gde je:

$$x = \ln(I/I_m/\sigma_{\ln I},$$

I_m -srednja vrednost amplitude struje prvog udara (kA),

$\sigma_{\ln I}$ -standardna devijacija logaritma amplitude struje prvom udara (r.j.),

$$y = \ln(Q/Q_m/\sigma_{\ln Q},$$

Q -ukupno naelektrisanje atmosferskog pražnjenja (C),

Q_m -srednja vrednost ukupnog naelektrisanja pražnjenja, koje uključuje i kontinualnu struju između udara (C),

$\sigma_{\ln Q}$ -standardna devijacija logaritma ukupnog naelektrisanja (r.j),

ρ -koeficijent korelacije između amplitude struje prvog udara i ukupnog naelektrisanja pražnjenja (r.j)

Usvojene su sledeće vrednosti za parametre pražnjenja:

$$I_m = 30 \text{ (kA)}$$

$$\sigma_{\ln I} = 0.53(r.j).$$

$$Q_m = 7.5 \text{ (C)}$$

$$\sigma_{\ln Q} = 1.04 \text{ (r.j.)}$$

$$\rho = 0.54 \text{ (r.j.)}$$

Nakon izračunavanja količine elektriciteta dovoljne da izazove premašenje energetske apsorpcione moći odvodnika prenapona za amplitudu pražnjenja I_i , započinje simulacija prelaznog procesa sa narednom amplitudom struje atmosferskog pražnjenja. U svakoj simulaciji prelaznog procesa određen je jedan par parametara atmosferskog pražnjenja (amplituda struje i količina elektriciteta koja protiče kroz kanal groma do tačke pražnjenja dovoljna da izazove kvar odvodnika prenapona).

Verovatnoća premašenja kritičnih parametara (I, Q) određuje se isto kao u slučaju razmatranja krive opasni parametara za izolaciju (S, I) , gde je S strmina čela struje, odnosno integraljenjem po postupku kao u izrazu 8.22 na strani 319. Broj udara u vod procenjuje se na osnovu poglavlja 8.4.3 na strani 339, a rizik kvara odvodnika analogno kao rizik kvara transformatora prema poglavlju 8.4.4 na strani 349.

Srednji godišnji broj kvarova odvodnika prenapona se računa na isti način kao i pri proračuna srednjeg godišnji broja kvarova izolacije.

Bibliografija

- [1] Working group IEEE: Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Tran. on Power App. and Systems, **Vol.PAS-104**, No.4, April 1985, pp. 919–927.
- [2] A.Dolginov: Tehnika visokog napona u elektroenergetici; Energija, Moskva, 1968. (Knjiga na ruskom)
- [3] L.V.Bewelly: Traveling Waves on Transmission Systems; John Wiley & Sons, New York, Chapman & Hall, London 1951.
- [4] R.Anderson, A.Errikson: Lightning Parameters for Engineering Applications, Electra No 69, CIGRE 1980, pp. 65-102.
- [5] G. W. Brown: Joint Frequency distribution of Stroke Current Rates of Rise and Crest Magnitude to Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, no. 1, January/February 1978, pp. 53-58.
- [6] CIGRE Working Group 33.07: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, CIGRE Technical Brochure No. 63, 1991.
- [7] M. S. Savić: Engineering Method for High-Voltage Substations Lightning Performance Estimation, Proc.IEE, Vol.136, Pt.C, No.4, July 1989, pp. 222–229.
- [8] CIGRE Working Group 33.07: Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, No. 72, Paris 1992.
- [9] Zahira Annane, Abdehafid Bayadi, Kejie Huang: Distortion Phenomena on Transmission Lines Using Corona Modeling ATP/EMTP, Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.25, No. 2, April 2018.
- [10] T.Hara, O.Yamamoto, M.Hayashi, S.Matsumura: Empirical Formulas of Surge Impedance for Transmission Tower, 19 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Interlaken, Switzerland 1990, ref. br.3.7
- [11] Koordinacija izolacije-Deo 1: Definicije, principi i pravila, SRBS IEC 60071-1, izdato 2020.

- [12] Koordinacija izolacije-Deo 2: Uputstvo za primenu, Insulation co-ordination - Part 2: Application guidelines, SRBS IEC 60071-2, izdanje 2019 (na engleskom).
- [13] IEC TR 60071-4: Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks, First edition, June 2004.
- [14] SRPS EN 60060-1:2012: High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, Edition 21.6.2012. (na engleskom).
- [15] SRPS EN IEC 62305-1: Zaštita od atmosferskog pražnjenja -Deo 1: Opšti principi, od 2016, identičan EN 62305-1 od 2011.
- [16] SRPS EN IEC 62305-2: Zaštita od atmosferskog pražnjenja Ů Deo 2: Upravljanje rizikom, od 2017, identičan EN 62305-2 od 2012.
- [17] SRPS EN IEC 62305-3: Zaštita od atmosferskog pražnjenja Ů Deo 3: Fizicko oštećenje objekata i opasnost po život, od 09.11.2018, identičan sa IEC 62305-3.
- [18] Protection against LEMP in Telecommunication Centres, ITU-T Telecommunication Standardization Sector of ITU, Series K: Protection Against Interference, Recommendation K.40 October 1996.
- [19] Dino Lovrić, Slavko Vujević i Tonči Modrić: On the estimation of Heidler function parameters for reproduction of various standardized and recorded lightning current waveshapes, EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, (Euro. Trans. Electr. Power - ETEP) (2011) Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.669.
- [20] F. Heidler, J. Cvetić: A Class of Analytical Functions to Study the Lightning Effects Associated With the Current Front, ETEP Vol. 12, No. 2, March/April 2002.
- [21] Khaled Elrodessly, Ali M. Hussein: Modelling the Lightning Return-Stroke Current Using Heidler Function, 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, (Cagliari, Italy - September 13th -17th, 2010)
- [22] Mladen S. Banjanin i Milan S. Savić: Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice, INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS, Int. Trans. Electr. Energ. Syst. (2015). Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.2069
- [23] M.S. Savić, A.M. Savić: Substation Lightning Performance Estimation Due to Strikes Into Connected Overhead Lines, IEEE Transaction on Power Delivery, VOL. 30, No. 4., August 2015, pp. 1752-1760.
- [24] H.Dommel: Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks, IEEE Trans. on Power App. and Systems, **Vol. PAS-90**, 1971, p.p2561-2567.

- [25] A.Greenwood: Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore 1991.
- [26] Canadian-American EMTP User Group: ATP Rule Book, distributed by the European EMTP -ATP Users Group Association, 2011.
- [27] Tsu-huei Liu, W. Scott Meyer: Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory book, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, USA, Public domen distributed 1987.
- [28] A.Ametani: Modified travelling-wave techniques to solve electrical transients on lumped and distributed constant circuits; Proc.IEE, **Vol120(4)**, 1973, pp.497–503.
- [29] Z. Stojković: Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici - programski alati, Izdavač: Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, 2003
- [30] Laboratorijska ispitivanja izolacije vodova 400 kV, Elaborat br.1689, Energoinvest - IRCE, Institut za Energetiku, Sarajevo 1987 god.
- [31] S. Rusck: Effect of Non-Standard Surge Voltages on Insulation, CIGRE paper 403, Paris, 1958.
- [32] R.O. Caldwell and M. Darveniza: Experimental and Analytical Studies of the Effects of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 92, pp.1420 - 1428, 1973.
- [33] M.Darveniza, A.Vlastos: The Generalized Integration Method for Predicting Impulse Volt-Time Characteristics for non-Standard Wave Shapes - a Theoretical Basis, IEEE Transaction on Electrical Insulation , **Vol.23**, No.3, June 1988.
- [34] A. Ancajima, A. Carrus, E. Cinieri, C. Mazzetti: Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV insulators volt-time characteristics under standard and non standard lightning impulses, Power Tech 2007, July 1 - 5, 2007, Lausanne Switzerland, Paper ID: 175,
- [35] G. Gallet, G. Leroy, R. Lacey, I. Kromer: General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, no. 6, November/December 1975, pp. 1989-1993.
- [36] M. Banjanin, M.S.Savić: Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice, International Transaction on Electrical Energy Systems, ITEE Copyright John Wiley & Sons, Ltd. 2015, DOI: 10.1002/etep.2069
- [37] ASEA: Zinc oxide (ZnO) arresters type XAP, Application guide; Information LB 220-1-1E, Edition 3 1982-01.

- [38] Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, IEC 60099-4:2014.
- [39] K. Berger, R. Anderson, H. Kröninger: Parameters of Lightning Flashes; Electra, No 41, Paris, July 1975, pp. 23–33.
- [40] R. Anderson, A. Errikson: A Summary of Lightning Parameters for Engineering Applications; CIGRE, referat 33.06,
- [41] Cigre Brochure 069, Working Group 33.01 Cigre: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, 1991.
- [42] Working Group C4.40 - CIGRE: Lightning Parameters for Engineering Applications, CIGRE Publication 549, August 2013,
- [43] Milan Savić, Zlatan Stojković: Tehnika visokog napona - Atmosferski prenaponi, Monografija, II dopunjeno i izmenjeno izdanje, izdavač Elektrotehnicki fakultet u Beogradu i Akademska misao, Beograd, oktobar 2001.
- [44] Milan Savic: Visokonaponski rasklopni aparati, Elektrotehnicki fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, 2004.
- [45] E. Slameka: Interruption of small inductive currents; Chapter 1,2 Electra No 75, March 1981.
- [46] B. Belin: Uvod u teoriju sklopnih aparata; Školska knjiga, Zagreb 1978.
- [47] Lightning Protection Guide, Published by Dehn + Söhne, 2nd updated edition, Neumarkt, Germanz, 2007.
- [48] Jovan Nahman i Vladica Mijailović: Razvodna postrojenja, Stručna knjižara, drugo izdanje 2017.
- [49] ABB Surge arrester datasheet MWK, Edited Switzerland Ltd./PTHA 3210.2006-04E
- [50] High-voltage surge arresters Product guide, Siemens AG Energy Sector. Published by and copyright ©2014.
- [51] Andrew R. Hileman: Insulation Coordination for Power Systems, Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York, 1999.
- [52] H.R. Armstrong, E. Whitehead: Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding; IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, **VOL.PAS-87**, No.1, January 1968, pp. 270–281.
- [53] G.W. Brown, E. Whitehead: Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding: Part II; IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, **VOL.PAS-87**, No.1, January 1968, pp. 617–626.

- [54] M. O. Goni and A. Ametani: Analysis and Estimation of Surge Impedance of Tower, ACES Journal, VOL. 24. No.1 February 2009.
- [55] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, M. Aurélio O. Schroeder: Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors, IEEE Trans on Electromagnetic Compability VOL. 48. No. 3, August 2006.
- [56] C.Menemenlis, Zhu Tong Chun: Wave propagation on nonuniform lines, IEEE Trans. on Power App. and Systems, **Vol. PAS-101**, No.4, April 1982.
- [57] Stojkovic Z., Savic M.S: A practical method for determining the lightning resistance of high-voltage power lines taking into account the impulse characteristics of the grounding systems, Electrical technology Russia, No.1, 1999, pp. 112-124.
- [58] Stojkovic Z., Savic M.S., Geric Lj.: Lokalni efekat udarnih karakteristika uzemljivaca, Elektroprivreda, Br.3, 2000, str. 20-28.
- [59] Carson J: Wave propagation in overhead wires with ground return, Bell System Technical Journal, **Vol. 5**, October 1926.
- [60] Khuong D. Tran; J. ROBERT: New Digital Simulation for Ground-Mode Switching Surge Response of EHV Transmission Systems, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, **VOL. PAS-88**, No. 5, May 1969.
- [61] L. M. Wedepohl: Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. Proc. IEE, Vol. 110, No. 12, December 1963..
- [62] L. M. Wedepohl: Wave propagation in nonhomogeneous multiconductor
- [63] M.C. Perc, Robert Hazel: Effect of Earth Resistivity on modal parameters of an EHV horizontal line at PLC frequencies, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-92, Issue: 6, Nov. 1973) .
- [64] Khuong D. Tran, J. ROBERT: Digital Simulation and Analysis of Surges on Polyphase Transmission Lines with Earth Return, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems **Vol: PAS-91**, Issue: 2, March 1972)
- [65] W.Chisholm, Y.Chow, Srivstava: Lightning surge response of transmission towers, IEEE Trans. on Power App. and Systems, **Vol. PAS-102**, No.9, Sept.1983.
- [66] A.J.Eriksson: An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis; IEEE Transaction on Power Delivery, **Vol.PWRD-2**, No.3, July 1987, pp. 871-886.
- [67] IEEE Std 1410-1997: IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, Approved 26 June 1997 IEEE Standards Board.

- [68] R.B.Anderson: Lightning performance criteria for electric power systems; IEE Proceedings, **Vol 132**, Pt.C, Br.6, Novembar 1985.
- [69] D.Razevig: Tehnika visokog napona; Energija, Moskva 1976. (Knjiga na ruskom)
- [70] A.J.Erikson: The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines; IEEE Trans. on Power Delivery, **Vol PWRD-2**, No.3, July 1987, pp. 859–867.
- [71] G.Clark, D.Cook: A Basic Course in Statistics: izdavač Edvard Arnold, London, 1978.
- [72] E. D. Sunde: Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover Publications, New York, 1968.
- [73] J. Nahman: Digital Calculation of Earthing Systems in Nonuniform Soil, Archiv fur Elektrotechnik, Vol.62, 1980, pp.19–24.
- [74] J. Nahman, D. Salamon: Earthing System Modelling by Element Aggregation, Proc.IEE, Pt.C, No.1, Vol.133, 1986, pp. 54–58.
- [75] J. Nahman: A Numerical Method for Evaluation of Mutual Earth Resistances of Thin Cylindrical Straight Conductors, (in Serbo-Croatian), Elektrotehnika, Vol.27, 1984, No.1-2, pp. 27–32.
- [76] J. Nahman: D. Salamon, Programski paket za proračun otpora rasprostiranja, raspodele potencijala i napona dodira i koraka na nekom pravcu u okolini uzemljivača u jednoslojnom i dvoslojnom tlu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1987.
- [77] R. Velasquez, D. Mukhedkar: Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No.6, June 1984, pp. 1314–1322.
- [78] J. Surutka: Elektromagnetika, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1986.
- [79] A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos: Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PWRD-2, No.4, Oct. 1987, pp. 1073–1081.
- [80] E. Ja Rjabkova: Uzemljivači u postrojenjima visokog napona, Energija, Moskva, 1978, (na ruskom).
- [81] J.Nahman: Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema, Naučna knjiga, Beograd 1992.
- [82] P.Chowduri, E.T.Gross: Voltages Surges Induced on Overhead Line by Lightning Strokes, Proc. IEE, **Vol.114**, No.12, Dec.1967.
- [83] M. Savić: Primena srednjenaponskih vodova sa zaštitom od atmosferskih prenapona pomoću iskrišta sa ograničenjem struje pomoću nelinearnih otpornika, 3. Savetovanje JUKO CIRED, Vrnjačka Banja, Oktobar 2002, R-2.3.

- [84] J. He, J. Hu, S. Chen, R. Zeng: Influence of Series Gap Structures on Lightning Impulse Characteristics of 110 kV Line Metal-Oxide Surge Arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 2. 23, No. 2, pp. 703-709, April 2008.
- [85] S. Gu, W. Chen, J. He, H. Shen, S. Zhang: Development of Surge Arresters With Series Gap Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2191-2198, October 2007.
- [86] P. Bubov, D. Udovčić, L. Klingbeil: First Type Tests of Externally Gapped Line Arresters (EGLAs) for 132 kV and for 400 kV OHL according to new IEC 60099-8, CIGRE C4 International Colloquium on Power Quality and Lightning, Sarajevo, May 13-16, 2012, Paper 35.
- [87] Working Group C4.301: Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines, CIGRE report, Paris, December 2010.
- [88] Surge arresters - Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV (IEC 60099-8:2011)
- [89] High voltage surge arresters Buyer's guide, ABB High Voltage Products Surge Arresters, SE-771 80 Ludvika, Sweden, 2019.
- [90] S. Gu, W. Chen, J. He, H. Shen, S. Zhang: Development of Surge Arresters With Series Gap Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2191-2198, October 2007
- [91] Tarasiewicz, F. Rimmer, A. S. Morched: Transmission Line Arrester Energy, Cost and Risk of Failure Analysis for Partially Shielded Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 3, pp. 919-924, July 2000 [12]
- [92] L. C. Zanetta, Jr: Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, pp 796-801, July 2003
- [93] K. Mischishita, M. Ishii, Y. Hongo: Flashover Rate of Distribution Line Due to Indirect Negative Lightning Return Strokes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 1, pp 472-479, January 2009.
- [94] T. E. McDermott, T. A. Short, J. G. Anderson: Lightning Protection of Distribution Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, pp 138-152, January 1994
- [95] R. Shariatinasab, B. Vahidi, S. H. Hosseini, A. Ametani: Probabilistic Evaluation of Optimal Location of Surge Arresters on EHV and UHV Networks Due to Switching and Lightning Surges, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, pp 1903-1911, October 2009.

- [96] S. Sadovic, R. Joulie, S. Tartier, E. Brocard: Use of Line Surge Arresters for The Improvement of The Lightning Performance of 63 kV and 90 kV Shielded and Unshielded Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [97] P.Chowduri, E.T.Gross: Voltages Induced on Overhead Multiconductor Line by Lightning Strokes, *Proc. IEE*, **Vol.116**, No.4, April.1969, pp. 561–565.
- [98] M.K.Haldar, A.C.Liew: Alternative Solution for the Chowduri-Gross model of Lightning-induced Voltages on Power Lines, *Proc. IEE*, **Vol.135**, Pt.C, No.4, April.1988, pp. 324–329.
- [99] Milan S. Savic: Medium Voltage Distribution Systems Lightning Performance Estimation, *IEEE trans. on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, July 2003, DOI 10.1109/TPWRD.2003.813860.
- [100] B.Stein, M.T.Correia de Barros: A Line Model for the Calculation of Lightning Induced Voltages, Ninth Power System Computer Conference, cascais, Portugal, September 1987, pp. 402–406.
- [101] A. Porrino, I. Alexandri, N. Clement, G.S. Finlay, T. Henriksen, J. Hoeffelman, M. Ishii i drugi: "Protection of MV and LV network against lightning: Part I basic information," 14 International Conference CIRED 1997, June 2-5, 1997, Conf. Publication No 438, <https://doi.org/10.1049/cp:19970490>.
- [102] Vesna Javor, Leonid Stoimenov, Nikola Džakoviković, Nikola Dinkić, Dario Javor, Hans-Dieter Betz: LINETGIS Analysis of Lightning Flash Density in Serbia Based on Ten Years Data, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 15, No. 2, June 2018, pp. 201-211, DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE1802201J>.
- [103] G. Anderson and D. Klugmann: A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, No 14, pp. 815–829, 2014, doi:10.5194/nhess-14-815-2014.
- [104] Andrew R. Hileman, Pierre R. Leblanc, Gordon W. Brown: Estimating the Switching-Surge Performance of Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power App. and Systems*, Volume: PAS-89 Issue: 7, pp. 1455 - 1469.
- [105] Jeong-Boo Kim, Eung-Bo Shim, and Jeong-Woon Shim: Switching Overvoltage Analysis and Air Clearance Design on the KEPCO 765 kV Double Circuit Transmission System, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 15, NO. 1, JANUARY 2000, pp.381-386.
- [106] D.A.Woodford;L.M. Wedepohl: Transmission line energization with breaker pre-strike: IEEE WESCANEX 97 Communications, Power and Computing. Conference Proceedings, 22-23 May 1997.

- [107] J.Martinez E.Camm: Comparison of Statistical Switching Results Using Gaussian, Uniform and Systematic Switching Approaches, Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 884-889.
- [108] Patricia Mestas, Maria Cristina Tavares: Relevant Parameters in a Statistical Analysis - Application to Transmission-Line Energization, IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 29, Issue: 6, December 2014), pp. 2605 - 2613.
- [109] Priključci na niskonaponsku mrežu i električne instalacije u zgradama, EPS Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd, 2. izdanje 1998.
- [110] Katalog niskonaponskih kablova
https://www.bahra-electric/downloads/Low_Voltage.pdf
- [111] ETI B DOO Beograd: Katalog niskonaponskih osigurača
<https://www.etib.rs/pdf-katalozi-sr/zgrade-i-industrija/nv-nh-niskonaponski-osiguraci>
- [112] Miomir Kostić: Teorija i praksa projektovanja električnih instalacija, Izdavač Akademski misao, Beograd.
- [113] Is Limiter, The world fastest limiting and switching device, ABB AG, Calor Emag Medium Voltage Products, www.abb.com/mediumvoltage Calor Emag Medium Voltage Products
- [114] Integrated Power System Analysis Software DIgSILENT PowerFactory 15, User Manual. Online Edition, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, December 2013.
- [115] Insulation Coordination Study "QATOFIN LLDPE & LDPE3 PLANT", SELECTY, Italy, Client QATAR VINIL COMPANY, September 2015, Interni izveštaj
- [116] T. Rajić, M. Savić, M. Mrvić, A. Mihajlović, "Uticaj rada Is limitera na pojavu prenapona u industrijskoj mreži", 34 Savetovanje Cigre Crbija 2019, Zlatibor, Srbija.
- [117] T. Rajić, M. Savić, "Modelovanje rasklopnog uređaja Is limiter", 34 Savetovanje Cigre Crbija, Zlatibor, Srbija
- [118] M. Vatrenjak, "Elektrofiltri industrijskih gasova" Automatika (1979) 1-2, pp. 76-78.
- [119] J. Sesartić, J. Božićević, "Sistemski pristup modeliranju procesa elektrostatičkog filtriranja", Automatika 23 (1982) 3-4, pp. 103-105.
- [120] Mladen Banjanin, Milan S Savić: Experimental registration and numerical simulation of the transient overvoltages caused by single phase intermittent arc earth fault in 35 kV network with isolated neutral, IEEE Transaction on Power Delivery, VOL. 37, Issue 3, June 2022.