

Poglavlje 5

Modelovanje elemenata sistema

5.1 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. Oblik strujnog talasa se može modelovati na više načina, od kojih će biti prikazani neki najvažniji.

5.1.1 Eksponencijalni oblik strujnog i naponskog talasa

Na osnovu snimanja struja atmosferskih pražnjenja utvrđeno je da se strujni talas može najbolje modelovati korišćenjem dvostruke eksponencijalne funkcije:

$$I(t) = I_m(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (5.1)$$

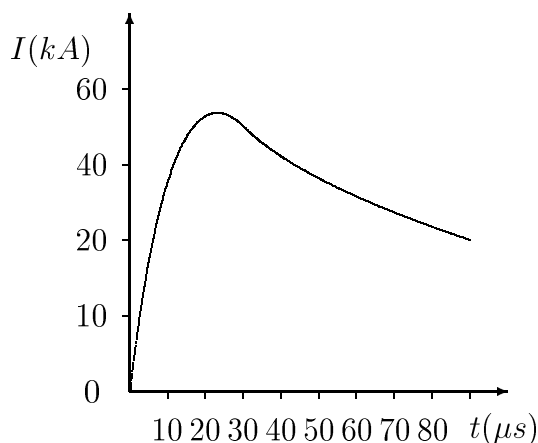
Maksimalna vrednost struje se javlja u trenutku:

$$t_m = \frac{\ln a - \ln b}{a - b} \quad (5.2)$$

Maksimalna vrednost struje u tom trenutku iznosi:

$$I_{max} = I_m \left[\left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{-a}{a-b}} - \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{-b}{a-b}} \right] \quad (5.3)$$

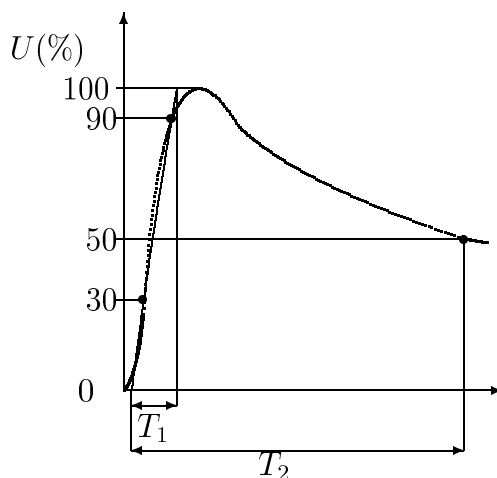
Na slici 5.1 prikazan je tipičan oblik strujnog talasa predstavljenog sa dve eksponencijalne funkcije.



Slika 5.1: Dvostruko eksponencijalni oblik strujnog talasa

Prilikom ispitivanja izolacije u laboratorijskim uslovima udarnim naponskim talasom koji simulira prenapon atmosferskog porekla, koristi se nešto izmenjeni oblik talasa koji ima u početnom trenutku vrlo malu strminu, za razliku od dvostruko eksponencijalnog talasa.

Realan naponski talas koji se koristi u laboratorijama ima oblik kao na slici 5.2. Na njoj je prikazan i način na koji su definisani parametri oblika talasa. Čelo talasa se linearizuje pravom koja prolazi kroz 0,3 i 0,9 od maksimalne vrednosti talasa. Nazivno vreme čela se definiše kao trajanje tako linearizovanog čela talasa. Vreme začelja se definiše kao vreme od početka linearizovanog čela talasa do trenutka do koga talas opadne na polovinu svoje vrednosti.



Slika 5.2: Definisanje parametara naponskog talasa

Nazivno vreme trajanja čela talasa obeleženo sa T_1 može se približno odrediti iz sledeće relacije [181]:

$$T_1 = \frac{3,24}{b} \quad (5.4)$$

Nazivno trajanje talasa T_2 može se približno odrediti iz sledeće relacije:

$$T_2 = \frac{0,69}{a} \quad (5.5)$$

Na osnovu relacija 5.4 i 5.5 može se uspostaviti veza izmedju nazivnog vremena čela i nazivnog trajanja talasa sa jedne strane, i eksponenata a i b u izrazu za dvostruki eksponencijalni talas sa druge strane.

Za ispitivanje izolacije visokonaponske opreme se u našoj zemlji koristi standardni atmosferski naponski talas čije je nazivno vreme trajanja čela $1,2 \mu s$ i vreme opadanja do polovine maksimalne vrednosti (nazivno trajanje talasa) $50 \mu s$. Ovakav talas se standardno obeležava oznakom $1,2/50$. U tekstu će biti korišćena i oznaka talasa $1,2/50 \mu s/\mu s$. U nekim zemljama se koriste naponski talasi oblika $1/50$ za ispitivanje izolacije visokonaponske elektroenergetske opreme, a za ispitivanje elemenata prenaponske zaštite telekomunikacionih uredjaja se koriste talasi različitog oblika, na primer oblika $0,3/50$, $10/700$ itd.

5.1.2 Uprošćen eksponencijalni oblik

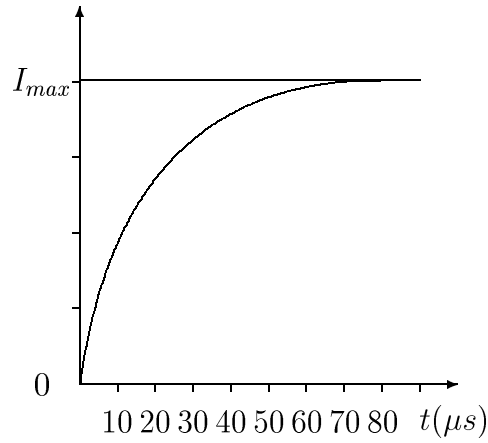
U proračunima se može koristiti uprošćeni eksponencijalni oblik talasa koji uvek daje nešto kritičnije rezultate nego dvostruki eksponencijalni talas jer se ovom metodom ne modeluje opadanje talasa na začelju. Uprošćeni eksponencijalni talas se dobija prema izrazu:

$$I(t) = I_{max}(1 - e^{-bt}) \quad (5.6)$$

U izrazu 5.6 I_{max} predstavlja amplitudu strujnog talasa. Može se smatrati da se maksimalna vrednost struje uspostavlja posle $t > 3/b$, 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 5.3 prikazan je oblik strujnog talasa datog relacijom 5.6.

Vreme čela talasa se odredjuje na osnovu izraza 5.4.

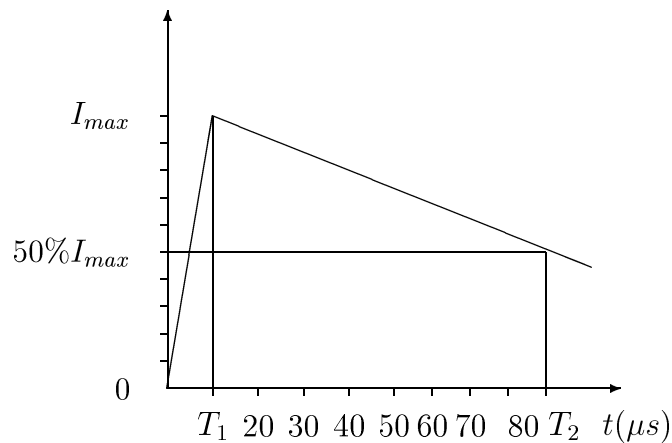


Slika 5.3: Talas eksponencijalnog čela i konstantnog začelja

5.1.3 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 5.4.



Slika 5.4: Talas linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja

Na slici 5.4 označeni su sa T_1 vreme trajanja čela talasa i sa T_2 vreme opadanja do polovine maksimalne vrednosti talasa. Analitički izraz za ovakav talas ima oblik:

$$I(t) = a_1 t h(t) - a_2 (t - T_1) + (a_2 - a_1) [t - (2T_2 - T_1)] h[t - (2T_2 - T_1)] \quad (5.7)$$

gde su:

a_1 – strmina struje na čelu talasa,

a_2 – brzina opadanja struje na začelju.

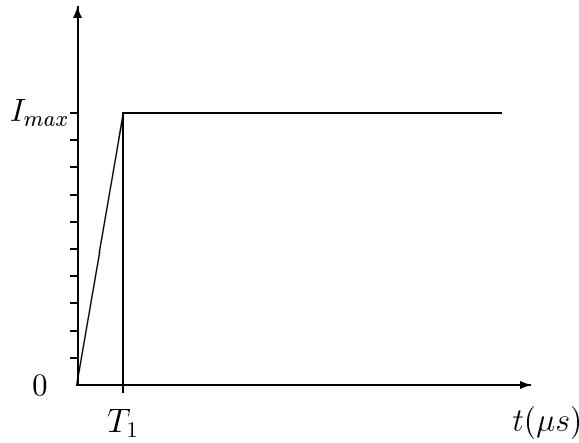
$$a_1 = \frac{I_{max}}{T_1} \quad (5.8)$$

$$a_2 = \frac{I_{max}}{2(T_2 - T_1)} + a_1 \quad (5.9)$$

$h(t)$ – jedinična odskočna funkcija.

5.1.4 Talas linearnog čela i konstantnog začelja

Iz istog razloga kao i kod eksponencijalnog talasa najčešće je dovoljno koristiti talas konstantnog začelja, kao na slici 5.5.



Slika 5.5: Talas linearnog čela i konstantnog začelja

Analitički izraz za ovaj oblik talasa je:

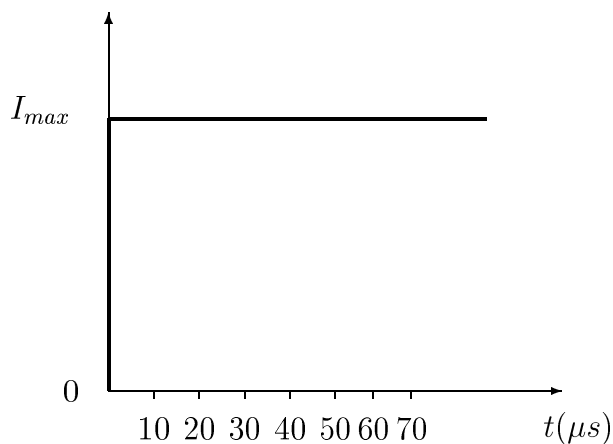
$$I(t) = a_1[th(t) - (t - T_1)h(t - T_1)] \quad (5.10)$$

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.

5.1.5 Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja

U praktičnoj analizi često se koristi uprošćen oblik talasa u vidu odskočne funkcije, kao na slici 5.6.



Slika 5.6: Talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja

Opšti oblik talasa dat je analitičkim izrazom:

$$I(t) = I_{max}h(t) \quad (5.11)$$

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.

5.2 Model kanala groma

Kanal groma se modeluje neograničeno dugačkim vodom karakteristične impedanse Z_g po kome nailazi upadni naponski talas čija je trenutna vrednost napona:

$$U_{up}(t) = \frac{Z_g I(t)}{2} \quad (5.12)$$

gde su:

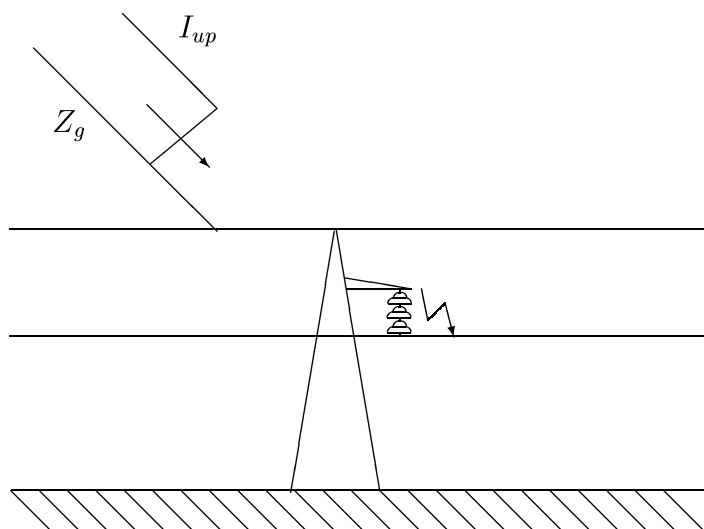
$I(t)$ – ukupna struja groma u dobro uzemljeni objekat, čiji se oblik modeluje nekim od ranije opisanih modela,

$U_{up}(t)$ – upadna komponenta napona po kanalu groma.

Prosečne vrednosti amplitude struje dobijaju se na osnovu merenja pri atmosferskim pražnjenjima u dobro uzemljene stubove. Upadna komponenta struje po kanalu groma predstavlja polovinu ukupne struje zbog totalne refleksije struje od uzemljivača.

Karakteristična impedansa kanala groma se procenjuje da ima vrednost od $100 - 500 \Omega$ pri velikim amplitudama struja. Pri manjim amplitudama struja ona može da ima veću vrednost.

Na slici 5.7 prikazana je tipična zamenska šema voda na kome je došlo do atmosferskog pražnjenja u uzemljene delove.



Slika 5.7: Model udara groma u uzemljeni deo sistema

Na slici 5.7 do udara groma došlo je u zaštitno uže, što može da dovede do povratnog preskoka na obližnjem stubu ukoliko napon na izolaciji poraste iznad udarnog podnosivog napona.

Pri analizi udara groma u uzemljene delove vodova i postrojenja, kao i pri analizi udara groma direktno u fazne provodnike kod vodova koji se ne štite zaštitnim užadima, može se usvojiti karakteristična impedansa kanala groma od oko $Z_g = 300 \Omega$.

Kad se razmatra udar groma u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta, tada samo pražnjenja male struje mogu da prodju u zonu zaštite. Zbog toga se pri razmatranju ove pojave mora uzeti znatno veća karakteristična impedansa kanala groma koja odgovara maloj amplitudi struje. Može se usvojiti da je impedansa kanala groma u tom slučaju reda veličine $Z_g = 3000 \Omega$.

Mora se voditi računa da se pri istoj struji dobijaju znatno kritičniji rezultati usvajanjem veće vrednosti karakteristične impedanse kanala groma.

5.3 Modelovanje provodnika

5.3.1 Modelovanje zaštitnog užeta

Zaštitno uže se modeluje kao provodnik karakteristične impedanse Z_u i dužine d izmedju dva susedna stuba.

Karakteristična impedansa zaštitnog užeta je:

$$Z_u = 60 \ln \frac{2H_{ef}}{R_u} \quad (5.13)$$

gde su:

$$H_{ef} = H_{st} - \frac{2}{3}f \quad (5.14)$$

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 5.14 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 [12]:

$$E_{kr} = 23,3m\delta[1 + \frac{0,62}{\delta R_u^{0,38}}] \quad (5.15)$$

gde su:

m – koeficijent glatkosti provodnika, koji se prema [38] kreće u granicama $0,82 - 0,94$, dok za zaprljane i uvlažene provodnike može prema [12] 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 $20^\circ C$ i vlažnosti od $11g$ vodene pare na $1m^3$ vazduha. Promene ovog koeficijenta se mogu zanemariti.

Kritična vrednost napona korone dobija se iz izraza [36]:

$$U_{kr} = E_{kr}R_uZ_u/60 \quad (5.16)$$

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.

5.3.2 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 [36]:

$$R_{ekv} = [nR_p R_s^{n-1}]^{1/n} \quad (5.17)$$

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.

Karakteristična impedansa faznog provodnika se računa po izrazu:

$$Z_f = 60 \ln \frac{2H_{ef}}{R_{ekv}} \quad (5.18)$$

gde su:

$$H_{ef} = H_v - \frac{2}{3}f_p \quad (5.19)$$

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:

$$E_{kr} = 23,3m\delta[1 + \frac{0,62}{\delta R_{ekv}^{0,38}}] \quad (5.20)$$

Kritična vrednost napona korone dobija se na osnovu izraza [36]:

$$U_{kr} = kE_{kr}R_{ekv}Z_f/60 \quad (5.21)$$

gde je:

k – koeficijent koji uvažava efekat slabljenja polja kod provodnika u snopu. On se dobija iz izraza:

$$k = \frac{n}{1 + (n-1)\frac{R_p}{R_s}} \quad (5.22)$$

5.4 Modelovanje dalekovodnog 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 [58]. Stub se može modelovati cilindrom ili konusom, a karakteristična impedansa se može tretirati kao da se kontinualno menja sa visinom, što je opisano u [59] ili da je konstantna. Prema [58] 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 [60] daje se veoma jednostavan empirijski izraz za karakterističnu impedansu vertikalnog cilindra dobijen na osnovu eksperimentalnih istraživanja:

$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H}}{R} - 2 \right] \quad (5.23)$$

gde su:

H – visina cilindra,

R – poluprečnik cilindra.

U slučaju da se stub sastoji iz n vertikalnih cilindara istog poluprečnika, tada se karakteristična impedansa prema [60] izračunava na osnovu izraza:

$$Z_s = \frac{1}{n} \{ Z_{s1} + Z_{s2} + \dots + Z_{sn} \} \quad (5.24)$$

gde se sopstvena impedansa svakog cilindra Z_{si} računa prema izrazu:

$$Z_{si} = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H_i}}{R_i} - 2 \right], i = 1, \dots, n \quad (5.25)$$

Medjusobna impedansa vertikalnih cilindara se računa na sledeći način:

$$Z_{s,m} = 60 \left[\ln \frac{2\sqrt{2H_i}}{D_m} - 2 \right] \quad (5.26)$$

U gornjim izrazima je:

H_i – visina i -tog cilindra u (m),

R_i – poluprečnik i -tog cilindra u (m),

D_m – rastojanje izmedju cilindara u (m).

Ukoliko cilindri nisu vertikalno postavljeni, već su nagnuti, tada se može odrediti ekvivalentno rastojanje izmedju cilindara:

$$D_m = D_V^{1/3} \cdot D_Z^{2/3} \quad (5.27)$$

gde su:

D_V – rastojanje izmedju cilindara na vrhu stuba,

D_Z – rastojanje izmedju cilindara na zemlji.

Za praktičnu primenu su veoma pogodni izrazi dati u [16] za tipične konstrukcije stubova. Zbog geometrije stubova se smatra da je brzina prostiranja talasa po stubovima oko 85% od brzine svetlosti.

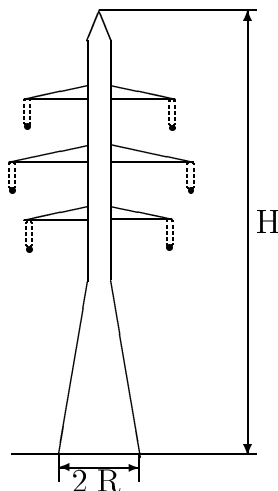
Za stub tipa jelka, sa oznakama dimenzija na sl. 5.8, karakteristična impedansa se može izračunati na osnovu sledećeg izraza:

$$Z_s = 30 \ln \left[\frac{2(H^2 + R^2)}{R^2} \right] \quad (5.28)$$

gde su:

H – visina stuba u (m),

R – poluprečnik osnove stuba u (m).



Slika 5.8: Stub tipa jelka sa oznakama dimenzija

Za slučaj portalnog stuba, datog na slici 5.9, karakteristična impedansa se računa prema izrazu:

$$Z_s = \frac{1}{2}[Z_1 + Z_m] \quad (5.29)$$

gde su:

$$Z_1 = 60 \ln \frac{H}{R} + 90 \frac{R}{H} - 60 \quad (5.30)$$

$$Z_m = 60 \ln \frac{H}{B} + 90 \frac{B}{H} - 60 \quad (5.31)$$

Prema oznakama na slici 5.9 su:

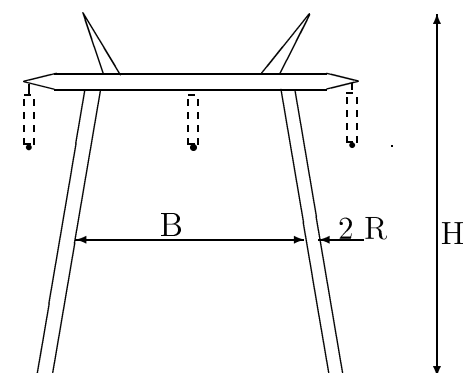
H – visina stuba,

R – ekvivalentni poluprečnik kraka stuba,

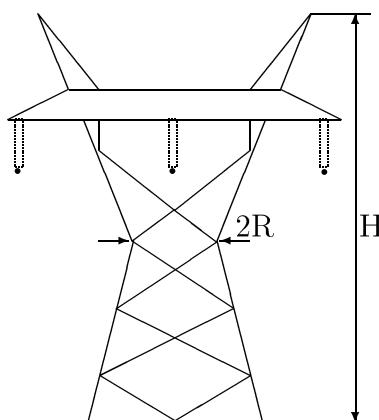
B – razmak izmedju krakova.

Na slici 5.10 prikazana je skica Y stuba sa označenim osnovnim dimenzijama. Karakteristična impedansa ovakvog stuba se računa primenom sledećeg izraza:

$$Z_s = 60 \left[\ln \frac{2H\sqrt{2}}{R} - 1 \right] \quad (5.32)$$



Slika 5.9: Skica portalnog stuba sa oznakama dimenzija



Slika 5.10: Skica Y stuba sa oznakama dimenzija

gde je R ekvivalentni poluprečnik stuba na najužem mestu.

5.5 Uzemljivač dalekovodnog stuba

Modelovanje impedanse uzemljenja dalekovodnog stuba u toku proticanja udarne struje atmosferskog pražnjenja predstavlja složen problem zbog više različitih nelinearnih efekata koji se pojavljuju na uzemljivaču. Kod uzemljivača dalekovodnih stubova su sledeći osnovni efekti koji dovode do promene otpornosti uzemljenja pri proticanju udarne struje u odnosu na otpornost izmerenu malom strujom industrijske učestanosti:

1. Uticaj jonizacije zemlje zbog jakog električnog polja pri proticanju velike udarne struje groma,
2. Uticaj induktivnosti uzemljivača pri pojavi vrlo strmih strujnih talasa, što izaziva porast napona na uzemljivaču,
3. Uticaj prostiranja talasa kod dužih trakastih uzemljivača pri proticanju udarne struje.

Jonizacija zemlje usled jakog električnog polja se javlja u slučaju velike specifične otpornosti tla. Ovaj efekat ima pozitivno dejstvo jer prividno povećava poprečni presek uzemljivačkih provodnika pri proticanju vrlo velikih udarnih struja i time utiče na smanjenje udarne otpornosti.

Prema rezultatima istraživanja grupe autora u okviru međunarodne radne grupe [16], za potrebe grube procene ugroženosti vodova od atmosferskih pražnjenja dovoljno je uzemljivač modelovati otpornošću izmerenom malom strujom industrijske učestanosti (otpornost rasprostiranja). U [39] se takodje navodi da se pored razvijenog numeričkog modela strujno i frekvencijski zavisnog uzemljivača, za praktičnu upotrebu može koristiti pojednostavljeni model uzemljivača u obliku konstantne otpornosti jednake otpornosti rasprostiranja izmerene malom strujom industrijske učestanosti.

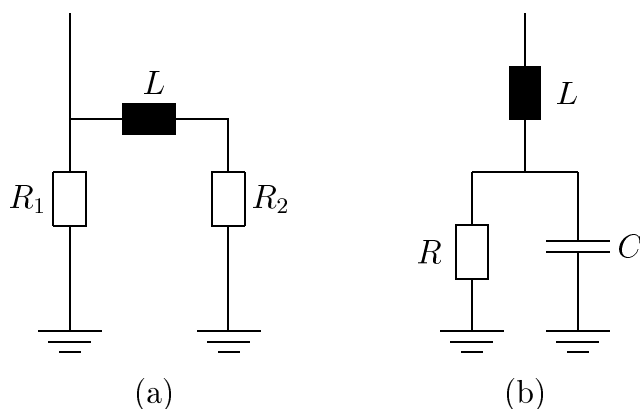
Otpornost se po metodi putujućih talasa modeluje beskonačno dugim vodom karakteristične impedanse koja je brojno jednaka otpornosti uzemljenja. Ovakav model je moguće primeniti zbog toga što je ulazna impedansa beskonačno dugog voda jednaka karakterističnoj impedansi tog voda, pa se beskonačno dugačak vod u Petersenovim šemama zamenjuje koncentrisanom otpornošću.

Pri injektiranju vrlo strmih strujnih impulsa, dolazi do izražaja uticaj induktivnosti uzemljivača koji se ogleda u povećanju napona na uzemljivaču za vreme trajanja čela talasa. S druge strane, injektiranje velikih struja dovodi do pojave jonizacije tla oko uzemljivača, što izaziva smanjenje napona na uzemljivaču.

U literaturi se mogu sresti različiti modeli uzemljivača u analizi ugroženosti elektroenergetskih postrojenja i nadzemnih vodova od atmosferskih prenapona. Prema najčešćem pristupu, udarna impedansa uzemljivača stuba je konstantna i jednaka stacionarnoj otpornosti rasprostiranja [102, 109]. Prema [61], ovakav pristup je primenljiv u slučaju kratkih uzemljivača, položenih u tlo male specifične otpornosti. Visokonaponsko postrojenje i prvi dalekovodni stub ispred njega imaju povezane uzemljivače. Otuda ovaj dalekovodni stub ima manju vrednost stacionarne otpornosti rasprostiranja u odnosu na ostale stubove [106, 110].

Rezultati proračuna broja ispada dalekovoda usled atmosferskih pražnjenja prema [62] ukazuju na izrazit induktivni uticaj uzemljivača pri malim vrednostima specifične otpornosti tla. Sa povećanjem specifične otpornosti tla, model sa stacionarnom otpornošću rasprostiranja daje najveći broj ispada. Realno, ovaj broj ispada je manji s obzirom na pojavu jonizacije tla oko uzemljivača.

Za vrednost stacionarne otpornosti rasprostiranja $R_{uz} = 15 \Omega$ model sa stacionarnom otpornošću rasprostiranja daje isti broj ispada kao tačan model sa uvažanim i jonizacionim i induktivnim uticajem. U ovom slučaju dovoljno tačni rezultati se mogu dobiti i približnim modelom sa stacionarnom otpornošću rasprostiranja. U [112] prikazan je postupak koji



Slika 5.11: Dva različita modela uzemljivača dalekovodnog stuba

omogućava inkorporaciju odgovarajućeg modela uzemljivača u postojeći program EMTP (Electro Magnetic Transient Program) koji se koristi za numeričke simulacije elektromagnetskih prelaznih režima u elektroenergetskim mrežama.

Na slici 5.11 prikazana su dva modela uzemljivača dalekovodnog stuba u impulsnom periodu prema [113, 114]. Oznake na slici 5.11 imaju sledeće značenje :

L - ekvivalentna induktivnost uzemljivača čija vrednost zavisi od oblika i strukture uzemljivača

R_1, R_2 na slici (a) ekvivalentne otpornosti čija paralelna veza daje stacionarnu otpornost rasprostiranja,

R na slici (b) – stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača,

C – kapacitivnost uzemljivača.

U opisanom modelu je impulsna impedansa uzemljivača određena samo za dvostruko eksponencijalan strujni impuls i impuls linearno rastućeg čela, dok za druge talasne oblike model nije testiran.

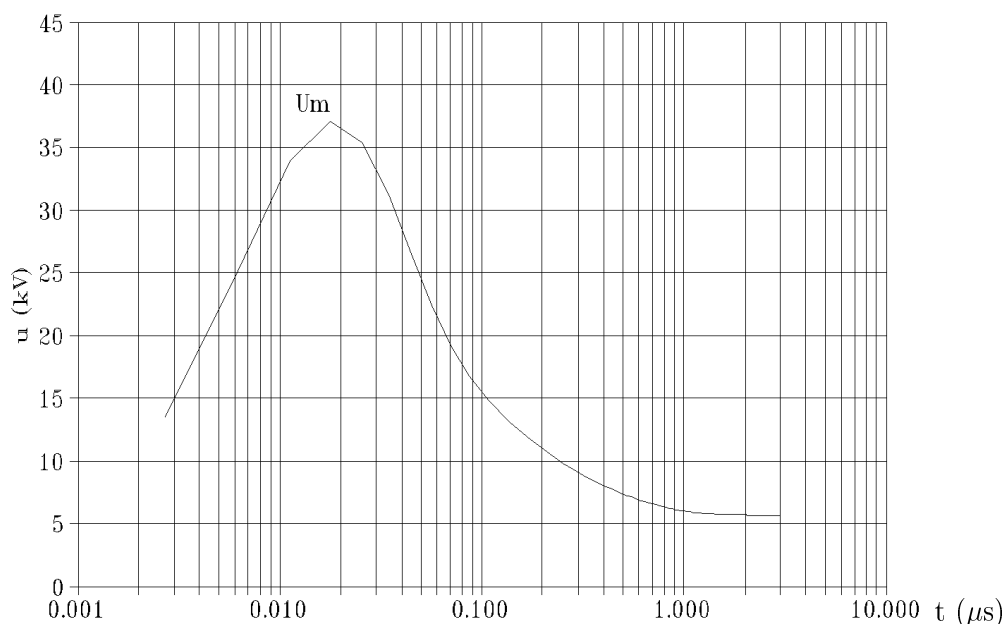
5.5.1 Odredjivanje parametara ekvivalentnog uzemljivača

Da bi se objasnio postupak odredjivanja parametara ekvivalentnog uzemljivača, analiziran je naponski odziv uzemljivača u obliku kvadrata dužine stranice 10 m, koji je ukopan na dubinu od 0,5 m. U ugao uzemljivača od užeta kružnog preseka površine 50 mm² se injektira strujni

talas Hevisajdovog oblika. Za tako injektiran strujni talas je određen naponski odziv na mestu injektiranja. Iz uslova jednakosti naponskih odziva realnog i ekvivalentnog uzemljivača na strujni talas Hevisajdovog oblika određuju se parametri ekvivalentnog uzemljivača.

Na slici 5.12 prikazan je tipičan oblik naponskog odziva realnog uzemljivača položenog u tlo specifične otpornosti $\rho = 100 \Omega m$, za strujni talas Hevisajdovog oblika. Vremenska podela na apscisnoj osi data je u μs u logaritamskom obliku da bi se jasnije sagledali detalji odziva u širem vremenskom dijapazonu.

Na dijagramu se mogu uočiti dve oblasti. Prva oblast odgovara porastu napona od nule do maksimalne vrednosti. Pokazuje se da se maksimalna vrednost napona na uzemljivaču najčešće postiže nakon $20 - 50 ns$ od trenutka injektiranja Hevisajdovog strujnog talasa [117].



Slika 5.12: Tipičan oblik naponskog odziva realnog uzemljivača za Hevisajdov strujni talas

Drugu oblast karakteriše daleko sporije opadanje napona od maksimalne vrednosti do odgovarajuće stacionarne vrednosti. Jedan od bitnih uticaja na talasni oblik odziva uzemljivača je efekat prostiranja talasa kroz uzemljivač. Brzina prostiranja talasa u tlu može se odrediti iz izraza [112]:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.33)$$

gde su :

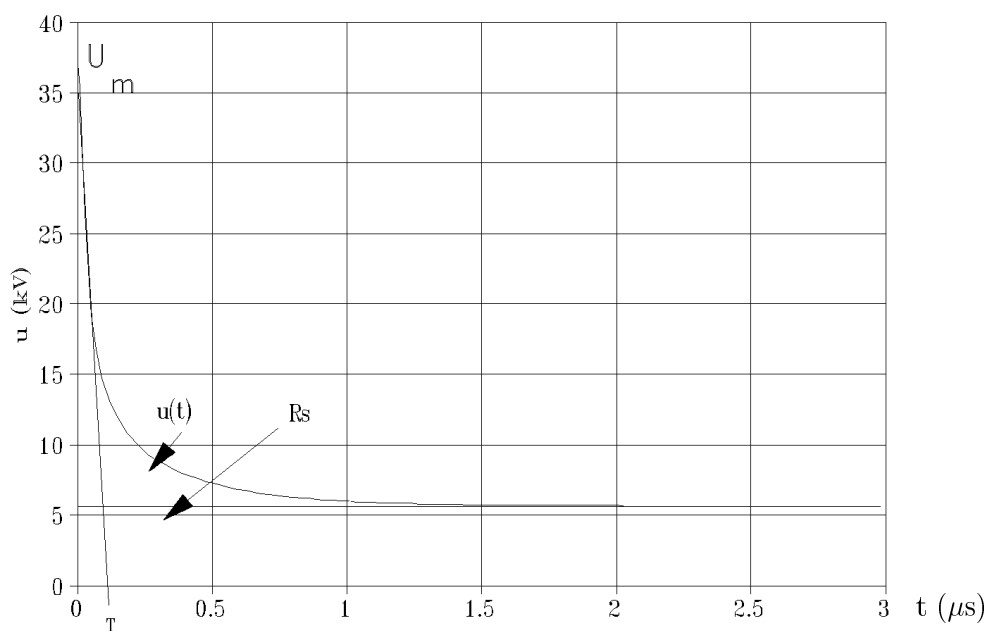
v - brzina prostiranja talasa u tlu,

c_o - brzina prostiranja talasa u vakuumu, koja iznosi $300 \text{ m}/\mu\text{s}$,

ε_r - relativna dielektrična konstanta tla.

Relativna dielektrična konstanta tla zavisi od vrste tla i nalazi se u opsegu $\varepsilon_r = 4 - 81$ [118]. Za tipičnu vrednost $\varepsilon_r = 9$, brzina prostiranja talasa u tlu iznosi $v = 100 \text{ m}/\mu\text{s}$. Za vremenski period od 20 ns do 50 ns , talas predje put od 2 m do 5 m .

Pri analizi ugroženosti nadzemnih vodova je ustanovljeno da naprezanja na izolaciji koja su dovoljna da izazovu preskok nastaju nekoliko μs posle prve pojave struje atmosferskog pražnjenja na uzemljivaču. Tada se može smatrati da je usponski deo krive odziva uzemljivača do vrednosti U_m već prošao i da ne utiče na rezultate proračuna. Zbog toga se naponski odziv na slici 5.12 može aproksimirati odzivom na slici 5.13. Oznake na slici 5.13



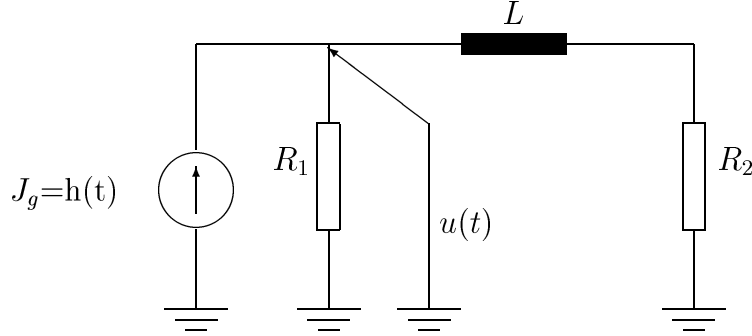
Slika 5.13: Aproksimirani oblik naponskog odziva

imaju sledeće značenje :

U_m - maksimalna vrednost napona,

R_s - stacionarna otpornost rasprostiranja, koja ujedno brojno predstavlja stacionarnu vrednost napona odziva na mestu injektiranja (kV) za Hevisajdov strujni talas (kA),

T - vremenska konstanta funkcije odziva uzemljivača.



Slika 5.14: RL kolo za formiranje naponskog odziva uzemljivača

Odredjivanje parametara ekvivalentnog uzemljivača izvršeno je na osnovu aproksimiranog oblika naponskog odziva realnog uzemljivača prema slici 5.13. Ovakav naponski odziv može se ostvariti injektiranjem Hevisajdovog strujnog talasa u RL kolo sa slike 5.14. Napon $u(t)$ u Laplasovom domenu na otporniku R_1 , koji predstavlja napon na mestu injektiranja struje, iznosi:

$$U(p) = \frac{R_1(R_2 + Lp)}{(R_1 + R_2 + Lp)} \frac{I_m}{p} \quad (5.34)$$

gde je $I_m = 1 \text{ kA}$ amplituda jediničnog strujnog impulsa u obliku odskočne funkcije.

Odredjivanjem inverzne Laplasove transformacije izraza 5.34, dobija se:

$$u(t) = \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_1^2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{R_1 + R_2}{L} t} \right) \cdot I_m \quad (5.35)$$

Otpornosti R_1 i R_2 se odredjuju iz sledećih graničnih uslova, uz $I_m = 1$:

$$u(t) |_{t=0} = U_m \quad (5.36)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = R_s \quad (5.37)$$

Na osnovu relacija 5.35 - 5.37, dobijeni su sledeći izrazi za otpornosti R_1 i R_2 :

$$R_1 = U_m \quad (5.38)$$

$$R_2 = \frac{U_m R_s}{U_m - R_s} \quad (5.39)$$

Induktivnost ekvivalentnog uzemljivača može se odrediti iz sledećeg izraza :

$$L = T(R_1 + R_2) \quad (5.40)$$

gde je T - vremenska konstanta kola koja se očitava sa dijagrama prikazanog na slici 5.13.

Zamenom izraza 5.38 - 5.39 u izraz 5.40, dobija se :

$$L = T(U_m + \frac{U_m R_s}{U_m - R_s}) \quad (5.41)$$

Očitavanjem maksimalne vrednosti napona U_m , stacionarne vrednosti napona (odnosno proračunom stacionarne otpornosti rasprostiranja R_s) i vremenske konstante T prema dijagramu na slici 5.13, definisani su svi parametri ekvivalentnog uzemljivača.

Ovako određeni parametri ekvivalentnog uzemljivača se mogu primenjivati za proizvoljan talasni oblik injektirane struje atmosferskog pražnjenja. U opštem slučaju je naponski odziv uzemljivača $U_G(p)$ u Laplasovom domenu na proizvoljni strujni talas $I_G(p)$:

$$U_G(p) = U(p) \cdot I_G(p) \quad (5.42)$$

gde je $U(p)$ odziv uzemljivača na jediničnu odskočnu funkciju struje.

Vremenski naponski odziv uzemljivača dobijen inverznom Laplasovom transformacijom izraza 5.42 je:

$$u_G(t) = u(t)i_G(0) + \int_0^t u'(t-z)i_G(z)dz \quad (5.43)$$

Umesto primene konvolucionog integrala za izračunavanje naponskog odziva uzemljivača na proizvoljnu injektiranu struju, može se izvršiti proračun u vremenskom domenu direktno injektiranjem struje atmosferskog pražnjenja u ekvivalentno kolo uzemljivača i određivanjem funkcije odziva.

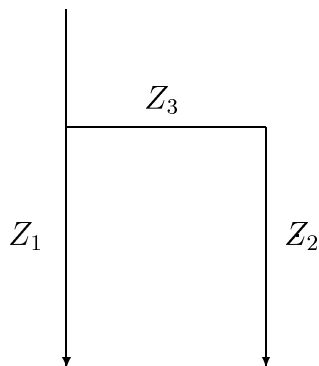
Navedeni postupak određivanja parametara ekvivalentnog uzemljivača primenljiv je za slučajeve umerenih vrednosti specifične otpornosti tla (do $\rho = 300 \Omega m$). Većina dalekovodnih stubova u našoj zemlji upravo se nalazi na ovakvom tlu ($\rho = 50 - 100 \Omega m$).

Za veće vrednosti specifične otpornosti tla dominira uticaj jonizacije tla koji dovodi do smanjenja udarne impedanse uzemljivača i godišnjeg broja ispada dalekovoda usled povratnih preskoka.

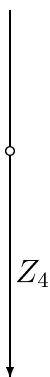
U ovim slučajevima model uzemljivača sa konstantnom otpornošću brojno jednako stacionarnoj otpornosti rasprostiranja uzemljivača daje rezultate na stranu sigurnosti [62].

Primena modela ekvivalentnog uzemljivača na kompletnu zamensku šemu za proračun atmosferskih prenapona

Pri proračunu brzih prelaznih procesa često se, radi jedinstvenosti postupka, elementi sa koncentrisanim parametrima predstavljaju kao vodovi. Na taj način se može približno proračunati prelazni proces u složenoj mreži koja sadrži i elemente sa koncentrisanim parametrima i vodove. Elementi ekvivalentnog uzemljivača prikazani na slici 5.14 zamenjuju se odgovarajućim vodovima prema metodi ekvivalentnih vodova. Na slici 5.15 prikazana je zamenska šema uzemljivača sa slike 5.14. Na slici 5.16 prikazana je zamenska šema uzemljivača modelovanog stacionarnom otpornošću rasprostiranja.



Slika 5.15: Zamenska šema uzemljivača u udarnom periodu



Slika 5.16: Zamenska šema uzemljivača modelovanog stacionarnom otpornošću rasprostiranja

Karakteristične impedanse vodova označene na slici 5.15 i 5.16 se određuju na osnovu pravila zamene koncentrisanih elemenata vodovima, kao što je ranije opisano:

$$Z_1 = R_1 \quad (5.44)$$

$$Z_2 = R_2 \quad (5.45)$$

$$Z_3 = \frac{L}{\tau} \quad (5.46)$$

$$Z_4 = R_s \quad (5.47)$$

Oznake u izrazima 5.44 - 5.47 imaju sledeće značenje:

Z_1 – Z_4 – karakteristične impedanse ekvivalentnih vodova,

R_1 , R_2 , L – parametri ekvivalentnog uzemljivača koji se određuju iz izraza 5.38 - 5.40, odnosno sa slike 5.13,

R_s – stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača, definisana izrazom 5.37,

τ – vreme prostiranja talasa koje se određuje tako da greška pri ekvivalentiranju bude minimalna. Po pravilu je ovo vreme jednako jednom koraku proračuna.

5.5.2 Primeri proračuna

Na slikama 5.17 i 5.18 su prikazane zamenske šeme dalekovoda na osnovu kojih je izvršena uporedna analiza uticaja načina modelovanja uzemljivača na visinu atmosferskih prenapona i rizika preskoka. Na slici 5.17 uzemljivač je modelovan stacionarnom otpornošću rasprostiranja. Na slici 5.18 uzemljivač je modelovan RL kolom. Parametri šeme na slikama 5.17 i 5.18 su sledeći:

Z_{uz} –karakteristična impedansa zaštitnog užeta, $Z_{uz} = 420 \, \Omega$,

Z_f –karakteristična impedansa faznog provodnika, $Z_f = 316 \, \Omega$,

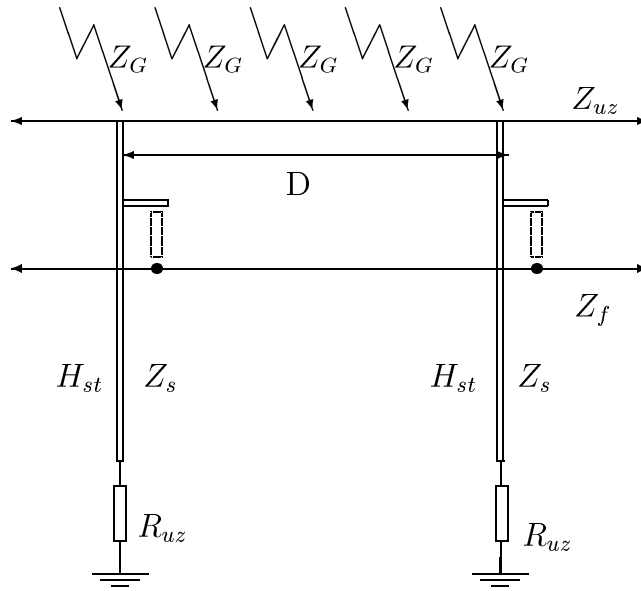
Z_s –karakteristična impedansa dalekovodnog stuba, $Z_s = 98 \, \Omega$,

Z_G –karakteristična impedansa kanala groma, $Z_G = 300 \, \Omega$,

H_{st} –visina dalekovodnog stuba, $H_{st} = 26 \, m$,

D –dužina raspona, $D = 200 \, m$.

Na slici 5.19 prikazan je oblik uzemljivača dalekovodnog stuba. Naponski odziv prikazanog uzemljivača dalekovodnog stuba na mestu injektiranja Hevisajdovog strujnog talasa dat je na slici 5.12, odnosno 5.13.



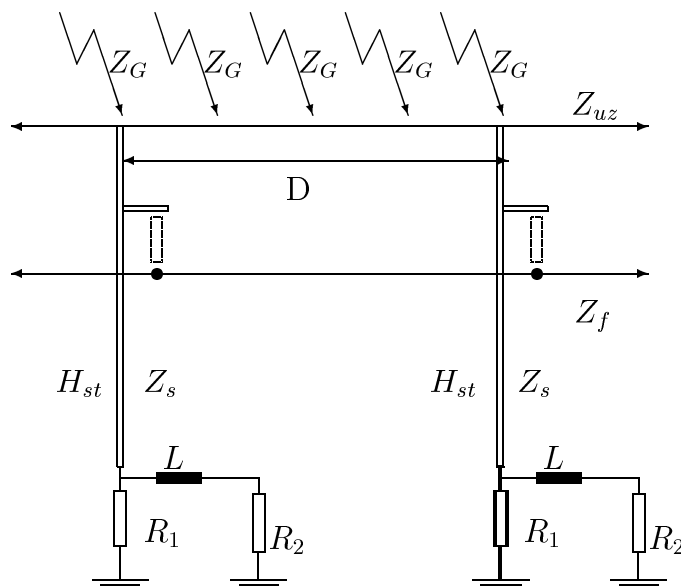
Slika 5.17: Zamenska šema dalekovoda sa stacionarnom otpornošću rasprostiranja uzemljivača

Na slici 5.20 prikazan je vremenski oblik napona na konzoli stuba, koji je određen klasičnim postupkom proračuna za slučaj atmosferskog pražnjenja u sredinu raspona za stacionarni i udarni model. Amplituda i strmina struje groma iznose $I_m = 121 \text{ kA}$ i $S = 43.2 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Prema [30], u svega 2 % slučajeva mogu se pojaviti atmosferska pražnjenja većih amplituda i strmina od navedenih vrednosti.

Stacionarna otpornost rasprostiranja uzemljivača i parametri RL kola, kao i izračunati godišnji broj preskoka na vazdušnoj izolaciji za različite modele prikazani su u tablici 5.1. Proračun broja preskoka određen je variranjem mesta udara duž raspona dalekovoda nazivnog napona $U_n = 400 \text{ kV}$ i $U_n = 110 \text{ kV}$, prema slici 5.17, odnosno 5.18 [123, 124, 125].

Model	Parametri uzemljivača				Godišnji broj preskoka	
	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$L (\mu H)$	$R_s (\Omega)$	400 (kV)	110 (kV)
Stacionarni model	-	-	-	5,66	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,07
Impulsni model	37,05	6,68	8,74	-	$0,15 \cdot 10^{-2}$	0,165

Tabela 5.1: Parametri RL kola, kao i godišnji broj preskoka na vazdušnoj izolaciji voda za dva različita modela uzemljivača



Slika 5.18: Zamenska šema dalekovoda sa uzemljivačem modelovanim RL kolom

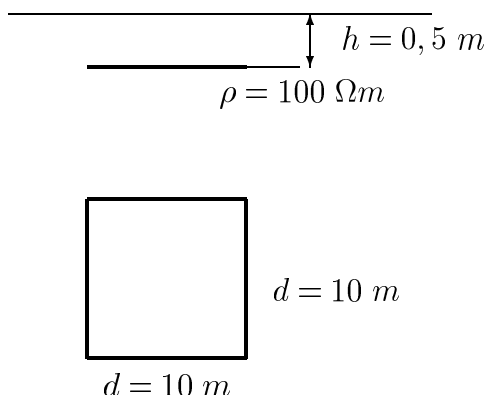
Rezultati proračuna ukazuju na izrazit induktivni uticaj u oblasti malih vrednosti specifične otpornosti tla, što je u saglasnosti sa zaključcima iznetim u [111, 62].

5.6 Modelovanje preskoka na izolaciji voda

Jedan od najbitnijih faktora koji utiče na vrednost rizika preskoka na izolaciji vodova je model preskočne karakteristike izolacije. Postoji više različitih modela izolacije, od kojih svaki unosi određene aproksimacije.

5.6.1 Eksperimentalna volt-sekundna karakteristika izolacije

Najjednostavniji model preskočnog napona izolacije voda je preko eksperimentalno određene zavisnosti 50% preskočnog napona u zavisnosti od vremena do preskoka za standardni oblik naponskog talasa $1.2/50 \mu s/\mu s$ koja se naziva volt-sekundna karakteristika izolacije ili $V - t$ kriva.



Slika 5.19: Oblik uzemljivača dalekovodnog stuba

Pod 50% preskočnim naponom se podrazumeva amplituda naponskog talasa koja posle više ponovljenih udara na nepromenljivu konfiguraciju elektroda izazove u 50% slučajeva preskok na izolaciji.

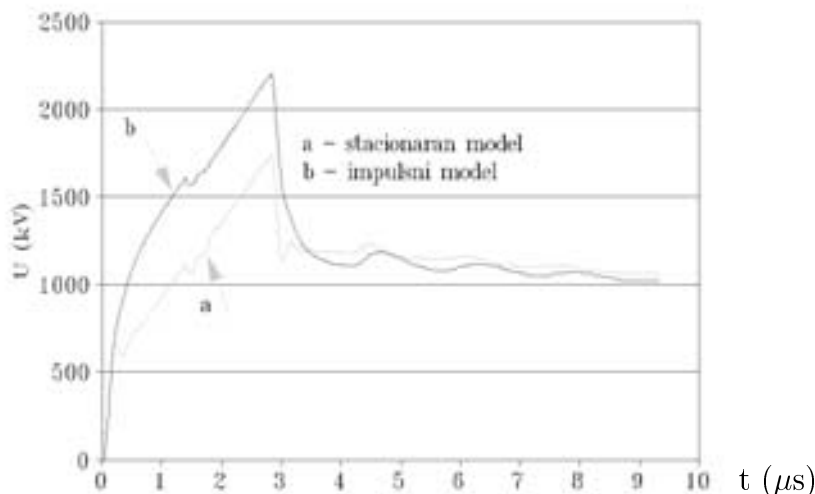
Ova kriva se dobija u laboratorijskim uslovima ispitivanjem standardnim udarnim atmosferskim talasom različitih amplituda i nepromenljivog oblika. Ovakva ispitivanja su veoma dugotrajna zbog potrebe za ispitivanjem sa velikim brojem impulsa da bi se odredio 50% preskočni napon.

Ukoliko se raspolaze eksperimentalnim rezultatima, tada se za sam proračun može koristiti karakteristika u linearno-segmentnom obliku, dobijena povezivanjem eksperimentalno dobijenih tačaka pravim linijama. Obično se volt - sekundna karakteristika može dovoljno verno reprezentovati sa 6 tačaka, odnosno 5 linearnih odsečaka.

Tipična kriva dobijena eksperimentalnim putem za jednostruki izolatorski lanac sa 19 članaka sa zaštitnom armaturom prema [63] prikazana je na slici 5.21.

Može se uočiti da 50% preskočni napon dobija vrlo visoke vrednosti pri primeni strmih talasa kada je vreme do preskoka vrlo kratko. Naprotiv, pri primeni talasa koji se sporo uspostavljaju $V - t$ kriva se vrlo malo menja u zavisnosti od vremena do preskoka. Pri numeričkom proračunu prelaznog procesa se u svakom trenutku ispituje da li je razlika napona između dve tačke koje definišu krajeve izolatora postala veća od volt-sekundne krive izolacije u posmatranom vremenskom trenutku.

Ukoliko je napon na izolatoru postao veći od 50% preskočnog napona datog $V - t$ krivom, posmatrane dve tačke se zamenjuju kratkim vodom čija je dužina približno jednaka dužini izolatorskog lanca, a karakteristična impedansa se usvaja da je jednaka karakterističnoj impedansi konzole stuba. Na taj način se konzola praktično direktno spaja sa faznim provodnikom.



Slika 5.20: Vremenska promena napona na konzoli stuba u zavisnosti od načina modelovanja uzemljivača

Mora se napomenuti da se vremenski trenutak u kome se posmatra napon na $V - t$ karakteristici računa od prvog nailaska talasa na posmatranu izolaciju, a ne od početka proračuna.

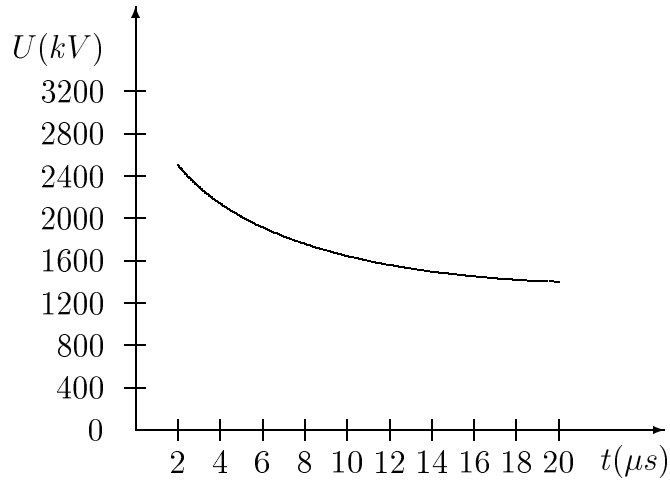
U ovakvom modelu se potpuno zanemaruje slučajna priroda preskočnog napona, već se smatra da svaki napon koji prevazilazi 50% preskočni napon izaziva preskok, dok niže napone izolacija podnosi.

Drugo veoma važno uprošćenje modela se sastoji u tome da je eksperimentalno dobijena $V - t$ karakteristika određena standardnim oblikom talasa, dok se u sistemu realno mogu pojaviti talasi različitog oblika.

5.6.2 V-t karakteristika izolacije u analitičkom obliku

Eksperimentalna volt-sekundna karakteristika izolacije se može predstaviti jednostavnom hiperbolom sledećeg oblika [16]:

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} \quad (kV) \quad (5.48)$$



Slika 5.21: Volt–sekundna karakteristika izolacije izolatorskog lanca

gde se prema [16] preporučuju sledeće vrednosti konstanti K_1 i K_2 :

$$K_1 = 400d \quad (5.49)$$

$$K_2 = 710d \quad (5.50)$$

gde d predstavlja medjuelektrodni 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 dva vremenska trenutka t_1 i t_2 .

$$U(t_1) = K_1 + \frac{K_2}{t_1^{0,75}} \quad (5.51)$$

$$U(t_2) = K_1 + \frac{K_2}{t_2^{0,75}} \quad (5.52)$$

Rešavanjem gornjeg sistema jednačina po K_1 i K_2 se dobija:

$$\begin{aligned} K_1 &= U(t_1) - \frac{U(t_1) - U(t_2)}{1 - t_1^{0,75} t_2^{-0,75}} \\ K_2 &= \frac{U(t_1) - U(t_2)}{t_1^{-0,75} - t_2^{-0,75}} \end{aligned} \quad (5.53)$$

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 $10 - 20 \mu s$.

Analitička $V - t$ karakteristika ne obuhvata slučajno rasipanje preskočnog napona i tačna je samo za standardni oblik talasa, jer je dobijena iz eksperimentalne krive koja važi pod tim uslovima.

5.6.3 Metoda površine

Proces razvoja pražnjenja zavisi ne samo od visine napona koji napreže izolaciju, nego i od vremena izloženosti izolacije naprezanju. Ako je U_o minimalni napon koji dovodi do preskoka pri neograničenom delovanju (jednosmerni preskočni napon), onda će svaki napon viši od U_o ranije izazvati preskok. Prema [64] mera naprezanja vazdušne izolacije srazmerna je sledećem integralu:

$$A = \int_{t_o}^t [U(t) - U_o]^k dt \quad (5.54)$$

gde su:

$U(t)$ – vremenska funkcija primenjenog napona,

k – empirijska konstanta koja se može usvojiti u jednostavnijoj verziji izraza da iznosi $k = 1$,

A – mera naprezanja izolacije,

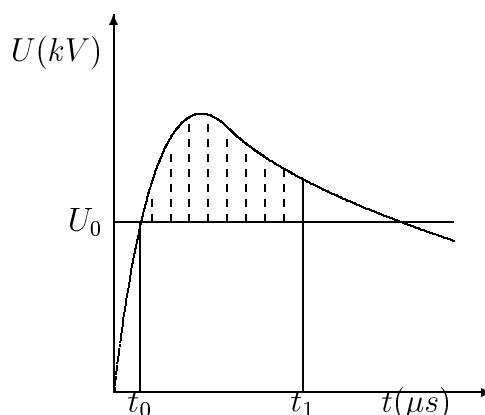
t_o – trenutak kada primenjeni naponski talas prvi put predje napon U_o .

Kada A postane veće od neke kritične vrednosti A_{kr} , dolazi do preskoka.

Na slici 5.22 ilustrovan je postupak proračuna. A predstavlja površinu izmedju napona U_o i krive primenjenog napona. Kada ta površina postane veća od kritične, dolazi do preskoka.

Gornji kriterijum važi i za nestandardne talase koji nisu oscilatorne prirode, ali ne obuhvata slučajno rasipanje preskočnih napona.

Metoda površine se primenjuje na taj način što se pre proračuna prelaznog procesa odrede konstante A_{kr} i U_o za određeni tip izolatora. U toku proračuna prelaznog procesa



Slika 5.22: Ilustracija metode površine

se u svakom koraku izračunava vrednost integrala A i upoređuje sa kritičnom vrednošću. Kada bude ispunjen uslov da je $A > A_{kr}$, dolazi do preskoka, kada se konzola prespaja sa faznim provodnikom, na isti način kao i kod $V - t$ karakteristike.

5.7 Modelovanje opreme u postrojenju

5.7.1 Modelovanje opreme kapacitivnostima

Prilikom analize atmosferskih prenapona koji nailaze u visokonaponska postrojenja po priključenim vodovima, potrebno je na odgovarajući način modelovati pojedine elemente postrojenja na koje prenaponski talas nailazi. U kasnijem radu će biti prikazana optimizacija zamenskih šema postrojenja u inženjerskim metodama proračuna.

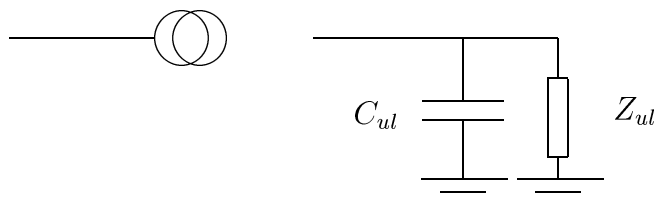
Elementi postrojenja koji utiču na deformaciju prenaponskih talasa pri prostiranju su:

- energetski transformator,
- naponski merni transformator,
- strujni merni transformator,
- prekidači,
- rastavljači,

- sabirnice,
- odvodnici prenapona,
- lančasti, potporni i provodni izolatori.

Svi ovi elementi se, osim odvodnika prenapona i sabirnica, modeluju svojom ulaznom kapacitivnošću. Pri brzim elektromagnetskim prelaznim procesima energetske i merni transformatori se modeluju ili samo ulaznom kapacitivnošću ili paralelnom vezom ulazne kapacitivnosti i otpornosti koja je brojno jednaka karakterističnoj impedansi transformatora.

Na slici 5.23 prikazana je najjednostavnija zamenska šema transformatora za modelovanje talasnih procesa u postrojenju. Za analizu talasnih procesa unutar transformatora je neophodno primeniti znatno složenije šeme koje uvažavaju kapacitivnosti navojaka prema uzemljenim delovima transformatora, kao i kapacitivnosti između pojedinih navojaka.



Slika 5.23: Zamenska šema transformatora

U tablici 5.2 date su tipične vrednosti ulaznih kapacitivnosti energetskih transformatora prema [37]:

Nazivni napon (kV)	Ulazna kapacitivnost transformatora (pF)
35	800
110	800
150-220	1500-2000
330	3000
500	5000
750	4000

Tabela 5.2: Tipične vrednosti ulaznih kapacitivnosti energetskih transformatora u zavisnosti od nazivnog napona

Pri analizi ugroženosti transformatora od atmosferskih prenapona poželjno je koristiti se podacima o ulaznim kapacitivnostima transformatora od proizvođača transformatora. Ukoliko se takvim podacima ne raspolaže, tada se usvajaju podaci iz tablice 5.2.

U tablici 5.3 date su orijentacione vrednosti kapacitivnosti različitih elemenata visokonaponske opreme u postrojenjima [36, 134].

Naziv opreme	Karakteristike opreme	Granica kapacitivnosti (pF)	Srednja vrednost (pF)	Talasna impedansa (Ω)
Energetski transformatori	Velike snage	1000-3000	1500	3000-10000
Energetski transformatori	male snage	300-1000		3000-10000
Naponski transformatori	induktivni	200-500	300	
Naponski transformatori	kapacitivni 145 kV–800 kV	16000-2000		
Prekidači	zatvoren položaj	300-800	500	
Prekidači	otvoren položaj	200-500	300	
Rastavljači	zatvoren položaj	40-80	60	
Rastavljači	otvoren položaj	30-60	40	
Strujni transfor.		20-700		
Provodni izolatori		100-300	200	

Tabela 5.3: Tipične vrednosti kapaciteta pojedinih elemenata opreme visokog napona

Pri analizi prenapona u visokonaponskim postrojenjima samo se pojedini elementi koji imaju dominantan uticaj na izobličenje prenaponskih talasa uzimaju u obzir. To su pre svega energetski transformator koji se modeluje svojom ulaznom kapacitivnošću i obično naponski merni transformator sa svojom ulaznom kapacitivnošću. Ostali elementi se najčešće zanemaruju.

5.7.2 Model transformatora za analizu prenetih prenapona sa primara na sekundar

Modelovanje transformatora pri analizi udarnih procesa unutar namotaja je izuzetno složen zadatak. Namotaj transformatora se zamenjuje kapacitivnostima izmedju navojaka, kapacitivnostima prema jezgru i sudu, kao i kapacitivnostima izmedju pojedinih namotaja. Za tačnu analizu prelaznih procesa unutar namotaja transformatora pri dejstvu strmih prenapona potrebno je formirati veoma složeno kolo. Za jednostavnu analizu prenošenja prenapona sa jednog namotaja na drugi možemo se poslužiti veoma jednostavnim modelom transformatora.

Pri analizi brzih prelaznih režima na transformatorima razlikuju se dva perioda:

- period kapacitivnog prenošenja energije (odmah nakon nailaska prenapona na transformator)
- period induktivnog prenošenja energije.

U realnosti se istovremeno energija prenosi i induktivnim i kapacitivnim putem, s tim što se brži procesi koji se odvijaju odmah nakon nailaska prenapona uglavnom prenose kapacitivno, a sporiji procesi se prenose pretežno induktivnim putem.

Kapacitivno prenošenje prenapona sa jednog na drugi namotaj

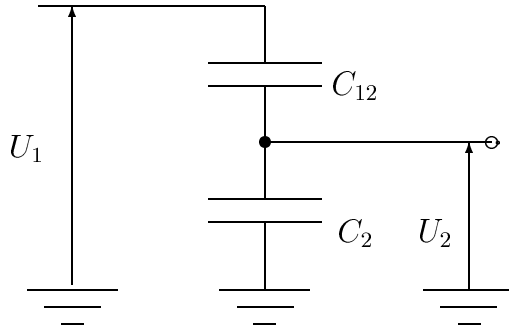
Prema [94] kapacitivno prenošenje prenapona sa namotaja višeg na namotaj nižeg napona se može modelovati jednostavnom zamenskom šemom prikazanom na slici 5.24 za slučaj otvorenog namotaja nižeg napona. Ova šema važi u početnom periodu nakon nailaska prenaponskog talasa (oko $1\mu s$). Po ovoj šemi se transformator ponaša kao kapacitivno delilo napona. Kondenzator C_{12} predstavlja kapacitivnost izmedju primarnog i sekundarnog namotaja, a C_2 predstavlja kapacitivnost sekundarnog namotaja.

Ako je trenutna vrednost napona na višenaponskoj strani po kojoj je naišao prenaponski talas U_1 , vrednost prenetog prenapona U_2 na niskonaponsku stranu je:

$$U_2 = sU_1 \quad (5.55)$$

gde je s odnos deljenja kapacitivnog delila, odnosno:

$$s = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} \quad (5.56)$$



Slika 5.24: Zamenska šema transformatora za procenu prenetih prenapona

U toku kapacitivnog prenošenja prenapona, ukoliko je na niženaponskoj strani transformatora priključen vazdušni vod ili kabl, tada se u zamenskoj šemi transformatora na niženaponsku stranu paralelno kondenzatoru C_2 vezuje otpornik R brojno jednak karakterističnoj impedansi priključenog provodnika.

Uticaj superponiranog dejstva radnog napona na prenesene prenapone se prema [94] obuhvata faktorom p na sledeći način:

$$U_2 = spU_1 \quad (5.57)$$

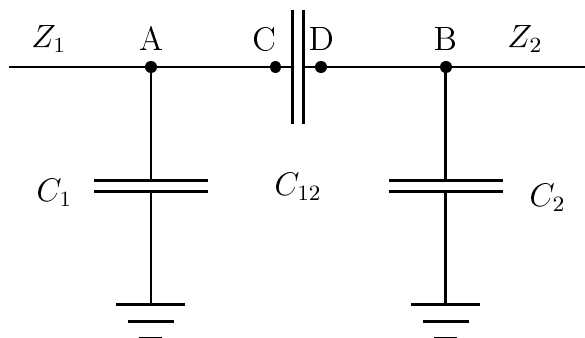
gde parametar p ima sledeće vrednosti:

- $p \approx 1,15$ za spregu zvezda-trougao,
- $p \approx 1,05$ za spregu zvezda-zvezda.

Parametar s za slučaj transformatora koji nema nikakve veze priključene na niženaponskoj strani, prema [94], ima vrednost u opsegu od $0 \div 0,4$ u zavisnosti od načina izvodjenja namotaja.

Vrednost kapacitivnosti izmedju primarnog i sekundarnog namotaja se obično kreće izmedju $C_{12} = 1 \text{ nF} \div 10 \text{ nF}$.

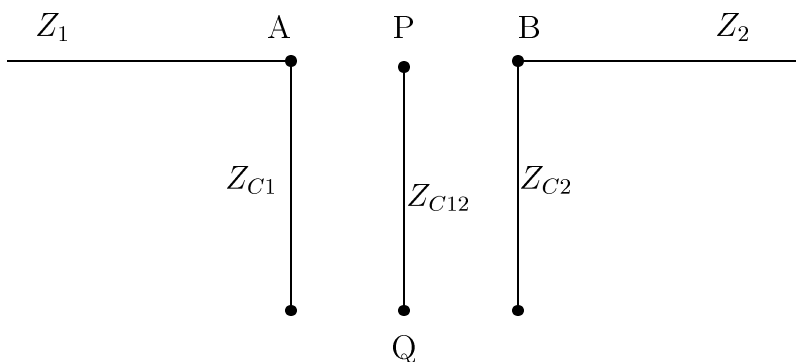
Zamenska šema transformatora unutar postrojenja pri numeričkoj analizi prenetih prenapona sa primarnog na sekundarni namotaj transformatora se bazira na metodi modifikovanih koeficijenata prelamanja. Originalna uprošćena zamenska šema sa koncentrisanim kapacitivnostima ima oblik kao na slici 5.25. U ovom slučaju transformator je deo kompletne šeme postrojenja, tako da talas koji nailazi sa višenaponske strane transformatora



Slika 5.25: Zamenska šema transformatora unutar postrojenja za procenu prenetih prenapona

predstavlja rezultat prelaznog procesa u kompletnoj šemi usled atmosferskog pražnjenja na neki od vodova koji su priključeni na sabirnice postrojenja.

Primenom metode modifikovanih koeficijenata prelamanja dobija se šema koja sadrži samo ekvivalentne vodove, kao na slici 5.26.



Slika 5.26: Zamenska šema transformatora za numeričku procenu prenetih prenapona primenom modifikovanih koeficijenata prelamanja

Induktivno prenošenje prenapona sa jednog na drugi namotaj

Pri razmatranju sporijih komponenti elektromagnetskih prelaznih procesa na transformatoru u [94] se predlaže uprošćena metoda modelovanja prenošenja prenapona putem induktivne sprege između primara i sekundara. Amplituda prenetog prenapona induktivnom spregom između namotaja izračunava se primenom sledećeg izraza:

$$U_s = pqrU_p/N \quad (5.58)$$

gde su:

p -faktor koji obuhvata uticaj superponiranog radnog napona na prenesene prenapone, isto kao kod kapacitivnog prenosa.

q -koeficijent prenapona u sekundarnom kolu na pobudu iz primarnog kola usled internih oscilacija unutar namotaja.

Ovaj koeficijent zavisi od oblika inicijalnog talasa i karakteristika sekundarnog kola. Kod interkonektivnih, distributivnih ili transformatora po industrijskim objektima na strani nižeg napona postoje veze između transformatora i ostale opreme čija je dužina do 100 m. U tim slučajevima koeficijent q retko prelazi vrednost 1,3 pri analizama atmosferskih prenapona.

U slučaju generatorskih transformatora odnos deljenja prenapona koji nailazi sa višenaponske strane i prenetog prenapona na generatorsku stranu odnosi se kao količnik subtranzijentne reaktanse generatora i ukupne reaktanse bloka generator-transformator. U ovom slučaju koeficijent q ima vrednost oko 0,9.

r -koeficijent čija vrednost zavisi od sprege namotaja transformatora i može da ima različite vrednosti, prema slici 5.27.

U_p -temena vrednost faznog napona na primarnoj (višenaponskoj) strani,

N -odnos preobražaja transformatora.

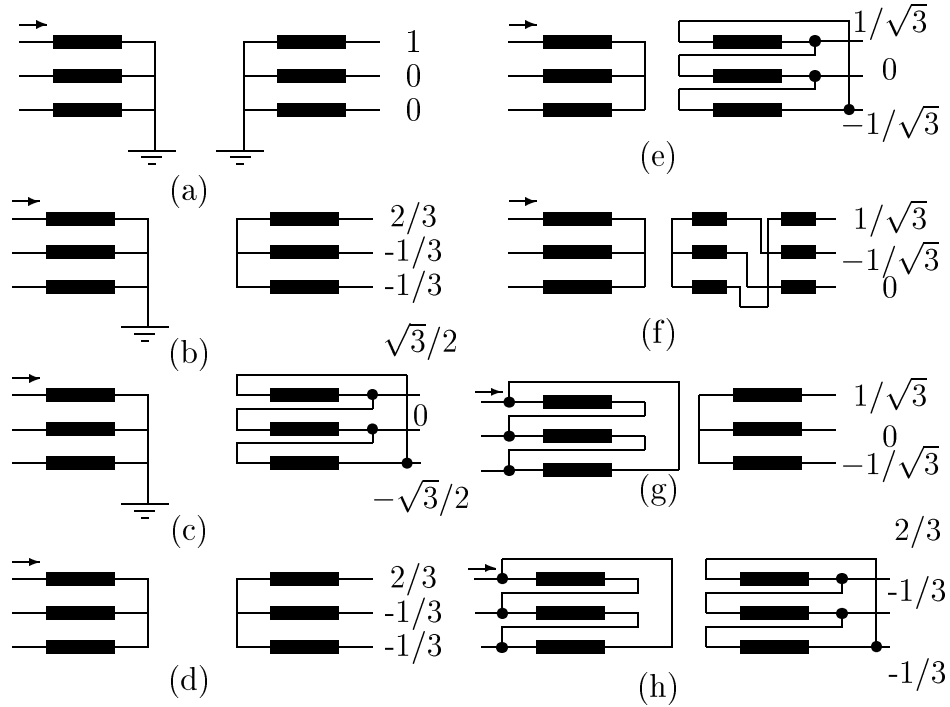
Vrednosti koeficijenta prenošenja prenapona r sa namotaja višeg na namotaj nižeg napona, u zavisnosti od sprege transformatora, prikazane su na slici 5.27.

5.8 Model odvodnika prenapona

5.8.1 Modelovanje nelinearnog otpornika

Odvodnik prenapona predstavlja osnovni zaštitni element za zaštitu izolacije visokonaponske opreme u postrojenju od prenapona. Detaljna konstrukcija i funkcionisanje odvodnika su opisani u posebnom poglavlju, dok je na ovom mestu dato 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



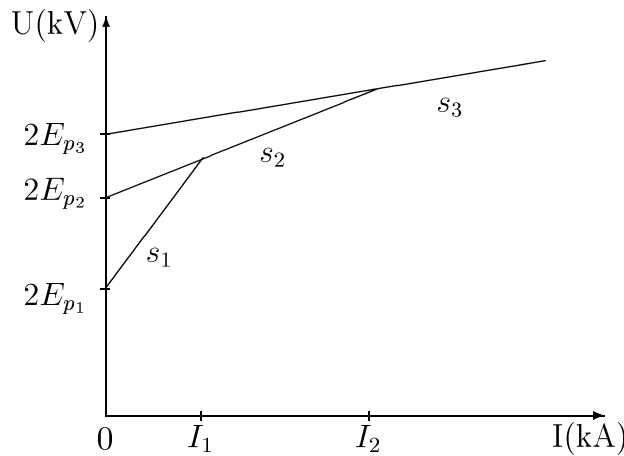
Slika 5.27: Koeficijenti prenošenja prenaponsa za razne sprege transformatora

u relativno uskim granicama. Da bi se nelinearni otpornik odvojio od mreže u normalnom pogonu koriste se iskrišta. Iskrište reaguje pri pojavi prenaponsa, tako da se fazni provodnik preko nelinearnog otpornika spaja sa zemljom.

Novi tip odvodnika prenaponsa (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-ampereska karakteristika nelinearnog otpornika odvodnika prenaponsa može se prikazati u linearno-segmentnom obliku, kao na slici 5.28. 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 inverznu karakteristiku odvodnika u linearizovanom obliku na posmatranom segmentu. Odsečki pojedinih segmenata na ordinati obeleženi su sa $2E_{p_1}, 2E_{p_2}, \dots, 2E_{p_n}$ da bi se uvela analogija sa upadnim komponentama napona po vodovima. Karakteristika preostalog napona na proizvoljnom segmentu s_i



Slika 5.28: Linearno-segmentni oblik volt-amperske karakteristike nelinearnog otpornika odvodnika prenapona

može se napisati u obliku linearne funkcije:

$$u(i) = \frac{E_{p_{j+1}} - E_{p_j}}{I_{j+1} - I_j} \cdot i + 2E_{p_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (5.59)$$

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.

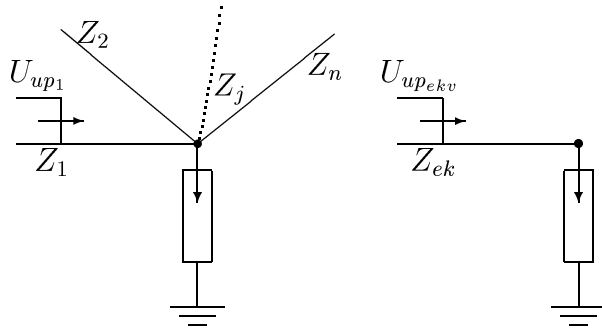
Ako se uvede oznaka:

$$R_{odv_j} = \frac{E_{p_{j+1}} - E_{p_j}}{I_{j+1} - I_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (5.60)$$

izraz 5.59 se može napisati u identičnom obliku kao inverzna karakteristika voda po Beržeronovoj grafoanalitičkoj metodi, odnosno:

$$u(i) = R_{odv_j} i + 2E_{p_j} \quad (j = 2, 3, \dots, n) \quad (5.61)$$

Na slici 5.29 je prikazano više vodova koji se susiće u čvornu tačku u kojoj je priključen odvodnik prenapona (levo), kao i ekvivalentan vod kojim je zamenjeno više vodova (desno). Na slici 5.30 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 5.30 se može zaključiti da se odvodnik na segmentu s_j može modelovati kao neograničeno dugačak vod karakteristične impedanse R_{odv_j} po



Slika 5.29: Odvodnik prenapona priključen na više vodova (levo) i ekvivalentan vod priključen na odvodnik (desno)

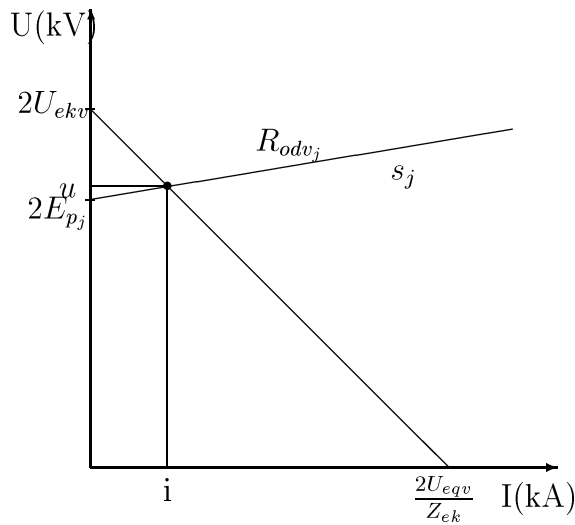
kome nailazi prenaponski talas čija je amplituda $2E_{pj}$, kao na slici 5.31 desno. Na slici 5.31 levo prikazan je nailazak prenaponskog talasa $U_{up_{ekv}}$ po ekvivalentnom vodu prema odvodniku prenapona. Pri proračunu prelaznog procesa potrebno je prvo odrediti segment na kome se seku karakteristika 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:

$$u_{odv} = U_{up_{ekv}} \frac{2R_{odvj}}{R_{odvj} + Z_{ekv}} + E_{pj} \frac{2Z_{ekv}}{Z_{ekv} + R_{odvj}} \quad (5.62)$$

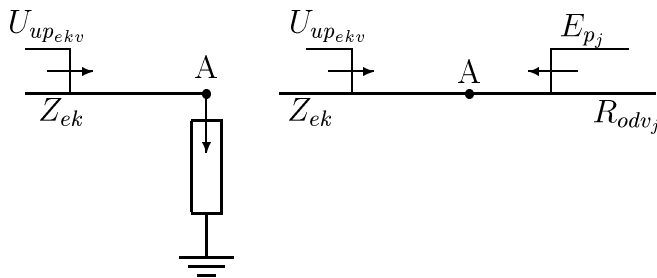
Ovim postupkom dobijen je jednostavan model nelinearnog otpornika odvodnika prenapona za koji je potrebno poznavati samo nekoliko tačaka na volt-amperskoj krivoj preostalog napona. Proizvođači najčešće daju podatke za odvodnik u obliku tabele preostalog napona za nekoliko standardnih vrednosti udarnih struja standardnog oblika, prema preporukama IEC (medjunarodne elektrotehničke komisije) i to najčešće 50 %, 100 % i 200 % od nazivne struje odvodjenja. 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 kao na slici 5.32 mogu se dobiti realni rezultati, sa neznatno višim prenaponima, bez poznavanja tačne karakteristike preostalog napona u oblasti vrlo malih struja.

5.8.2 Modelovanje iskrišta odvodnika prenapona

Iskrište odvodnika prenapona modeluje se na taj način što se odvodnik pre reagovanja zamjenjuje beskonačno velikim otpornikom. Posle reagovanja se uvodi opisani postupak odredjivanja preostalog napona.



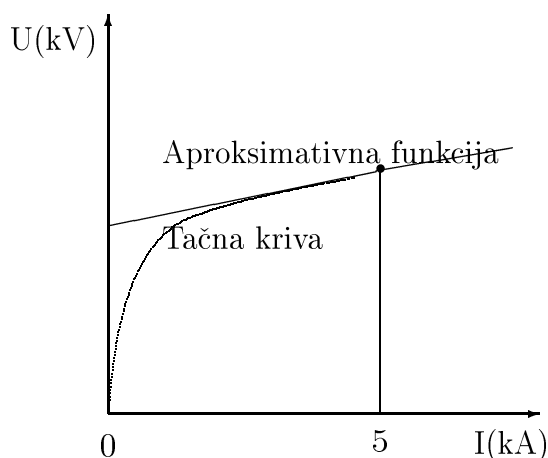
Slika 5.30: Beržeronov dijagram koji služi za modelovanje odvodnika prenapona na segmentu s_j



Slika 5.31: Model odvodnika prenapona na segmentu s_j nelinearne volt-amperske karakteristike putem ekvivalentnih vodova

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 5.33 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, jedino se smatra da je napon reagovanja odvodnika jednak nuli, jer ovi odvodnici imaju nelinearni otpornik direktno uključen pod napon.



Slika 5.32: Aproksimacija karakteristike odvodnika u oblasti malih struja

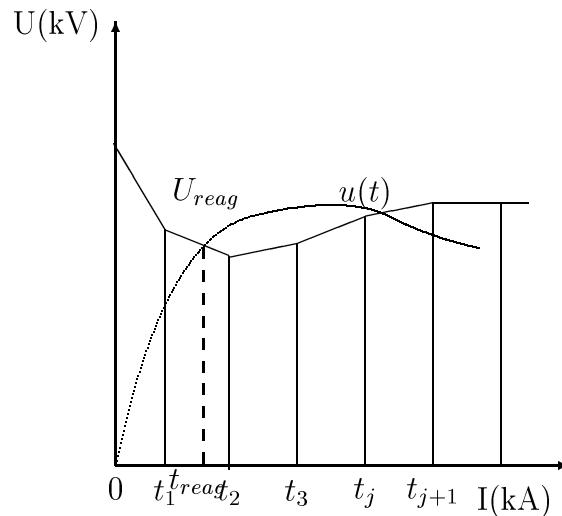
5.8.3 Modelovanje dinamičke karakteristike preostalog napona

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.

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 5.34. Uticaj koeficijenta K_t se uzima u obzir samo kod *ZnO* odvodnika prenapona, dok se kod klasičnog odvodnika zanemaruje.

U svakom koraku proračuna se određuje preostali napon na odvodniku primenom 5.62, koji se množi sa koeficijentom $K_t(\%)/100$ određenim sa dijagrama 5.34 za vreme t proteklo od nailaska prenaponskog talasa na odvodnik do posmatranog trenutka.



Slika 5.33: Modelovanje reagovanja iskrišta klasičnog odvodnika prenapona

5.9 Zamenske šeme visokonaponskih postrojenja

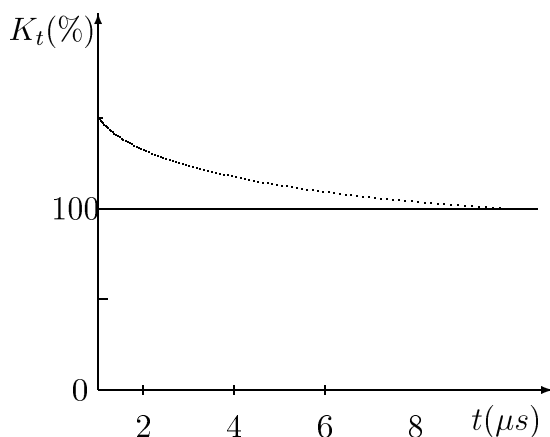
Tačnost simulacije prelaznih procesa u visokonaponskim postrojenjima usled atmosferskih pražnjenja u priključene vodove zavisi od izabrane zamenske šeme kojom se elementi postrojenja modeluju.

Model za analizu atmosferskih prenapona u visokonaponskim postrojenjima obuhvata sledeće elemente:

- Vazdušni vod priključen na sabirnice postrojenja, po kome nailaze prenaponski talasi. Vod se može modelovati kao monofazan sa određenim brojem raspona, na kojima atmosferska pražnjenja mogu da imaju uticaja na ugroženost izolacije elemenata postrojenja. Najčešće je dovoljno modelovati samo prva dva raspona ispred postrojenja za analizu u sistemima visokog napona (iznad 110 kV).

Vod se predstavlja faznim provodnicima i zaštitnom užadi, ukoliko ona postoje. Monofazni model voda je uglavnom dovoljan za tehničke analize, jer se po pravilu posmatra prostiranje talasa po jednom faznom provodniku, dok se na druga dva fazna provodnika pojavljuju indukovani naponi koji su potpuno bezopasni za izolaciju i nemaju efekta na posmatrani fazni provodnik.

Do prostiranja talasa po sva tri fazna provodnika može da dodje jedino u slučaju povratnog preskoka kod voda nižeg nazivnog napona ili pri pojavi indukovanih prenapona. U ovom slučaju su pojave potpuno identične na sva tri fazna provodnika, tako



Slika 5.34: Koeficijent promene preostalog napona u zavisnosti od trajanja čela talasa

da se vod može posmatrati monofazno.

- Stubovi se mogu modelovati kao kratki vodovi, sa otpornostima uzemljenja i preskočnim karakteristikama izolacije.
- Rasklopna oprema, merni i energetske transformatori se mogu modelovati samo ulaznim kapacitivnostima.
- U postrojenju je važno modelovati sve povezne vodove izmedju elemenata, kao i spust od faznog provodnika do odvodnika prenapona i vezu odvodnika prenapona sa uzemljivačem.

Uvažavanje svih elemenata u postrojenju, čak i u slučaju najjednostavnijeg, a ujedno najkritičnijeg uklopnog stanja kada su uključeni samo po jedno transformatorsko i dalekovodno polje, dovodi do komplikovanih zamenskih šema. S obzirom da su elementi koji su modelovani kapacitivnostima najbrojniji, raznolikost zamenskih šema se uglavnom zasniva na različitom broju obuhvaćenih ulaznih kapacitivnosti opreme. Prema broju elemenata modelovanih kapacitivnostima mogu se svi modeli postrojenja podeliti na sledeće grupe [25, 105, 103, 107]:

- model razvodnog postrojenja bez ijedne kapacitivnosti,
- model razvodnog postrojenja sa uvaženom kapacitivnošću samo jednog elementa (najčešće energetskog transformatora),
- model razvodnog postrojenja sa uvažanim kapacitivnostima dva ili više elemenata.

Da bi se izbegao rad sa komplikovanim šemama sa velikim brojem elemenata, pojedini elementi se izostavljaju iz ekvivalentne šeme. Na osnovu analize uticaja pojedinih elemenata na tačnost proračuna date su optimalne zamenske šeme za sisteme nazivnih napona 110 kV i 400 kV. Šeme su odabrane na osnovu kriterijuma da greška proračuna atmosferskih prenapona na priključcima energetskog transformatora za redukovanu šemu ne bude veća od 10 % u odnosu na tačnu šemu. Smatra se da je u slučaju analize atmosferskih prenapona greška od 10 % dozvoljena za tehničke analize.

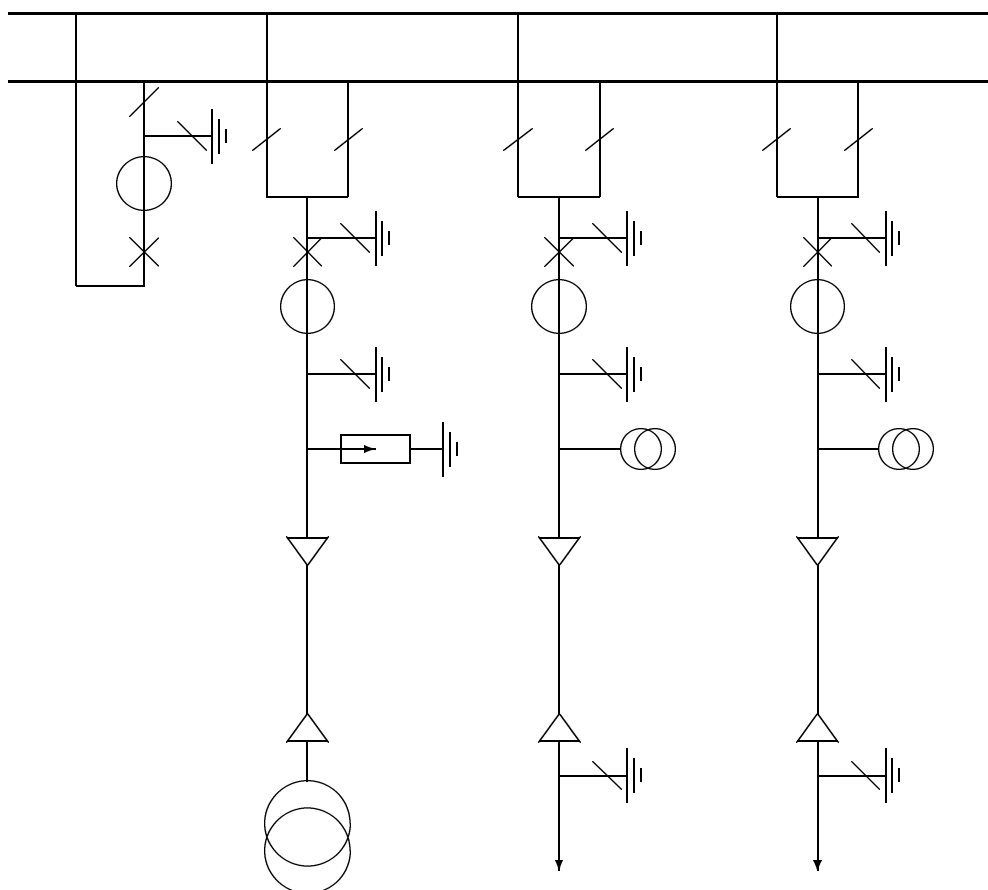
Redukovanu šemu sistema koja se dobija analizom osetljivosti greške proračuna u odnosu na kompletnu šemu nazivamo **tipskom zamenskom šemom**. U odnosu na kompletne zamenske šeme u kojima su uvaženi svi elementi postrojenja, korišćenje tipskih zamenskih šema omogućava sledeće prednosti:

- brže se učitavaju podaci;
- smanjuje se mogućnost greške u procesu učitavanja podataka;
- proračuni se mogu raditi na računaru slabijih performansi;
- povećava se brzina proračuna prelaznog procesa, što može da bude od velike važnosti kod statističkih proračuna sa velikim brojem simulacija.

5.9.1 Tipske zamenske šeme

Analizirane su sledeće zamenske šeme razvodnih postrojenja:

- A** – metalom oklopljeno jednofazno izolovano razvodno postrojenje 400 kV sa kablovskim prilazom,
- B** – metalom oklopljeno jednofazno izolovano razvodno postrojenje 110 kV sa kablovskim prilazom,
- C** – tipsko dispoziciono rešenje 400 kV razvodnog postrojenja TS 400/110 kV/kV na otvorenom,
- D** – tipsko dispoziciono rešenje 110 kV razvodnog postrojenja TS 400/110 kV/kV na otvorenom,
- E** – razvodno postrojenje 110 kV pri hidroelektrani.



Slika 5.35: Principijelna šema jednofaznog metalom oklopljenog postrojenja 400 kV sa kablovskim prilazom

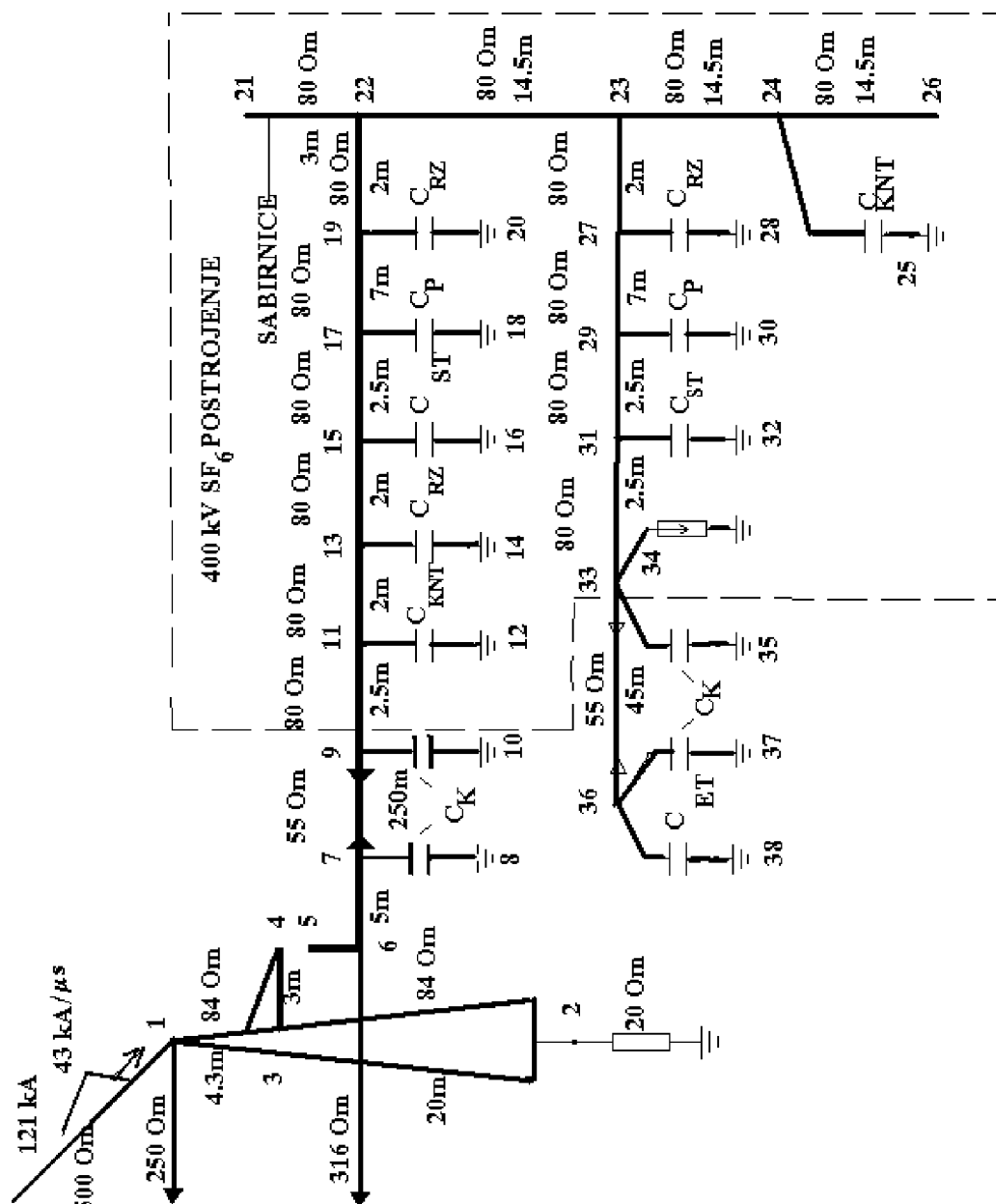
Postupak formiranja tipske zamenske šeme prikazan je na primeru postrojenja **A**. Na slici 5.35 prikazana je principijelna šema postrojenja.

Na slici 5.36 prikazana je kompletna zamenska šema ovog postrojenja za najkritičnije uklopno stanje. Ovo stanje podrazumeva uključenje samo po jednog transformatorskog i dalekovodnog polja.

Tipične brojne vrednosti kapacitivnosti elemenata postrojenja otvorenog tipa i SF6 postrojenja date su u [36, 134]. Orijentacione vrednosti kapacitivnosti opreme date su u tablici 5.3.

Oznake prikazane na slici 5.36 imaju sledeće značenje:

C_{ET} – ulazna kapacitivnost energetskog transformatora,



Slika 5.36: Kompletna zamenska šema postrojenja A za najkritičnije uklopno stanje

C_{KNT} – kapacitivnost kapacitivnog naponskog transformatora,

C_{INT} – kapacitivnost induktivnog naponskog transformatora,

C_{ST} – kapacitivnost strujnog transformatora,

C_P – kapacitivnost prekidača u zatvorenom položaju,

C_{RZ} – kapacitivnost rastavljača u zatvorenom položaju,

C_{RO} – kapacitivnost rastavljača u otvorenom položaju,

C_K – kapacitivnost kablovske glave.

Brojne vrednosti kapacitivnosti elemenata analiziranih razvodnih postrojenja A–E su date u tabeli 5.4.

Tip postrojenja	Kapacitivnosti							
	C_{ET} (nF)	C_{KNT} (nF)	C_{INT} (pF)	C_{ST} (pF)	C_P (pF)	C_{RZ} (pF)	C_{RO} (pF)	C_K (pF)
A	3,23	4	-	50	300	100	-	400
B	3,00	16	100	23	200	100	-	200
C	3,23	4,4	-	500	200	100	50	-
D	3,23	4,4	300	700	500	60	40	-
E	3,00	-	300	700	500	60	40	

Tabela 5.4: Brojne vrednosti kapacitivnosti elemenata analiziranih razvodnih postrojenja A-E

5.9.2 Rezultati klasičnog postupka proračuna

U tabeli 5.5 su prikazani rezultati analize osetljivosti prenapona prouzrokovanih atmosferskim pražnjenjem u vrh prvog stuba ispred postrojenja. Amplituda struje groma u svim proračunima je usvojena da iznosi 121 kA dok je usvojena strmina struje groma $43.2 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Talasna impedansa kanala groma je usvojena da je konstantna i da ima vrednost 500Ω . Verovatnoća da budu prevaziđene vrednosti amplitude i strmine struje groma prema [30] iznosi svega 2 %. Prenaponi su računati u čvorovima 9 i 33 u kojima su locirane kablovske završnice i čvorovima 24 i 36 u kojima su priključeni naponski merni transformator i energetski transformator.

Oznake varijanti upotrebljene u tabeli 5.5 imaju sledeće značenje:

varijanta	Maksimalni prenaponi (kV) u čvorovima				Greška Δ (%)
	9	24	33	36	
<i>a</i>	1160	1110	932	1420	0
<i>b</i>	1160	1110	932	1420	0
<i>c</i>	1170	1120	932	1420	0
<i>d</i>	1150	1150	932	1430	0,7
<i>e</i>	1140	1340	932	1160	-18,31
<i>f</i>	1160	1160	932	1520	9,86
<i>g</i>	1070	1080	932	1530	7,75

Tabela 5.5: Analiza osetljivosti rezultata proračuna prenapona u pojedinim tačkama u zavisnosti od varijante šeme **A**

a – kompletna zamenska šema,

b – zamenska šema bez kapacitivnosti strujnih transformatora,

c – zamenska šema bez kapacitivnosti strujnih transformatora i rastavljača,

d – zamenska šema sa uvaženim kapacitivnostima naponskih transformatora i kapacitivnošću energetskog transformatora,

e – zamenska šema sa uvaženim kapacitivnostima svih naponskih mernih transformatora,

f – zamenska šema sa uvaženom ulaznom kapacitivnošću energetskog transformatora,

g – zamenska šema bez ijedne uvažene kapacitivnosti.

Prenaponi određeni na mestu priključka energetskog transformatora predstavljaju kriterijum greške u svim analiziranim varijantama. Procentualna greška Δ (%) je definisana sledećim izrazom:

$$\Delta(\%) = \frac{U_i - U_a}{U_a} \cdot 100 \quad (5.63)$$

gde su:

U_i – maksimalna vrednost prenapona na priključcima energetskog transformatora u *i*-toj analiziranoj varijanti,

U_a – maksimalna vrednost prenapona u istoj tački kompletne zamenske šeme (varijanta *a*).

Na osnovu rezultata proračuna može se zaključiti da optimalna zamenska šema sadrži samo kapacitivnosti naponskih i energetskog transformatora (varijanta *d*). Na ovaj način je eliminisano 11 kondenzatora u odnosu na kompletnu zamensku šemu uz grešku od svega 0.7 %. Ova zamenska šema je prikazana na slici 5.37.

Istovetne analize su uradjene za postrojenja **B–E**. Tipska zamenska šema postrojenja **B** odnosno **C** sadrži samo kapacitivnosti naponskih mernih i energetskog transformatora uz grešku od -1.2% , odnosno -3.4% , respektivno.

Formiranje tipske zamenske šeme razvodnog postrojenja 110 kV otvorenog tipa prikazano je na primeru postrojenja **E**. Na slici 5.38 prikazana je principijelna šema ovog postrojenja. Na slici 5.39 prikazana je kompletna zamenska šema za najkritičnije uklopno stanje, a na slici 5.40 odgovarajuća optimalna šema.

Ovako formirana optimalna zamenska šema dovodi do greške u proračunu od svega -1.3% .

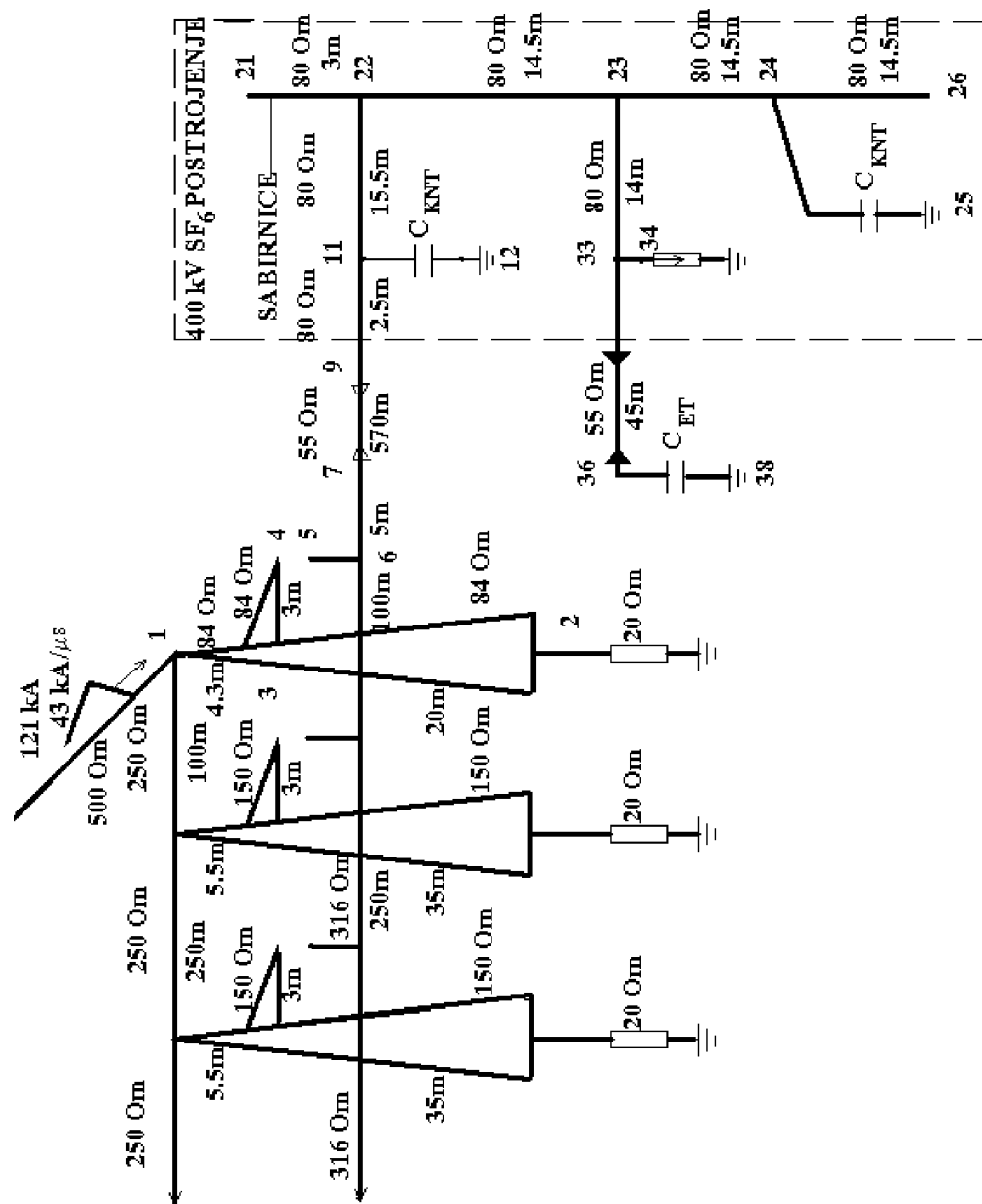
Na slici 5.41 su prikazani vremenski oblici prenapona na izolatorskom lancu, kao i na priključcima energetskog transformatora za slučajeve kompletne i tipske zamenske šeme postrojenja **E**.

Primenom iterativnog postupka svodjenja kapacitivnosti elemenata u susedne čvorove [135],[136] moguće je izvršiti dalje uprošćenje predložene tipske zamenske šeme.

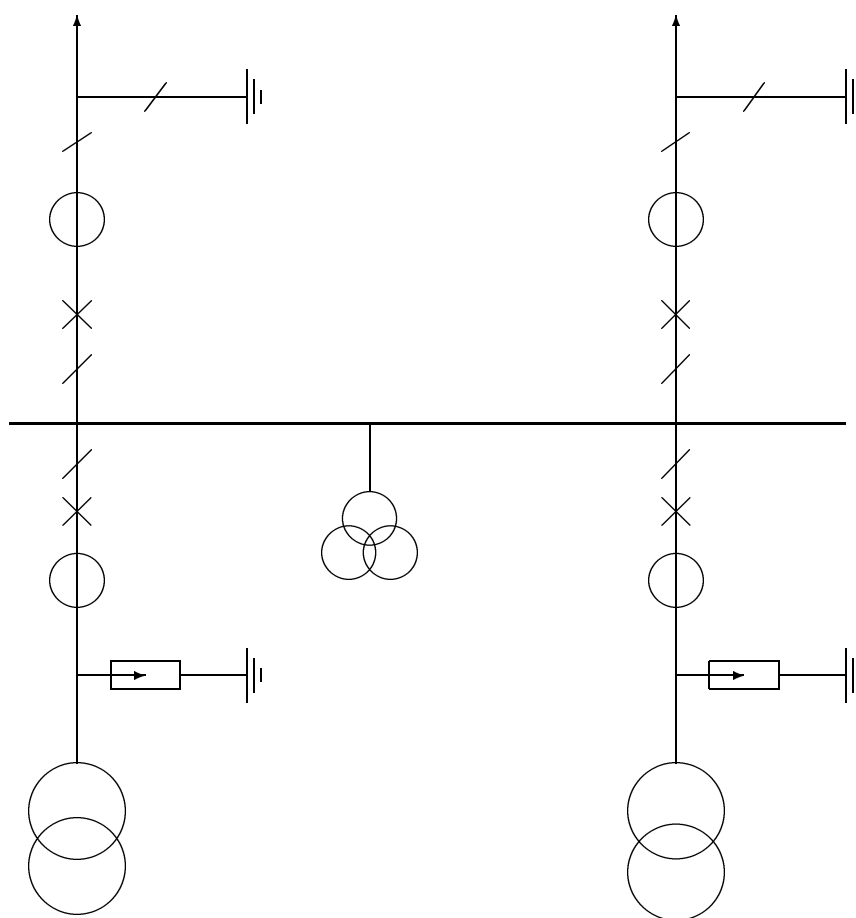
Vrednosti kapacitivnosti redukovane šeme su funkcije kapacitivnosti rasklopne opreme i mernih transformatora, kao i njihovih rastojanja [135],[136]. U slučaju analize razvodnog postrojenja atipične konfiguracije treba očekivati da kapacitivnosti naponskih i energetskog transformatora budu sastavni deo zamenske šeme. U ovom slučaju se preporučuje sprovođenje celokupne procedure analize osetljivosti u cilju određivanja tipske zamenske šeme za proračun atmosferskih prenapona.

5.9.3 Rezultati statističkog postupka proračuna

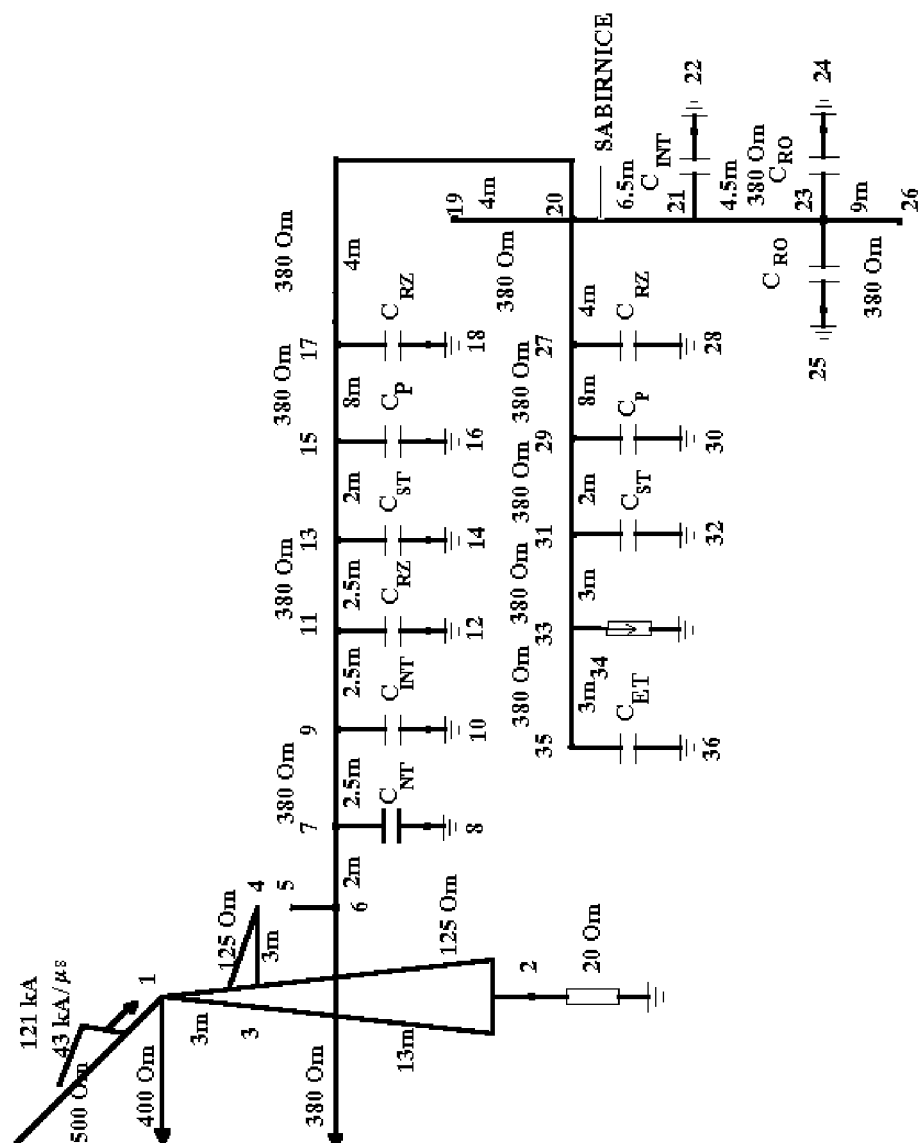
Analiza osetljivosti greške u proračunu usled izbora zamenske šeme je ponovljena i statističkim postupkom proračuna. Rizik kvara izolacije energetskog transformatora je određen primenom metoda krive opasnih parametara [123]. Proračun je uradjen za varijantu *a* (kompletna zamenska šema), varijantu *d* (tipska zamenska šema) i varijantu *f* (zamenska šema sa uvaženom ulaznom kapacitivnošću energetskog transformatora) razvodnog postrojenja **A**. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 5.6.



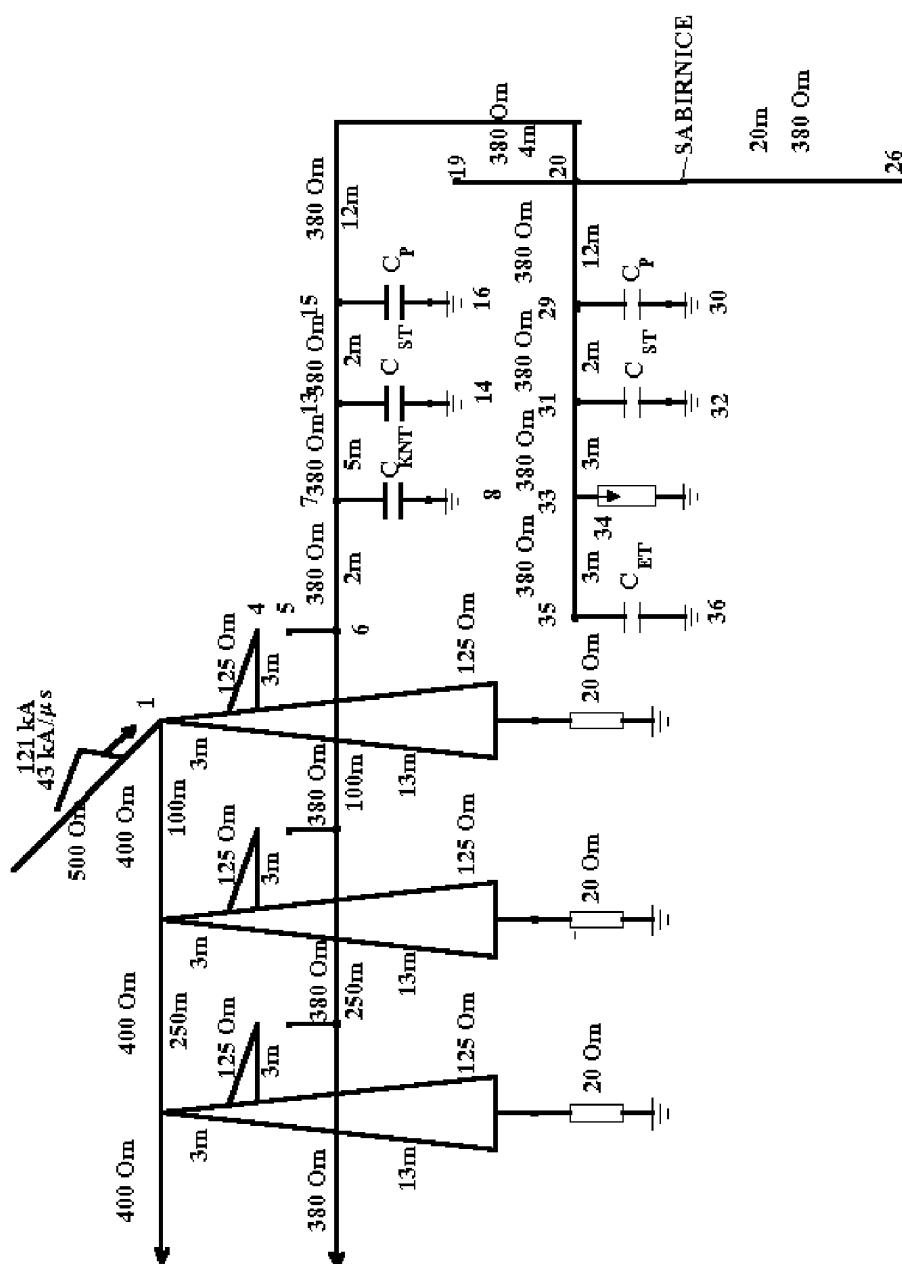
Slika 5.37: Tipska zamenska šema postrojenja **A**



Slika 5.38: Principijelna šema razvodnog postrojenja 110 kV pri hidroelektrani (postrojenje **E**)



Slika 5.39: Kompletna zamenska šema postrojenja E za najkritičnije uklopno stanje



Slika 5.40: Tipska zamenska šema postrojenja E

Varijanta	Rizik	Greška (%)
a	$0,397 \cdot 10^{-3}$	0
d	$0,413 \cdot 10^{-3}$	4,1
f	$0,470 \cdot 10^{-3}$	18,29

Tabela 5.6: Analiza osetljivosti rizika kvara izolacije energetskog transformatora za različite varijante zamenske šeme postrojenja **A**

Na osnovu prikazanih rezultata proračuna, mogu se izvesti slični zaključci kao u slučaju klasičnog postupka proračuna. Tipska zamenska šema dovodi do greške u riziku kvara od 4.1 % u odnosu na kompletnu zamensku šemu, što je u tehnički prihvatljivim granicama.

5.10 Povećanja prenapona u šemama sa više kondenzatora

Poznato je da kondenzatori smanjuju strminu prenapona kod brzih prelaznih pojava u električnim kolima. Pošto je trajanje prenapona kod talasnih procesa usled atmosferskih pražnjenja kratko, kondenzatori po pravilu smanjuju amplitudu prenapona. Međutim, u odredjenim konfiguracijama se može dogoditi da pri višestrukim refleksijama talasa u šemama sa kondenzatorima koji su razdvojeni kratkim vodovima dodje usled superpozicije do povećanja napona.

Ovaj efekat će biti posebno razmatran upravo zbog toga što ekvivalentne šeme postrojenja pri analizi atmosferskih prenapona imaju veći broj kondenzatora koji su razdvojeni kratkim vodovima.

5.10.1 Primer elementarne šeme

Na slici 5.42 prikazana je jednostavna zamenska šema koja se sastoji od voda karakteristične impedanse Z_c povezanog sa kondenzatorom kapacitivnosti C_2 . Naponi se izračunavaju u tački 1 ispred kondenzatora i u tački 2 u kojoj je priključen kondenzator. Prenaponski talas pravougaonog čela i beskonačnog trajanja $U_{up} = U_m h(t)$ nailazi po vodu sa leve strane, gde je U_m amplituda prenaponskog talasa.

Primenom Petersenovog pravila se dobija vremenska promena napona $U_2(t)$ na kon-

denzatoru C_2 u sledećem obliku:

$$u_2(t) = 2U_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) h(t) \quad (5.64)$$

gde je $T_2 = Z_c C_2$ - vremenska konstanta u čvoru 2.

Na slici 5.43 je prikazana zamenska šema sa dva kondenzatora C_1 i C_2 , koji su razdvojeni vodom karakteristične impedanse Z_c .

Da bi se analizirao efekat povećanja napona u kolu sa dva kondenzatora u odnosu na kolo sa samo jednim kondenzatorom, izvršen je analitički proračun napona u čvorovima 1 i 2.

Napon u Laplasovom domenu u trenutku prvog nailaska upadnog talasa u čvor 1, pre nego što se pojave reflektovani talasi od kraja voda, ima oblik:

$$U_{1I}(p) = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \quad (5.65)$$

Oznaka $U_{1I}(p)$ predstavlja Laplasovu transformaciju napona u čvoru 1 u trenutku prvog nailaska talasa u ovaj čvor. Ovaj talas ujedno predstavlja prelomljeni talas koji se prostire prema čvoru 2, u koji stiže sa vremenskim kašnjenjem τ . Laplasova transformacija napona u čvoru 2 u trenutku prvog nailaska talasa u ovaj čvor, računata u odnosu na vremenski trenutak kada talas prvi put naidje u čvor 1, ima oblik:

$$U_{2I}(p) = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} e^{-p\tau} \quad (5.66)$$

Oznaka $U_{2I}(p)$ predstavlja Laplasovu transformaciju napona u čvoru 2 za prvi nailazak talasa u ovaj čvor. Ovakav talasni oblik u Laplasovom domenu će postojati sve do trenutka dok se ne pojavi talas usled višestrukih refleksija iz čvora 1.

Vremenski odziv napona u čvoru 2, računat nakon prvog nailaska talasa u ovaj čvor, ima sledeći oblik [136]:

$$U_{2I}(t) = 2U_m \left[1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t-\tau}{T_2}} \right] h(t - \tau) \quad (5.67)$$

gde su:

$T_1 = \frac{Z_c C_1}{2}$ - vremenska konstanta napona u čvoru 1,

$T_2 = Z_c C_2$ - vremenska konstanta napona u čvoru 2,

Z_c - talasna impedansa voda,

τ - vreme prostiranja talasa izmedju čvorova 1 i 2,

$h(t)$ - Hevisajdova funkcija.

Kod izračunavanja napona U_{2I} početni vremenski trenutak je računat kao trenutak prvog nailaska talasa u čvor 1.

Od čvora 2 se reflektuje talas, koji se kreće ka čvoru 1. Njegova Laplasova transformacija je:

$$U_{od2}(p) = U_{2I}(p) - U_{1I}(p) \quad (5.68)$$

odnosno, kad se zamene izrazi:

$$U_{od2}(p) = \left[\frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} - \frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \right] e^{-p\tau} \quad (5.69)$$

Ako se izračuna Laplasova transformacija napona u čvoru 1 samo usled dejstva odbijenog napona koji je stigao iz čvora 2, dobija se sledeći izraz za napon, računat za vremenski trenutak nailaska odbijenog talasa iz čvora 2 u čvor 1 kao koordinatni početak.

$$U_{1II}(p) = U_{od2}(p) \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \quad (5.70)$$

odnosno:

$$U_{1II}(p) = \left[\frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{(2Z_c C_1 p + 1)^2} \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} - \frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{(2Z_c C_1 p + 1)^2} \right] e^{-2p\tau} \quad (5.71)$$

Oznaka $U_{1II}(p)$ se odnosi na komponentu napona u čvoru 1 samo usled reflektovanog talasa iz čvora 2.

Ukupan napon u čvoru 1 dobija se superpozicijom napona koji se formira kada upadni talas stigne prvi put u čvor 1 $U_{1I}(p)$ i odbijenog talasa od čvora 2 koji stiže sa zakašnjenjem od 2τ .

$$U_1(p) = U_{1I}(p) + U_{1II}(p) \quad (5.72)$$

Od čvora 1 se pojavljuje odbijena komponenta napona koja kreće ponovo ka čvoru 2. Ona ima sledeći oblik u Laplasovom domenu:

$$U_{od1}(p) = U_{1II}(p) - U_{od2}(p)e^{-2p\tau} \quad (5.73)$$

Ovaj napon stiže kao upadni talas u čvor 2 u trenutku 3τ nakon prve pojave napona u čvoru 1. Laplasova transformacija naponskog odziva u čvoru 2 samo usled dejstva dvostruko reflektovanog talasa U_{od1} je:

$$U_{2II}(p) = [U_{1II}(p) - U_{od2}(p)] \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} e^{-3p\tau} \quad (5.74)$$

odnosno:

$$U_{2II}(p) = \left\{ \left[\frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{(2Z_c C_1 p + 1)^2} \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} - \frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{(2Z_c C_1 p + 1)^2} \right] - \left[\frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} - \frac{U_m}{p} \cdot \frac{2Z_c}{2Z_c C_1 p + 1} \right] \right\} \cdot \frac{2Z_c}{Z_c C_2 p + 1} e^{-3p\tau}$$

Vremenski odziv napona u čvoru 2 računat nakon drugog nailaska talasa u ovaj čvor, dobija se inverzijom Laplasove transformacije. Posle izvršene inverzije dobija se sledeći vremenski oblik napona [136]:

$$U_{2II}(t) = U_m \left\{ \frac{2T_1}{T_2 - T_1} \left[2 - \frac{2T_2^2}{(T_2 - T_1)^2} + \frac{2T_1}{T_2 - T_1} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} - \frac{2T_1 T_2}{(T_2 - T_1)^2} \right] \times \right. \\ \left. \left(e^{-\frac{t-3\tau}{T_1}} - e^{-\frac{t-3\tau}{T_2}} \right) + \left[\frac{2}{T_1 - T_2} - \frac{4T_1}{(T_2 - T_1)^2} \right] \cdot (t - 3\tau) e^{-\frac{t-3\tau}{T_1}} - \frac{4T_1}{(T_2 - T_1)^2} (t - 3\tau) e^{-\frac{t-3\tau}{T_2}} \right\} \times \\ h(t - 3\tau)$$

Upotrebljene oznake imaju isto značenje kao u izrazu 5.67.

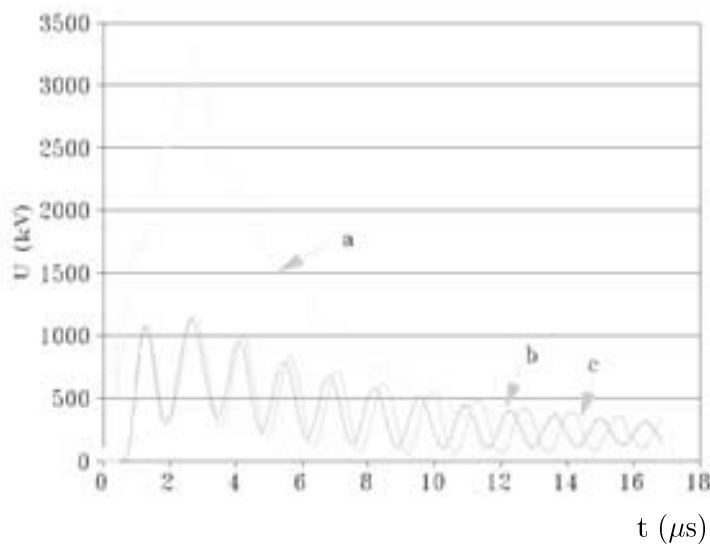
Ukupan napon u čvoru 2 dobija se superpozicijom talasa $U_{2I}(t)$ koji se pojavljuje u trenutku $t = \tau$ kada upadni talas prvi put stiže u čvor 2 i talasa $U_{2II}(t)$ koji se pojavljuje u trenutku $t = 3\tau$ kada dvostruko reflektovani talas stiže u čvor 2.

Ukoliko je vreme prostiranja dovoljno dugo (duže od $3T_1$, odnosno $3T_2$), amplituda ukupnog napona u čvoru 2 dobijenog superponiranjem napona $U_{2I}(t)$ i $U_{2II}(t)$ može prevazići vrednost $2U_m$, koliki bi bio najviši napon u šemi sa slike 5.42.

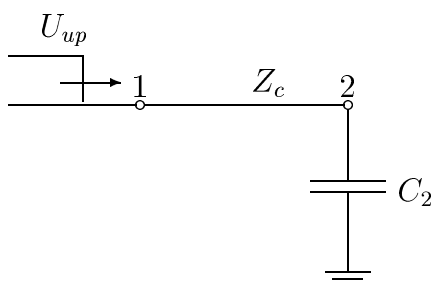
Napon na kondenzatoru C_2 analiziran je za slučaj amplitude pravougaonog talasa $U_m = 1000 \text{ kV}$, kapacitivnosti kondenzatora $C_1 = 3 \text{ nF}$ i $C_2 = 3 \text{ nF}$, karakteristične impedanse vodova $Z_c = 380 \Omega$ i dužine voda koji spaja kondenzatore $d = 1800 \text{ m}$. Brzina prostiranja talasa po vodu jednaka je brzini svetlosti. Izvršeno je upoređenje talasnih oblika napona u čvoru 2 na šemi na slici 5.42 sa samo jednim priključenim kondenzatorom i u šemi sa dva kondenzatora na slici 5.43. Na slici 5.44 napon u čvoru 2 na šemi sa jednim kondenzatorom obeležen je sa U_2 , dok je izračunati napon na kondenzatoru C_2 u šemi sa dva kondenzatora, koji je dobijen superpozicijom dve komponente napona obeležen oznakom $U_{2I} + U_{2II}$.

Može se uočiti da se u šemi sa dva kondenzatora superponira dodatni član usled dva puta reflektovanog napona, koji izaziva oscilaciju napona koja povećava ukupan napon na kondenzatoru C_2 . U šemi sa dva kondenzatora maksimalna vrednost prenapona iznosi 2158 kV , za razliku od šeme sa jednim kondenzatorom u kojoj maksimalni napon ima vrednost od tačno 2000 kV .

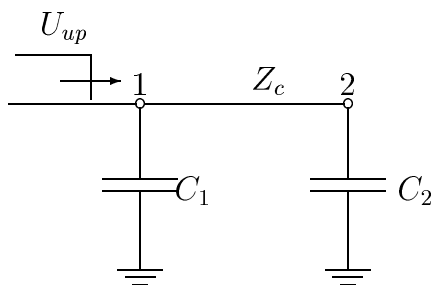
Na osnovu ovog primera se može zaključiti da nisu uvek šeme sa većim brojem kondenzatora povoljnije sa stanovišta atmosferskih prenapona, nego se može pojaviti upravo obrnuti efekat.



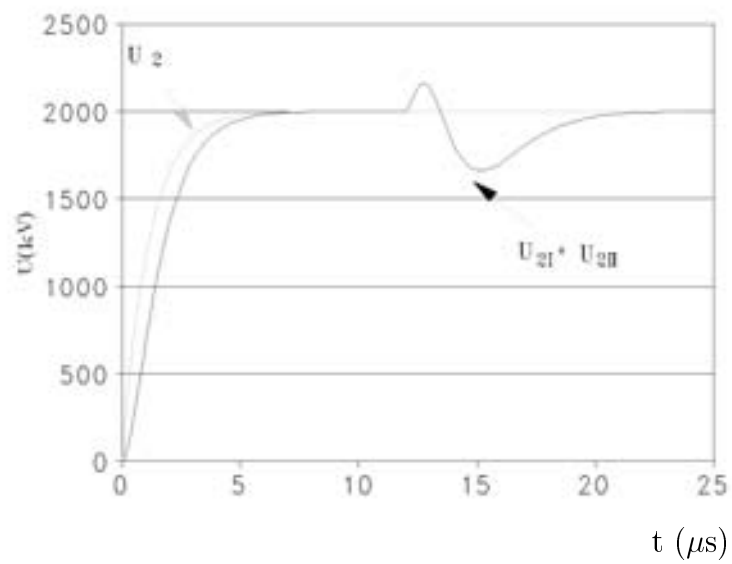
Slika 5.41: Vremenski oblici prenapona na izolatorskom lancu, kao i na priključcima energetskog transformatora za slučajeve kompletne i tipske zamenske šeme postrojenja E. a)-napon u čvoru 4, b) napon u čvoru 35 u punoj šemi, c) napon u čvoru 35 u redukovanoj šemi.



Slika 5.42: Šema sa samo jednim kondenzatorom u kolu



Slika 5.43: Šema sa dva kondenzatora u kolu



Slika 5.44: Oblik naponskog odziva u šemi sa jednim kondenzatorom i sa dva kondenzatora

