

Proračun elektromagnetnih prelaznih procesa u elektroenergetskim mrežama

Verzija 2.2

Milan Savić

Beograd
4. Mart 2026

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Katedra za Elektroenergetske sisteme

Autor: Dr. Milan Savić

Redovni 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 2026

Sadržaj

I	Teorijski opis metoda i modela	4
1	Proračuni prelaznih procesa	5
2	Mreže sa koncentrisanim parametrima	8
2.1	Definicije elemenata sa koncentrisanim parametrima	8
2.2	Omov zakon u matričnom obliku	15
2.3	Definicije grafova električne mreže	16
2.4	Incidentne matrice	16
2.5	Osnovne incidentne matrice	17
2.6	Jednačine stanja	28
2.7	Rešavanje jednačina stanja	36
3	Mreže sa raspoređenim parametrima	39
3.1	Jednačine telegrafičara	39
3.2	Putujući talasi	51
3.3	Zamena koncentrisanog elementa vodom	66
3.4	Modifikovani koeficijenti prelamanja	70

3.5	Petersenovo pravilo	74
3.6	Metode proračuna talasnih procesa na vodovima	81
3.7	Numeričke metode	102
3.8	Frekvencijski zavistan povratni put kroz zemlju	116
4	Trofazna transformacija	124
4.1	Objašnjenje trofazne transformacije	124
4.2	Najčešće korišćene transformacije	127
4.3	Modalna transformacija	131
5	Mešovite mreže	146
5.1	Kombinovana metoda rešavanja mešovitih mreža	146
5.2	Metoda kompenzacije	147
5.3	Određivanje ustaljenog stanja	151
6	Parametri atmosferskih pražnjenja	174
6.1	Tipovi atmosferskih pražnjenja	174
6.2	Osnovni parametri atmosferskih pražnjenja	175
7	Modelovanje elemenata	191
7.1	Modelovanje atmosferskog pražnjenja	191
7.2	Modelovanje provodnika	205
7.3	Modelovanje dalekovodnog stuba	208
7.4	Model uzemljivača	217
7.5	Model preskoka na vazdušnoj izolaciji	232

7.6	Model odvodnika prenapona	249
7.7	Model prekidača	270
7.8	Računanje verovatnoće nastanka prenapona	294
8	Rizik kvara usled atmosferskih prenapona	303
8.1	Metoda opasnih parametara	303
8.2	Proračun verovatnoće pojave kritičnih parametara	314
8.3	Elektrogeometrijski model kod atmosferskog udara	318
8.4	Kriterijum preskoka na izolaciji voda	322
8.5	Monte - Karlo simulacija	360
9	Indukovani prenaponi	365
9.1	Nastanak indukovanih prenapona	365
9.2	Elektrostatička teorija indukovanih prenapona	366
9.3	Elektromagnetna teorija indukovanih prenapona	367
9.4	Numeričko računanje indukovanih napona na vodu	373
9.5	Statistički proračun indukovanih prenapona	378
10	Šeme za proračun atmosferskih prenapona	382
10.1	Proračun ugroženosti transformatorske stanice	382
11	Analiza ugroženosti trofaznih vodova	387
11.1	Modelovanje trofaznog voda	387
11.2	Metoda opasnih parametra trofaznog voda	389

12	Energija oslobođena u odvodniku prenapona	396
12.1	Energetska naprezanja pri radu odvodnika prenapona	396
12.2	Procena energije oslobođene u odvodniku	397
12.3	Verovatnoće premašenja energetske moći odvodnika	399
II	Primeri proračuna prelaznih procesa	5
1	Zaštitno uže na vodovima srednjeg napona	6
1.1	Analiza voda nazivnog napona 35 kV	7
1.2	Uticaj nazivnog napona voda na broj preskoka	10
2	Udar u gromobransku instalaciju objekta	12
2.1	Opis objekta i problema koji se pojavljivao	12
2.2	Deterministički proračun pre optimizacije zaštite	16
2.3	Rešenje problema ugroženosti transformatora.	17
2.4	Rizik kvara izolacije usled udara groma	23
2.5	Određivanje atraktivne površine objekta	24
2.6	Godišnja gustina pražnjenja i broj udara u objekat	27
2.7	Minimalna struja pražnjenja koja izaziva kvar	29
2.8	Određivanje rizika proboja transformatora	29
3	Zaštita stubnih transformatorskih stanica	32
3.1	Prenaponska zaštita odvodnicima prenapona	32
3.2	Uticaj mesta ugradnje odvodnika na stubnoj TS	34

3.3	Proračun prenapona na transformatorima na stubu	35
4	Zaštita transformatora pri HE	44
4.1	Opis sistema	44
4.2	Deterministički proračun	48
4.3	Statistički proračun	49
5	Prenaponi pri intermitentnom zemljospoju	52
5.1	Uvodna razmatranja	52
5.2	Opis eksperimenata	52
5.3	Numeričke simulacije prenapona pri zemljospoju sa lukom	60
5.4	Maksimalni prenapon pri uspostavljanju prenapona	62
5.5	Zaključci	63
6	Prenaponska zaštita objekata niskog napona	65
6.1	Osnovni podaci o analiziranom objektu	65
6.2	Proračun prenapona	66
6.3	Ispitivanje osetljivosti rezultata na parametre šeme	67
6.4	Statistički proračun	73
6.5	Određivanje rizika preskoka u KPK	74
6.6	Primena zaštitnih mera	75
6.7	Zaključak	83
7	Kvarovi usled upotrebe Is Limitera	86
7.1	Razlog uvođenja Is Limitera	86

7.2	Opis sistema	90
7.3	Merno-akvizicioni sistem	91
7.4	Modelovanje Is limitera	94
7.5	Zaštita od prenapona	96
7.6	Zaključak	98
8	Požar usled indukovanih prenapona	99
8.1	Kratak opis događaja i opis sistema	99
8.2	Hipoteza o nastanku požara	100
8.3	Primena zaštitnih mera	103
9	Uticao jonizacije tla	107
9.1	Uvodne napomene i numerički proračun	107
9.2	Primenjeni modeli	108
9.3	Rezultati proračuna	112
10	Analiza proboja u postrojenju elektrofiltra	120
10.1	Princip rada elektrofiltra	120
10.2	Opis sistema	121
10.3	Rezultati merenja	123
10.4	Računska simulacija prelaznih procesa u elektrofiltru	124
10.5	Mogućnost prigušenja prelaznih procesa u elektrofiltru	127
10.6	Zaključak	130
11	Zaštita instalacija u tunelima	131

11.1 Cilj analize	131
11.2 Gromobranska zaštita pogonske stanice	132
11.3 Prenaponska zaštita niskog napona transformatora	147
11.4 Proračun prenapona u NN mreži	151
11.5 Zaključak	160
12 Analiza rizika preskoka na 110 kV vodovima sa linijskim odvodnicima prenapona	162
12.1 Uvodna razmatraja	162
12.2 Upoređenje broja ispada sa i bez linijskih odvodnika	164
13 Razvoj udarnog generatora od 1000 kV	167
13.1 Hala i konstrukcija udarnog generatora	167
13.2 Primer šeme udarnog generatora sa 4 stepena	169
13.3 Konstrukcija udarnog generatora do 1000 kV	171
13.4 Izbor elemenata udarnog generatora	175
13.5 Termički proračun otpornika za struju punjenja	177
13.6 Izbor otpornika za pražnjenje kondenzatora	180
13.7 Dodatne bezbednosne mere	184
14 Razvoj delila za udarne napone	188
14.1 Visokonaponska delila za udarne napone	188
14.2 Visokonaponski generator pravougaonih talasa	193
14.3 Rezultati testiranja step generatora	196
14.4 Detaljno modelovanje delila napona	199

14.5	Numeričko određivanje odziva delila	202
14.6	Mešovito delilo napona paralelnog tipa	203
14.7	Uvođenje sekundarnog delila napona	210
14.8	Numeričko ispitivanje uticaja koaksijalnog kabla	213
14.9	Uticaj dužine koaksijalnog kabla do osciloskopa	215
14.10	Zaključak	219

Predgovor

Prvi deo rukopisa nastao je na osnovu predavanja koje sam držao 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, 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.

U drugom delu prikazano je rešavanje problema iz prakse kroz studije, ekspertize i razvoj uređaja. U navedenim primerima, pored sopstvenih programa razvijenih na Fakultetu, korišćeni su programi "AtpDraw" kao grafički predprocesor programa EMTP-atp (Elektromagnetic Transient Program -Alternative Transient Program) [26], kao i drugi komercijalni programi opisani u [29] i [114]. Pored računarskih simulacija, u primerima su prikazana i eksperimentalna istraživanja, urađena 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.

Prošireni su primeri koje se odnosi na sopstveni razvoj udarnog naponskog generatora i delila napona za udarne napone do 1 MV, za industrijsku laboratoriju za visoki napon, koja je trenutno u fazi razvoja, kao i postojeći udarni generator do 300 kV u Laboratoriji za visoki napon ETF, Beograd. Doprinos razvoju Laboratorije za visoki napon na ETF, kao i industrijske Laboratorije ELBI Valjevo, dao je vlasni i direktor firme ELBI Živorad Cvetković, dipl. ing, bez čije pomoći izrada udarnih generatora ne bi bila moguća.

Doprinos u ovoj oblasti dao je veći broj diplomaca, studenata magistarskih studija, kasnije master studija i doktoranata. Posebno zahvaljujem Milanu Jankoviću, dipl.ing. za realizaciju udarnog strujnog generatora za ETF kroz svoje postdiploske aktivnosti.

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, vanredni prof. 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. u penziji 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 i Mladenu Banjaninu, 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 2026

Deo II

Primeri proračuna prelaznih procesa

Primer 1

Zaštitno uže na vodovima srednjeg napona

Zaštitna užad mogu da utiču na sledeće karakteristike sredjenaponskih nadzemnih vodova:

- broj preskoka na nadzemnim vodovima usled atmosferskih pražnjenja,
- amplituda struja jednopolnih kvarova u sistemima sa uzemljenom neutralnom tačkom,
- visina napona dodira i koraka u postrojenjima ili u blizini postrojenja u sistemima sa uzemljenom neutralnom tačkom,
- veći investicioni troškovi pri izgradnji vodova za zaštitnim užetom,
- potrebno je dodatno mehaničko ojačanje stubova zbog većeg naprezanja pri snegu i vetru.

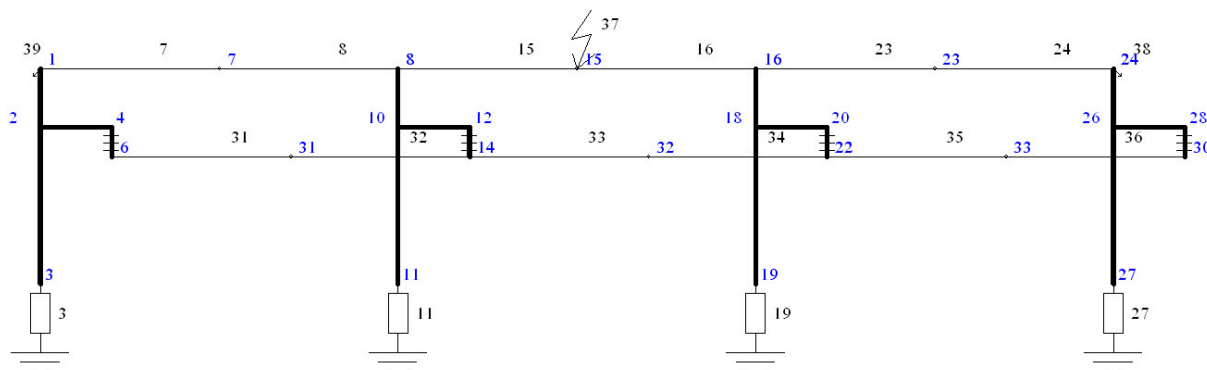
Na ovom mestu će se analizirati samo uticaj zaštitnog užeta na broj preskoka usled atmosferskih pražnjenja za sredjenaponske mreže različitog nazivnog napona.

Po pravilu se na vodovima nazivnog napona 110 kV ili više uvek koriste zaštitna užad jer značajno smanjuju broj preskoka usled atmosferskih pražnjenja. Razlog je što je preskočni udarni napon izolacije vodova dovoljno veliki da pri udaru u zaštitno uže uticaj odvođenja struje kroz stub i zemlju smanjuje napon na stubu da se spreči povratni preskok. Izuzetak mogu da budu vodovi 110 kV sa jako velikim otporom uzemljenja stubova.

Vodovi srednjih napona 10 kV i 20 kV imaju nizak preskočni napon izolatora. Ukoliko bi vodovi imali zaštitno uže, svaki udar u uže bi prouzročivao povratni preskok zbog porasta napona na uzemljivaču stuba i induktivnom padu napona duž stuba. Iz tog razloga se ne stavlja zaštitno uže na vodove 10 i 20 kV. Vodovi 35 kV su na granici, pa će iz tog razloga ovi vodovi biti analizirani.

1.1 Analiza voda nazivnog napona 35 kV

Na slici 1.1 prikazana je ekvivalentna šema 35 kV nadzemnog voda sa užetom, koji modelovan sa 3 raspona. Srednji raspon je pogođen atmosferskim udarom, čija je pozicija varirana duž raspona u 5 tačaka. Druga dva raspona su služila za verniju simulaciju uticaja ostatka mreže na refleksije talasa. Preskok je modelovan volt sekundnom karakteristikom izolacije (V-t metoda), koja je ranije opisana. Korišćen je programski paket GROM, mada se može koristiti bilo koji program za proračun tranzijentnih prenapona pri atmosferskim udarima.



Slika 1.1: Ekvivalentna šema sistema za modelovanje povratnog preskoka

U analizama je izvršen proračun godišnjeg broja preskoka usled udara groma u raspon, sveden na 100 km, kada je vod sa zaštitnim užetom ili bez užeta.

Pri proračunu su korišćeni podaci o srednjim dužinama raspona i srednjim visinama stubova za ceo vod. Otpornost uzemljenja stubova je varirana u širokom opsegu da bi se došlo do kriterijuma kada su zaštitna užad neophodna, a kada nisu.

Analiza je izvršena na osnovu srednjih vrednosti geometrijskih podataka za analiziran dalekovod nazivnog napona 35 kV, koji su dati u tabeli 1.1. U jednopolnoj ekvivalentnoj šemi korišćena je samo gornja faza trofaznog voda, koja je najugroženija.

Sledeći podaci ne utiču bitno na rezultate proračuna godišnjeg broja preskoka usled atmosferskih udara, pa se mogu usvajati bez obzira na naponski nivo:

Tabela 1.1: Tipični geometrijski podaci za nadzemni vod 35 kV

Visina stuba do vrha (m)	Visina gornje faze (m)	Dužina raspona (m)	Presek užeta (mm ²)	Presek faze (mm ²)
22	16	100	35	95

1. poluprečnik ili površina poprečnog preseka zaštitnog užeta,
2. poluprečnik faznog provodnika,
3. dužina raspona kod analize broja preskoka na vodovima bez primene linijskih odvodnika prenapona.

Parametri koji bitno utiču na broj preskoka usled atmosferskih udara su sledeći:

1. podnosivi udarni napon izolacije (zavisi od nazivnog napona voda),
2. otpornost uzemljenja stuba,
3. visina stuba.

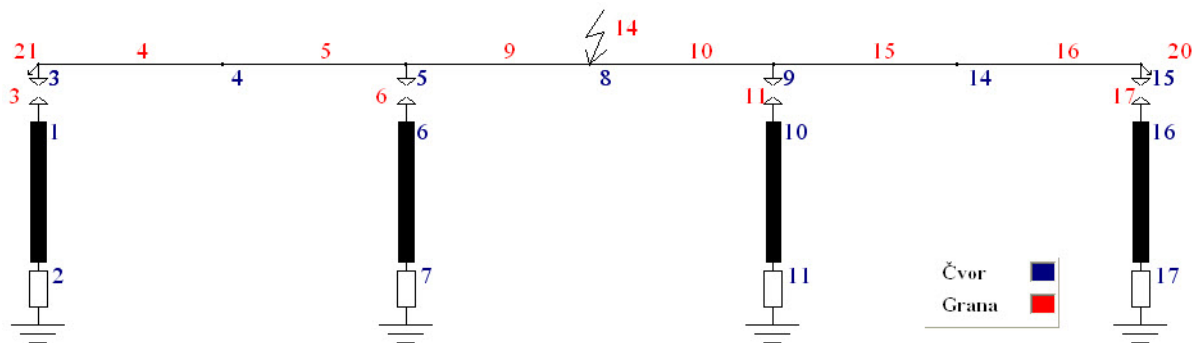
U narednim primerima se neće se navoditi parametri sistema koji ne utiču bitno na broj kvarova usled atmosferskih udara.

Preskočna karakteristika izolatorskog lanca sa zaštitnim rogovima ima važan uticaj na rezultate. Izabrana je V-t metoda, objašnjena u poglavlju 7.5.1 data je izrazom 7.78 na strani 235 (I deo). Odabrane su sledeće empirijske konstante za modelovanje preskočne karakteristike metodom V-t karakteristike:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 400 \times d \text{ (kV}\mu\text{s)} \\
 K_2 &= 710 \text{ (kV/m)} \\
 A_n &= 0.75 \\
 d &= 0.348 \text{ (m)}
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

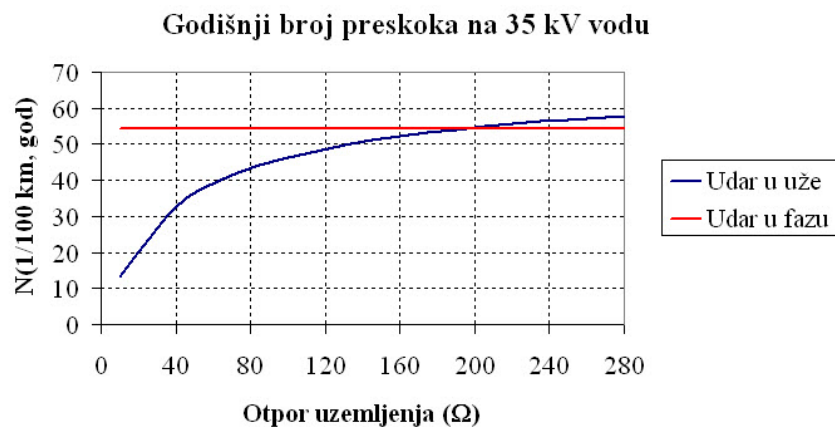
Proračun je ponovljen za 35 kV vod bez zaštitnog užeta. Analizirana faza se nalazi na vrhu stuba. Visina faze je identična za vod sa užetom i vod bez užeta. Izolator je na vodu bez užeta označen kao iskrište, za razliku od voda sa zaštitnim užetom kod koga je iskrište sastavni deo stuba i nije istaknuto u šemi. Zamenska šema u programu Grom data je na slici 1.2

Na slici 1.3 prikazan je godišnji broj povratnih preskoka na 100 km za 35 kV vod sa zaštitnim užetom, kada se varira otpor uzemljenja od 10 Ω do 280 Ω , što odgovara opsegu



Slika 1.2: Ekranski prikaz zamenske šeme nadzemnog voda bez zaštitnog užeta u analizi broja preskoka

specifičnog otpornosti tla od $100 \Omega\text{m}$ do $2500 \Omega\text{m}$ za prstenasti uzemljivač poluprečnika 3.3 m, prema izrazu 7.64, na strani 220. Nacrtan je na istoj slici i slučaj pražnjenja u fazni provodnik, kod konstrukcije voda bez zaštitnog užeta, a svi ostali geometrijski odnosi su ostali isti. U tom slučaju broj preskoka uopšte ne zavisi od otpora uzemljenja, jer udar u fazni provodnik dovodi do porasta napona na izolaciji stuba nezavisno od otpornosti stubova.



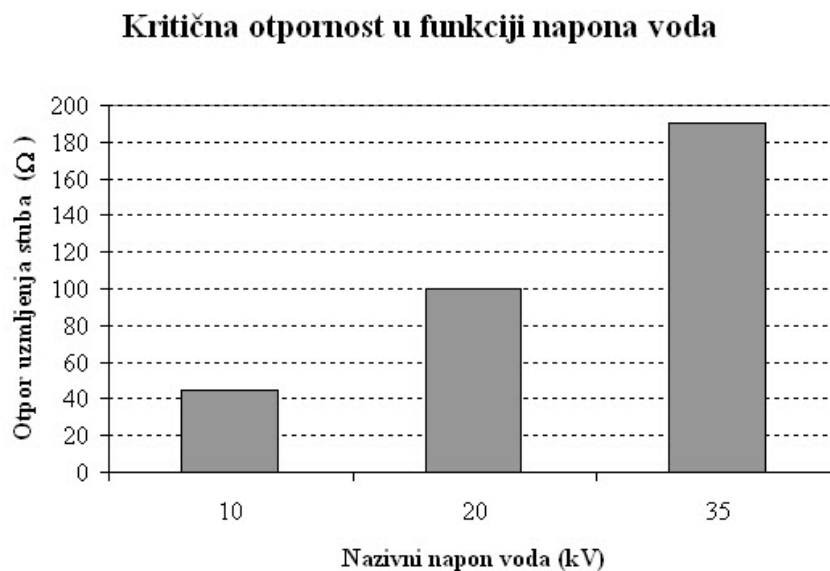
Slika 1.3: Godišnji broj preskoka na 100 km za 35 kV vod pri udaru zaštitno uže ili u fazu za različite otpore uzemljenja

Sa slike 1.3 se vidi da pri otpornosti uzemljenja stubova od 190Ω broj preskoka pri udaru u zaštitno uže ili pražnjenja u fazni provodnik bez zaštitnog užeta je praktično identičan. Pri manjim otpornostima uzemljenja zaštitno uže ima zaštitnu ulogu jer se smanjuje broj ispada vodova usled povratnog preskoka. Pri većim otpornostima uzemljenja broj preskoka usled udara u zaštitno uže je veći zbog veće atraktivne zone voda, pošto je zaštitno uže na većoj visini od faznog provodnika.

1.2 Uticaj nazivnog napona voda na broj preskoka

Analiza je izvršena za vodove nazivnog napona 10 kV, 20 kV i 35 kV identične geometrije da bi se ustanovilo pri kojim vrednostima otpora uzemljenja stubova postaje broj preskoka sa zaštitnim užetom veći od broja preskoka identičnog voda bez zaštitnog užeta. Mora se naglasiti da se visine i ostali parametri stubova i dužine raspona razlikuju za različite naponske nivoe, a taj faktor u ovoj analizi nije uzet u obzir.

Na slici 1.4 prikazana je kritična otpornost uzemljenja stuba pri kojoj je broj preskoka na vodu sa zaštitnim užetom veći od slučaja bez užeta.



Slika 1.4: Kritična otpornost pri kojoj je broj preskoka sa zaštitnim užetom veća od slučaja bez užeta

Vidi se da je za više vrednosti nazivnog napona voda pogodno dejstvo zaštitnog užeta izražen i za velike vrednosti otpora uzemljenja.

Pored otpornosti uzemljenja stubova, na odluku da li nam treba zaštitno uže za određeni naponski nivo zavisi i od sledećih faktora:

- važnosti pouzdanog napajanja po razmatranom vodu,
- grmljavinske aktivnosti na području voda,
- ekonomski aspekti povećanih investicionih troškova za postavljanje zaštitnog užeta i pojačanje mehaničke konstrukcije stubova,
- uticaj na intenzitet i raspodelu struja kratkih spojeva,

- uticaj na napone dodira i koraka u blizini postrojenja ili dalekovodnih stubova kada su postavljena zaštitna užad.

Zahvalnica

Primer je nastao na osnovu studije pod nazivom "Sagledavanje mogućnosti zamene faznih provodnika 70 mm² provodnicima 95 mm² u cilju povećanja propusne moći dalekovoda Suva separacija sa stanovišta koordinacije izolacije u RB Kolubara". Studija je rađena 2011 god. Analiza je na ovom primeru dopunjena uticajem nazivnog napona sistema na broj preskoka na vodovima srednjeg napona.

Primer 2

Udar u gromobransku instalaciju objekta

2.1 Opis objekta i problema koji se pojavljivao

U industrijskom objektu se dogodio veći broj kvarova suvih transformatora 10/0.4 kV za vreme grmljavinskih oluja. Izvršena je analiza sa ciljem da se utvrdi uzrok kvarova i odgovarajućim merama spreči ponavljanje. Utvrđeno je da atmosferski prenaponi usled udara u nadzemni deo mešovitog voda 10 kV, koji se kablovskim prilazom vodi do objekta nisu uzrok havarija. Stoga je analiziran samo slučaj kada atmosferski prenaponi nastaju direktnim pražnjenjem u gromobransku instalaciju zgrade industrijskog objekta. Na slici 2.1 prikazan je objekat sa bočne strane (levo) i odozgo (desno) sa dimenzijama u (m) i označenim gromobranskim prihvatnim sistemom u obliku mreže i spušnim provodnicima do uzemljivača u obliku prstena oko objekta, koji je nacrtan isprekidanom linijom. Provodnici gromobranske instalacije nacrtani su crvenom bojom.

D - kućica za lift zajedno sa dimnjakom, koji su 4 m iznad krova prvog sprata,

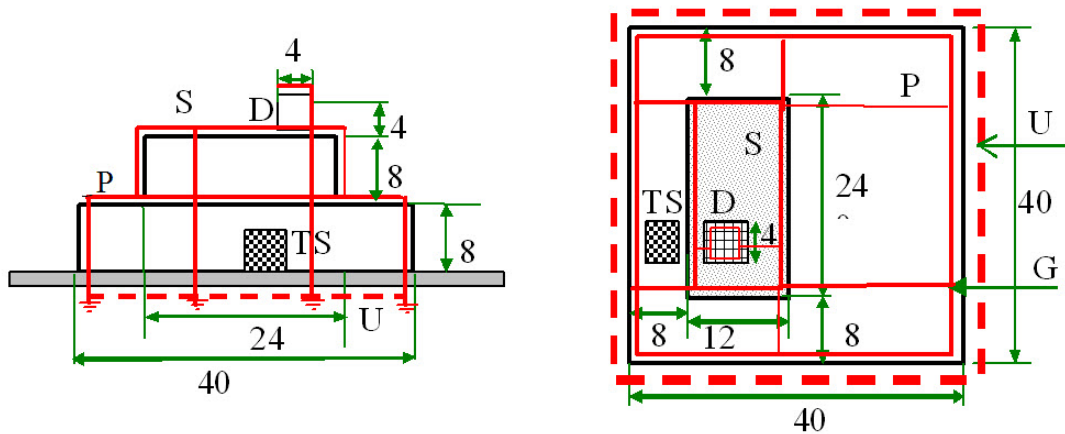
G - gromobranski prihvatni sistem,

U - uzemljivačka traka oko celog objekta,

TS -transformatorska stanica koja se nalazi u suterenu objekta, koja je više puta bila ugrožena od atmosferskih prenapona,

P - ravna površina krova prizemlja,

S - ravna površina prvog sprata.



Slika 2.1: Prikaz objekta sa strane (levo) i iz ptičje perspektive (desno)

Sa svake strane duž objekta predviđen je na svakih 20 m po jedan spust koji je uzemljen vezivanjem na pravougaonu uzemljivačku traku oko objekta, označenu na slovom *U* i isprekidanim kvadratom na desnoj strani slike.

Na osnovu slike 2.1 nacrtana je šema kompletne gromobranke instalacije koja obuhvata prihvatni sistem i spusne provodnike. Uzemljivački sistem nije modelovan trakom oko objekta, već koncentrisanim otpornicima koji ekvivalentiraju udarnu impedansu uzemljivača. Svaki spust se završava ekvivalentnim otpornikom koji ekvivalentira deo prstenastog uzemljivača. Vrednost otpora na kraju svakog spusta $R_{uz} = R_{obj} \times N$, gde je R_{obj} otpornost kompletnog prstenastog uzemljivača, a N broj ekvivalentnih otpornika na kraju svakog od spusteva. Izgled spoljašnje gromobranske instalacije skiciran je na slici 2.2. Usvojene su karakteristične impedanse traka prihvatnih i spusnih provodnika je 255Ω .

Napojni transformator postavljen je u donjem delu objekta. Na slici 2.3 prikazana je ćelija u kojoj je smešten suvi transformator 10/0.4 kV.

Oznake na slici 2.3 imaju sledeće značenje:

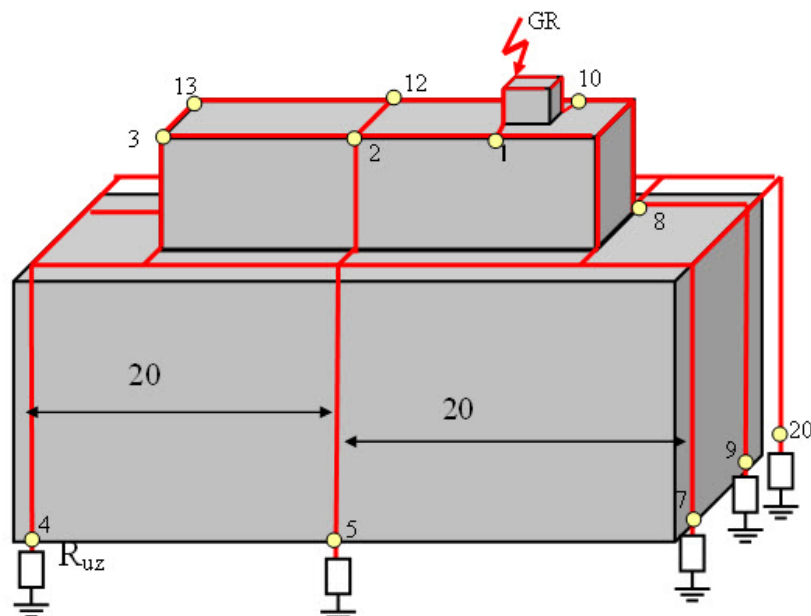
TR -transformator,

Sab -sabitnice,

OP -odvodnik prenapona,

Z -traka za uzemljenje.

Dužina veze između uzemljenog kraja odvodnika prenapona i uzemljenja transformatora je 15 m, jer se vodi preko tavanice i bočnog zida do trake na podu. Dužina veze između



Slika 2.2: Skica spoljašnje gromobranske instalacije

krajeva odvodnika prenapona i priključaka transformatora je oko 3 m. Odvodnici prenapona su pričvršćeni za tavanicu ćelije i vezani za sabirničke šine. Na slici 2.4 prikazana je zamenska šema sistema za koji je izvršen proračun prenapona. Posmatran je jedan spust koji direktno vodi od dimnjaka do uzemljivača u tački koja je najbliža tački uzemljenja transformatora. Predpostavljen je udar groma u prihvatni sistem gromobranske instalacije na vrhu dimnjaka. Na slici levo prikazana je teorijska zamenska šema gromobranske instalacije, a na slici desno primenjeni deo šeme za proračun.

Oznake na slici 2.4 imaju sledeće značenje:

V_S - spusni provodnici dužine $d_S = 16$ m,

V_H - horizontalni provodnici prihvatnog sistema dužine $d_S = 20$ m,

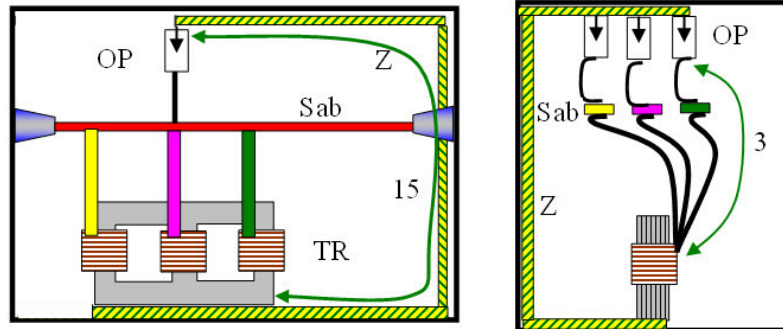
d_z - dužina veze od priključka odvodnika do transformatora $d_z = 3$ m,

d_T - dužina veze između odvodnika prenapona koji štiti transformator do uzemljivača na koji je povezano kućište transformatora. Ova dužina je procenjena na $d_3 = 15$ m,

C_T - Kondenzator koji zamenjuje kapacitivnost namotaja transformatora od 3 nF,

R_{uz} - udarna impedansa uzemljenja koja je procenjena na $R_{uz} = 30 \Omega$ po svakom spustu,

OP - odvodnik prenapona,



Slika 2.3: Čelija sa suvim energetskim transformatorom sa označenim odvodnicima prenapona, sabirnicama i trakom za uzemljenje

Z_{K10} - otpornik čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi 10 kV kabla kojim se transformator napaja. Predpostavljeno je da je kabl dovoljno dugačak da se ne pojavljuju procesi višestrukih refleksija za vreme trajanja prenapona. Karakteristična impedansa kabla je usvojena da iznosi $Z_K = 20 \Omega$.

Udar na impedansa uzemljenja određena je na sledeći način:

Za specifičnu otpornost tla od $\rho = 254 \Omega\text{m}$ ukupna otpornost rasprostiranja uzemljivača u obliku kvadratne trake oko objekta dimenzija 40×40 m izračunata je na osnovu izraza 7.64, na strani 220 (I deo), za otpornost uzemljenja prstenastog uzemljivača.

$$R_{uk} = \frac{2 \cdot \rho}{3D_{ekv}} = \frac{2 \times 254}{3 \times 22.6} = 3.75 \Omega \quad (2.1)$$

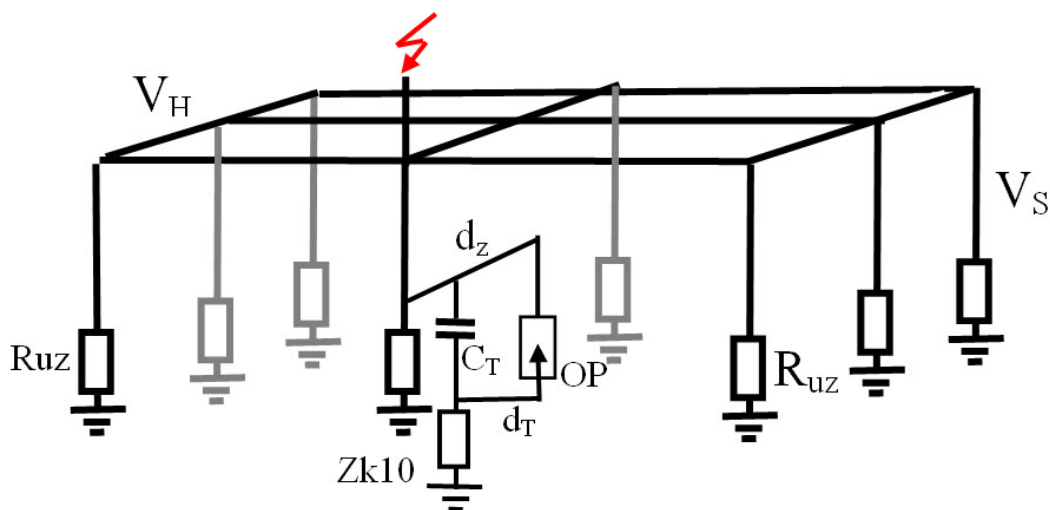
U predhodnom izrazu je ekvivalentni prečnik kruga izračunat na osnovu izraza 7.63 na strani 220, odnosno:

$$D_{ekv} = 1.13 \cdot \sqrt{A} = 1.13 \times 40 = 45.2 \text{ m} \quad (2.2)$$

Ukupna dužina uzemljivačkog prstena je $d_{uk} = 4 \times 40 = 160$ m. Otpornost rasprostiranja po 1 m dužine uzemljivača je:

$$R_1 = R_{uk} \times d_{uk} = 600 \Omega \quad (2.3)$$

Ako se ukupna otpornost uzemljivača R_{uk} raspodeli na 8 koncentrisanih otpornika na krajevima svakog od spusteva, u tom se slučaju može se uvesti dužina uzemljivačke trake koja odgovara jednom spustu, za koju se izračunava otpornost ekvivalentnog otpornika. Svakom spustu odgovara dužina uzemljivačke trake od $d_{uk}/8 = 20$ m, odnosno od svakog spusta se na obe strane 10 m trake modeluju jednim otpornikom. Otpornost svakog pojedinačnog otpornika $R_{uz} = R_{uk}/20 = 30 \Omega$.



Slika 2.4: Šema gromobranske instalacije sa ucrtanim svim prihvatnim i spusnim provodnicima, otporima uzemljenja, priključkom transformatora i odvodnikom prenapona

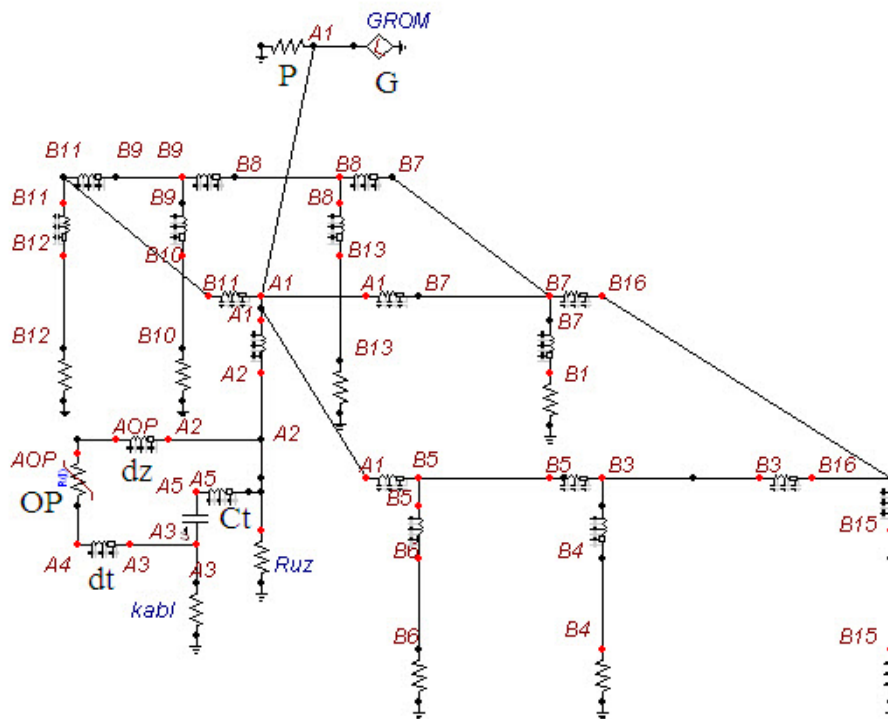
2.2 Deterministički proračun pre optimizacije zaštite

Izvršena je simulacija prelaznog procesa usled atmosferskog pražnjenja primenom programa EMTP-ATP. Na slici 2.5 prikazan je ekranski izgled kompletne šeme za proračun sa 8 gromobranskih spusteva.

Predpostavljen je udar groma amplitude 121 kA prema šemi na slici 2.5 označen slovom G . Karakteristična impedansa kanala pražnjenja, koja je obeležena sa P , iznosi 400Ω . Vreme čela talasa struje je usvojeno da bude $T_f = 1.2 \mu s$. Na slici 2.6 prikazan je talasni oblik napona na transformatoru koji se nalazi u suterenu ispod dimnjaka na kome je tačka pražnjena. Usvojena je amplituda struje atmosferskog pražnjenja od 121 kA odgovara amplitudi struje prvih negativnih udara koja može biti prevaziđena verovatnoćom od 2 %, prema [43].

Maksimalni izračunati prenapon na transformatoru usled udara u gromobransku hvatalku na vrhu dimnjaka iznosi $U_{max} = 347.5 \text{ kV}$, što je više od podnosivog napona izolacije transformatora, koji iznosi 75 kV.

Verovatnoća pojavljivanja struje od 121 kA koja izaziva ovoliki prenapon je 2 %. Iz tog razloga se mora izvršiti statistička analiza da bi se utvrdila verovatnoća pojavljivanja struje koja će izazvati prenapone koji premašuju 75 kV.

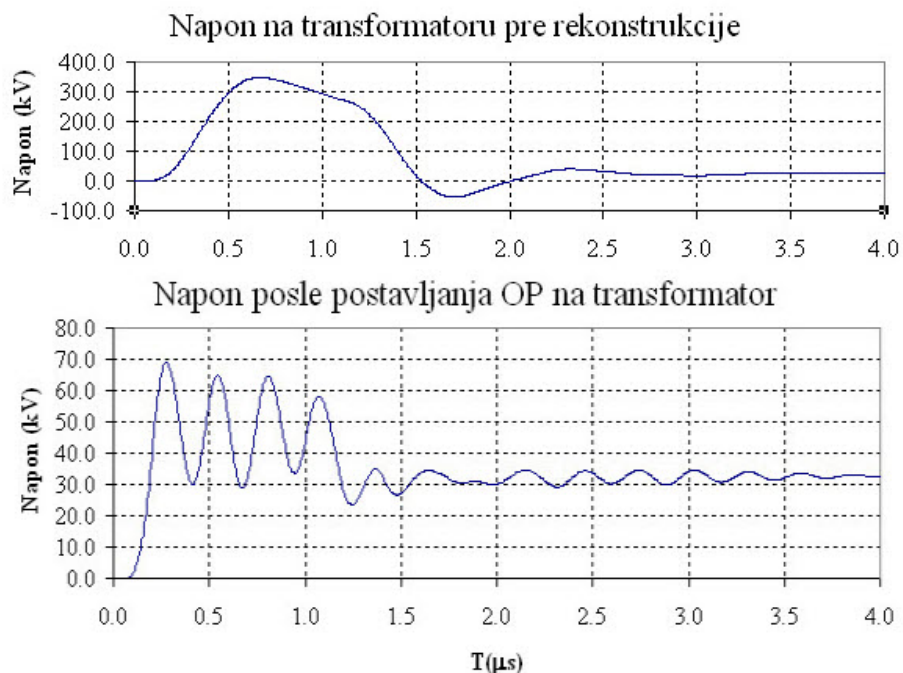


Slika 2.5: Ekranski prikaz šeme po kojoj je vršen proračun

2.3 Rešenje problema ugroženosti transformatora.

2.3.1 Problem u radu starih tipova odvodnika prenapona u porculanskm kućištu

Silicijum karbidni odvodnici i prve konstrukcije ZnO odvodnika prenapona rađene su u porculanskim kućištima, sa vazдушnim zazorom između aktivnog dela (redne veze nelinearnih otpornika) i kućišta. Kod konstrukcija odvodnika u porculanskom kućištu pojavljuje se problem zaptivanja na mestu gde se spaja metalna prirubnica na vrhu i dnu odvodnika sa porculanom. Spajanje se obavlja pomoću specijalnog cementa. Ukoliko zaptivanje oslabi, dolazi u toku dana kada se odvodnik greje zbog sunčanog zračenja, do ispuštanja vazduha. U toku noći se odvodnik hladi, pritisak u procepu između porculana i aktivnog dela se smanjuje ispod spoljašnjeg atmosferskog pritiska i dolazi do usisavanja hladnog vazduha koji može da sadrži vlagu. Proces se ponavlja u ciklusima, gde se svaki put izbacuje topao vazduh bez vlage u toku dana, a u toku noći usisava vlažan vazduh. Vлага se kondenzuje na unutrašnjim zidovima kućišta, kao na slici 2.7. Kroz tanak sloj vlage protiče mala struja, koja može da na pojedinim mestima izazove isušivanje vlage i parcijalni preskok u obliku iskre, kao na slici 2.7.



Slika 2.6: Talasni oblik napona na transformatoru usled atmosferskog pražnjenja u gromobransku hvataljku na vrhu dimnjaka objekta tačno iznad transformatora u suterenu

Obeležimo otpornost po jedinici vlažnog sloja oznakom R_{v1} , a oznakom R_{i1} otpornost iskre po jedinici dužine. Neka je dužina vlažnog sloja po površini izolatora pre pojave iskre d , a efektivna vrednost napona u stacionarnom stanju na odvodniku U . Pod pretpostavkom da je vlažan sloj homogen sa konstantnim otporom po jedinici dužine, u tom slučaju bi efektivna vrednost struje koju bi povlačio vlažan sloj bi bila data izrazom:

$$I = \frac{U}{R_{v1}d} \quad (2.4)$$

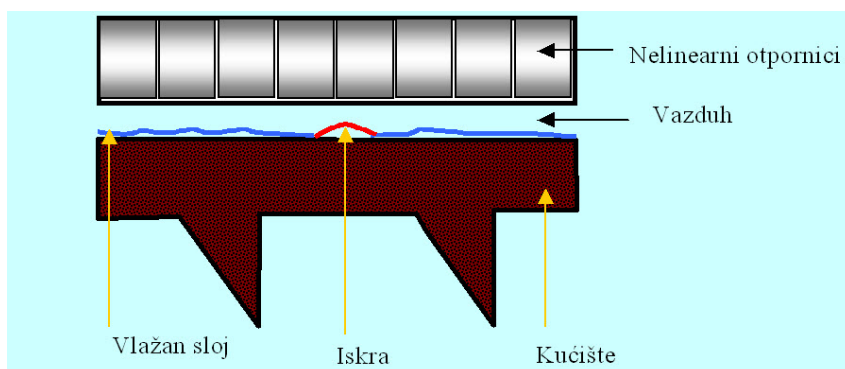
Ukoliko se pojavi iskra dužine d_i , tada bi ukupna dužina vlažnog sloja bila:

$$d_v = d - d_i \quad (2.5)$$

Ukupna struja u ovom slučaju bila bi ograničena zbirom otpora vlažnog sloja i otpora iskre, odnosno:

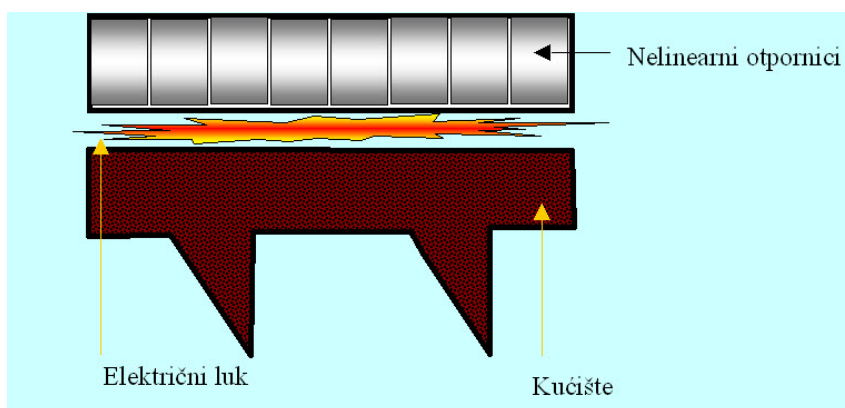
$$I = \frac{U}{R_{v1}(d - d_i) + R_{i1}d_i} \quad (2.6)$$

Ukoliko je otpornost po jedinici dužine iskre R_{i1} manja od otpornosti vlažnog sloja, ukupna otpornost strujnog puta će se smanjiti, a struja povećati. To će izazivati isušivanje



Slika 2.7: Skica kondenzovane vlage po zidu odvodnika prenapona i formiranje parcijalnog preskoka

vlažnog sloja, proširenje zone parcijalnog preskoka i dalje povećanje struje. Kao rezultat pojave parcijalnog preskoka sa otporom iskre koji je manji od otpornosti vlažnog sloja pojavljuje se na kraju proširenje zone parcijalnog preskoka duž celog unutrašnjeg zida kućišta odvodnika i pojave preskoka duž celog vazdušnog prostora između aktivnog dela odvodnika i kućišta, što rezultira pojavom električnog luka koji prespaja sa unutrašnje strane odvodnik i prouzrokuje kratak spoj, kao na slici 2.8.



Slika 2.8: Pojava električnog luka u međuprostoru između aktivnog dela odvodnika i kućišta

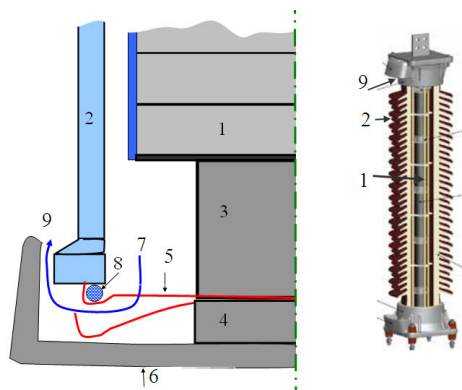
Električni luk koji se pojavljuje unutar kućišta odvodnika prenapona ima sledeće karakteristike:

- Kada se pojavi električni luk duž cele unutrašnje strane kućišta, uspostavlja se struja od nekoliko kA do nekoliko desetina kA.
- Temperatura električnog luka kreće se od 3000 do preko 10000°C.

- Zbog naglog širenja vazduha usled visoke temperature pritisak unutar kućišta može da poraste toliko da izazove eksploziju porculanskog kućišta.

Eksplozija kućišta opasna je za okolne uređaje, koji mogu biti oštećeni, kao i za osoblje postrojenja. Iz tog razloga se odvodnik udaljavao od štice objekta (najčešće transformatora), a sa druge strane zahtevi zaštite od prenapona su nalagali da odvodnik bude što bliže štice objektu.

Da bi se sprečile eksplozije odvodnika prenapona, kod odvodnika sa porculanskim kućištem još se primenjuje elastična metalna membrana koja služi za odušak gasova u slučaju nadpritiska. Na slici 2.9 prikazan je presek donjeg dela odvodnika sa membranom (levo) i izgled kompletnog odvodnika u porculanskom kućištu sa metal-oksidnim otpornicima, prema [50]. Oznake na slici 2.9 imaju sledeće značenje:



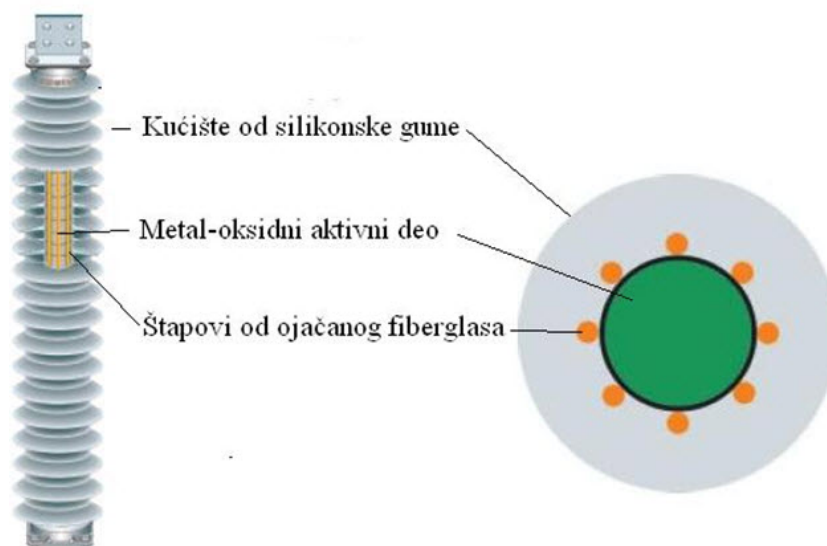
- Slika 2.9: Presek donjeg dela odvodnika sa membranom
1. Cilindrični rezistori (pogačice) od ZnO,
 2. Porculansko kućište,
 3. Metalni cilindrični umetak za popunu prostora između stuba koji čini aktivni deo nelinearnih otpornika i metalnog dna odvodnika,
 4. Metalni cilindrični umetak koji priteže elastičnu membranu uz cilindar 3,
 5. Elastična metalna membrana,
 6. Metalno dno odvodnika, za koji se vezuje provodnik za uzemljenje,
 7. Mlaz gasova u slučaju nadpritiska i otvaranja membrane,
 8. Zaptivka od specijalnog materijala koja zajedno sa elastičnom membranom u normalnom radu drži unutrašnjost odvodnika zaptivenom od uticaja spoljašnjeg vazduha,

9. Otvor za izbacivanje gasova pod pritiskom u slučaju pojave nadpritiska u unutrašnjosti odvodnika prenapona.

Iako danas preovlađuje upotreba odvodnika u polimernim kućištima, kada su u pitanju objekti koji se nalaze u oblastima u kojoj postoji industrija koja izaziva agresivno zagađenje vazduha (jedinjenja azota ili sumpora), iskustva pokazuju da su porculanska kućišta apsolutno neosetljiva na takve uticaje, pa se u tom slučaju daje prednost ovim konstrukcijama.

2.3.2 Odvodnici prenapona u kućištima o polimernih materijala

Danas se koriste polimerna kućišta, najčešće od silikonske gume, koje potpuno eliminiše opasnost od eksplozija. Naime, na aktivni deo odvodnika od nelinearnih otpornika se direktno izliva materijal od koga je kućište, uz postavljanje mehaničkog ojačanja od fibreglasa u kućište od silikonske gume, koje ne poseduje mehaničku čvrstoću. Konstrukcija je data na slici 2.10, gde je prikazana takozvana kavezna konstrukcija odvodnika prenapona [50]. Postoje i drugi načini postizanja mehaničke čvrstoće i obezbeđivanja da ne dolazi

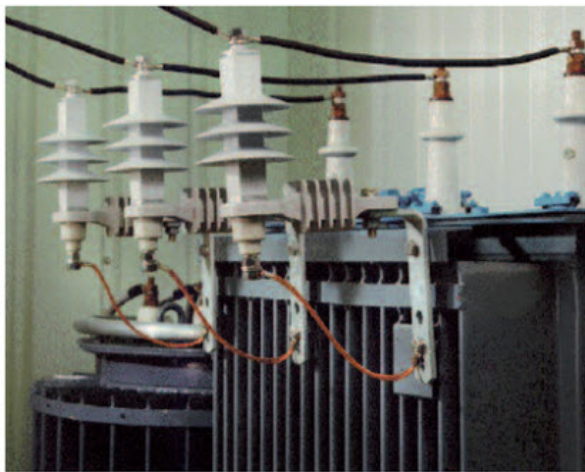


Slika 2.10: Kavezna konstrukcija odvodnika prenapona

do internog luka.

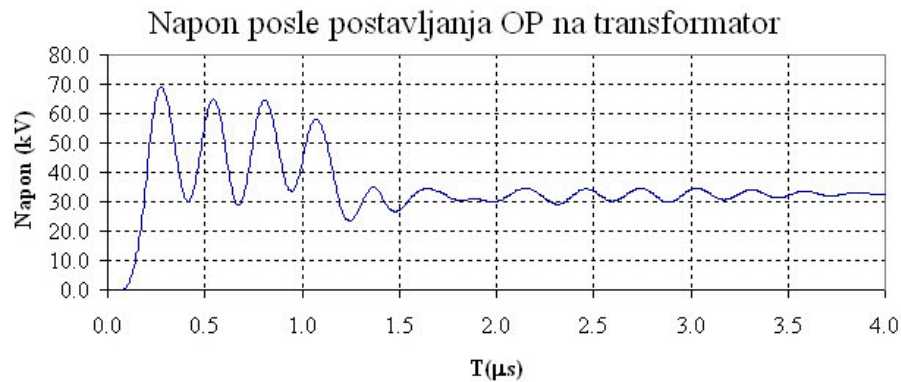
Uvođenjem polimernih kućišta za odvodnike prenapona potpuno se izbegava opasnost od eksplozija, jer se kućišta postavljaju bez vazdušnih zazora na aktivni deo odvodnika. Sada ulazi u praksu postavljanje odvodnika direktno na kućište uljnih transformatora ili na uzemljenu konstrukciju suvih, kao što je prikazano na slici 2.11

Na slici 2.11 prikazana su dva primera instalacije metal-oksidnog (MO) odvodnika na uljnom transformatoru 10/0.4 (levo) i suvom (desno). U oba slučaja odvodnici su fiksirani za uzemljenu konstrukciju transformatora. Odvodnici prenapona služe kao potpore za fiksiranje šina (desno). Sva tri priključka za uzemljenje odvodnika prenapona povezana su savitljivim provodnikom i vezana za šinu za uzemljenje, da bi se izbeglo proticanje velike struje atmosferskog pražnjenja kroz metalnu konstrukciju transformatora. Savitljivi izolovani provodnik pod naponom vodi se od šina pod naponom do priključaka za namotaj (desno).



Slika 2.11: 1 Slike uljnog i suvog transformatora sa postavljenim odvodnicima prenapona sa silikonskim kućištima direktno na konstrukciji

Izvršen je proračun prenapona kada je dužina veze od odvodnika do samog priključka transformatora 1 m, kada je struja pražnjenja 121 kA (slučaj sa slike 2.11 desno). Vremenski tok napona na transformatoru dat je dat na slici 2.12. Maksimalni izračunati prenapon je 72.2 kV što je manje od podnosivih 75 kV.



Slika 2.12: Vremenski tok napona na zaštićenom transformatoru

Na osnovu analize se mogu doneti sledeći zaključci:

- Električni uređaji u objektu mogu biti ugrožen od atmosferskih udara usled pražnjenja u gromobransku instalaciju samog objekta. To znači da ugroženost električnih instalacija ne mora da nastupi samo od prenapona koji dolaze po priključenim nadzemnim ili kablovskim vodovima.
- Optimalna zaštita transformatora je postavljanje odvodnika prenapona direktno na priključcima transformatora i vezivanje za uzemljeno kućište, stim što se paralelno sa kućištem transformatora vodi velika struja pražnjenja provodnikom odgovarajućeg preseka od donjeg kraja odvodnika do uzemljiivača.

2.4 Rizik kvara izolacije usled udara groma

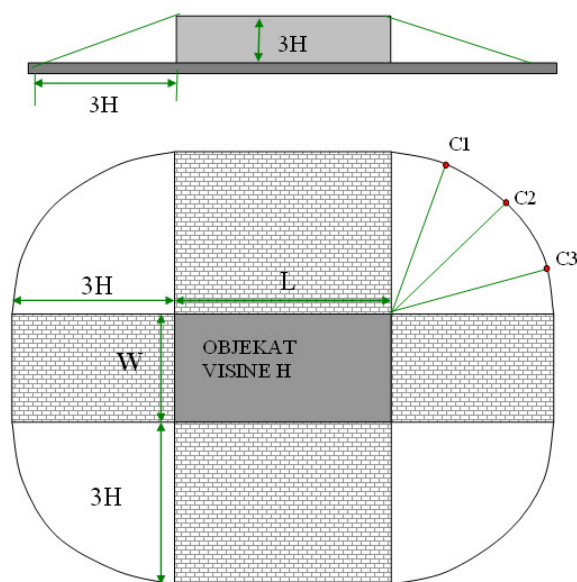
Statistički prilaz proceni ugroženosti izolacije od atmosferskih prenapona u procesu koordinacije izolacije nekog objekta se sastoji iz sledećih tačaka:

- Procena atraktivne površine objekta,
- Određivanje gustine pražnjenja za analizirano područje,
- Procena minimalne struje pražnjenja koja može da prouzrokuje proboj,
- Određivanje verovatnoće prevazilaženja minimalne struje pražnjenja koja može da prouzrokuje proboj.

Statistički prilaz proceni ugroženosti rizika kvara izolacije od atmosferskog pražnjenja urađen je za transformatora 10/0.4 kV iz primera u poglavlju 2.

2.5 Određivanje atraktivne površine objekta

Atraktivna površina usamljenog objekta na ravnoj površini zemlje se određuje u preseku između površine zemlje i prave linije sa nagibom $1/3$ koja polazi sa gornje ivice posmatranog objekta, kao na slici 2.13 prema standardu [16].



Slika 2.13: Skica određivanja atraktivne zone usamljenih objektata na ravnom tlu

Napravljen je pojednostavljen model analiziranog objekta čija je osnova kvadratna, stranica $L = 40$ m.

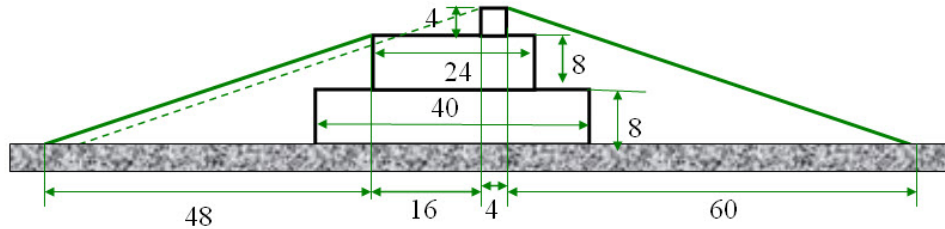
Visina II sprata od $H = 16$ m je usvojena kao srednja visina objekta, a dimnjak na kome se nalazi deo prihvatnog sistema na kome se predpostavlja da se dogodio udar je na visini $H_p = 20$ m. Prema standardu [16] atraktivna zona objekta čija je osnova pravougaonik dužine L , širine W , a visina pravougloh paralelopipeda H se može izračunati primenom sledeće formule:

$$A_D = L \times W + 6 \times H \times (W + L) + 9 \times \pi \times H^2 \quad (2.7)$$

Na slici 2.1 iz poglavlja 2 dat je prikaz objekta sa strane (levo) i iz ptičje perspektive (desno).

Na slici 2.14 prikazano je određivanje prihvatne površine analiziranog objekta sa slike 2.1 levo postavljanjem pravih pod nagibom $1:3$ posmatrajući analizirani objekat sa bočne strane.

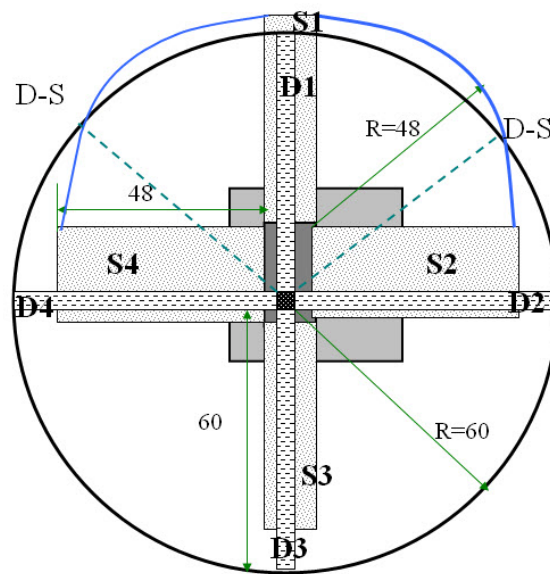
Sa slike 2.14 može se uočiti da sa desne strane prihvatnu površinu definiše visina



Slika 2.14: Određivanje prihvatne površine objekta postavljajanjem prava 1:3 posmatrajući analizirani objekat sa bočne strane

dimnjaka 20 m, pa je širina prihvatne površine 60 m, a sa leve strane prihvatnu površinu definiše visina krova prvog sprata od 16 m, pa je širina prihvatne površine 48 m.

Na slici 2.15 prikazana je grafička predstava određivanja prihvatne površine razmatranog objekta posmatrana odozgo, tako da se vide sve prihvatne površine.



Slika 2.15: Određivanje prihvatne površine razmatranog objekta

Oznake imaju sledeće značenje:

$D1, D2, D3, D4$ - prihvatna površina samo usled uticaja stranice krova kućice za lift $L1 = 4$ m i $W = 4$ m, bez rotacije linije oko uglova objekta,

$S1, S2, S3, S4$ - prihvatna površina samo usled uticaja stranice krova sprata $L2 = 12$ m i $W2 = 24$ m, bez rotacije linije oko uglova objekta.

U našem slučaju postoje dva pravougaonika koja utiču na prihvatnu površinu. Dominantni uticaj ima kućica za lift i dimnjak, čiji je krov kvadratni, koja imaju sledeće dimenzije.

$$\begin{aligned} L_1 &= 4 \text{ m} \\ W_1 &= 4 \text{ m} \\ H_1 &= 20 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Drugi po važnosti je ravan krov prvog sprata koji ima sledeće dimenzije:

$$\begin{aligned} L_2 &= 24 \text{ m} \\ W_2 &= 12 \text{ m} \\ H_2 &= 16 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Kada se izračuna prihvatna površina kućice za lift visine 20 m, bez uticaja prvog sprata, dobija se prihvatna površina kućice za lift: A_{DL} :

$$A_{DL} = 4 \cdot 4 + 6 \cdot 20 \cdot (4 + 4) + 9 \cdot \pi \cdot 20^2 = 16 + 960 + 11310 = 12286 \text{ m}^2 \quad (2.10)$$

Ako bi se prihvatna površina računala samo na osnovu dimenzija pravouglog paralipipeda koji odgovara prvom spratu, tada bi izračunata površina bila A_{DS} :

$$A_{DS} = 4 \cdot 4 + 6 \cdot 16 \cdot (24 + 12) + 9 \cdot \pi \cdot 16^2 = 288 + 3456 + 7238 = 10982 \text{ m}^2 \quad (2.11)$$

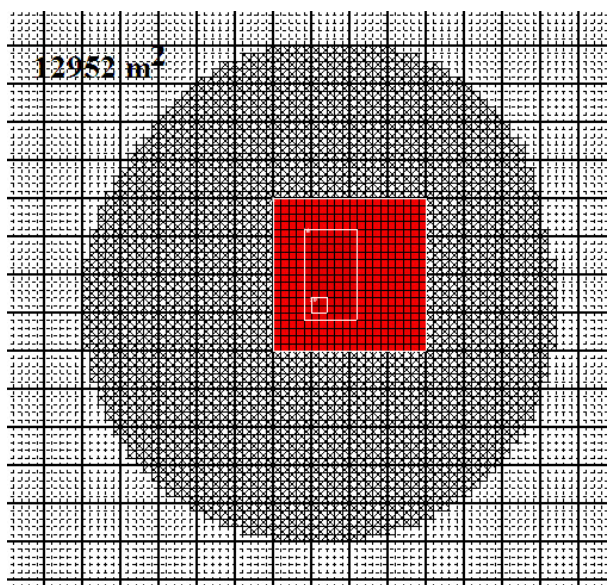
Vidi se da je izračunata prihvatna zona dimnjaka A_{DL} veća nego prihvatna zona krova prvog sprata A_{DS} .

Kada se uzme u obzir i jedna i druga prihvatna površina, tada površina $S1$ sa gornje strane na slici 2.15 potiče od dela ravnog krova koji nije u zoni koju pokriva kućica za lift. Usvojicemo da je aproksimativno uticaj rotacije linije takav da je granica uticaja definisana pravom iz ugla kućice za lift do tačke $D - S$ na luku kružnice. Od tačke $D - S$ luk do pravougaonika površine $S1$ je definisan pravama pod nagibom 1:3 od linije krova prvog sprata sa gornje strane.

Iako je moguće analitički izračunati taj uticaj previšenja koji čini kućica za lift, umesto analitičkog proračuna, korišćen je numerički proračun. Cela horizontalna površina tla oko objekta podeljena je na elementarne kvadrate. Objekat se modeluje postavljanjem

iznad svakog kvadrata na površini tla jedan kvadar čija je osnova kocka, a visine odgovara visini tog dela objekta. Na taj način se može objekat veoma složenog oblika modelovati skupom kvadara. Za svaki kvadar se vrši modelovanje prihvatne površine, ali samo oni kvadri koji su na spoljašnjoj strani objekta utiču na prihvatnu površinu. Kvadri koji su unutar objekta i koji su okruženi susednim kvadrima nemaju uticaja.

Na slici 2.16 prikazani su rezultati proračuna numeričkom metodom pomoću programa sopstvene izrade, koji je urađen u programskom jeziku Microsoft Visual Basic 6.



Slika 2.16: Numerički određena prihvatna površina kompletnog objekta uvažavajući prizemlje, sprat i kućicu za lift

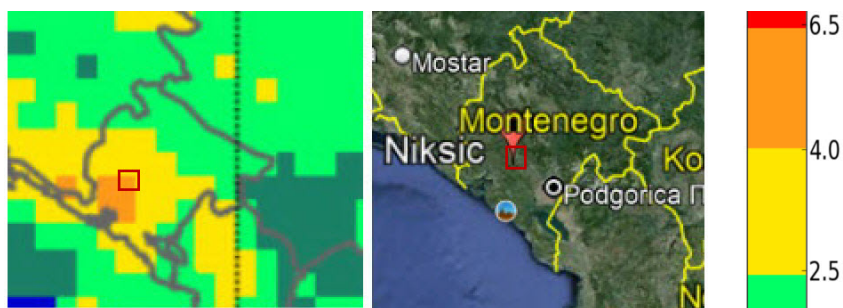
Uvećanje prihvatne površine objekta usled dejstva krova prvog sprata u odnosu na rezultate proračuna kada se razmatra samo kućica za lift D je:

$$k = \frac{12952}{12286} = 1.054$$

Može se smatrati da je ovaj uticaj mali.

2.6 Godišnja gustina pražnjenja i broj udara u objekat

Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja dobijena je na osnovu sistema za lokaciju pražnjeja koja pripadaju sistemu EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection). U [103] su dati rezultati sakupljanja podataka za područje Evrope o gustini atmosferskih pražnjenja u periodu 2008 do 2012 god. Na slici 2.17 prikazana je jako uvećana mapa



Slika 2.17: Mapa gustine atmosferskih pražnjenja N_G za područje Crne Gore (levo) i mapa Crne Gore (desno)

gustine atmosferskih pražnjenja N_G za područje Crne Gore (levo) i mapa Crne Gore iz Google Earth (desno).

Na osnovu skale sa numeričkim vrednostima koje odgovaraju pojedinim bojama usvaja se godišnja gustina pražnjenja po $1 \text{ km}^2 = 5.25$ za uokvireno područje približne veličine $15 \times 15 \text{ km}^2$.

Broj atmosferskih udara za razmatrani objekat izračunat je na osnovu [16] pomoću sledećeg izraza:

$$N_D = N_G \times A_d \times C_D \times 10^{-6} \quad (2.12)$$

gde je:

N_D - ukupan broj udara u objekat u toku 1 godine,

N_G -gustina atmosferskih pražnjenja prema zemlji $(\text{km}^2 \cdot \text{god})^{-1}$, prema slici 2.17 za uokvirenu oblast srednja vrednost je 5.25 udara po km^2/god .

A_d - prihvatna površina objekta, za naš slučaj je $A_d = 12952 \text{ m}^2$.

C_d -faktor lokacije za objekat, koji ima vrednost 1 za horizontalnu površinu zemlje bez okolnih objekata.

Kada se izračuna, dobija se godišnji broj udara u objekat:

$$N_D = 0.068 \text{ udara/god} \quad (2.13)$$

Srednji broj godina bez udara u objekat je:

$$\text{MTBS} = \frac{1}{N_D} \quad (2.14)$$

gde je MTBS skraćenica od engleskog **M**ean **T**ime **B**etween **S**trikes. Kada se izračuna, dobija se $\text{MTBS}=14.7$ god.

2.7 Minimalna struja pražnjenja koja izaziva kvar

Po metodi koordinacije izolacije koja je opisana u sekciji 8.1.7 na strani 313 (I deo), varira se amplituda struje atmosferskog pražnjenja od dovoljno velike vrednosti ka manjim vrednostima. Strmina je funkcionalno povezana sa amplitudom struje preko izraza za čelo talasa $T_f = 0.154 \times I^{0.624}$ za $I > 20$ kA, što je ranije dato izrazom 6.19 na strani 184 (I deo), prema [13]. Za svaku struju pražnjenja se izračunava napon na transformatoru i upoređuje sa podnosivim naponom izolacije. Proračun verovatnoće premašenja kritične struje dat je u poglavlju 8.4.6 na strani 349 (I deo).

Primer jednog dela tabele sa rezultatima proračuna dat je u tabeli 2.1. Proračun je rađen na taj način što je amplituda struje pražnjenja smanjivana za konstantan dekrement i za svaku struju je izračunavan maksimalni napon na transformatoru. Određena je minimalna struja za koju je napon iznad poznosivog napona, koji iznosi 75 kV.

Tabela 2.1: Variranje struje od 45 kA na niže i određivanje minimalne amplitude struje koja izaziva proboj pri naponu od 75 kV

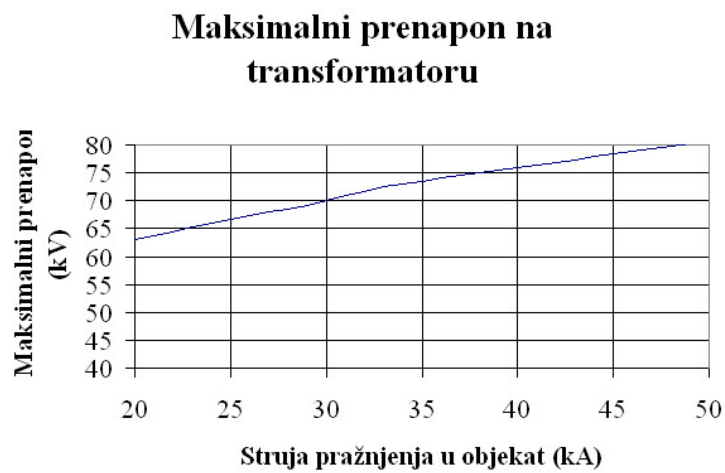
Br.	I_{max} (kA)	T_f (μs)	U_{max} (kV)
1	45	1.66E-06	78.4
2	44	1.63E-06	77.9
3	43	1.61E-06	77.4
4	42	1.59E-06	76.9
5	41	1.56E-06	76.4
6	40	1.54E-06	75.9
7	39	1.52E-06	75.5
8	38	1.49E-06	75.0
9	37	1.47E-06	74.5
10	36	1.44E-06	74.0

Sve struje koje su veće ili jednake $I_{min} = 38$ kA izazivaju proboj izolacije, jer je pri većim strujama napon na izolaciji viši od podnosivog napona izolacije $U_{iz} = 75$ kV.

Na slici 2.18 prikazana je maksimalna vrednost prenapona na transformatoru u funkciji amplitude struje pražnjenja za nešto širi dijapazon struja.

2.8 Određivanje rizika proboja transformatora

Na osnovu tabele 2.1 određena je amplituda struje od $I_{min} = 38$ kA kao najmanja struja koja izaziva preskok. Svi parametri potrebni za proračun verovatnoće premašenja struje



Slika 2.18: Dijagram napona na transformatoru u funkciji amplitude struje pražnjenja

I_{min} dati su u tabeli 2.2, uz usvojenu srednju amplitudu struje pražnjenja od $I_{sr} = 30$ kA i srednjeg kvadratnog rasipanja logaritma struje $\sigma_{\ln I} = 0.6$.

Tabela 2.2: Tabela sa proračunom verovatnoće pojave struje veće od minimalne struje koja izaziva proboj transformatora

I_g	I_{sr}	$\sigma_{\ln I}$	$X = \frac{\ln(I_g/I_{sr})}{\sqrt{2} \times \sigma_{\ln I}}$	$Z = \text{erf}(X)$	$P(I_g) = \frac{1+Z}{2}$
38	30	0.6	0.279	0.307	0.346

Verovatnoća pojave struje koja izaziva kvar izolacije je $P(I_g > I_{min}) = 0.346$. Ukupan očekivani broj kvarova transformatora je:

$$N_k = N_D \times P(I_g > I_{min}) = 0.068 \times 0.348 = 0.024 \text{ kvarova/god} \quad (2.15)$$

Očekivani broj godina bez kvara MTBF (Mean Time Between Failures) je:

$$MTBF = 42.6 \text{ god} \quad (2.16)$$

Za transformatore se smatra da je prihvatljiv broj godina bez kvara $MTBF > 600$ god, što znači da postojeće rešenje nije dobro. Stoga je potrebno postaviti odvodnik prenapona na transformator, što bi potpuno sprečilo kvarove transformatora, jer ne postoji struja pražnjenja koja bi povećala napon na transformatoru iznad 75 kV.

Zahvalnica

Projekat zaštite transformatora 10/0.4 kV direktnim postavljanjen odvodnika prenapona na uzemljenu šasiju suvog transformatora u Institutu za crnu metalurgiju u Nikšiću rađen je u saradnji sa osobljem Instituta i proizvođačem suvog transformatora Minel Trafo Mladenovac, na čemu se zahvaljujem. To je bila prva primena rešenja prenaponske zaštite transformatora na opisani način u našoj zemlji, koja je realizovana 2005 god.

Primer 3

Zaštita stubnih transformatorskih stanica

Koautor: Zlatan Stojković

Distributivni nadzemni vodovi naponskih nivoa 10 kV i 20 kV u našoj zemlji se po pravilu grade bez zaštitnih užadi, jer bi udar u zaštitno uže izazvao povratni preskok na najbližem stubu zbog niskog preskočnog napona izolacije. U slučaju stubnih transformatorskih stanica u praksi su se mogla sresti različita rešenja prenaponske zaštite.

3.1 Prenaponska zaštita odvodnicima prenapona

U vreme kada su se koristili odvodnici prenapona sa nelinearnim otpornicima od silicijum karbida sa internim iskrištem (u daljem tekstu SiC) odvodnici, sa kućištem od porculana, događale su se havarije odvodnika, često praćene eksplozijama kućišta. Glavni razlozi kvarova odvodnika bili su:

1. Popuštanje zaptivke između porculanskog kućišta i metalnih kapa na vrhu i dnu odvodnika dovelo je u do prodora spoljašnjeg vazduha sa mogućim sadržajem vlage. Ta pojava bi mogla da dovede do internog luka između krajeva odvodnika, što je ponekad izazivalo havarije praćene eksplozijom porculanskih kućišta, često oštećujući okolnu opremu, što je opisano u primeru u sekciji 2.3.1 na strani 17 (II deo).
2. Interna iskrišta na red vezana sa nelinearnim otpornicima su bila pravljena u vidu tanjirastih elektroda, koje su držane izolacionim odstojećima na određenom rasto-

janju. Nakon reagovanja (preskoka između elektroda iskrišta), javljao se električni luk koji je morao da se prekine u prvoj nuli struje industrijske učestanosti, koja je proticala kroz nelinearne rezistore i iskrišta. Ukoliko bi struja pražnjenja pregrijala nelinearne rezistore, njihova bi se otpornost smanjila i struja kroz iskrište se ne bi mogla prekinuti u prvoj nuli, što je dovodilo do termičkog razaranja nelinearnog rezistora od SiC.

3. Posle reagovanja odvodnika često bi na površini iskrišta dolazilo do topljenja materijala i stvaranja sitnih neravnina, što je dovodilo do nižavanja napona reagovanja. Ukoliko bi se napon reagovanja odvodnika prenapona spustio toliko da reaguje pri privremenim prenaponima, nastajala bi havarija odvodnika zbog dugotrajnog trajanja prenapona pri kome se luk na iskrištu nije mogao ugasi.

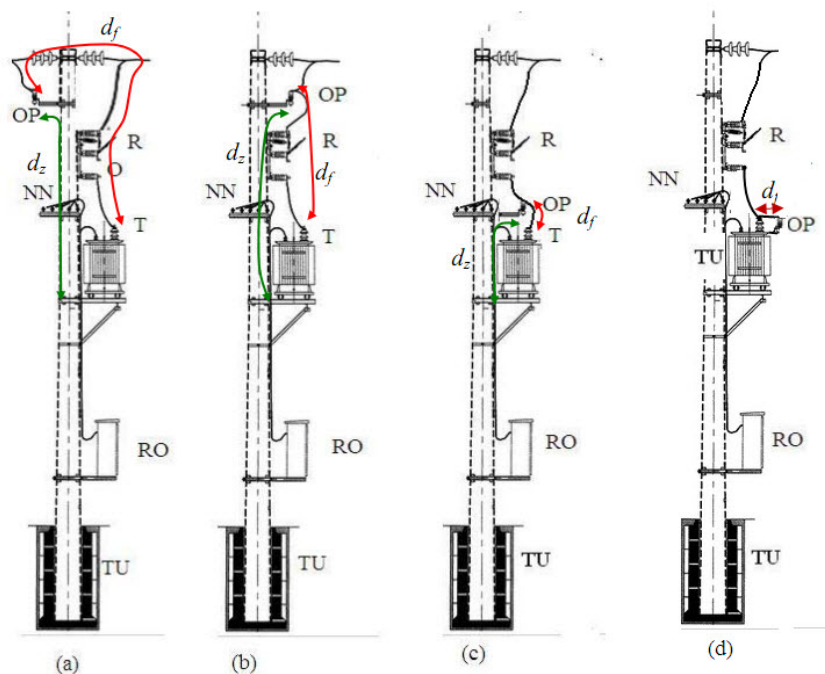
Početak osamdesetih godina prošlog veka došlo je do masovnog prelaska na odvodnike prenapona bez iskrišta sa rezistorima od cink oksida (metal-oksidni odvodnici prenapona bez iskrišta ili kraće MO odvodnici ili ZnO odvodnici). Takođe je došlo do tehnološkog razvoja izolacionih materijala tako da su razvijena kućišta za odvodnike od novih polimernih materijala, pre svega silikonske gume. Prednosti novih MO odvodnika u silikonskim kućištima su sledeće:

- Nelinearnija volt-amperska karakteristika (V-A), tako da pri radnom naponu kroz rezistor protiče praktično kapacitivna struja, jer se rezistor ponaša kao izolator i zbog toga nije potrebno iskrište. Sa povećanjem napona naglo opada otpornost i odvodnik je u stanju pri prenaponima da propusti veliku udarnu struju pri ograničenom porastu napona.
- MO odvodnici prenapona su mnogo pouzdaniji jer nemaju unutrašnje iskrište koje menja karakteristike posle više reagovanja i postaje faktor nesigurnosti.
- Korišćenjem kućišta od silikonske gume se potpuno izbegava mogućnost eksplozije, zbog elastičnosti materijala. Pored toga, danas postoje konstrukcije odvodnika u silikonskom kućištu bez vazdušnog međuprostora između nelinearnih otpornika i kućišta. Po takvoj tehnologiji se polimerno kućište direktno postavlja na jezgro od nelinearnog otpornika.

Zbog opasnosti od eksplozije "klasični", odnosno SiC odvodnici su postavljani na udaljenosti od transformatora, da ne bi pri eksploziji oštetili prolazne izolatore transformatora. Uvođenjem MO odvodnika moglo se to rastojanje smanjiti. Na ovom primeru će biti prikazana 4 različita slučaja prenaponske zaštite transformatora.

3.2 Uticaj mesta ugradnje odvodnika na stubnoj TS

Na slici 3.1 prikazana su četiri primera postavljanja odvodnika prenapona na različitim pozicijama na stubu ispred šticebnog transformatora. Oznake na slici 3.1 imaju sledeće



Slika 3.1: Tri položaja odvodnika prenapona ispred transformatora na stubu

značenje:

OP -odvodnik prenapona,

R -rastavljač,

O -visokonaponski topljivi osigurač,

T -energetski transformator koji se štiti od prenapona,

NN -priključak na niskonaponsku nadzemnu mrežu,

RO -niskonaponski razvodni orman,

TU -temelj stuba sa uzemljivačem.

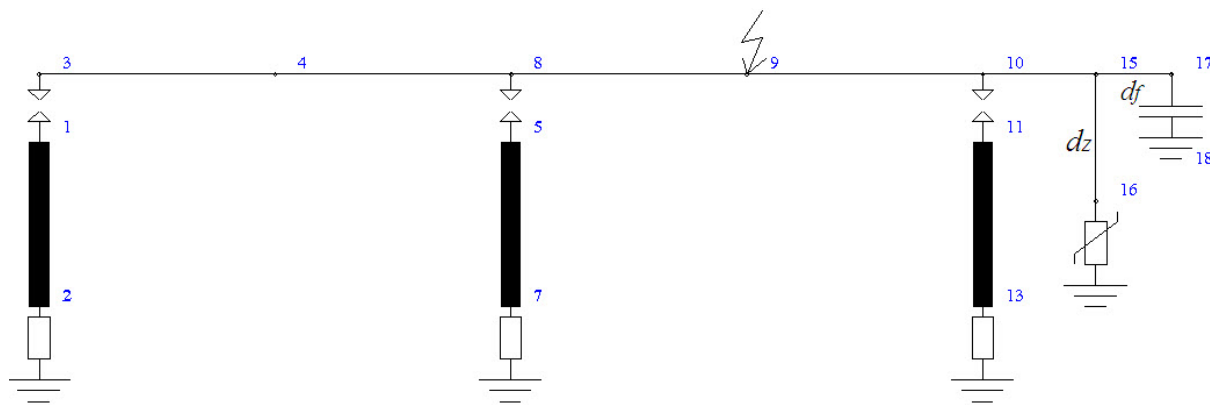
d_f -dužina faznog provodnika između priključka odvodnika prenapona i uvodnog izolatora transformatora.

d_z -dužina zemljovoda između priključka za uzemljenje odvodnika prenapona i platforme na kojoj je transformator.

Za prenaponsku zaštitu stubnih transformatora bitna je dužina zemljovoda od donjeg priključka odvodnika prenapona do platforme na kojoj stoji transformator d_z , za koju je galvanski vezan transformatorski stub, koja se sabira sa rastojanjem između gornjeg priključka odvodnika prenapona i priključka transformatora d_f . Za proračun prenapona na transformatoru jako je važna dužina petlje koju čini dužina zemljovoda do platforme na kojoj je postavljen transformator i dužina veze od odvodnika do transformatora, bez obzira na eventualno postojanje aparata na putu veze, kao što su rastavljač ili osigurač. Ovu veličinu ćemo zvati električna udaljenost. U slučaju (d) odvodnik je fiksiran direktno na kućište transformatora. Struja pražnjenja se vodi provodnim užetom postavljenim paralelno sa kućištem transformatora od donjeg priključka odvodnika koji je vezan za kućište transformatora do platforme na kojoj se nalazi transformator.

3.3 Proračun prenapona na transformatorima na stubu

Na slici 3.2 dat je ekranski prikaz iz programa GROM monofazne ekvivalentne šeme dva raspona ispred stubne transformatorske stanice. Na šemi su označene grane koje odgovaraju zemljovodu od dna odvodnika do platforme na kojoj je transformator, što je obeleženo sa d_z i dužina veze od gornjeg priključka odvodnika do prolaznog izolatora transformatora d_f .



Slika 3.2: Ekranski prikaz šeme monofazna ekvivalentna šema za proračun ugroženosti stubne transformatorske stanice

3.3.1 Osnovni podaci o sistemu

- Nazivni napon sistema je $U_n=10$ kV.

- Razmatrana su prva dva raspona, svaki dužine $d=100\text{m}$.
- Prosečne visine provodnika su $H_f=16\text{ m}$.
- Poprečni presk provodnika $S = 95\text{ mm}^2$.
- Otpor uzemljenja stuba $R_{uz} = 15\ \Omega$.
- Karakteristična impedansa svih faznih provodnika $Z_f = 503\ \Omega$
- Poluprečnik stuba $R_t = 0.3\text{ m}$.
- Karakteristična impedansa stuba $Z_s = 240\ \Omega$
- Podnosivi atmosferski udarni napon izolacije transformatora oblika $1.2/50\ \mu\text{s}$ iznosi $U_{wt} = 75\text{ kV}$.
- Podnosivi atmosferski udarni napon izolatora na stubu iznosi 75 kV i definisan je metodom V-t krive koja je opisana u poglavlju 7.5.1, na strani 233 (I deo), sa zadatim koeficijentima u tom poglavlju.

Dužina preskočnog razmaka dobijena je računski za vrednost podnosivog napona od 75 kV da iznosi 0.01 m . Mora se naglasiti da se pri formiranju ekvivalentne šeme usvojilo da je platforma na kojoj je postavljen transformator na referentnom naponu, jer nas interesuje samo razlika napona na priključku transformatora prema masi, odnosno kućištu transformatora.

3.3.2 Izbor odvodnika prenapona

Izbor odvodnika je urađen prema proceduri opisanoj u poglavlju 7.6.7 na strani 265 (I deo).

1. korak - određivanje parametara sistema:

- nazivni napon sistema $U_n = 10\text{ kV}$,
- najviši radni napon sistema $U_m = 12\text{ kV}$,
- neutralna tačka uzemljena preko otpornika koji ograničava struju jednopolnog kratog spoja na 300 A u trajanju od najviše 3 s ,
- Trajni radni napon odvodnika U_C je fazna vrednost maksimalnog trajnog radnog napona na mestu postavljanja odvodnika. Ako je odvodnik priključen između faze i zemlje i neutralna tačka je uzemljena direktno ili preko impedanse, tada je $U_C = U_m/1,73$. U slučaju razmatrane mreže $U_c = 12/1,73 = 7\text{ kV}$.

2. korak - nenormalni uslovi rada usled privremenih prenapona U_t . U distributivnom sistemu najvažniji privremeni prenaponi su usled jednopolnog kvara. Privremeni prenaponi usled zemljospoja u mreži uzemljenoj preko otpornika iznose:

$$U_t = U_c \cdot K_f \cdot K_S$$

K_f je koeficijent zemljospoja koji za ovaj slučaj ima vrednost kao kod mreže sa izolovanom neutralnom tačkom, odnosno $K_f = 1,73$. Usvojen je sigurnosni faktor $K_S = 1,1$ koji povećava privremene prenapone zbog različitih mogućih uticaja. Privremeni prenapon prema zemlji iznosi $U_t = 13,2$ kV.

3. korak: Izbor minimalnog naznačenog napona odvodnika na bazi trajnog radnog napona U_{Ro} vrši se pomoću izraza:

$$U_{Ro} = \frac{U_c}{K_o} \quad (3.1)$$

gde je $K_o = 0,8$ faktor proizvođača.

Kada se izračuna, dobija se $U_{Ro} = 8,7$ kV

4. korak - Izbor naznačenog napona odvodnika na osnovu privremenog prenapona pri zemljospoju $U_t = K_S \cdot K_f \cdot U_c$, gde je $K_S = 1,1$ koeficijent sigurnosti, a K_f faktor zemljospoja, koji se usvaja da iznosi $K_f = 1,73$ rj za uzemljenje preko otpornika. Na ovaj način se dobija da je privremeni prenapon $U_t = 13,2$ kV

Trajanje zemljospoja je ograničeno na 3 s, pa se za određivanje naznačenog napona na osnovu privremenog prenapona koristi kriva podnosivih privremenih prenapona odvodnika prenapona u funkciji trajanja, koja je data na slici 3.3, gde je određena vrednost podnosivog privremenog prenapona za trajanje prenapona $t_z = 3$ s. Ovu zavisnost daju proizvođači odvodnika.

Odreden je koeficijent podnošnja privremenih prenapona u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon odvodnika U_r . Vrednost koeficijenta

$$k_t = \frac{U_t}{U_r} = 1,028 \text{ za trajanje kvara } 3 \text{ s}$$

Minimalni naznačeni napon U_{Rt} na bazi privremenog prenapona pri zemljospoju izračunava se iz izraza

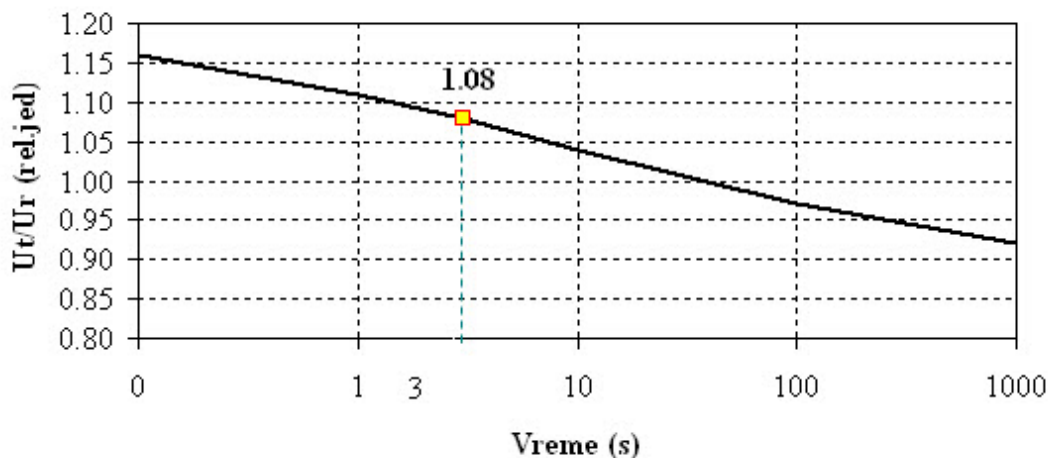
$$U_{Rt} = \frac{U_t}{k_t} = 12,8 \text{ kV}$$

5. korak - određuje finalnog minimalnog naznačenog napona kao većeg od predhodno dva određena naznačena napona za različite kriterijume.

$$U_r = \max[U_{Ro}, U_{Rt}] = 12,8 \text{ kV}$$

Izabran je odvodnik prenapona ABB Polim-d-n naznačenog napona $U_r = 15$ kV, sa karakteristikom preostalog napona kao u tabeli 3.1 za različite temene vrednosti udarnih struja oblika $8/20 \mu\text{s}$.

Sposobnost podnošenja privremenih prenapona



Slika 3.3: Kriva podnosivih privremenih prenapona odvodnika u funkciji trajanja

Tabela 3.1: Karakteristika preostalog napona za udarne struje standardnog oblika

Temena vrednost udarne struje (kA) oblika 8/20 μ s	1	2.5	5	10	20
maksimalna vrednost preostalg napona (kV)	34.9	37.	39.1	42	47.7

3.3.3 Rezultati proračuna

Izvršen je proračun maksimalnih prenapona determinističkom metodom sa amplitudom struje pražnjenja $I_{max} = 121$ kA, koja može biti prevaziđena sa verovatnoćom od 2%, u slučaju kada se usvoji rasipanje logaritma struje pražnjenja $\sigma_{ln}(I) = 0.68$ rj. Usvojena je godišnja gustina pražnjena od $N_G = 2.8$ udara po km^2 .

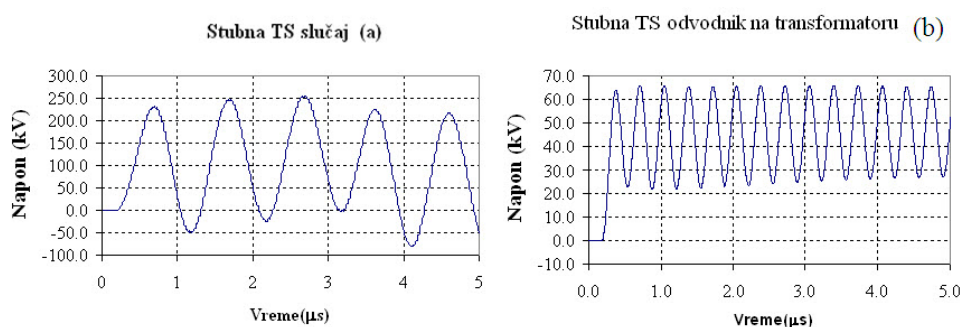
Rezultati proračuna maksimalnih prenapona U_{max} (kV), kao i srednjeg vremena između kvarova izolacije (MTBF-Mean Time Between Failures) prikazani su u tabeli 3.2. Veličinu $(d_z + d_f)$ nazvaćemo električnom udaljenošću odvodnika prenapona od transformatora. Ova veličina igra ključnu ulogu za zaštitu izolacije transformatora.

Prema usvojenim kriterijumima za male transformatore je dozvoljen srednji broj godina bez kvara transformatoba $MTBF \geq 200$ (god), tako da jedino u slučaju (d) se može smatrati da je izolacija zaštićena.

Radi ilustracije, na slici 3.4 prikazani su talasni oblici napona za slučaj (a) (odvodnik sa suprotne strane od transformatora) i slučaj (d) (odvodnik montiran na samom transformatoru, kada je dužina veze između priključka odvodnika i prolaznog izolatora 50 cm).

Tabela 3.2: Rezultati proračuna maksimalnih prenapona U_{max} (kV) kao i srednje vreme između kvarova izolacije (MTBF)

	Slučaj (a)	Slučaj (b)	Slučaj (c)	Slučaj (d)
d_f (m)	3	2	0.5	0.5
d_z (m)	4	1	1.5	0
$(d_z + d_f)$ (m)	7.1	5.7	2.4	0.3
U_{max} (kV)	256	207	155	66.5
MTBF (god)	23.7	27.5	41.2	∞



Slika 3.4: Talasni oblici prenapona na transformatoru kada je odvodnik sa suprotne strane od transformatora (a) i kada je montiran na samom transformatoru (b)

Sa slike se može videti da je zaštita sa odvodnikom postavljenim direktno na transformator rešenje koje ograničava prenapone na 66,5 kV, što je ispod podnosivog napona izolacije transformatora koji iznosi 75 kV.

3.3.4 Uticaj otpora uzemljenja stuba transformatorske stanice

Cilj sledeće analize je da pokaže da otpornost uzemljenja stuba koji nosi stubnu TS nema uticaja na naprezanje izolacije transformatora. Na slici 3.5 dat je detaljan prikaz modela stubne TS.

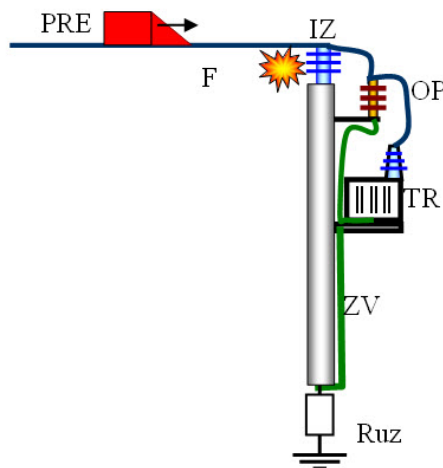
Oznake na slici 3.5 imaju sledeće značenje:

PRE -prenaponski talas koji se prostire po faznom provodniku,

F -fazni provodnik nadzemnog voda,

IZ - izolator između faznog provodnika i uzemljenog stuba,

OP -odvodnik prenapona postavljen na uzemljenoj konzoli vezanoj za stub, pomoću



Slika 3.5: Detaljan prikaz modela stubne TS

zemljovoda **ZV**, donji priključak odvodnika je vezan za platformu na kojoj je transformator,

TR -transformator,

ZV -zemljovod od odvodnika prenapona, preko platforme na kojoj je transformator i za čije kućište je vezan, do uzemljivača stuba,

Ruz -uzemljivač stuba.

Zemljovod je provodnik koji je postavljen paralelno stubu (bez obzira da li je stub čelično rešetkasti, cevni ili armirano-betonski) koji ima ulogu da efikasno sprovede struju atmosferskog pražnjenja od odvodnika prenapona do zemlje.

Na slici 3.6 dat je ekranski prikaz šeme dva raspona u programu AtpDraw i stubne transformatorske stanice

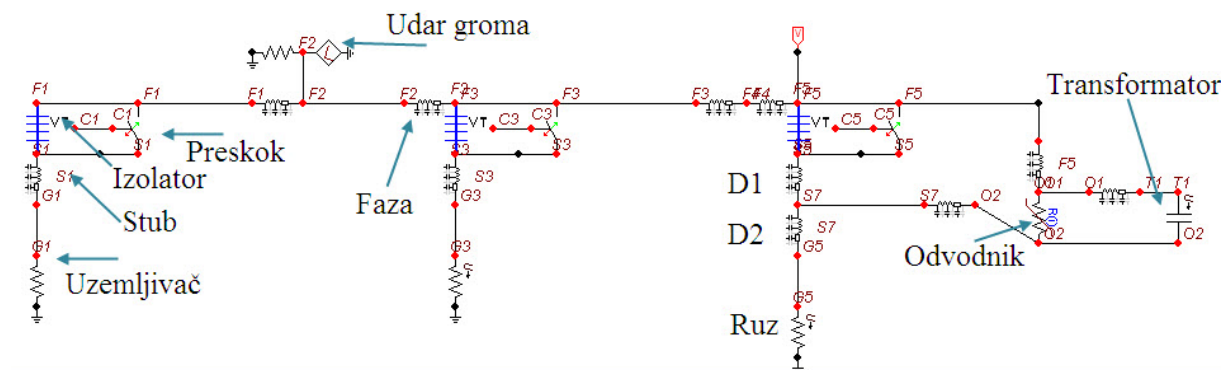
Oznake na slici 3.6 imaju sledeće značenje:

Izolator -element koji sadrži programski kod za modelovanje preskoka napisan u jeziku **Models** koji je nadogradnja paketa EMTP-atp.

Preskok - kontrolisani prekidač koji naredbom iz elementa **Izolator** otvara ili zatvara kontakte.

Stub -model stuba u vidu kratkog voda.

Uzemljivač - otpornik koji zamenjuje impedansu uzemljenja.



Slika 3.6: Ekranski prikaz šeme u programu AtpDraw dva raspona i stubne transformatorske stanice

Faza -provodnik dužine koja je jednaka polovini raspona.

Udar groma -Idealni strujni izvor paralelan sa otpornikom od 300 Ω , koji modeluje karakterističnu impedansu kanala groma.

D1 -gornji deo stuba dužine 4 m od vrha do platforme za transformator.

D2 -donji deo stuba od platforme za transformator do zemlje dužine 12 m.

Odvodnik -odvodnik prenapona naznačenog napona 15 kV na udaljenosti od 0.6 m od transformatorskog uvodnog izolatora (rešenje sa postavljanjem odvodnika direktno na transformator).

Ruz -otpornost uzemljenja stubne transformatorske stanice, koja se varira da bi se video uticaj uzemljenja na naprezanje transformatora.

Preskok se modeluje iz nekoliko koraka u programskom kodu u jeziku **Models**:

- Promenljiva $Close = 0$ deklariše da je prekidač paralelan izolatoru otvoren.
- U svakom koraku proračuna se izračunava minimalni preskočni napon iz formule 7.78 iz poglavlja 7.5.1, odnosno:

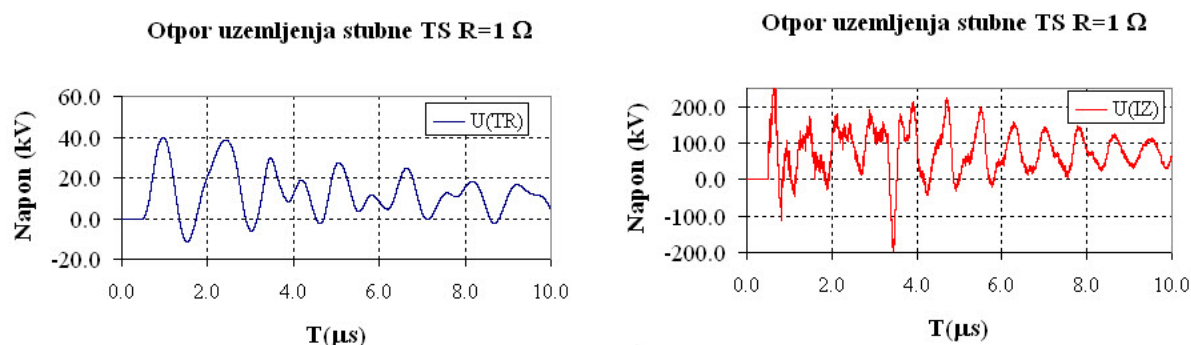
$$U(t) = d \times \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{A_n}} \right) \quad (3.2)$$

- Izračunavaju se naponi na krajevima izolatora U_1 i U_2 , kao i absolutna vrednost razlike napona $\Delta U = |U_1 - U_2|$
- Ukoliko je $\Delta U < |U(t)| \Rightarrow Close = 0$

- Ukoliko je $\Delta U \geq |U(t)| \Rightarrow Close = 1$, promjenljiva $Close = 1$ ostaje do kraja proračuna nepromjenljiva, odnosno prekidač paralelan izolatoru je zatvoren simulirajući preskok sa električnim lukom koji se ne gasi.

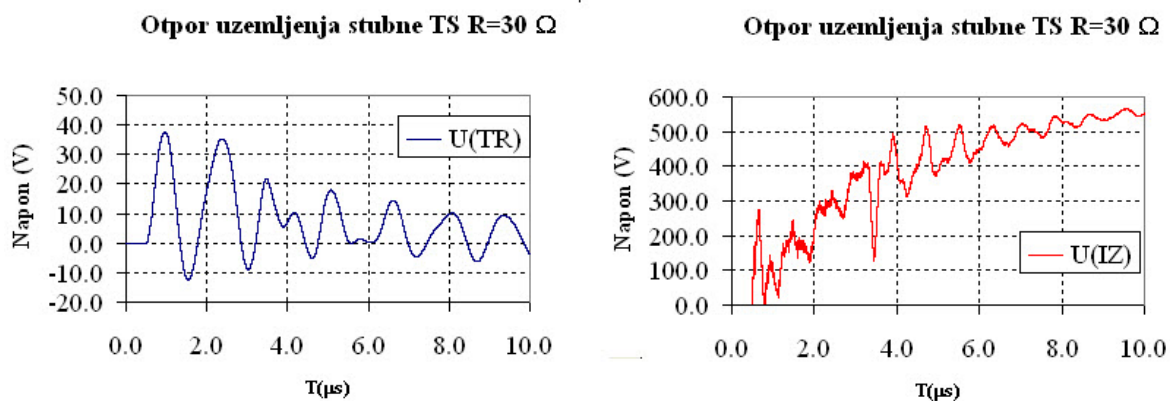
Izvršen je proračun napona na priključcima transformatora prema transformatorskom stubu i napona na faznom provodniku na vrhu stuba prema referentnoj zemlji, za otpor uzemljenja 1Ω i 30Ω .

Na slici 3.7 prikazan je talasni oblik napona na transformatoru $U(TR)$ i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji $U(RZ)$ za otpor uzemljenja stuba 1Ω .



Slika 3.7: Talasni oblik napona na transformatoru $U(TR)$ i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji $U(RZ)$ za otpor uzemljenja stuba 1Ω .

Na slici 3.7 prikazan je talasni oblik napona na transformatoru $U(TR)$ i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji $U(RZ)$ za otpor uzemljenja stuba 30Ω .



Slika 3.8: Talasni oblik napona na transformatoru $U(TR)$ i na vrhu stuba prema referentnoj zemlji $U(RZ)$ za otpor uzemljenja stuba 1Ω .

U tabeli 3.3 prikazani su maksimalni naponi na transformatoru i na faznom provodniku na vrhu stuba prema referentnoj zemlji za slučaj otpora uzemljenja $R_{uz}=1 \Omega$ i $R_{uz}=30 \Omega$.

Tabela 3.3: Maksimalni naponi na transformatoru i na faznom provodniku na vrhu stuba prema referentnoj zemlji za slučaj otpora uzemljenja $R_{uz}=1 \Omega$ i $R_{uz}=30 \Omega$

Ruz=1 Ω		Ruz=30 Ω	
U(TR)(kV)	U(Uz)(kV)	U(TR)(kV)	U(Uz) (kV)
39.57	27četvoroš	37.78	565.3

Talasnici napona na transformatoru na slici 3.4 i 3.7, odnosno na 3.8 se razlikuju jer su usvojeni različiti odvodnici prenapona. Može se uočiti da napon na transformatoru ne zavisi bitno od otpora uzemljenja stuba, dok napon faze na vrhu stuba prema referentnoj zemlji značajno raste sa porastom otpora uzemljenja.

Važno je zaključiti da je potrebno da veza između odvodnika i transformatora bude što je moguće kraća, a otpornost uzemljenja nema uticaja.

Zahvalnica

Zahvaljujemo Elektroprivreda Srbije za finansiranje Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu studije "Analiza atmosferskih prenapona u srednjenaponskim i niskonaponskim distributivnim mrežama", koja je rađena zajedno sa Elektrotehničkim Institutom Nikola Tesla, 2001-2002 god.

Primer 4

Zaštita transformatora pri HE

4.1 Opis sistema

U toku eksploatacije u hidroelektrane koja ima priključene nadzemne 110 kV i 35 kV vodove desilo se u kratkom roku nekoliko kvarova izolacije na strani 35 kV. Kvarovi su se pojedinačno desili na 35 kV namotaju suvog transformatora sopstvene potrošnje, proboj 35 kV kablovske završnice, havarija 35 kV odvodnika prenapona, havarija 35 kV osigurača sa pojavom međufaznog luka praćenog eksplozijom. Dvostruki nadzemni vod nazivnog napona 35 kV ispred transformatorske stanice je na čelično rešetkastim stubovima, postavljenim na stenovitom planinskom terenu. Vod je svojim položajem veoma eksponiran atmosferskim udarima (videti sliku 4.1 levo). Desno je prikazana fotografija priključka 35 kV voda na zgradu, sa odvodnicima prenapona i 9 m dugačkim spustom od odvodnika do uzemljivača.

Radi lakšeg modelovanja dvosistemske nadzemni vod je modelovan monofaznom zamenskom šemom, jer je predpostavljeno da će prilikom udara u zaštitno uže ili vrh stuba, zbog velikog otpora uzemljenja, doći do preskoka na sve tri faze oba sistema, tako da se može smatrati da talas nailazi po jednom ekvivalentnom provodniku dostruko manje karakteristične impedanse. Zamenska šema sistema data je na slici 4.2.

Oznake na slici 4.2 imaju sledeće značenje:

S_1, S_2, S_3 -vrhovi stubova ispred zgrade postrojenja,

d_1, d_2, d_3 -dužine prvih raspona,

F -fazni provodnik,

Z -zaštitno uže,



Slika 4.1: Prilazni dalekovid 35 kV (levo) i priključak na zgradi sa odvodnicima prenapona (desno)

H_z -visina zaštitnog užeta,

H_F -visina faznog provodnika,

H_o -dužina zemljovoda od odvodnika do uzemljivača,

H_z -visina zaštitnog užeta,

$P1, P2$ -izvlačivi 35 kV prekidači u dalekovodnom i transformatorskom polju,

d_k -dužina kabla od priključka na zgradi do sabirnica,

d_t -dužina kabla od sabirnica do transformatora.

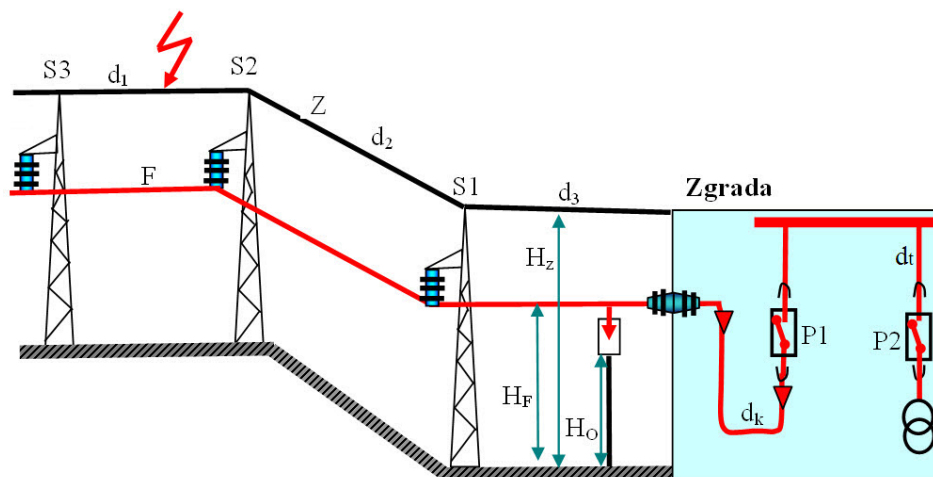
Na slici 4.3 dat je ekranski prikaz šeme iz programa GROM za slučaj atmosferskog pražnjenja u prvi raspon između prvog i drugog stuba ispred ulaza u transformatorsku stanicu.

Na slici 4.3 oznake imaju sledeće značenje:

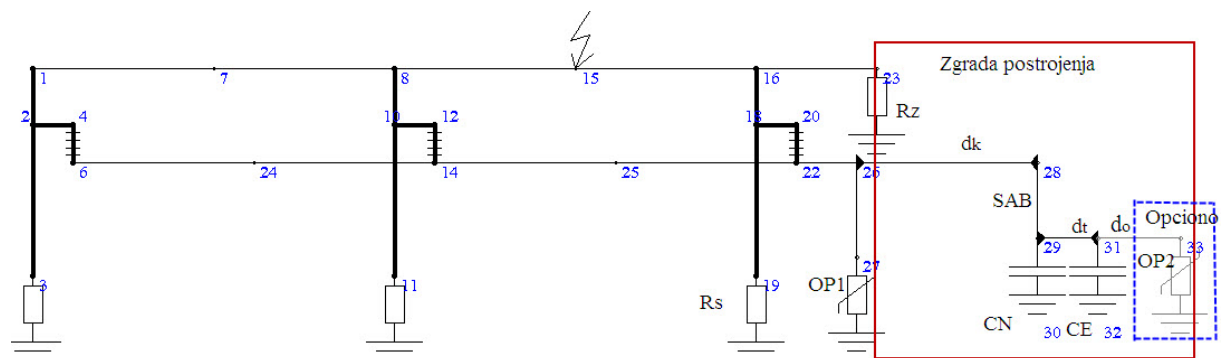
CN - ulazna kapacitivnost naponskog mernog transformatora,

CE -ulazna kapacitivnost namotaja 35 kV energetskog transformatora sopstvene potrošnje,

$OP1$ -odvodnik prenapona ispred ulaza u zgradu postrojenja,



Slika 4.2: Jednopolna zamenska šema nadzemnog priljučnog voda i kablovskih veza u zgradi



Slika 4.3: Ekranski prikaz šeme iz programa GROM

$OP2$ -odvodnik prenapona koji se kroz analizu priključuje uz transformator sopstvene potrošnje (analiza prenapona pokazuje da je ovaj odvodnik prenapona neophodan),

d_o -dužina veza od dodatnog odvodnika prenapona $OP2$ do energetskog transformatora CE ,

ZU - zaštitno uže, fiksirano za krov postrojenja i vezano zemljovodom za uzemljivač zgrade na brani,

R_z -otpornost rasprostiranja uzemljivača transformatorske stanice na brani. Ova otpornost nema uticaja na naprezanje izolacije aparata usled atmosferskih pražnjenja. Razlog je što je što su odvodnici prenapona i svi aparati u transformatorskoj stanici, kao i kućište transformatora, vezani za isti uzemljivač. Podizanje potencijala uzemljivača u odnosu na udaljenu tačku referentnog potencijala nema uticaja na naprezanje izolacije.

R_s -otpornost uzemljenja stubova koja je usvojena da je 15Ω ,

SAB -sabirnice postrojenja.

Na visinu prenapona najveći uticaj imaju dužina spusta od odvodnika do uzemlji-vača H_o , zatim ukupna dužina kablova od priključka na zgradi (odnosno od odvodnika prenapona) do transformatora, kada su prekidači $P1$ i $P2$ zatvoreni ($d = d_k + d_t$) i otpornost uzemljenja stubova. Kod statističkog proračuna uticaj ima visina najvišeg provodnika (u ovom slučaju zaštitnog užeta), kao i godišnja gustina atmosferskih pražnjenja u ravnu površinu zemlje n_G . Kod determinističkog proračuna visina provodnika i dužina raspona imaju veoma mali uticaj na rezultate proračuna, ali zato najvažniji uticaj imaju izabrani slučajni parametri atmosferskog pražnjenja (amplituda struje i strmina čela strujnog talasa), kao i mesto udara na vodu.

U proračunu su korišćeni najvažniji parametri mreže koji su dati u tabeli 4.1. Za

Tabela 4.1: Najvažniji parametri analizirane mreže

H_o (m)	9
d_k (m)	30
d_t (m)	15
d_o (m)	3
$R_s \Omega$	15

mrežu 35 kV koja radi sa izolovanom neutralnom tačkom kod koje se zemljospoj jedne faze ne isključuje automatski, odvodnik prenapona se bira tako da može trajno da podnese složeni napon u slučaju zemljospoja.

Odvodnik prenapona je izabran na osnovu sledećeg kriterijuma:

$$U_r = \frac{U_m \cdot K_s}{K_f} \quad (4.1)$$

gde je:

U_r -naznačeni napon odvodnika prenapona,

U_m -maksimalni trajno dozvoljeni napon mreže, $U_m = 38$ kV za sistem nazivnog napona 35 kV,

K_s -koeficijent sigurnosti, koji za srednjenaponske mreže ima vrednost 1.1, a za mreže 110 kV i više 1.05.

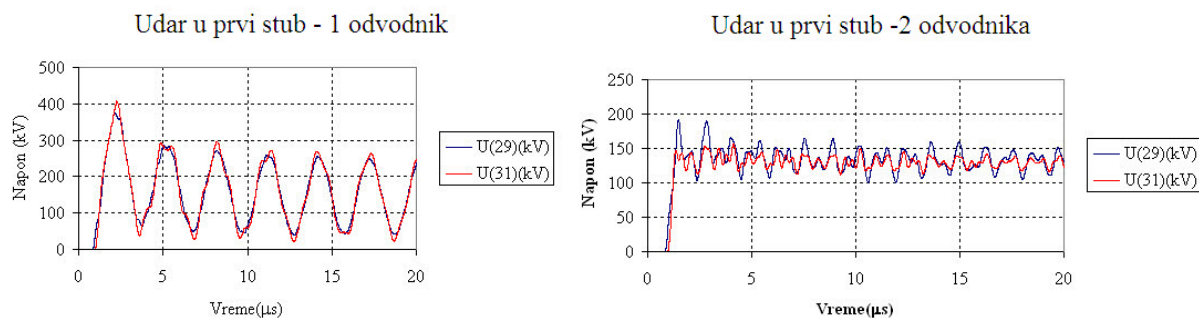
K_f -faktor proizvođača, za odvodnike firme ABB ima vrednost 0.8.

Kada se izračuna, minimalna vrednost naznačenog napona odvodnika je 52.25 kV. Zato je izabran odvodnik prenapona čiji je naznačeni napon 54 kV.

4.2 Deterministički proračun

U ovom primeru koji je rađen determinističkom metodom, za najkritičnije mesto pražnjenja je izabran stub S1 na slici 4.2, odnosno čvor 16 u šemi na slici 4.3. Amplituda struje pražnjenja je usvojena da bude 121 kA, a strmina struje 43 kA/ μ s. To su veličine čije je premašenje moguće sa verovatnoćom od 2% prema usvojenoj statističkoj raspodeli amplituda i struja atmosferskih pražnjenja prema [42], [43]. U klasičnom proračunu je kriterijum za ispravno odabrani podnosivi napon izolacije, da prenaponi ne pređu podnosivi udarni atmosferski napon, koji za mrežu 35 kV iznosi 170 kV, koliko iznosi ispitni napon za izolaciju novog uređaja. Zbog mogućeg slabljenja izolacije usled starenja, uslova eksploatacije i drugih faktora, uvodi se koeficijent sigurnosti koji se usvaja $K_s = 1.15$ prema [12] za staru izolaciju. Kriterijum proboja za ostarelu izolacija je da maksimalni izračunati prenapon u determinističkom proračunu pređe vrednost $170/1.15=148$ kV.

Rezultati determinističkog proračuna u uslovima pražnjenja u prvi stub ispred postrojenja (čvor 16) prikazani su u obliku talasnog oblika prelaznog napona na energetskom transformatoru U(31) i na mernom naponskom transformatoru U(29) na slici 4.4.



Slika 4.4: Talasni oblik napona na naponskom mernom transformatoru i energetskom transformatoru kada se primenjuje 1 set odvodnika (levo) i dva seta odvodnika (desno)

U tabeli 4.2 prikazani su rezultati determinističke analize prenapona kada se primenjuje samo 1 set odvodnika prenapona i kada se primenjuju 2 seta odvodnika prenapona.

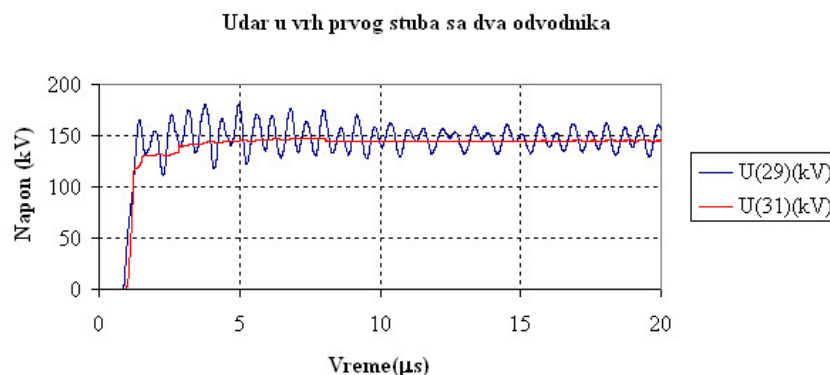
Tabela 4.2: Rezultati determinističke analize prenapona kada se primenjuje samo 1 set i kada se primenjuju 2 seta odvodnika prenapona

Jedan set odvodnika		Dva seta odvodnika	
U _{max} (29)(kV)	U _{max} (31)(kV)	U _{max} (29)(kV)	U _{max} (31)(kV)
375.9	407.3	191.5	155.8

Može se uočiti da je energetski transformator zaštićen korišćenjem odvodnika neposredno uz transformator (bez uvažavanja sigurnosnog koeficijenta), dok je naponski

transformator prema kriterijumima za deterministički prilaz koordinacije izolacije ugrožen.

Proračun je ponovljen kada je odvodnik prenapona postavljen direktno na transformator, paralelno prolaznom izolatoru. U tom slučaju je dužina veze $d_o = 0$. Vremenski dijagram napona u ovom slučaju dat je na slici 4.5.



Slika 4.5: Talasni oblik napona kada je odvodnik postavljen direktno na transformator

Vrednosti maksimalnog napona su dati u tabeli 4.3.

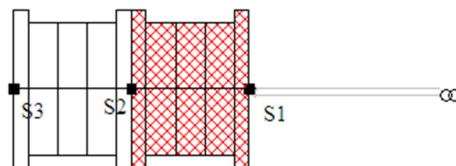
Tabela 4.3: Rezultati determinističke analize prenapona kada se koriste 2 seta odvodnika od kojih je jedan fiksiran na samom energetsom transformatoru

Dva seta odvodnika	
$U_{max}(29)(kV)$	$U_{max}(31)(kV)$
180.4	147.8

Može uočiti da je u ovom slučaju energetska transformator zaštićen, čak kada je kriterijum zaštite uvažavanje koeficijenta sigurnosti K_s , odnosno kada je granični dozvoljeni napon 148 kV.

4.3 Statistički proračun

Proračun je ponovljen statističkom metodom za raspone d_2 i d_3 koji su jako izloženi udarima zbog reljefa. Prvi raspon je ekraniran branom i građevinskom konstrukcijom. Proračuni su rađeni kada je mesto udara varirano duž drugog i trećeg raspona ispred postrojenja, na svakom rasponu sa po 5 lokacija udara, što znači da je mesto udara varirano na 10 lokacija. Skica atraktivne zone pojedinih lokacija i segmenti na kojima je variranje rađeno prikazani su na slici 4.6.



Slika 4.6: Atraktivne zone voda na 2 raspona

Šrafirana površina označava da se radilo o analizi udara u prvi raspon. Svaki od pravougaonika označava atraktivnu zonu segmenta voda. $S1$, $S2$ i $S3$ su stubovi računati od najbližeg postrojenju. Usvojena je godišnja gustina udara od $n_G = 5.41$ udar/god,km².

Usvojen je statistički kriterijum za procenu ugroženosti izolacije opreme u postrojenju dat u tabeli 4.4. Rezultati se označavaju se MTBF od engleskog Mean Time Between Failures, odnosno srednje vreme između kvarova.

Tabela 4.4: Kriterijum ugroženosti izolacije kod statističkog proračuna

Naziv elementa	MTBF
Veliki energerski transformator	600
Manji energetski transformator	400
Merni transformatori	200

Rezultati statističkog proračuna su dati u tabeli 4.5. Rezultati predstavljaju vreme između dva kvara izolacije energetskog transformatora i naponskog transformatora, izraženo u godinama, kada je primenjen 1 ili 2 seta odvodnika prenapona.

Tabela 4.5: Vreme između dva kvara izolacije energetskog transformatora i naponskog transformatora kada je primenjen jedan ili dva odvodnika prenapona

Jedan set odvodnika		Dva seta odvodnika	
MTBF(29)(god)	MTBF(31)(god))	MTBF(29)(god)	MTBF(31) (god)
12.3	22.4	24četvoro6	∞

Može se uočiti da kada se primenjuju dva seta odvodnika, energetki transformator u čvoru 31 je potpuno zaštićen, a naponski transformator takođe zadovoljava kriterijum iz tabele 4.4. Ukoliko se zadrži postojeće rešenje sa 1 setom odvodnika ispred postrojenja, očekivano vreme između kvarova izolacije je MTBF=12.3 god, što je neprihvatljivo.

Uzroci sadašnje loše prenaponske zaštite postrojenja su sledeći:

- Energetski transformator kao najvažniji objekat koji treba zaštititi, mora biti zaštićen odvodnikom prenapona što je bliže moguće priključcima transformatora, a

najbolje je postavljanje na samu konstrukciju transformatora paralelno izolaciji. U zatečenom stanju transformator je nezaštićen.

- Velika dužina zemljovoda između donjeg priključka odvodnika, odnosno konzole na kojoj stoje odvodnici ispod zateznih izolatora na zidu zgrade i priključka za uzemljivač.
- Zbog izolovanog zvezdišta i struje zemljospoja koja se ne isključuje, već samo signalizira, mora se odabrati visok naznačeni napon odvodnika prenapona, što znači da je njegov zaštitni nivo za oko 45 % viši nego kada bi neutralna tačka bila direktno uzemljena.

Zahvalnica

Zahvaljujemo kompaniju Elnos Banja Luka za angažovanju za rešavanja problema prenapona u HE Bočac. Istraživanje je rađeno 2015 god.

Primer 5

Prenaponi pri intermitentnom zemljospoju

Koautori: Mileta Žarković, Mladen Banjanin

5.1 Uvodna razmatranja

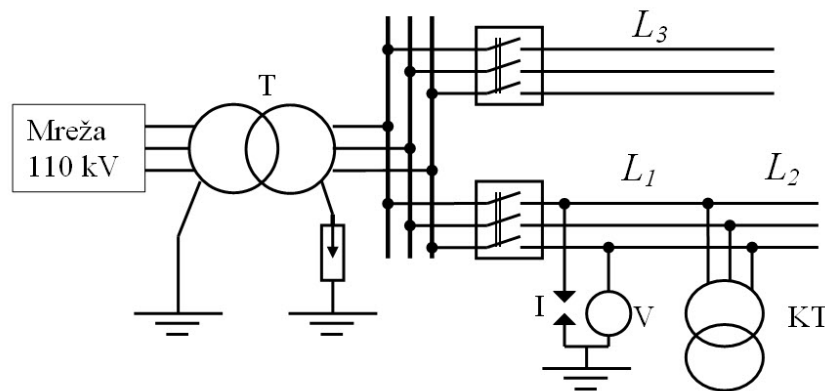
Sistem 35 kV u koji je uključena analizirana hidroelektrana je razgranat, sa mešovitim kablovskim i nadzemnim mrežama i radi sa izolovanom neutralnom tačkom transformatora. Zbog većeg broja kvarova izolacije izvršena je analiza da li je mogući uzrok proboja izolacije prouzrokovan prenaponima usled zemljospoja sa intermitentnim gorenjem luka. Planirano je istraživanje koje obuhvata eksperimentalni rad sa veštački izazvanim zemljospojem i računске simulacije.

5.2 Opis eksperimenata

Istraživanja prenapona usled kontrolisanih zemljospojeva u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom su urađena eksperimentalno u mreži 35 kV i numeričkim simulacijama programom EMTP-atp. Izvršeno je upoređivanje rezultata numeričkih simulacija i snimaka sa eksperimentalnog istraživanja i procenjene su najviše vrednosti prenapona koje se mogu pojaviti u mreži.

Na slici 5.1 prikazana je trofazna šema napajanja postrojenja 35 kV i dva voda sa označenim iskrištem za simulaciju zemljospoja i mernim mestom na fazi koja nije u

zemljospoju. Na šemi je označen i transformator sa malim potrošačem, koji je isključen u toku eksperimenata, ali na kablovskom ogranku za transformator je došlo do proboja kablovske završnice pri izvođenju eksperimenata.



Slika 5.1: Analizirani sistem sa označenim najvažnijim elementima

Oznake na slici 5.1 imaju sledeć značenje:

T -energetski transformator 110/35 kV,

I -iskrište za simulaciju intermitentnog prenapona,

V -merenje napona pomoću kapacitivnog delila napona,

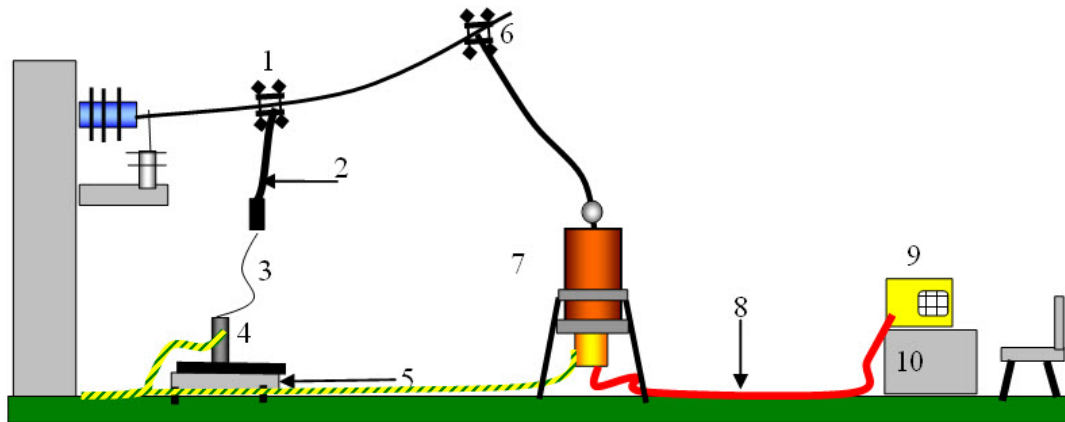
KT -transformator 35/0.4 kV za mali potrošač, koji je bio isključen za vreme eksperimenata,

L_1, L_2, L_3 -nadzemni vodovi dužina 0.9 km, 6 km i 12.4 km.

Skica razmeštaja merne opreme za eksperimente sa veštački iniciranim zemljospojem prikazana je na slici 5.2 u bočnom prikazu.

Oznake na slici 5.2 imaju sledeće značenje:

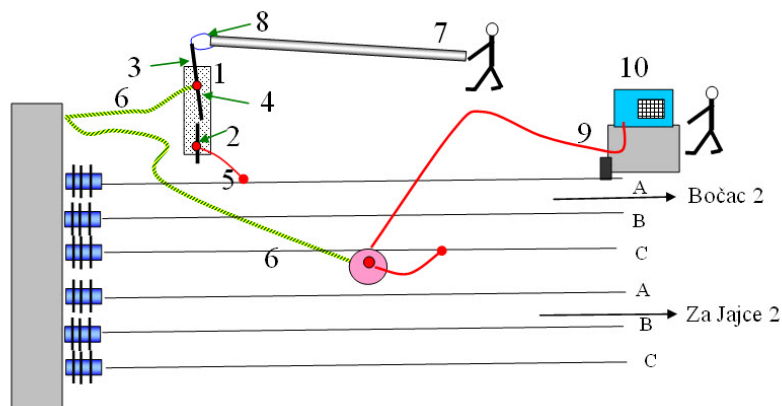
1. Stezaljke za priključak veze faznog provodnika za iskrište,
2. Veza od faznog provodnika velikog preseka,
3. Veza tankog provodnika od kraja provodnika velikog preseka do iskrišta. U slučaju uspostavljanja dvopolnog kratkog spoja uloga tankog provodnika je da izgori i na taj način deluje kao osigurač,
4. Iskrište,



Slika 5.2: Skica razmeštaja merne opreme na terenu - bočni pogled

5. Postolje za iskrište,
6. Stezaljke za priključak veze od faznog provodnika do delila napona,
7. Delilo napona odnosa deljenja 107100:1,
8. Koaksijalni kabl do osciloskopa,
9. Osciloskop,
10. Izolacioni sto.

Razmeštaj merne opreme za eksperimente sa veštački iniciranim zemljospojem prikazana je na slici 5.3 iz ptičje perspektive.



Slika 5.3: Skica razmeštaja merne opreme na terenu - pogled odozgo

Oznake na slici 5.3 imaju sledeće značenje:

- 1 -Drveno postolje,
- 2 -dva obrtna izolatora,
- 3 -bakarne šipke koje čine elektrode iskrište,
- 4 -zavrtnji za pritezanje šipki iskrišta,
- 5 -provodnik za dovođenje visokog napona,
- 6- provodnik za uzemljenje,
- 7 -teleskopska izolaciona šipka dužine 5 m koja se sastoji od 4 segmenta za upravljanje obrtnim iskrištem,
- 8- omča od najlona za spajanje izolacione šipke i šipke iskrišta, koja omogućava slobodnu rotaciju iskrišta pri povlačenju izolacione šipke,
- 9 -sto za smeštaj opreme,
- 10- osciloskop.

Na slici 5.4 prikazana je fotografija eksperimentalne opreme sa iskrištem za upravljanje električnim lukom preko izolacione šipke za pomeranje iskrišta.



Slika 5.4: Fotografija eksperimentalne opreme sa iskrištem za upravljanje električnim lukom

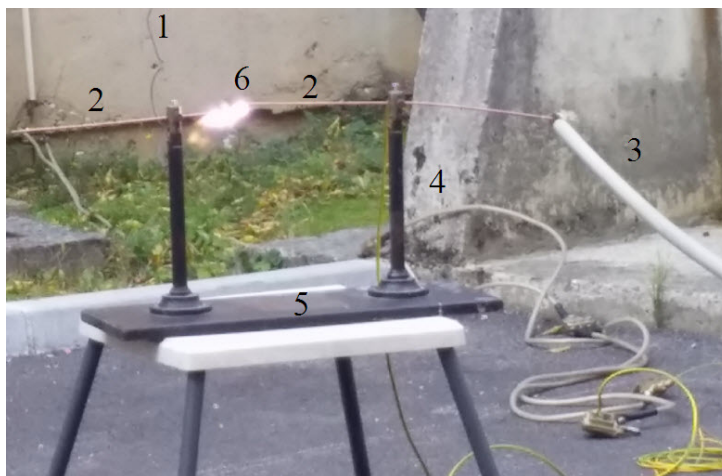
Oznake na slici 5.4 imaju sledeće značenje:

DP -debeli provodnik koji se završava namotanim klupkom,

K - namotano klupko debelog provodnika,

- TP - tanak provodnik koji se slabo uočava na fotografiji,
 M - provodnik za dovođenje napona za merenje napona do delila,
 D - kapacitivno delila napona,
 IS -iskrište za uspostavljanje intermitentnog luka.

Na slici 5.5 prikazan je detalj uspostavljenog električnog luka na iskrištu.

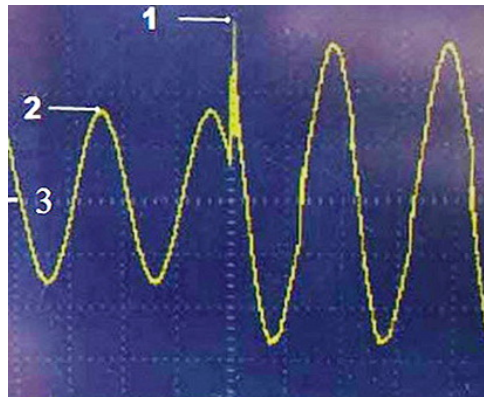


Slika 5.5: Eelektrični luk na iskrištu

Na slici 5.5 oznake imaju sledeće značenje:

1. -Visokonaponski provodnik,
2. -elektrode iskrišta,
3. -izolaciona šipka za razmicanje iskrišta,
4. -obrotni izolatori,
5. -drveno postolje,
6. -električni luk između elektroda iskrišta.

Izvršeno je nekoliko eksperimenata pri kojima je zemljospoj uspostavljan preko električnog luka čija je dužina kontrolisana pomoću dugačke izolacione motke kojom je vršena promena razmaka između elektroda iskrišta. Eksperimenti su rađeni za slučaj kada je vod 35 kV dužine $L_1 + L_2 = 6.9$ km uključen, kada je drugi vod dužine $L_3 = 12.4$ km uključen i kada su oba voda uključena. Snimci su registrovani samo na jednoj fazi na osciloskopu



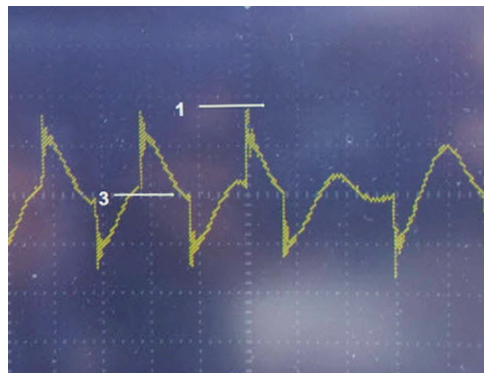
Slika 5.6: Napon pri uspostavljanju zemljospoja

jer se nije raspolagalo sa 3 delila napona. Na slici 5.6 prikazan je napon pri uspostavljanju zemljospoja kada je uključen vod od 7 km.

Na slici 5.6 Oznake imaju sledeće značenje:

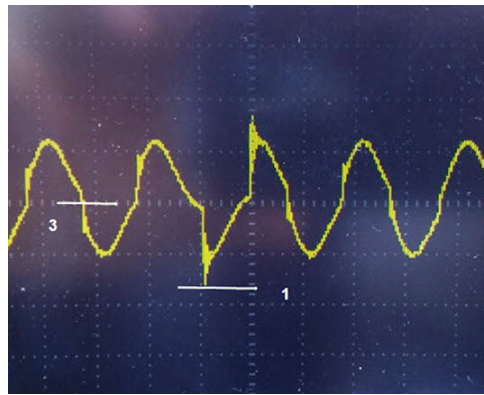
1. - temena vrednost prenapona,
2. - temena vrednost radnog napona pre kvara,
3. - nulti nivo napona (sa kranje leve strane ekrana strelica označava referentni nivo napona za kanal 1.

Na slici 5.7 prikazan je napon pri zemljospoju sa lukom kada je uključen samo vod dugačak $L_3 = 12.4$ km.



Slika 5.7: Napon pri zemljospoju sa lukom sa više paljenja i gašenja luka kada je uključen samo vod dugačak 12.4 km

Na slici 5.8 prikazan je napon pri zemljospoju sa lukom kada su uključeni svi vodovi ukupne dužine $L_1 + L_2 + L_3 = 19.3$ km.



Slika 5.8: Napon pri zemljospoju sa lukom kada su uključeni svi vodovi ukupne dužine 19.3 km

Izmerene temene vrednosti prenapona u kV i u relativnim jedinicama u odnosu na trajnu vrednost radnog napona u toku merenja date su u tabeli 5.1. Uočeno je da je trajni radni napon u toku odvijanja eksperimenta viši od deklarisanog trajnog radnog napona i iznosio je 39 kV efektivnog složenog napona, što je 2.63 % više od trajnog radnog napona za 35 kV mrežu koji iznosi 38 kV. Temena fazna vrednost stacionarnog napona koja odgovara naponu od 39 kV je 31.8 kV.

Tabela 5.1: Brojčani rezultati registracije koji odgovaraju karakterističnim snimcima

Br.	U_{max} (kV̂)	U_f (kV̂)	Koef. prenapona rj	Slika
1	72.8	31.8	2.3	5.6
3	96.4	31.8	3.0	5.7
4	91.0	31.8	2.9	5.8

U tabeli 5.1 oznaka kV̂ predstavlja temena vrednost izmerenog napona izraženog u kV. Samo sa slike 5.6 je izmerena temena vrednost radnog napona pre kvara U_f , dok u ostalim slučajevima nije bilo moguće izmeriti stacionarni radni napon. U tim slučajevima tranzijentni napon je postojao u toku celog perioda registracije. Zato je usvojen izmereni radni napon iz slučaja 1.

Izvršen je relativno mali broj eksperimenata zbog opasnih prenapona koji se pri eksperimentima pojavljuju, a u radu su prikazani najizraženiji slučajevi prenapona. Međutim, može se očekivati da se u praksi pojave još viši prenaponi u određenim okolnostima. Visina prenapona zavisi od razmaka između faznog provodnika i uzemljenog dela prema kome se pojavljuje električni luk, tako da se može pojaviti intermitentno gorenje luka, kao i od struja zemljospoja koja zavisi od kapacitivnosti svih uključenih vodova u sistemu. Posebno značajan efekat ima trenutak paljenja luka u odnosu na vrednost napona izvora u tom trenutku. Eksperimenti su rađeni sa razmacima elektroda iskrišta neposredno ispod graničnog rastojanja pri kome se luk ne može uspostaviti, da bi se dobili što viši prena-

poni. Pošto su svi ovi faktori slučajni, ne može se unapred predvideti koliki se maksimalni prenaponi mogu pojaviti u realnoj mreži.

Nakon završetka eksperimenata je utvrđeno da je došlo do oštećenja kablovske završnice kod malog potrošča KT sa slike 5.1. Kablovska završnica je bila oštećena ponovljenim naprezanjima usled intermitentnih prenapona kod višestrukog paljenja i gašenja luka, pa je kasnije pri radnom naponu probila.

Na slici 5.9 prikazan je deo probijene kablovske završnice nakon skidanja sa kabla.

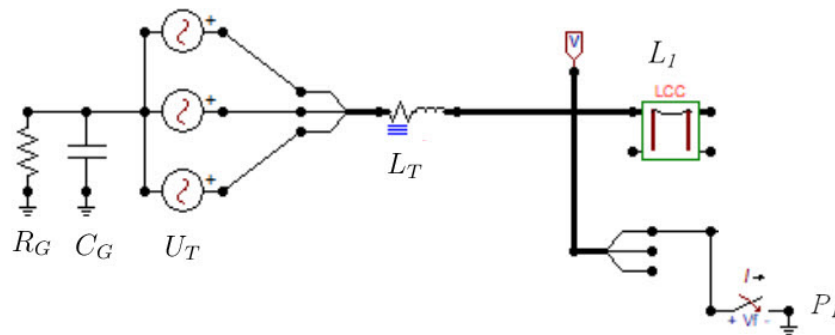


Slika 5.9: Probijena kablovska završnica

5.3 Numeričke simulacije prenapona pri zemljospoju sa lukom

Numerički proračuni prelaznih prenapona u 35 kV mreži sa izolovanim neutralnim vodom izvršeni su pomoću EMTP-atp softvera.

Napravljen je u programskom jeziku MODELS model prekidača koji omogućava paljenje električnog luka između elektroda kada napon prevaziđe određeni nivo, a gasi prilikom prolaska struje luka kroz nulu pri uslovima da brzina opadanja struje pre prirodnog prolaska kroz nulu ne prelazi određeni nivo, u suprotnom se čeka sledeća nula struje. Ovo je važno pri pojavi visokofrekventnih struja pri ponovnim paljenjima luka. Na slici 5.10 prikazana je zamenska šema 35 kV sistema u kome je modelovan zemljospoj u programu ATPdraw koji je redprocesor EMTP-atp.



Slika 5.10: Ekranski prikaz zamenska šema sistema 35 kV u kojoj ce se vršiti proračuni prenapona usled zemljospoja u programu ATPdraw

Oznake na slici 5.10 oznake imaju sledeće značenje:

C_G -parazitna kapacitivnost izolovane neutralne tacke transformatora u odnosu na zemlju, 100 pF,

R_G -parazitna otpornost izolovane neutralne tačke transformatora u odnosu na zemlju, uključujući impedanse drugih elemenata povezanih između faznih provodnika i zemlje, usvojeno 300 k Ω ,

U_T - ekvivalentne elektromotorna sila svedena na 35 kV stranu po fazama, koja predstavlja Tevenenov model mreže,

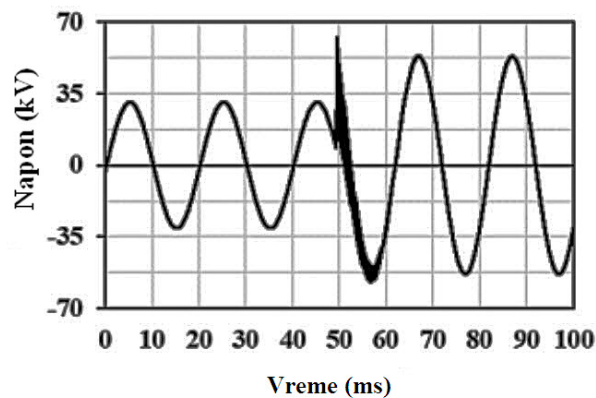
L_T - ekvivalentna induktivnost i otpornost napojnog sistema koja je dobijena iz snage kratkog spoja na strani 35 kV sistema.

L_1 - analizirani nadzemni vod sa uključenim modelom frekvencijski zavisnog izobličenja prema modela JMarti u programu EMTP-atp.

E - idealni prekidač sa kontrolisanim trenutcima otvaranja i zatvaranja kontakata, koji služi za simulaciju uspostavljanja i prekidanje luka na mestu zemljospoja, na bazi usvojenih kriterijuma,

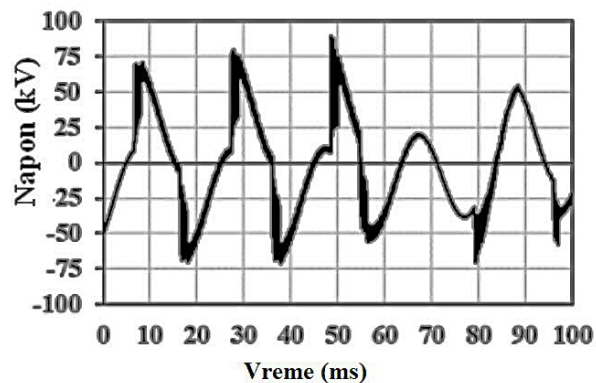
V - voltmetar za registraciju napona.

Na slici 5.11 prikazani su prenaponi pri jednom paljenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici 5.6 za uključenje voda dužine 6.9 km.



Slika 5.11: Izračunati prenaponi pri jednom paljenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici 5.6 za vod dužine 6.9 km

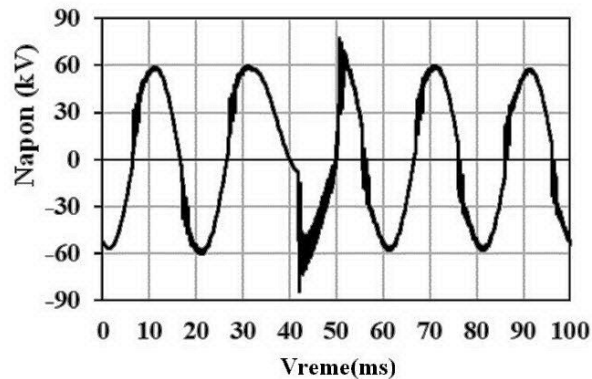
Na slici 5.12 prikazani su prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici 5.7, za vod dužine 12.4 km.



Slika 5.12: Prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka što odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici 5.7

Na slici 5.13 prikazani su prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka, što

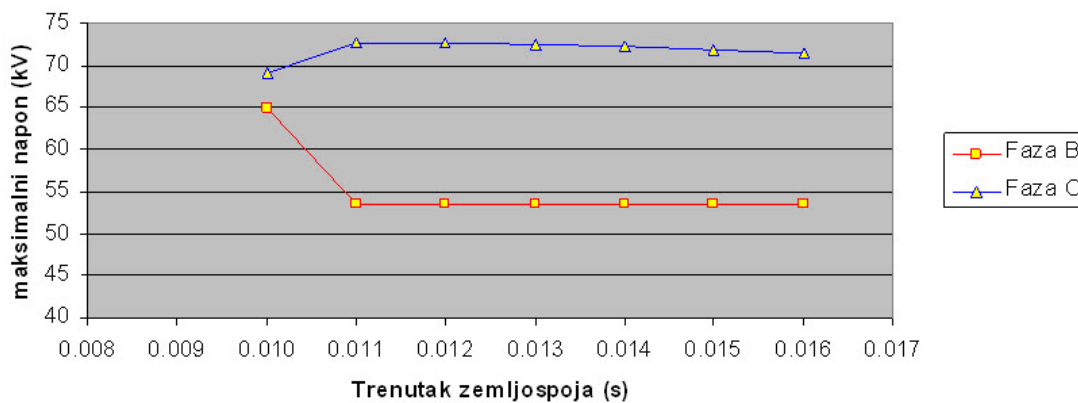
odgovara eksperimentalnim rezultatima prema slici 5.8, za ukupnu dužinu svih uključenih vodova od 19.3 km.



Slika 5.13: Izračunati prenaponi pri višestrukom paljenju i gašenju luka što odgovara eksperimentalni rezultatima prema slici 5.8

5.4 Maksimalni prenapon pri uspostavljanju prenapona

Analiziran je slučaj uspostavljanja prenapona u mreži sa vodom dužine 6.9 km, prema uslovima u kojima je rađen eksperiment sa dobijenim rezultatima prema slici 5.6, odnosno rezultati proračuna na slici 5.11. Za taj slučaj variran je nastanak zemljospoja u fazi A i izračunati prenaponi na fazama B i C dati su na slici 5.14.



Slika 5.14: Promena visine prenapona u funkciji trenutka uspostavljanja luka

Na osnovu izvršenih proračuna se vidi da postoji trenutak kada se pojavljuju maksimalni prenaponi od 72.7 kV na fazi C, a pri tome na fazi B se uspostavlja niži prenaponi za isti trenutak paljenja luka.

5.5 Zaključci

Na osnovu merenja i proračuna prenapona pri zemljospoju se mogu izvesti sledeći zaključci:

- Na osnovu intenziteta električnog luka se može zaključiti da struja zemljospoja nije velika i da se električni luk lako gasi ukoliko je samo vod od 6.9 km uključen. U slučaju kada su oba dalekovoda 35 kV uključena, električni luk usled zemljospoja se teže gasi.
- Ustanovljeno je da se pojavljuju značajni tranzijentni prenaponi prilikom uspostavljanja zemljospoja. U slučaju kada je manja struja zemljospoja, pri određenim okolnostima (malo rastojanje između faznog provodnika i uzemljenog objekta na koji se događa preskok), moguća je pojava intermitentnog gorenja luka pri kome se uzastopce događaju paljenja i gašenja električnog luka.
- Primenom programa za proračun prenapona je dokazano da su talasni oblici izmerenih prenapona posledica intermitentnog gorenja luka, što može biti izuzetno opasno za izolaciju u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom transformatora.

Na kraju se može zaključiti da postoje sledeći načini za ublažavanje problema rada mreže sa izolovanom neutralnom tačkom:

- Najskuplje i teško za realizaciju je rešenje sa ograničenjem struje zemljospoja preko male impedanse na relativno malu vrednost. Najčešće se u našoj zemlji bira da struja zemljospoja bude ograničena na 300 A. Ova struja se isključuje posle najviše 3 s.
- Smanjenje broja kvarova se može postići isključivanje voda u kvaru posle nekog vremenskog intervala, na primer 2 sata.
- Potrebno je povećati izolacioni nivo komponenti koje se najčešće kvare (na primer kablovske glave).
- Odvodnike prenapona treba izabrati sa velikom energetsom apsorpcionom moći, na primer klase 4 rasterećenja vodova. Odvodnici prenapona ne mogu da ograničavaju tranzijentne prenapone pri zemljospoju, jer im je preostali napon ponekad viši od prenapona koji se pojavljuju, ali ukoliko su tranzijentni prenaponi prisutni u mreži u dužem vremenskom periodu, oni mogu da izazovu termičko preopterećenje odvodnika slabije energetske klase.

Zahvalnica

Zahvaljujemo kompaniju Elnos Banja Luka na angažovanju za rešavanja problema prenapona u HE Bočac. Istraživanje je rađeno 2015 god.

Primer 6

Prenaponska zaštita objekata niskog napona

6.1 Osnovni podaci o analiziranom objektu

Izvršena je analiza višespratnog stambenog objekta koji se napaja kablom do metalne kablovske priključne kutije (KPK).

Skica sistema prikazana je na slici 6.1. Dimenzije objekta su $a=15$ m, $b=15$ m i $h=16$ m.

Oznake na slici 6.1 imaju sledeće značenje:

G -atmosfersko pražnjenje,

H -gromobranska hvataljka, deo prihvatnog sistema,

SP -spusni provodnik gromobranskog sistema,

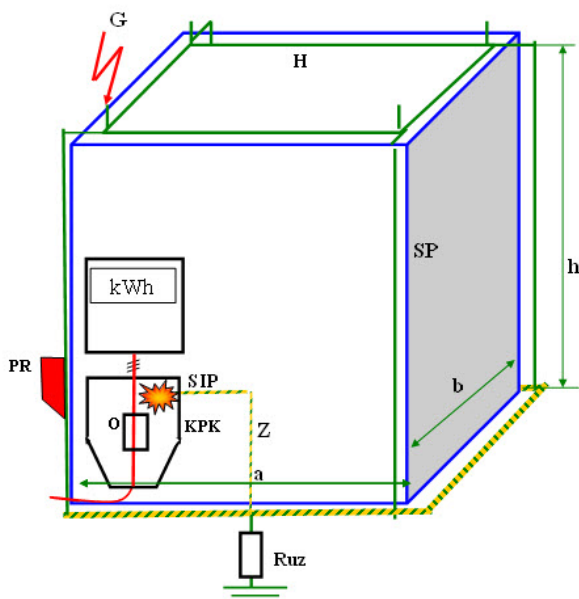
Z -provodnik za vezu sa uzemljivačem,

SIP -šina za izjednačenje potencijala,

KPK -kablovska priključna kutija, koja je izrađena od metala i povezana za uzemljivačem,

O -osigurači u kablovskoj priključnoj kutiji,

PR -prenaponski talas koji se prostire po provodnicima gromobranske instalacije.



Slika 6.1: Skica objekta u koji se dogodilo pražnjenje u gromobranski prihvatni sistem ($a=15$ m, $b=15$ m i $h=16$ m)

6.2 Proračun prenapona

Za proračun prenapona važno je poznavanje otpora rasprostiranja uzemljivača zgrade. Uzemljivač zgrade je u obliku kvadrata oko cele zgrade od pocinkovane čelične trake 25×4 mm u zemlji specifičnog otpora $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Za kvadratni uzemljivač od pljosnate trake na dubini od 0.5 m otpornost rasprostiranja se određuje pomoću izraza za određivanje ekvivalentnog prečnika kružnog prstena koji ima istu površinu kao kvadratni prsten prema izrazu 7.63 na strani 220. Kada se izračuna D_{ekv} , dobija se:

$$D_{ekv} = 1.13\sqrt{a \times b} \quad (6.1)$$

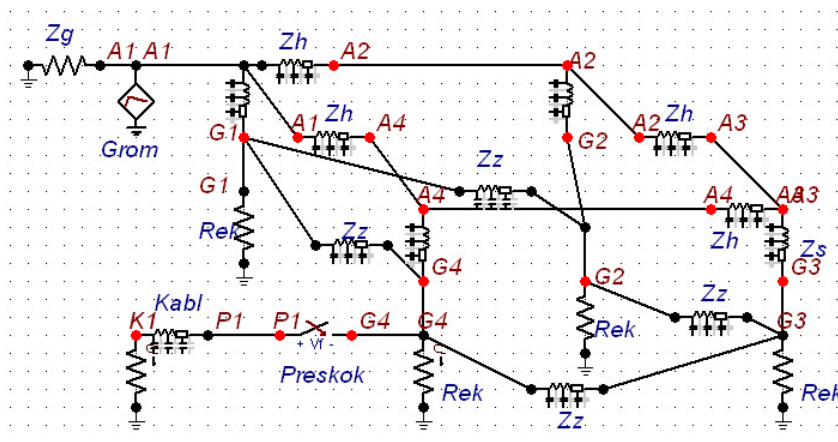
Kada se zamene vrednosti, dobija se $D_{ekv} = 16.95$ m, za $a = 15$ m i $b = 15$ m. Otpornost prstenastog uzemljivača je prema 7.64:

$$R_{uz} = \frac{2\rho}{3D_{ekv}} = 3.93 \Omega \quad (6.2)$$

Uzemljivačka traka u obliku kvadrata ekvivalentirama je sa 4 koncentrisana otpornika smeštena u uglovima kvadrata koji imaju otpornost $R_{ek} = R_{uz} \times 4$, odnosno $R_{ek} = 15.72 \Omega$.

Proračun prenapona rađen je programom EMTP-atp prema šemi datoj kao ekranski prikaz gromobranske instalacije. Na slici 6.2 prikazana je šema sa označenim provodnicima prihvatnog sistema karakteristične impedanse Z_h , spusnih provodnika označenih preko

karakteristične impedanse Z_S , kao i horizontalne trake u zemlji označene preko karakteristične impedanse Z_Z . Karakteristične impedanse elemenata instalacija imaju usvojene vrednosti $Z_h = Z_S = 250 \Omega$ i $Z_Z = 50 \Omega$. Oznaka za karakterističnu impedansu kanala groma je Z_g , a usvojena vrednost je $Z_g = 300 \Omega$. Karakteristična impedansa napojnog kabla $Z_K = 50 \Omega$.



Slika 6.2: Šema gromobranske instalacije stambenog objekta u obliku ekranskog prikaza iz programa

Izvršen je proračun prenapona u KPK ormanu između faznog provodnika za koji je pretpostavljeno da je na potencijalu referentne nule i napona na metalnom kućištu KPK. Proračun je urađen za struju atmosferskog pražnjenja 30 kA i vreme čela struje $1.2 \mu\text{s}$. Predpostavljeno je da je preskočni napon između faze i KPK 12 kV. Talasni oblik napona prikazan je na slici 6.3. Izabrani talasni oblik predstavlja prvu komponentu negativnog atmosferskog udara, koji se odlikuje manjom amplitudom struje, ali daleko kraćim čelom, koje se u laboratoriji i pri simulacijama predstavlja talasom $1.2/50 \mu\text{s}$, gde je prva brojka trajanje čela, a druga trajanje do pada na polovinu vrednosti amplitude.

U trenutku $0.22 \mu\text{s}$ dolazi do preskoka i naponi na faznom provodniku i KPK se izjednačavaju.

6.3 Ispitivanje osetljivosti rezultata na parametre šeme

6.3.1 Karakteristične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika

Karakteristične impedanse pocinkovanih gvozdениh traka postavljenih na nosačima na relativno malom rastojanju od površine krova ili zidova kod spusnih provodnika se usvajaju.



Slika 6.3: Talasni oblik napona na uzemljenom kućištu KPK -kriva $U(G4)$ i na žili kabla -kriva $U(P1)$

Urađeni su primeri kod kojih je varirana vrednost karakteristične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika u širokom dijapazonu da bi se utvrdio uticaj na maksimalni prenapon. Rezultati su prikazani u tabeli 6.1.

Tabela 6.1: Uticaj karakteristične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika na maksimalne prenapone

Karakteristična impedansa (Ω)	100	150	200	250	300
Maksimalni prenapon (kV)	99.8	101	100	101	101

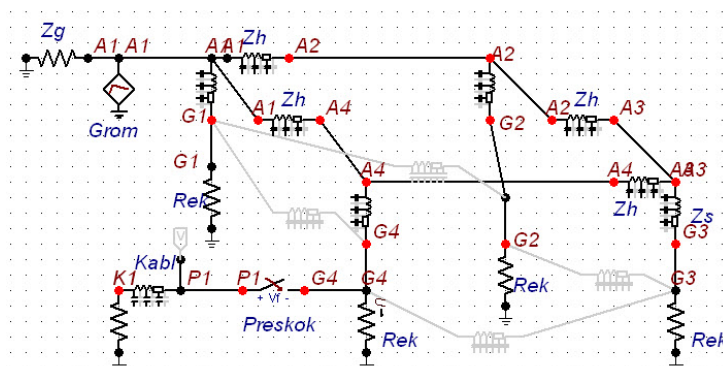
Na osnovu rezultata analize se može videti da karakteristične impedanse provodnika spoljašnje gromobranske instalacije nemaju uticaja na visinu prenapona. Mala kolebanja u rezultatima koja su oko 1% su beznačajna na zaključivanje o efikasnosti gromobranske zaštite.

Analiziran je uticaj horizontalne uzemljivačke trake u obliku kvadrata na visinu prenapona. Traka je isključena iz proračuna kao na slici 6.4, za razliku od slike 6.2 gde traka postoji.

Talasni oblik napona u ovom slučaju prikazan je na slici 6.5.

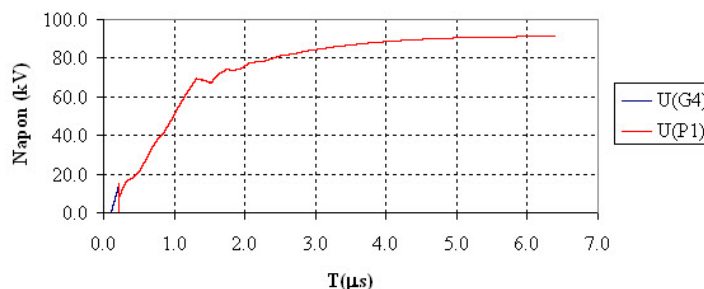
Može se uočiti značajna promena oblika talasa kada se ukine traka za povezivanje ekvivalentnih otpornika uzemljivača i dobijaju se niže vrednosti prenapona. Razlog promene je što uzemljivačka traka pomaže ravnomernijoj raspodeli struja između koncentrisanih uzemljivača, pa se brže uspostavlja napon na uzemljivačima koji bolje prati oblik struje samog atmosferskog pražnjenja.

Izvršena je analiza osetljivosti rezultata proračuna kada se varira karakteristična impedansa uzemljivačke trake Z_{uz} u širokom intervalu. Rezultati su dati u tabeli 6.2.



Slika 6.4: Šema gromobranske instalacije stambenog objekta bez uzemljivačke trake, u obliku ekranskog prikaza

Model bez traka za povezivanje Ruz



Slika 6.5: Talasni oblik napona na uzemljenom kućištu KPK -kriva $U(G4)$ i na žili kabla -kriva $U(P1)$ bez povezne trake za uzemljenje

Vidi se da je uticaj usvojene vrednosti arakteristične impedanse uzemljivačke trake mali na rezultate proračuna.

Tabela 6.2: Uticaj karakteristična impedansa uzemljivačke trake Z_{uz}

Karakteristična impedansa povezne trake Z_Z (Ω)	10	50	100	200	∞
Maksimalni prenaponi U_{max} (kV)	101.3	100	99.03	97	91.2

6.3.2 Uticaj karakteristične impedanse kanala groma

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, kao što je objašnjeno u poglavlju 7.1 na strani 191 (I deo). Pri proračunima se usvaja karakteristična impedansa kanala groma 300 do 400

Ω . Izvršeno je ispitivanje osetljivosti modela pražnjenja na maksimalni prenapon na KPK. Rezultati su dati za širi dijapazon vrednosti karakteristične impedanse od 200 do 500 Ω . Rezultati pokazuju porast prenapona sa povećanjem vrednosti karakteristične impedanse

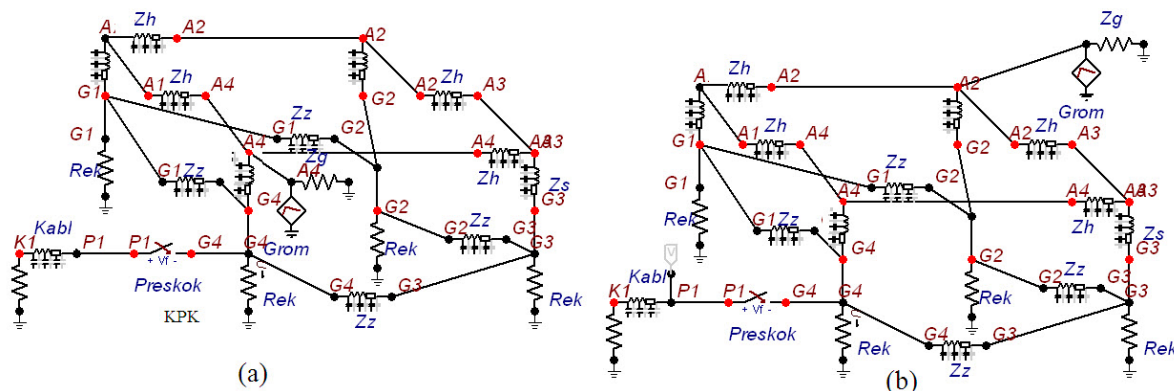
Tabela 6.3: Uticaj karakteristične impedanse kanala groma na maksimalan prenapon

Karakteristična impedansa kanala groma (Ω)	200	300	400	500
Maksimalni prenapon (kV)	98.6	99.2	99.9	100

od 1,4%. Stoga je potpuno opravdano usvojiti bilo koju vrednost karakteristične impedanse u opsegu od 300 do 400 Ω .

6.3.3 Uticaj mesta udara na prihvatnom sistemu

Izvršena je analiza kada je mesto udara atmosferskog pražnjenja najbliže KPK na kome se događa preskok (slika 6.6 (a)) i kada je na suprotnoj strani objekta 6.6 (b). Amplituda pražnjenja i svi ostali parametri su identični.

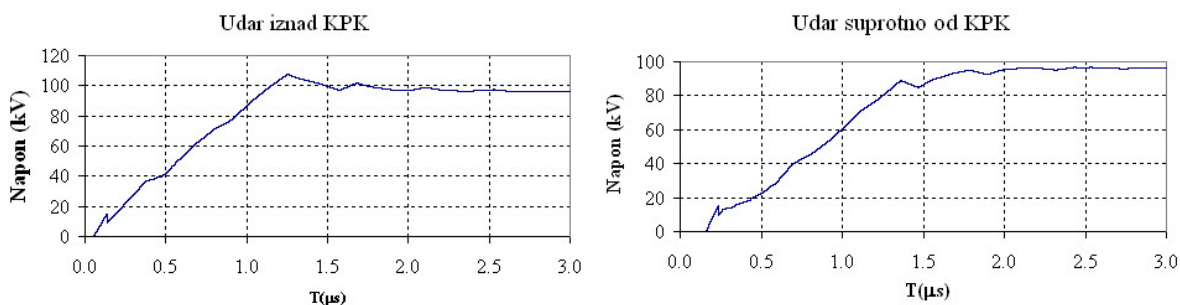


Slika 6.6: Ekranski prikaz zamenske šeme kada je udar iznad KPK (a) i na suprotnoj strani objekta (b)

Na slici 6.7 prikazani su talasni oblici napona kada je udar iznad KPK i kada je na suprotnoj strani.

U Tabeli 6.4 prikazani su maksimalni prenaponi na KPK pri amplitudi udara od 30 kA, kada se udar odvija u gromobranski prihvatni sistem direktno iznad KPK, kao i kada se udar odvija u prihvatni sistem na suprotnoj strani objekta. Prikazani su maksimalni naponi obeleženi kao U_{max} (kV) kao i u % u odnosu na najkritičnije mesto iznad KPK, što je obeleženo oznakom $U_{max}(\%)$.

Na osnovu dobijenih rezultata se može zaključiti da mesto udara utiče na visinu



Slika 6.7: talasni oblici napona kada je udar iznad KPK i kada je na suprotnoj strani

prenapona na KPK, ali da je najveća razlika samo 8.22% u odnosu na najkritičnije mesto udara. U slučaju objekata veće površine, ta razlika bi se povećavala.

Na osnovu izvršenih analiza se može zaključiti da sledeći parametri nemaju uticaj na rezultate proračuna:

- karakteristične impedanse prihvatnog gromobranskog sistema u obliku traka na krovu i spusnih provodnika do uzemljivača,
- karakteristične impedanse uzemljivačkih traka u zemlji između tačaka vezivanja za spusne provodnike ne utiču na rezultate,
- Karakteristična impedansa kanala groma.

Uzemljivačke trake koje se nalaze u zemlji se ne modeluju da odvede struju sa svoje površine, već za odvođenje struje u zemlju služe koncentrisani omski otpornici na krajevima traka na mestima ukrštanja sa spusnim provodnicima. Otpornost koncentrisanih omskih otpornika koji odvede struju u zemlju ima dominantan uticaj na visinu prenapona.

6.3.4 Redukovanje ekvivalentne šeme

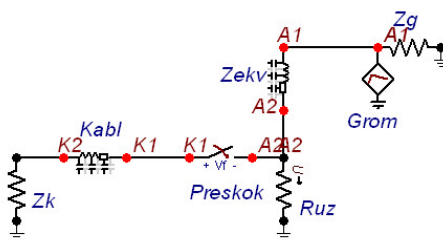
Radi pojednostavljenja šeme sa slike 6.6 levo, ispitivana je mogućnost redukovanja šeme na taj način što bi se svi spustevi zamenili jednim ekvivalentnim spustom, a svi horizontalni provodnici na krovu i uzemljenju zanemarili. U tom slučaju bi ekvivalentna

Tabela 6.4: Maksimalni prenaponi u različitim lokacijama udara

Mesto udara	Iznad KPK	Suprotno od KPK
U_{max} (kV)	107.6	98.75
U_{max} (%)	100.00%	91.78 %

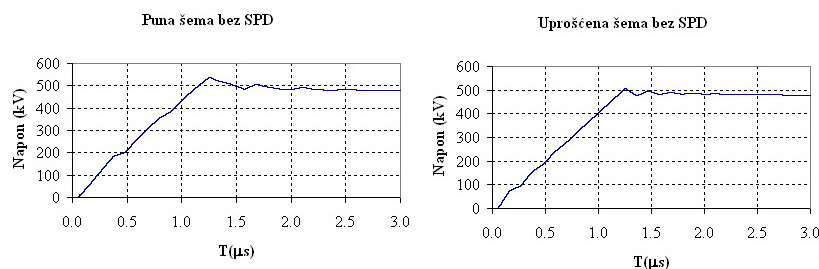
karakteristična impedansa spusnog provodnika bila $Z_{ekv} = Z_S/4$, odnosno $Z_{ekv} = 62.5 \Omega$. Otpornost rasprostiranja uzemljivača je $R_{uz} = R_{ek}/4$, odnosno $R_{uz} = 3.93 \Omega$. Upoređivanje će biti urađeno taladom amplitude 100 kA i oblikom talasa 1.2/50 μs .

Na slici 6.8 prikazana je uprošćena ekvivalentna šema sa jednim spustom karakteristične impedanse Z_{ekv} i jednim koncentrisanim otpornikom uzemljivača R_{uz}



Slika 6.8: Ekvivalentna šema sa jednim spustom i jednim koncentrisanim otpornikom uzemljivača

Na slici 6.9 prikazani su talasni oblici napona na otporniku uzemljenja pri primeni pune i redukovane šeme.



Slika 6.9: Upoređenje talasnih oblika primenom pune i redukovane šeme

Pri primeni pune šeme dobija se nešto viši napon nego kod redukovane šeme, jer u slučaju udara neposredno iznad KPK najveći deo struje protiče kroz najbliži spust, dok ostali spustevi odvede manji deo struje. Uvođenjem korekcionog faktora za struju se ovaj efekat može ispraviti.

U tabeli 6.5 izvršeno je upoređivanje maksimalnih napona pri primeni pune U_{maxP} i redukovane šeme U_{maxR} i izračunavanje korekcionog faktora za struju.

Tabela 6.5: Upoređivanje maksimalnih napona pri primeni pune i redukovane šeme i izračunavanje korekcionog faktora za struju

U_{maxP} (kV)	U_{maxR} (kV)	Faktor korekcije U_{maxP}/U_{maxR}
537.8	507.6	1.0595

Faktor korekcije zavisi od geometrije analiziranog objekta, kao i od oblika talasa.

Ukoliko se koristi strujni generator amplitude struje 106.9 kA umesto 100 kA, dobijaju se gotovo identične amplitude napona.

Ako bi se primenjivao talasni oblik struje 10/350 μ s, razlika u amplitudama bi bila daleko manja.

6.4 Statistički proračun

Za statistički proračun potrebna su 4 ulazna parametra:

1. prihvatna površina objekta A_D ,
2. godišnja gustina pražnjenja N_G po km^2 ,
3. kritične struje I_k koja izaziva kvar izolacije,
4. verovatnoća $P(I_k)$ prekoračenja kritične struje I_k atmosferskog pražnjenja.

6.4.1 Prihvatna površina objekta

Prema standardu [16] prihvatna površina objekta čija je osnova kvadrat dužine L i visina pravouglog paralelopipeda H se može izračunati primenom sledeće formule, koja je objašnjena detaljnije izrazom 2.7 na strani 24 (II deo):

$$A_D = L^2 + 12 \times H \times L + 9 \times \pi \times H^2 \quad (6.3)$$

Kada se izračuna, dobija se da je prihvatna površina objekta

$$A_D = 10343 \text{ m}^2 \text{ odnosno } A_D = 0.010343 \text{ km}^2$$

6.4.2 Godišnja gustina pražnjenja

Usvojena je godišnja gustina pražnjenja po km^2 od $N_G = 2.8$ udara/god, km^2 .

6.4.3 Kritična struja koja izaziva preskok

Analiziran je slučaj pražnjenja iznad KPK sa amplitudom struje pražnjenja koja je sistematski smanjivana od 15 kA na niže sa korakom 1 kA. Trajanje čela struje dato je izrazom $T = 0.154 \times I_m^{0.624}$. Trajanje čela struje je funkcija amplitude struje prema [13] objašnjeno je izrazom 8.15 na strani 313 (I deo). Na ovaj način se postiže da imamo samo jednu nezavisnu slučajnu promenljivu.

Primer dela tabele sa rezultatima maksimalnih napona na KPK dat je u tabeli 6.6. Proračun je rađen na taj način što je amplituda struje pražnjenja smanjivana za konstantan dekrement i za svaku struju je izračunavan maksimalni napon na KPK. Određena je minimalna struja za koju je napon iznad podnosivog napona, koji je usvojen da je 12 kV.

Tabela 6.6: Variranje struje od 10 kA na niže i određivanje minimalne amplitude struje koja izaziva proboj pri naponu od 12 kV

Br.	I_{max} (kA)	U_{max} (kV)
1	10	33.1
2	9	29.9
3	8	26.7
4	7	23.3
5	6	20.2
6	5	17.4
7	4	15.0
8	3	14.1
9	2	11.0
10	1	3.4

Sve struje koje su veće ili jednake $I_{min} = 3$ kA izazivaju preskok u KPK, jer je pri većim strujama napon na izolaciji viši od podnosivog napona izolacije $U_{iz} = 12$ kV.

6.5 Određivanje rizika preskoka u KPK

Na osnovu tabele 6.6 određena je amplituda struje od $I_{min} = 3$ kA kao najmanja struja koja izaziva preskok. Svi parametri potrebni za proračun verovatnoće premašenja struje I_{min} dati su u tabeli 6.7, uz usvojenu srednju amplitudu struje pražnjenja od $I_{sr} = 30$ kA i srednjeg kvadratnog rasipanja logaritma struje $\sigma_{\ln I} = 0.6$.

Verovatnoća pojave struje koja izaziva kvar izolacije je $P(Ig > I_{min}) \approx 1$. Ukupan očekivani broj kvarova transformatora je:

$$N_k = N_D \times P(Ig > I_{min}) = 0.01034 \times 1 = 0.01034 \text{ kvarova/god} \quad (6.4)$$

Tabela 6.7: Tabela sa proračunom verovatnoće pojave struje veće od minimalne struje koja izaziva proboj transformatora

I_g	I_{sr}	$\sigma_{\ln I}$	$X = \frac{\ln(I_g/I_{sr})}{\sqrt{2} \times \sigma_{\ln I}}$	$Z = \text{ERFC}(X)$	$P(I_g) = \frac{1-Z}{2}$
3	30	0.6	-2.72	-0.99988	0.99994

Očekivani broj godina bez kvara MTBF (Mean Time Between Failures) je:

$$MTBF = 96.7 \text{ god} \quad (6.5)$$

Događaj je redak jer je prihvatna površina objekta mala, ali praktično svaki udar u gromobransku instalaciju objekta bi izazvao preskok u KPK i kratak spoj, koji bi trebalo da prekine osigurač u KPK. Ukoliko bi KS bio ispred osigurača, tada bi on trebalo da bude isključen u transformatorskoj stanici.

6.6 Primena zaštitnih mera

6.6.1 Opis zaštitnih mera

Prema ugroženosti objekata od atmosferskih prenapona se vrši podela objekata na 4 nivoa zaštite (skraćeno LPL od engl. lightning protection level). Nivo zaštite se bira u zavisnosti od nivoa opasnosti po život i zdravlje, od ugroženosti od požara, oštećenja ili uništenja imovine, prekida javnih servisa (snabdevanje električnom energijom, prekid telekomunikacija, vodosnabdevanja itd), oštećenja električnih aparata, gubitak kulturnog nasleđa i druge štete. U zavisnosti od rizika i veličine štete bira se amplituda struje atmosferskog pražnjenja sa kojom se proverava efikasnost zaštite. Takođe se bira i način postavljanja spoljašnje gromobranske instalacije. U tabeli 6.8 date su amplitude udarne struje pražnjenja u funkciji klase LPS (engl. Lightning Protection System), kao i razmaci provodnika koji čine prihvatni sistem i spusne provodnike. Klasa LPS je jednaka nivou LPL (nivoi I, II, III i IV). Provera adekvatnosti prenaponskog zaštitnog uređaja (SPD od engl. Surge Protective Device) radi se atmosferskim udarnim talasom struje pozitivnog polariteta, oblika talasa $10/350 \mu s$, koji energetski značajno više opterećuje zaštitni sistem od struja prvih negativnih udara. Pozitivni udari su oko 10 puta ređi od negativnih.

Prenaponska zaštita u električnim instalacijama se sprovodi pomoću SPD uređaja. Objekat se deli na zone zaštite. Spoljašnja gromobranska zaštita štiti ljude i materijalna dobra, ali ne štiti električne i elektronske sisteme u zgradama koji su osetljivi na prolazne prenapone usled atmosferskog pražnjenja, koji mogu biti velike energije.

Danas se postavljaju visoki zahrevi za stalnu dostupnost i pouzdanost električnih

Tabela 6.8: Amplituda atmosferskog pražnjenja i dimenzionisanje spoljašnje gromobranske zaštite u obliku mreže u funkciji LPL (klasa LPS)

Klasa LPS	Amplituda struje (kA)	veličina okaca mreže (m×m)	Rastojanje spusteva (m)
I	200	5 × 5	10
II	150	10 × 10	10
III	100	15 × 15	15
IV	75	20 × 20	20

sistema u zgradama. Zaštita električnih i elektronskih sistema u zgradama i objektima od prenapona koji nastaju usled elektromagnetnog impulsa groma (LEMP-engl. - Lightning Electromagnetic Pulse) zasniva se na principu zona zaštite od udara groma (LPZ-Lightning Protection Zone). Prema ovom principu, zgrada ili struktura koja se štiti mora biti podeljena na unutrašnje zone zaštite od groma prema nivou opasnosti koju predstavlja LEMP. Ovo omogućava da se područja sa različitim nivoima rizika od LEMP prilagode po nivou zaštite elektronskog sistema. Ovim konceptom, odgovarajuće LPZ mogu biti definisane prema broju, tipu i osetljivosti elektronskih uređaja ili sistema. U zavisnosti od vrste opasnosti od atmosferskog pražnjenja, definisane su sledeće zone zaštite:

Spoljašnje zone

LPZ 0A - zone koje su ugrožene direktnim udarima groma, bilo od kompletne struje pražnjenja ili od delimičnih strujnih putanja koje se odvajaju od glavne strujne staze,

LPZ 0B -zona zaštićena od direktnih udara groma, ali ugrožena od celog elektromagnetnog polja atmosferskog pražnjenja,

Unutrašnje zone

LPZ 1 - udarne struju su ograničene odvođenjem dela struje u zemlju, smanjeno je elektromagnetno dejstvo tih struja.

LPZ 2 ... n -dodatno je smanjeno dejstvo udarnih struja i ostalih efekata usled dodatnog odvođea delova struja u zemlju.

Postavljaju se SPD uređaji na granicama zona, tako da se unutar zaštićenih zona smanjuju opasni efekti.

SPD uređaji se prema svojoj efikasnosti dele na klase:

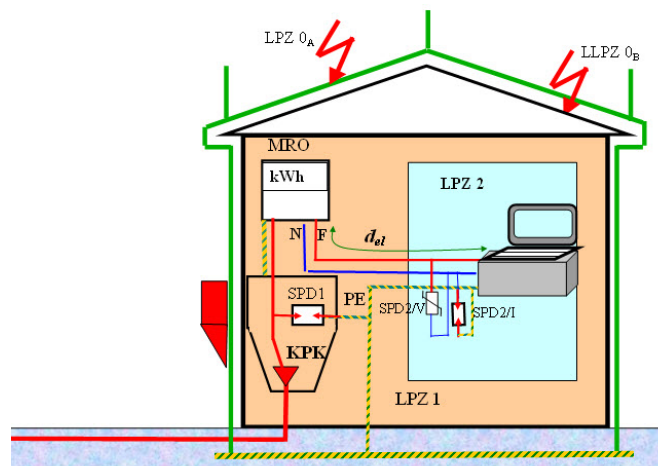
Klasa 1 -Sposobnost odvođenja velike energije (zovu se odvodnici struje), jer mogu da provedu struje čak i do 200 kA. Rade na dva principa:

- Koriste se iskrišta, tako da nakon reagovanja napon pada na nulu, a nastaje kratak spoj u mreži, koji se mora prekinuti. Ukoliko ne gasi sam uređaj luk, mora se predvodeti osigurač ispred SPD koji prekida struju kratkog spoja.
- Koriste se varistori koji su sposobni da podnesu velike udarne struje, koji ne prave kratak spoj, već zadržavaju napon na konstantnom nivou.

Klasa 2 -Ograničavaju napon u mreži (odvodnici prenapona). Koriste se varistori koji ograničavaju napon na preostalu vrednost napona.

Klasa 3 -Imaju manju energetska sposobnost, a veću brzinu delovanja, koriste se ispred jako osetljivih uređaja, a bazirani su na brzim Zener diodama.

Na slici 6.10 prikazane su zone zaštite objekta zaštićenog spoljašnjom i unutrašnjom zaštitom.

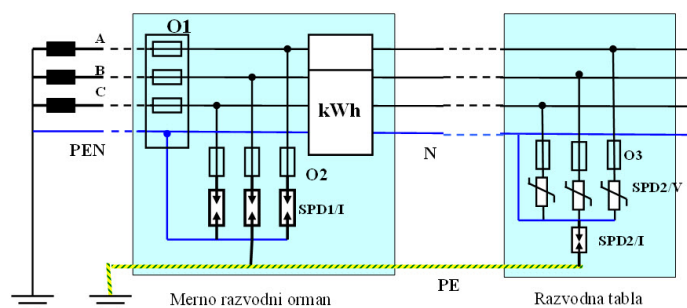


Slika 6.10: Crtež analiziranog objekta sa označenim zonama zaštite

Na slici su prikazane zone zaštite LPZ 1 i LPZ 2. Na granici LPZ 0A i LPZ 1 (KPK) postavljen je SPD uređaj klase 1 sa iskrištem, a u prostoru sa računarom koji predstavlja LPZ 2 postavljen je SPD2/V uređaj na bazi varistora između faze i N, a između N i PE postavljen je SPD2/I na bazi iskrišta. Objekat koji se štiti je desktop računar sa metalnim kućištem, koji se napaja direktno iz mreže.

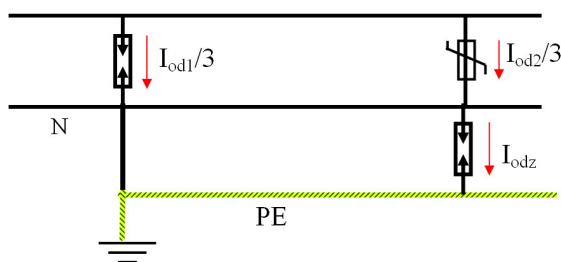
Na slici 6.11 prikazana je koordinacija primenjenih SPD na granici LPZ 0 i LPZ 1, odnosno LPZ 1 i LPZ 2 u trofaznoj šemi.

Oznaka SPD1/I označava strujni odvodnik, koji je sposoban da odvede veliku struju prema zemlji, a SPD1/V ili SPD2/V označavaju prenaponske zaštite koje ograničavaju prenapone.



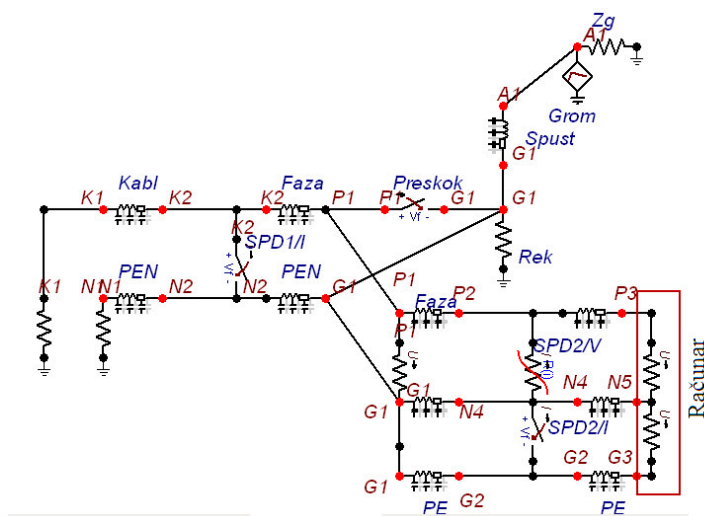
Slika 6.11: Koordinacija primenjenih SPD na granici LPZ 0 i LPS 1, odnosno LPZ 1 i LPZ 2

Da bi se proračun pojednostavio, trofazni napojni kabl sa neutralnim provodnikom (četvorožilni kabl TN-C sistema) se u ekvivalentnoj šemi zamenjuje sa faznim i neutralnim provodnikom. U samoj zgradi se primenjuje TN-S sistem, odnosno neutralni provodnik N se odvaja od zaštitne zemlje PE. Zbog toga se u prvom stepenu zaštite na ulazu u objekat (najčešće u KPK ili u MRO ispred brojila primenjuje zaštita između faze i PEN. Kroz SPD protiče trećina struje odvođenja $I_{od1}/3$, jer se struja deli između 3 faze koje su ekvivalentirane jednim provodnikom i teče prema zajedničkom PEN. U drugom stepenu zaštite SPD između faze i N odvodi $I_{od2}/3$, dok SPD između N i PE odvodi punu struju I_{odz} prema zemlji. U proračunima se formira ekvivalentna šema sa ekvivalentnim SPD za 3 faze, kroz koji se izračunava struja, koja se naknadno deli sa 3. Na slici 6.12 prikazana je ekvivalentna jednopolna šema trofaznog sistema dvostepene zaštite sa slike 6.11.



Slika 6.12: Ekvivalentna jednopolna šema trofaznog sistema dvostepene zaštite

Na slici 6.13 prikazana je ekranska slika ekvivalentne zamenska šema iz programa ATPdraw sa jednopolno prikazanim trofaznim instalacijama. Kompletna gromobrnska instalacija je ekvivalentirana jednim spustom i jednim otporom rasprostiranja uzemljivača prema poglavlju 6.3.4 na strani (II deo). Na slici su označeni preskok u KPK, trofazni napojni kabl prikazan jednopolno, prenaponski zaštitni uređaji SPD1/I (odvodnik struje), SPD2/V (odvodnik prenapona) i SPD2/I (odvodnik struje) i štíćeni objekat (računar) velike ulazne impedanse usvojene vrednosti 100 kΩ. Predpostavljeno je da se radi o desktop računaru sa metalnim kućištem, zbog čega se napaja sa monofaznim sistemom za PE provodnikom.



Slika 6.13: Ekranski prikaz iz programa ATPDraw kompletne električne šeme sa označnim elementima

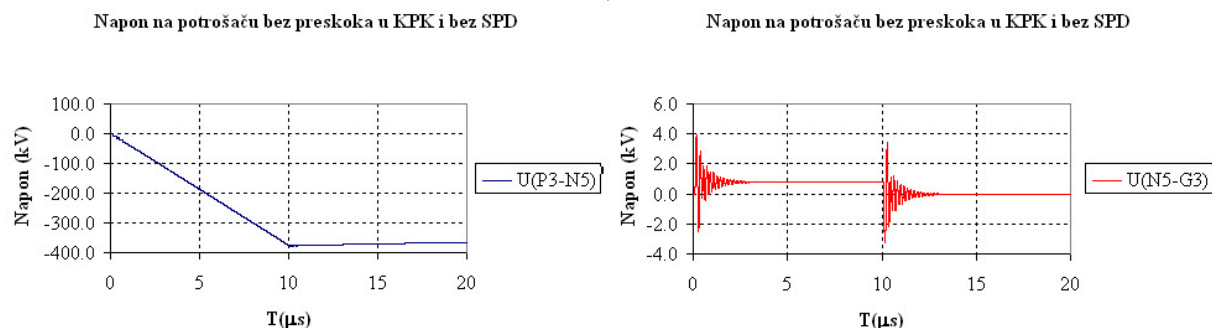
Sistem je nulovan do granice LPZ0/LPZ1, tako da se zaštitni uređaji postavljaju između faze i PEN provodnika (TN-C sistem), a zgradi je TN-S sistem sa razdvojenom nulom i PE. Na granici LPZ1/LPZ2 stavljaju se SPD2/V na bazi varistora između faze i N i SPD2/I između N i PE. Pri tome veze do potrošača mogu biti monofazne ili trofazne. Struje kroz SPD1/I i SPD2/V koje su dobijene proračunom se dele sa 3, jer su SPD u 3 faze ekvivalentirani jednim uređajem. U tački G1 vrši se razdvajanje PE i N provodnika.

6.6.2 Analiza sistema bez prenaponske zaštite pod pretpostavkom da ne dolaze do preskoka u KPK

Izvršen je proračun sa strujom atmosferskog udara 105.9 kA, što pripada klasi III LPS a u skladu je i sa dimenzijama mreže spoljašnje gromobranske zaštite. Izvršena je korekcija struje pražnjenja od 100 kA zbog ekvivalentiziranja spoljašnje gromobranske instalacije objekta jednim spustom. U prvoj varijanti nije uopšte sprovedena gromobranska zaštita, tako da se prenaponski zaštitni uređaji SPD1/I, SPD2/V i SPD2/I uopšte ne koriste. Takođe je pretpostavljeno da u KPK ne dolazi uopšte do preskoka, odnosno grana P1-G1 je uklonjena na slici 6.13.

Talasni oblici napona na potrošaču između faze u N (grana P3-N5) i između N i PE (grana N5-G3) prikazani su na slici 6.14.

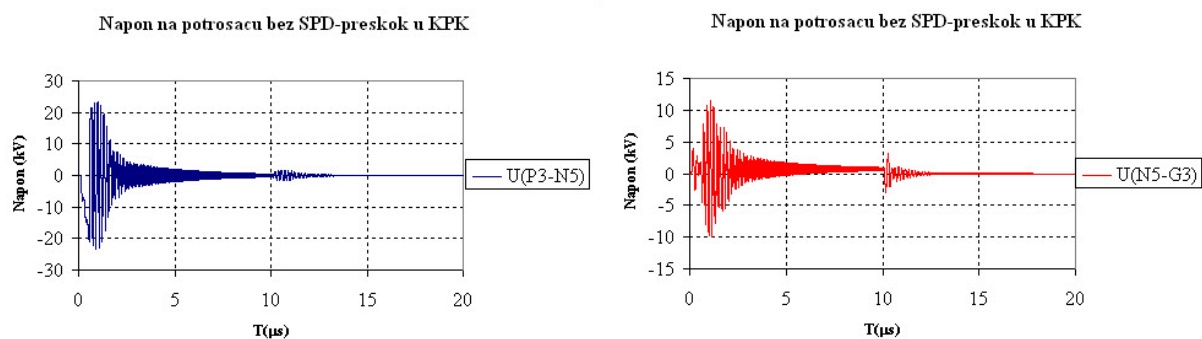
Sa slike se može videti da bi se na objektu analize u grani P3-N5 pojavio napon od skoro 380 kV, što bi sigurno negde ispred potrošača izazvalo proboj. Napon između N i zemlje PE je oko 4 kV. Proračun pokazuje da je prenaponska zaštita neophodna.



Slika 6.14: Talasni oblici napona u grani P3-N5 i N5-G3 kada nema preskoka u KPK

6.6.3 Modelovanje sistema sa preskokom u KPK bez prenaponske zaštite

Urađena je simulacija kada se modeluje preskok unutar KPK pri naponu od 12 kV, a ne koriste se prenaponska zaštita. Na slici 6.15 prikazan je talasni oblik napona grani P3-N5 između faze i neutralnog provodnika N (levo), kao i napon prema zemlji na grani N5-G3 (desno). U slučaju kada je uređaj koji se štiti u izolacionom kućištu, napajanje se vrši preko pretvarača koji daju nizak jednosmerni napon za napajanje, a sam pretvarač se napaja trožilnim kablom, pa je potrebno vršiti zaštitu faza-N i N-PE, da bi se pretvarački sklop zaštitio. To je slučaj kod laptop računara, televizora i drugih uređaja koji su u izolacionom kućištu. Desktop računari su u metalnom kućištu i napajaju se trožilnim kablom faza-N-PE, pa je potrebno sprovesti i zaštitu između N i PE.



Slika 6.15: Talasni oblik napona na objektu P3-N5 (levo) i napon prema zemlji na grani N5-G3 (desno) kada se ne primenjuje zaštita, a postoji preskok u KPK

Na slici 6.16 prikazan je talasni oblik struje kroz mesto preskoka u KPK kada ne postoji nijedna prenaponska zaštita u objektu

Sa slike 6.16 se vidi da kroz mesto preskoka P1-G1 protiče struja ka izvoru napajanja, amplitude oko 8.7 kA, talasnog oblika koje je veoma sličan talasnom obliku struje



Slika 6.16: Struja kroz mesto preskoka u KPK kada ne postoji nijedna prenaponska zaštita u objektu

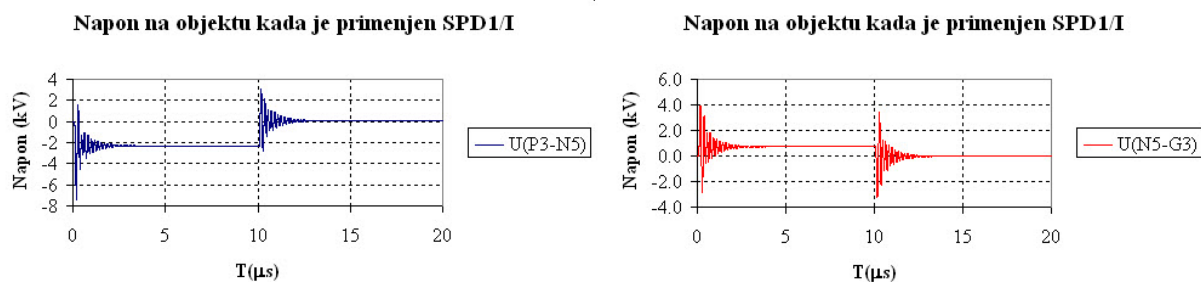
atmosferskog pražnjenja. Preskok u KPK redukuje napone, ali su oni dovoljno visoki da mogu da oštete objekat.

6.6.4 Analiza sistema sa prenaponskom zaštitom na ulazu u objekat

Na slici 6.17 prikazani su naponi između tačaka P3-N5 kada se primenjuje samo SPD1/I sa iskrištem na ulazu napajanja u objekat. Na slici levo prikazan je napon između tačaka P3-N5 na objektu analize, a na slici desno prikazan je napon neutralnog provodnika prema zemlji N5-G3 na mestu objekta. Može se uočiti prelazni proces na naponskoj krivoj u trenutku kada iskrište reaguje i u trenutku $T = 10 \mu s$ kada prestaje čelo talasa. Pošto model talasa struje sa linearno rastućim čelom i linearno opadajućim začeljem ima naglu promenu strmine strujnog talasa sa pozitivne na čelu na negativnu u trenutku maksimuma, to izaziva dodatni prelazni režim koji se može izbeći promenom oblika talasa, ali to ne može da utiče na krajnje rezultate proračuna. Na slici 6.18 prikazan je strujni talas koji protiče kroz SPD1/I, čiji je oblik talasa gotovo identičan strujnom talasu groma. Važno je izračunati maksimalnu struju kroz SPD da bi se odredila maksimalna udarna podnosiva struja. Provera se radi strujom oblika 10/350 μs . Izračunata udarna struja kroz SPD je 8.6 kA.

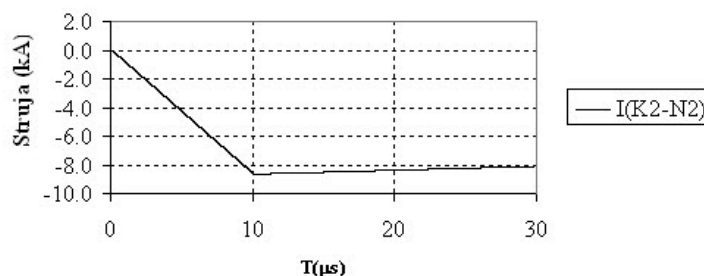
6.6.5 Analiza sistema sa 2 nivoa prenaponske zaštite

Na slici 6.19 levo prikazan je talasni oblik napona na objektu, odnosno na grani P3-N5 kada se primenjuje SPD1/I na bazi iskrišta i SPD2/V na bazi varistora. Na slici desno prikazana je prikazan je talasni oblik napona na grani N5-G3 neutralnog provodnika



Slika 6.17: Napon između tačaka P3-N5 (levo) i između tačaka N5-G3 (desno) kada se primenjuje samo SPD1/I sa iskrištem

Struja kroz SPD1/I kada je samo on primenjen



Slika 6.18: Talasni oblik strujnog talasa kroz SPD1/I kada se samo on primenjuje

N prema zemlji PE. Na slici 6.20 prikazane su struje kroz SPD1/I i SPD2/I kada se primenjuju dva nivoa zaštite. Može se uočiti da je struja kroz SPD2/I značajno manja od struje kroz SPD1/I. Na slici 6.21 prikazan je talasni oblik struje kroz prenaponski zaštitni uređaj SPD2/V u grani P2-N4.

Može se uočiti da napon na objektu ne prelazi 1.73 kV kada se primenjuju dve prenaponske zaštite.

U tabeli 6.9 prikazani su maksimalni naponi i struje kada se ne primenjuje prenaponska zaštita i ne dolazi do preskoka u KPK, kada dolazi do preskoka u KPK i ne primenjuj se zaštite, kada se primenjuje samo SPD1 i kada se primenjuje i SPD1 i SPD2.

Na osnovu primera se može zaključiti da se potpuna zaštita postiže višestepenom primenom SPD. Pri tome je SPD1/I baziran na iskrištu deklarisan kao uređaj klase 1 više strujno i energetski opterećen od SPD2/I i SPD2/V uređaja klase 2. Kada se primeni SPD1/I, sprečava se preskok u KPK.

Tabela 6.9: Maksimalni naponi i struje kroz zaštitu u zavisnosti od primenjene prenaponske zaštite

Upotrebljena zaštita	Bez presk. u KPK	Bez SPD	samo SPD1/I	SPD1/I + SPD2/V+SPD2/I
Napon na P3-N5 (kV)	378.9	24.4	7.46	1.73
Napon na N5-G3 (kV)	3.28	11.5	3.9	2.14
Struja kroz SPD1/I (kA)			8.6	8.5
Struje kroz SPD1/I i SPD2/I (kA)				0.88
Struja kroz SPD2/V (kA)				0.042
Struja kroz preskok (kA)	nema	8.7	nema	nema

6.7 Zaključak

Na osnovu predhodne analize se može izvršiti izbor prenaponskih zaštitnih uređaja.

SPD1 - klasa zaštite 1 Karakteristike SPD1/I date su u tabeli 6.10

Tabela 6.10: Tabela karakteristika uređaja SPD1/I na bazi iskrišta

Tip 1	Klasa I	
Nominalni napon 50 Hz	U_n (V)	230
Maksimalni radni napon	U_m (V)	255
Udarna struja pražnjenja	I_{imp} (10/350 μ s) (kA)	12.5
Zaštitni nivo (L-N)	U_p (kV)	2.5
Vreme odziva	t_a	<100 ns
Sposobnost gašenja propratne struje nakon reagovanja	I_{ef} (kA)	25 kA
Maksimalni osigurač prema izvoru	I_{osig} (A)	125
Opseg radne temperature	-40	+85
Zaštita od stranih tela i vlage		IP20

Kod SPD na bazi iskrišta mora se obezbediti osigurač ispred SPD da prekine struju KS koja nastaje nakon reagovanja iskrišta. Neki od SPD uređaja imaju efikasan sistem za gašenje luka nakon reagovanja. Neki od SPD uređaja su snabdeveni sa daljinskom dojavom kvara SPD uređaja, a neki imaju na sebi indikaciju kvara.

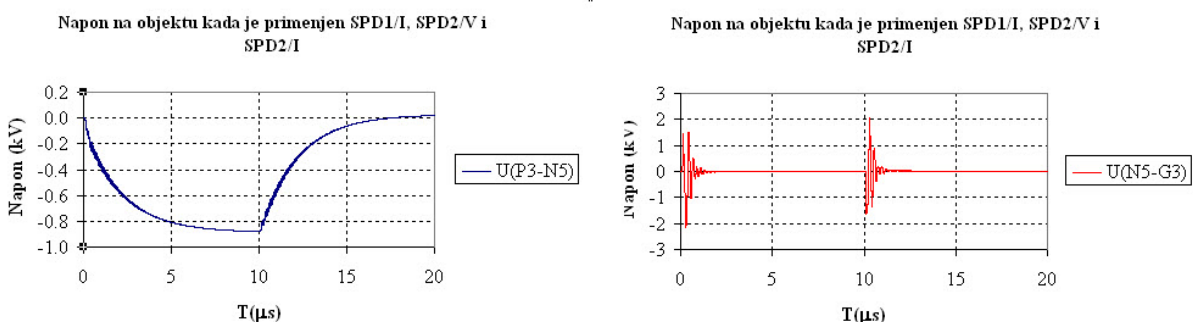
SPD2 - klasa zaštite 3 U tabeli 6.11 dati su podaci za uređaj ispred krajnjeg potrošača.

Tabela 6.11: Tabela karakteristika uređaja SPD2/V na bazi varistora

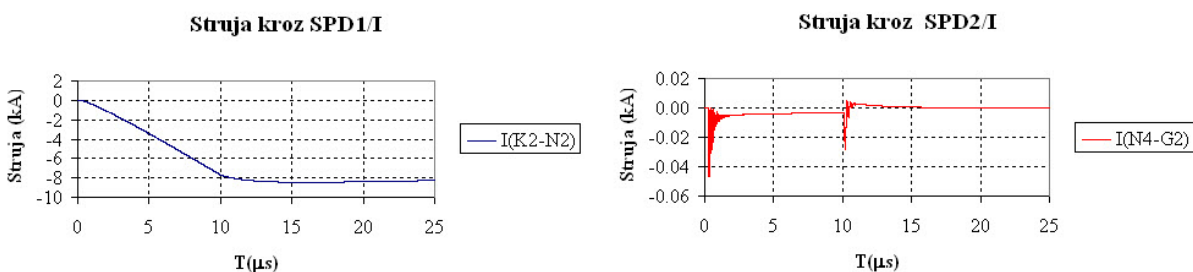
Tip 3	Klasa III	
Nominalni napon 50 Hz	U_n (V)	230
Maksimalni radni napon	U_m (V)	255
Udarna struja pražnjenja F-N	I_f (A) (8/20) μ s) (kA)	3
Ukupna struja pražnjenja N-PE	I_t (A) (8/20) μ s) (kA)	8
Zaštitni nivo (F-N)	Upf (kV)	1
Zaštitni nivo (N-PE)	Upe (kV)	1.5
Vreme odziva (F-N)	ta	<25 ns
Vreme odziva (N-PE)	ta	<100 ns
Sposobnost prekidanja struje KS	I_{ef} (kA)	6 kA
Maksimalni osigurač prema izvoru	I_{osig} (A)	25
Maksimalni privremeni prenaponi	TOV(F-N) (V) za 5 s	335
Opseg radne temperature	-40	+85
Zaštita od stranih tela i vlage		IP20

Zahvalnica

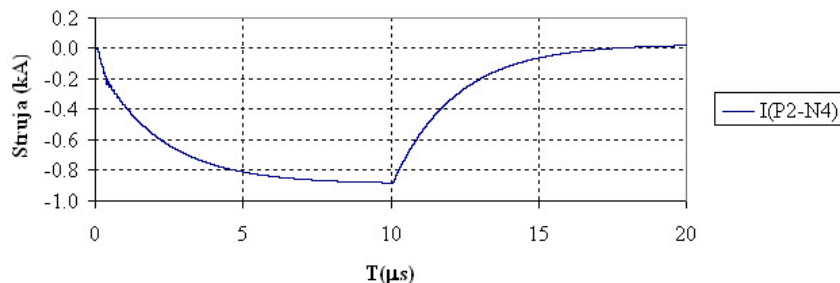
Primer je nastao na modifikacijom studije Analiza gromobranske zaštite i elektromagnet-ske kompatibilnosti Regionalnog centra za održavanje državnih puteva i centra za upra-vljanje saobraćajem u Nišu. Studija je rađena za Šidprojekt d.o.o, Kneza Miloša 2, Šid. Investor JP "Putevi Srbije", 2019 god.



Slika 6.19: Talasni oblik napona na otporniku P3-N5 kada se primenjuje SPD1/I i SPD2/V SPD2/I (levo) i talasni oblik napona na grani N5-G3 neutralnog provodnika N prema zemlji PE (desno)



Slika 6.20: Struje kroz SPD1/I (K2-N2) i kroz SPD2/I (P2-N4)
Struja kroz SPD2/V



Slika 6.21: Talasni oblik struje kroz prenaponski zaštitni uređaj SPD2/V u grani P2-N4

Primer 7

Kvarovi usled upotrebe Is Limitera

Koautor: Tomislav Rajić

7.1 Razlog uvođenja Is Limitera

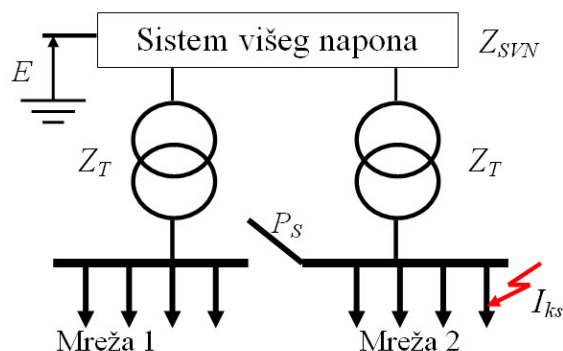
Prilikom projektovanja postrojenja, vrši se izbor adekvatne opreme. Prekidači moraju biti u stanju da prekinu najveće moguće očekivane struje kvara. Ukoliko se tokom eksploatacije izgrađuju novi izvori i mreža razvija, može se dogoditi da se struje kvara značajno uvećaju iznad prekidne moći prekidača i kratkotrajne podnosive struje ostale opreme. U tom slučaju morala bi da se zameni oprema tako da nova oprema može da podnese i isključi uvećane struje kvara. U slučaju kada se srednjenaponska mreža napaja iz sistema višeg napona preko dva transformatora koja rade u paraleli, da se ne bi vršila zamena celokupne opreme u mreži srednjeg napona, može se sekcionisanjem sabirnica sistem na niženaponskoj strani razdvojiti na dva odvojena sistema. Svaki od razdvojenih sistema napaja iz se iz jednog transformatora, što omogućava da se impedansa kratkog spoja gledana sa niženaponske strane uveća i smanji struja kratkog spoja u bilo kom delu niženaponske mreže. Na slici 7.1 prikazan je princip smanjenja struje kvara sekcionisanjem sabirnica.

Oznake na slici 7.1 imaju sledeće značenje:

E -Ekvivalentna elektromotorna sila kompletnog sistema višeg napona, $E = 123 \text{ kV}$,

Z_{SVN} -ekvivalentna kompleksna impedansa sistema 123 kV, svedena na stranu 33 kV,

Z_T - kompleksna impedansa kratkog spoja transformatora 123/33 kV, svedena na stranu 33 kV,



Slika 7.1: Princip smanjenja struje KS sekcionisanjem sabirnica

P_S -prekidač u spojnom polju,

I_{KS} -struja kratkoh spoja na 33 kV strani.

U slučaju kada sabirnice nisu sekcionisane, struja trolnog kratkog spoja na izvodu 33 kV bi bila:

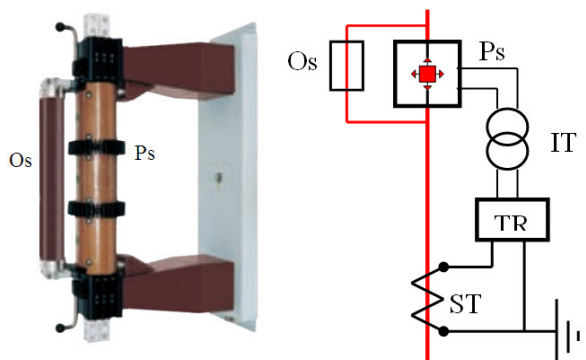
$$\underline{I_{KS}} = \frac{E}{\underline{Z_{SVN}} + \underline{Z_T} \cdot 0.5} \quad (7.1)$$

Kada se prekidač P_S otvori, sabirnice su sekcionisane i struja kratkog spoja na odvojenom delu sistema 33 kV bi imala vrednost:

$$\underline{I_{KS}} = \frac{E}{\underline{Z_{SVN}} + \underline{Z_T}} \quad (7.2)$$

Ukoliko se želi da se sačuva fleksibilnost sistema, u normalnom pogonu sistem radi sa paralelnim transformatorima. Da bi se omogućilo brzo sekcionisanje sabirnica pri kratkom spoju, uvodi se novi rasklopni elemenat koji može veoma brzo da razdvoji vezu između paralelno vezanih sistema sa niženaponske strane u trenutku kvara. Uređaj koji je uveden naziva se Is Limiter.

Is limiter je uređaj koji ima zadatak da spreči pojavu velikih vrednosti struja već u prvoj poluperiodi nakon nastanka kvara. Predviđen je za srednjenaponske mreže. Ovaj elektroenergetski rasklopni uređaj sastoji se od elementa sa eksplozivnim punjenjem koji trenutno prekida struju kroz svoje kolo i preusmerava je na paralelno postavljene osigurače velike prekidne moći, koji preuzimaju na sebe tu struju i prekidaju je pre dostizanja maksimalne vrednosti. U nastavku procesa, dve mreže bi praktično bile razdvojene i postojeća oprema bi prekinula ograničenu struju kvara. Na slici 7.2 levo pokazana je fotografija uređaja, a desno šema.



Slika 7.2: Fotografija Is Limitera(levo) i šema delovanja (desno)

Oznake na slici 7.2 imaju sledeće značenje:

P_S -Brzi prekidač sa eksplozivnim punjenjem.

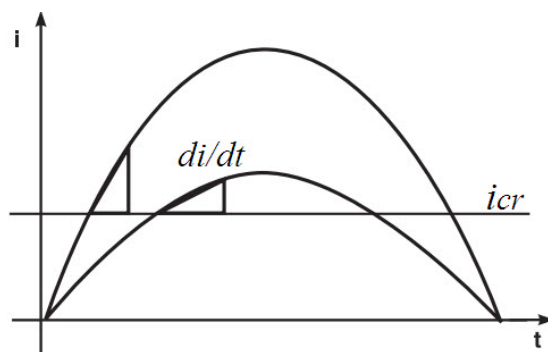
O_S -Visokoučinski osigurač.

ST -Strujni transformator (detektuje struju kratkog spoja).

TR -Merni i okidački uređaj koji meri parametre struje i određuje trenutak za trigero-
vanje.

IT -Impulsni izolacioni transformator koji signal za okidanje iz okidačkog uređaja koji
je na potencijalu zemlje dovodi na potencijal faza sistema 33 kV na kome se nalazi
Is Limiter.

Na slici 7.3 pokazano je kako uređaj detektuje kritičnu vrednost struje pre uspostavljanja prvog maksimuma.



Slika 7.3: Kriterijum za procenu kritične vrednosti struje pre maksimalne vrednosti

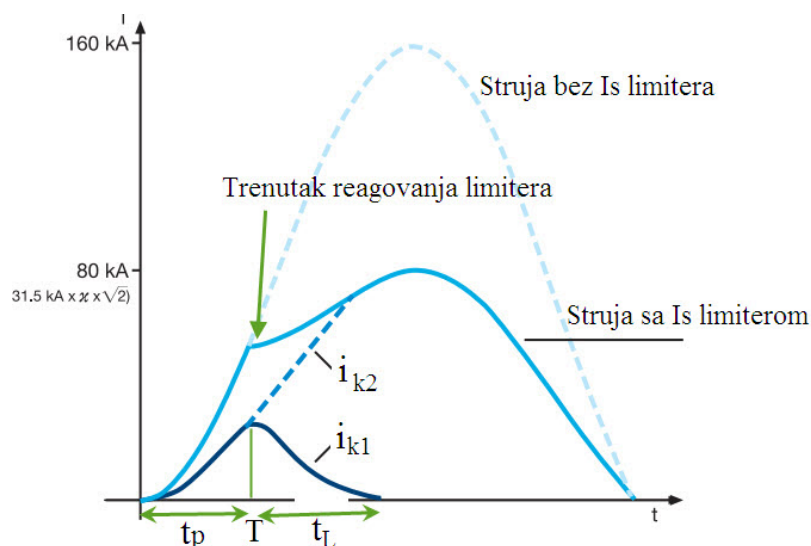
Da bi se detektovala struja merni i okidački uređaji mere sledeće veličine:

- -trenutnu vrednost struje i i procenjuje se da li je veća od kritične struje i_{cr}
- -strminu porasta struje di/dt .

Strmina struje di/dt je važan pokazatelj o daljem trendu porasta struje, tako da se struja na vreme može prekinuti. Ukoliko je pri kritičnoj struji i_{cr} veća strmina struje, to je pokazatelj da se može očekivati veća temena vrednost struje kratkog spoja.

Hiperbrzi prekidač sa eksplozivnim punjenjem prekida struju kroz prekidač i preusmerava kroz osigurač, što omogućava da se na prekidaču ne pojavi luk zbog malog pada napona na osiguraču. Reagovanje prekidača je funkcija podešene struje i_{cr} , kao i strmine struje di/dt . Struja kratkog spoja može da poraste iznad struje okidanja i_{cr} i prekidanja struje kroz brzi prekidač P_S sve dok ne počne proces pregorevanja osigurača O_s .

Na slici 7.4 prikazane su komponente struje koje napajaju mesto kratkog spoja direktno iz transformatora i_{k2} ili preko Is Limitera i_{k1} , prema slici 7.1. Struja i_{k1} ograničena je dejstvom osigurača i naglo se približava nuli pre prirodnog prolaska kroz nulu.



Slika 7.4: Komponente struje koje napajaju mesto kratkog spoja direktno iz transformatora i_{k2} ili preko Is Limitera i_{k1}

Kao što se može videti na slici 7.4, struja kvara bi dosegla vršnu vrednost od 160 kA da nije instaliran Is limiter. Is limiter seče struju i praktično eliminiše udeo leve mreže na slici 7.1 u ukupnoj struji kvara. Struja kvara i_{k2} nije izobličena prelaznim procesom usled luka u osiguraču.

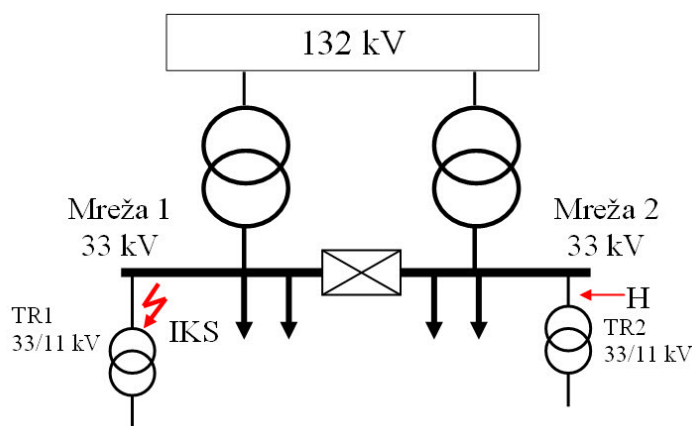
Struja i_{k1} je ograničena usled delovanja električnog luka koji povećava pritisak u osiguraču, što dovodi do intenzivnog povećanja otpora luka zbog hlađenja u dodiru sa peskom.

Vremenski period t_p je pre reagovanja limitera i struja i_{k1} je neizobličena. U periodu t_L posle prekida struje u limiteru nastaje pregorevanje osigurača i pojava električnog luka unutar osigurača. Što je intenzivnije gašenje luka u osiguraču, brzina opadanja struje će biti veća. Strmina struje pri pregorevanju osigurača di_L/dt od velike je važnosti za mogućnost nastanka prenapona usled naglog sečenja struje.

7.2 Opis sistema

Sistem je modelovan i prelazni proces simuliran pomoću komercijalnog softvera pod nazivom DigSilent PowerFactory [114]. Analizirana je primena Is limitera u sistemu koji se sastoji od dve industrijske mreže nazivnog napona 33 kV. Mreža većim delom sadrže motore, ali poseduju i svoje generatore. Jedna mreža ima 6, a druga 4 generatorske jedinice. Preko dva transformatora 132/33 kV napajaju se glavne sabirnice u obe mreže iz visokonaponske napojne mreže 132 kV. Neutralne tačke u obe mreže su uzemljene preko otpornika, tako da je struja zemljospoja ograničena na 100 A.

Na slici 7.5 prikazana je blok šema kojom se pojednostavljeno predstavlja sistem tokom havarijskog scenarija. IKS je inicijalni KS, a H predstavlja havariju usled prenapona generisanog radom Is Limitera u mreži 1.



Slika 7.5: Blok šema sa označenim havarijskim sekvencama

Merno-akvizicioni moduli relejne zaštite beleže stanja i promene u sistemu. Opisane su snimljene sekvence havarijskog događaja čija će analiza poslužiti za modelovanje Is limitera. Hronologija havarijskog događaja je predstavljena u Tabeli 7.1.

Inicijalni zemljospoj se desio u Mreži 1 na visokonaponskim (VN) priključcima transformatora TR1 u trenutku $t=0$ s. Struja zemljospoja ograničena je na 100 A. Kada kvar preraste u dvofazni KS sa zemljom, dolazi do pojave velikih vrednosti struja koje prolaze

Tabela 7.1: Hronologija havarijskog događaja

R.Br.	Vreme (ms)	Objekat	Događaj
1	0	Mreža 1/TR1	Zemljospoj na priključku B TR1
2	41	Mreža 1/TR1	Zemljospoj na priključku A TR1
3	42	Is-limiter	Is-limiter reaguje u fazama A i B
4	43	Mreža 2/TR 2	Preskok na priključcima faza A i B
5	66	Mreža 1/TR1	Kvar u fazi C TR1
6	68	Is-limiter	Is-limiter reaguje u fazi C
7	70	Mreža 2/TR 2	Preskok na priključku u fazi C

kroz vezu gde se nalazi Is-limiter u trenutku $t=41$ ms. Dešava se reagovanje Is limitera u dve faze pogođene kvarom u trenutku $t=42$ ms. U trenutku $t=66$ ms, dolazi do kratkog spoja preostale faze C sa zemljom. To dalje implicira otvaranje pola Is-limitera i u toj fazi u trenutku $t=68$ ms. Treba uočiti da se nakon svakog reagovanja Is limitera, javljaju preskoci na priključcima TR 2 u Mreži 2. Pretpostavlja se da to prouzrokuju prenaponi, nastali prilikom reagovanja Is limitera i prekidanja struje pomoću osigurača.

Na slici 7.6 prikazana je fotografija priključne kutije u kojoj su priključci za prolazne izolatore za TR2, u kojoj je nastala havarija.

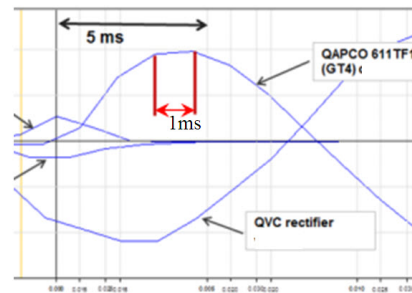


Slika 7.6: Izgled havarisane priključne kutije u kojoj se nalaze prolazni izolatori 33 kV transformatora

7.3 Merno-akvizicioni sistem

Sistem digitalne relejne zaštite snabdeven je merno-akvizicioni sistemom koji može registrovati tranzijentne pojave napon i struje. Na osnovu snimaka je procenjeno da je period

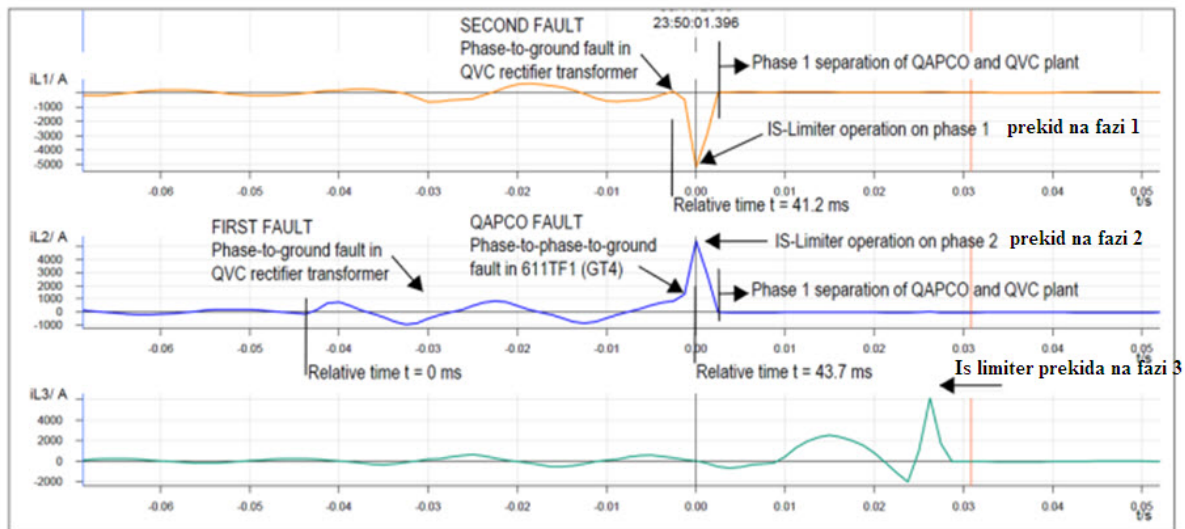
odabiranja uzoraka merno-akvizicionog sistema 1 ms. Na slici 7.7 prikazana je struja snimljena merno-akvizicionim sistemom i jako razvučena po vremenskoj skali.



Slika 7.7: Procena koraka uzorkovanja merno-akvizicionih sistema relejne zaštite

Na slici se jasno vidi kako su susedne tačke dobijene odabiranjem, spojene pravim linijama.

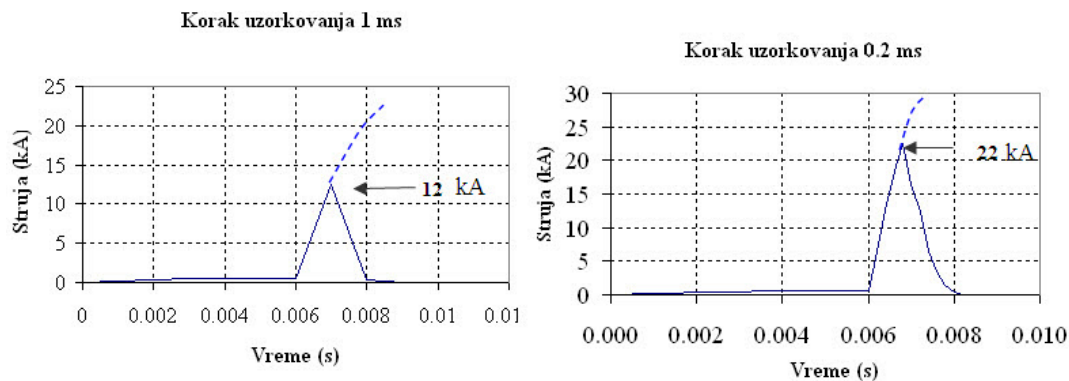
Snimci talasnih oblika struja kroz Is limiter preuzeti sa merno-akvizicionog sistema relejne zaštite, iz studije [115], prikazani su na slici 7.8.



Slika 7.8: Snimci talasnih oblika struja kroz Is limiter preuzeti iz [115]

Na slici 7.8 označeni su trenutki kada dolazi do prekidanja struje pomoću Is limitera na fazama 1, 2 i 3. Može se uočiti da na svakoj fazi u trenutku nastanka kvara struja linearno raste do maksimuma, a zatim linearno opada, što je posledica male brzine uzimanja uzoraka, tako da jedna tačka je pre početka porasta struje, druga je u toku porasta struje, a treća je već nakon isključenja. Iz tog razloga se uopšte ne može proceniti trenutna vrednost struje u trenutku reagovanja Is limitera, kao ni maksimalna vrednost struje i strmina struje u toku porasta i opadanja prilikom gašenja luka u osiguraču.

Da bi objasnio uticaj brzine odabiranja uzoraka na tačnost rezultata, urađena je simulacija prelaznog procesa pri nastanku KS sa različitim koracima simulacije. Na slici 7.9 prikazana je simulacija snimka struje ustaljenog režima amplitude 0.6 kA na koju se superponira struja kratkog spoja 31 kA. Na slici levo prikazana je kriva za korak uzorkovanja 1 ms, a na slici desno korak uzorkovanja je 0.2 ms. Zbog toga je na slici levo odabrana tačka kada je trenutna vrednost struje KS u trenutku početka gašenja luka u osiguraču zabeležena da je 12 kA. Na slici desno, gde ima 5 puta više uzoraka, zabeležena je vrednost struje od 22 kA. Još važnije je da je na slici levo strmina struje opadanja mogla da se izračuna kao $S = 12/0.001 = 12000$ kA/s. Na slici desno strmina opadanja struje nije linearna zbog sitnijeg koraka proračuna i promene struje usled uticaja gašenja luka u prekidaču.



Slika 7.9: Snimak simulacije kratkog spoja-levo kriva za korak uzorkovanja 1 ms, a na slici desno korak uzorkovanja je 0.2 ms

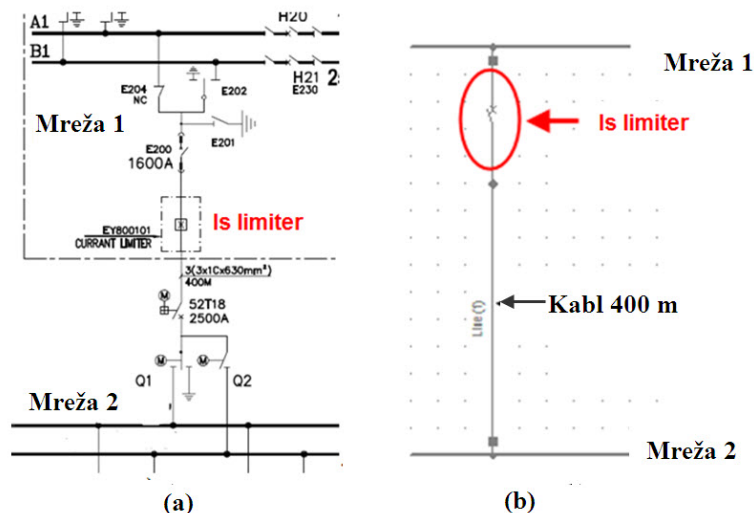
Struja KS je prikazana do 12 kA, kada je osigurač Is limitera ograničava, tako da je tačkasto označen predpostavljen tok struje koja bi se uspostavila kada ne bi bilo ograničavanja. Početak registracije struje KS definisan je tačkom u trenutku 0.006 s, druga tačka je registrovana u trenutku 0.007 s kada se uspostavlja maksimalna vrednost struje od 12 kA pre reagovanja osigurača, a treća tačka je registrovana u trenutku 0.008 s kada je došlo do potpunog prekidanja struje zbog dejstva osigurača. Desno je izvršena simulacija sa korakom 0.2 ms. Proces uspostavljanja struje KS takođe nastupa u trenutku 0.006 s, ali reagovanje osigurača Is limitera nastupa u trenutku 0.0068 s. Od tog trenutka počinje proces gašenja luka u osiguraču koji sada nije linearan, već se struja u početku procesa brže smanjuje, a zatim se intenzitet gašenja smanjuje, pa se proces usporava. Ovo je numerička simulacija koja služi samo za ilustraciju greške usled neadekvatnog koraka uzorkovanja i nije povezana sa analiziranim događajima, ali je vezana za mogućnost pogrešne interpretacije štetnog događaja.

7.4 Modelovanje Is limitera

Model Is limitera je razvijen na osnovu realnih snimaka sa merno-akvizicionog sistema. Struja kvara se naglo smanjuje nakon reagovanja Is limitera. Prilikom reagovanja prekidača sa eksplozivnim punjenjem, struja kvara se naglo prebacuje na topljivi osigurač, koji preuzima struju kvara i intenzivno gasi električni luk u komori osigurača. Što je struja kvara koju prekida osigurač veća, pritisci gasova razvijenih u električnom luku su veći i luk se intenzivnije gasi. Pri vrlo velikim strujama kvara trajanje struje je veoma kratko. Ovde je usvojen pojednostavljen model koji se svodi na sečenje struje u trenutku preuzimanja struje kvara od strane osigurača.

Na osnovu slike 7.9 uvodi se modelovanje preko srednje strmine struje kao odnosa izmerene struje pri kojoj osigurač Is limitera reaguje, podeljenim sa jednim korakom proračuna. Na osnovu slike 7.8 može se vodeti da se opadanje struje pri gašenju luka završava između dve susedne sekvence uzimanja uzoraka..

U programu DigSilent je iskorišćen model prekidača koji može da seče struju pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Od trenutka kada osigurač Is limitera reaguje, u sledećem koraku koji je usvojen da je 1 ms, kao što je vreme uzorkovanja akvizicionog softvera, smatra se da je struja prekinuta. Numerički program podrazumeva da je pri sečenju struja linearno opadala u toku jednog koraka. Na slici 7.10 prikazan je deo šeme mreže sa Is limiterom (a) i model formiran u softveru (b).

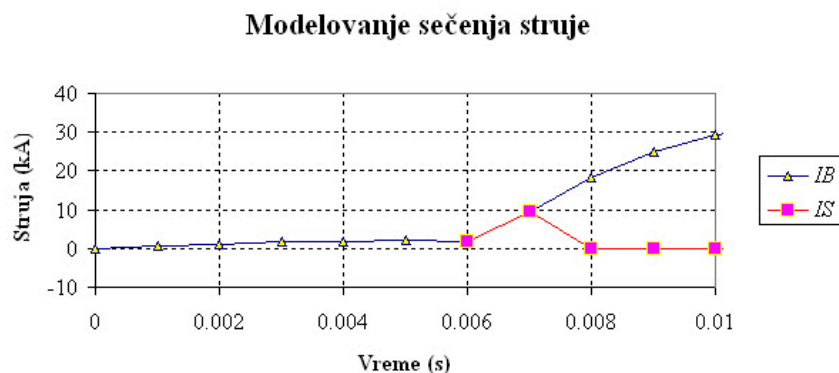


Slika 7.10: Deo mreže sa Is limiterom a) prikazan u projektnoj dokumentaciji i b) model izdvojen iz ekranskog prikaza u softveru

Model osigurača nije detaljno razvijen u softveru, a ni u literaturi se ne mogu naći opšte prihvaćeni rezultati za simulaciju gašenja luka. Zbog toga je luk zanemaren u modelu celokupnog Is limitera. Usvojeni model daje kritičnije rezultate nego kada bi se

obuhvatao uticaj električnog luka. Međutim, kako je ustanovljena koincidencija reagovanja Is-limitera i pojava prenapona koja je izazvala kvarove, usvojen je ovaj model radi sagledavanja okolnosti u mreži koje nastaju pri kratkim spojevima kada Is-limiter reaguje. Sa tog aspekta, smatra se da je dovoljno modelovati Is limiter idealnim prekidačem koji trenutno seče struju, a faktički se struja linearno menja između tačke gde je inicirano opadanje struje i sledeće tačke u kojoj je struja nula.

Na slici 7.11 predstavljen je pojednostavljeni model prekidača koji seče struju između dva uzastopna koraka proračuna.

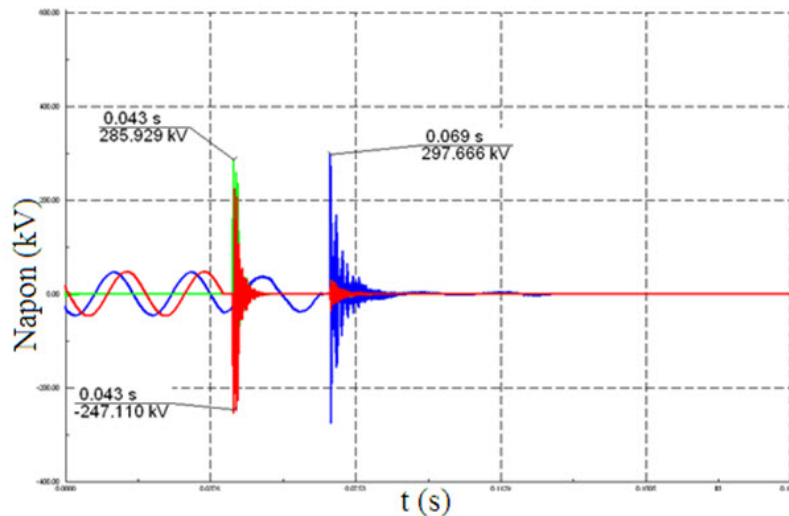


Slika 7.11: pojednostavljeni model prekidača koji seče struju između dva uzastopna koraka proračuna

Na slici 7.11 oznaka *IB* označava struju koja bi nastala kada ne bi bilo Is limitera, a oznaka *IS* označava sečenu struju. S obzirom da se struja kvara naglo smanjuje, pretpostavlja se da bi reagovanje prvog pola Is limitera, sa eksplozivnim punjenjem, prouzrokovalo pojavu sklopnih prenapona. Da bi se ispitala korektnost navedene pretpostavke, izvršene su simulacije kvarova u navedenim mrežama. Pretpostavka je da pri vrlo velikim strujama kvarova, kada Is limiter naglo prekine struju, topljivi osigurač zbog razvoja električnog luka koji stvara visok pritisak u unutar kućišta, veoma intenzivno gasi električni luk, što se u proračunima manifestuje kao sečenje struje. U realnosti se gašenje luka ne odvija trenutno, kao što je u ovom radu modelovano, ali u svakom slučaju opadanje struje je veoma brzo. Matematički model gašenja luka u osiguračima za ograničavanje struje je složen i očekuje se da u budućnosti bude implementiran u proračune [116], [117].

Simuliran je opisani havarijski scenario. Posmatrani su talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2 jer je na tom mestu došlo do preskoka. Spisak događaja koji je simuliran, naveden je u Tabeli 7.1. Prvo se simulira zemljospoj u fazi B, dve periode kasnije dešava se kvar u fazi A, što bi trebalo da izazove reagovanje limitera u dve pomenute faze. Na kraju se simulira kvar u trećoj fazi i reagovanje limitera u toj preostaloj fazi. Struja reagovanja limitera podešena je na 7 kA. Na slici 7.12 prikazani su izračunati talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2 tokom

navedenog scenarija. TR 2 je povezan na glavne sabirnice 33 kV mreže 2. Proračun je rađen sa podešenom vrednošću reagovanja Is limitera od 7 kA.



Slika 7.12: Talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2

Jasno je da sečenje struje izaziva pojavu visokih prenapona u mreži 2. Prenaponi u fazama A, B i C iznose 247 kV, 286 kV i 298 kV respektivno. To svakako može biti uzrok međufaznog kvara sa zemljom na tom transformatoru. Može se smatrati da su ovo približni rezultati, jer vreme isključenja osigurača može da bude i kraće od vremena uzorkovanja. U svakom slučaju ovakvi proračuni se mogu sprovoditi samo kada se poznaje vreme uzorkovanja akvizicionog sistema i program za proračun radi sa istim korakom.

7.5 Zaštita od prenapona

7.5.1 Analiza primene odvodnika prenapona

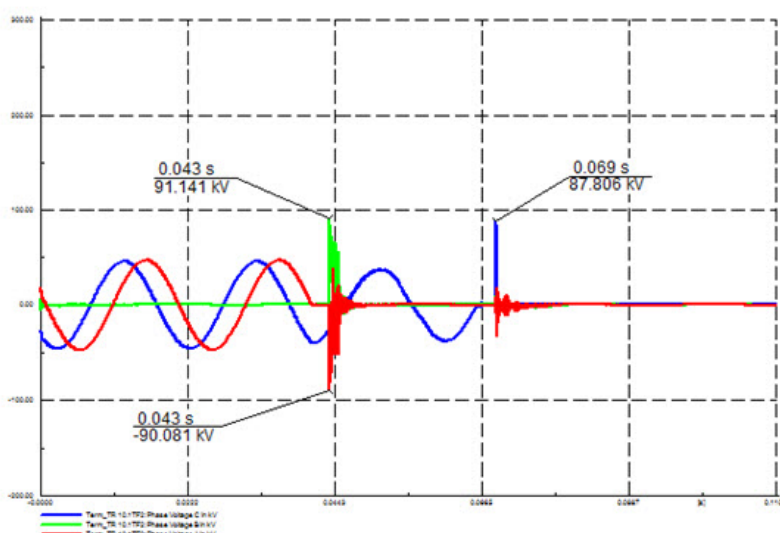
Izvršena je analiza uticaja zaštite od prenapona primenom odvodnika prenapona. Ponovljen je havarijski scenario opisan u prethodnom poglavlju. U tabeli 7.2 prikazana je karakteristika preostalog napona primenjenog odvodnika prenapona u funkciji atmosferske udarne struje oblika $8/20 \mu\text{s}$. Odvodnike prenapona treba ugraditi što je moguće bliže transformatoru. Optimalno mesto je da se promeni priključna kutija na transformatoru, tako da ima mesta da se stave odvodnici u sikonskom kućištu direktno ispred prolaznih izolata, a svi krajevi za uzemljenje odvodnika da se vežu za jednu sabirnu šinu, koja je vezana za kućište transformatora, ali takođe posebnim uzemljivačkim spustem vezana za uzemljivač postrojenja. Ukupna dužina veze odvodnika do priključka za prolazni izolator

transformatora i od priljučka za uzemljenje odvodnika do veze za kućište transformatora je grubo procenjeno da je 1 m.

Tabela 7.2: Preostali napon odvodnika SIEMENS 3EK7 360 4CH4 za atmosfere struje pražnjenja standardnog oblika

Struja 8/20 (kA)	1	3	5	10	15	20
Preostali napon (kV)	77.6	84.3	89.1	95.8	104	110

Na slici 7.13 su dati talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2, kada su odvodnici postavljeni uz transformatora na predhodno opisan način.



Slika 7.13: Talasni oblici napona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2, kada su odvodnici postavljeni neposredno ispred transformatora

U tabeli 7.3 su prikazane maksimalne vrednosti prenapona na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2, za slučaj primene odvodnika prenapona.

Tabela 7.3: Maksimalni prenaponi na VN priključcima TR 2 33/11 kV u mreži 2

Transformator Faza	A	Faza B	Faza C
Mreža 2/TR 2	91	90	88

Uočljivo je da postavljanjem odvodnika prenapona ispred transformatora uspešno izvršena zaštita transformatora od prenapona, jer su dobijeni prenaponi značajno niži od kratkotrajno podnosivog napona (trajanja 1 min) industrijske učestanosti od 70 kV efektivne vrednosti, odnosno $70 \cdot 1.41 = 98.7$ kV temene vrednosti prema [11]. Podnosivi sklopni prenaponi se mogu proceniti prema [12] korišćenjem faktora konverzije u opsegu 120 kV do 130 kV temene vrednosti, što daleko premašuje dobijene prenapone iz tabele 7.3.

7.5.2 Komentar o Is Limiteru

Is Limiter je novo sredstvo koje omogućava da se sa manjim investicijama reši problem koji nastaje pri razvoju srednjenaponskih mreža koji dovodi do povećanja struja kratkih spojeva iznad prekidnih moći prekidača i kratkotrajno podnosivih struja kratkih spojeva postojeće opreme u postrojenjima. Iako deluje na prvi pogled Is Limiter pogodno sredstvo za velike uštede u investicijama za zamenu opreme, analiza pokazuje opasnost na od prenapona koja se može ublažiti uvođenjem prenaponske zaštite. U svakom slučaju potreban je dodatni oprez da bi se osigurala ostala oprema, koja nije analizirana od prenapona. Zbog toga se preporučuje analiza rešenja problema sa trajno sekcionisanim sabirnicama, bez upotrebe Is Limitera.

7.6 Zaključak

Na osnovu ovog primera može se zaključiti da primena osigurača u mrežama niskog, a posebno srednjeg napona može biti opasna sa stanovišta prenapona u uslovima veoma intenzivnog gašenja luka unutar osigurača. To izaziva brzo smanjivanje struje pre definitivnog gašenja luka i mogućnost nastanka visokih prenapona u mreži ispred i iza osigurača.

U ovom primeru se takođe može videti da se prilikom ekspertize štetnih događaja mora voditi računa o koraku uzorkovanja digitalnih uređaja za registraciju. Pri velikom koraku uzorkovanja mogu biti preskočeni upravo oni odbirci koji su najviše amplitude.

Zahvalnica

Primer je nastao na osnovu analize koja je trebalo da proverí predhodnu studiju koordinacije izolacije i prelaznih povratnih napona u mreži QAPCO-QVC-QATOFIN Electrical Network u Kataru, koja nije razrešila probleme havarija u mreži. Revizija predhodne studije rađena je za Energoprojekt Entel LTD, Doha, Qatar. Analiza je uspešno identifikovala problem i dala predlog rešenja.

Primer 8

Požar usled indukovanih prenapona

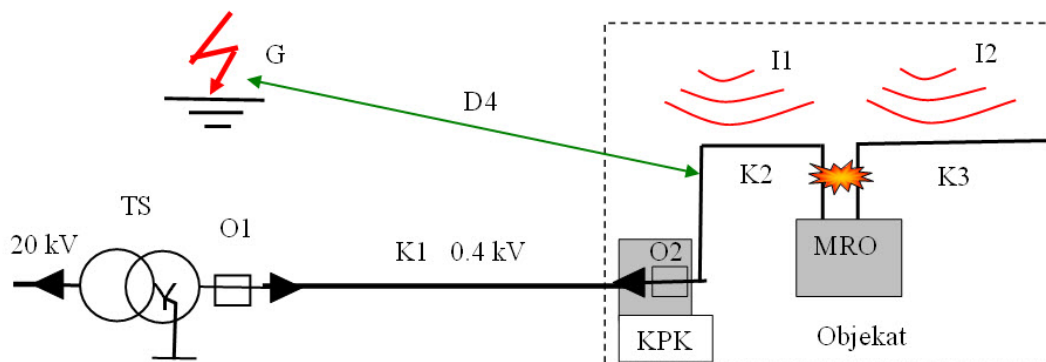
8.1 Kratak opis događaja i opis sistema

U ovom primeru opisan je stvarni događaj kada je izbio požar na jednom industrijskom objektu u toku jake grmljavinske nepogode. Zbog veštačenja je bilo neophodno pokazati da je pojava indukovanih prenapona mogući uzrok iniciranja požara. Objekat u kome je izbio požar se napaja iz transformatorske stanice (TS) 20/0.4 kV podzemnim kablom dužine od oko 90 m. Na spoljašnjem zidu objekta se nalazi kablovska priključna kutija (KPK) u kojoj se nalaze topljivi osigurači 160 A. Iz KPK se vode po kablovskim regalima kablovi na visini od 10 m unutar fabričke hale do merno razvodnog ormara (MRO) i nastavljaju dalje po regalima do potrošača. Ispod regala po kojima su vođeni kablovi nalazio se zapaljiv materijal za ambalažu.

Kompletna skica napajanja od TS 20/0.4 do instalacija 0.4 kV u analiziranom objektu, kao i elektromagnetni uticaj atmosferskog udara na instalaciju u objektu izgleda kao na slici 8.1.

Oznake na slici 8.1 imaju sledeće značenje:

- G - Atmosfersko pražnjenje u zemlju na udaljenosti D_4 od objekta,
- O1 - topljivi osigurači od 200 A u transformatorskoj stanici 20/0.4 kV,
- K1 - kabl 0.4 kV dužine 90 m do kućnog priključka,
- KPK -kablovska priključna kutija,
- O2 - topljivi osigurači od 160 A u KPK,



Slika 8.1: Kompletna slika napajanja od TS 20/0.4 kV do instalacija 0.4 kV unutar objekta i delovanje indukovanih prenapona

K2 - Provodnici unutrašnje instalacije 0.4 kV na kablovskim regalima do merno-razvodnog ormana,

K3 - Provodnici unutrašnje instalacije 0.4 kV na kablovskim regalima od merno-razvodnog ormana do pogona,

MRO - merno-razvodni orman,

D4 - Udaljenost mesta udara groma od provodnika na kojima se indukuje napon,

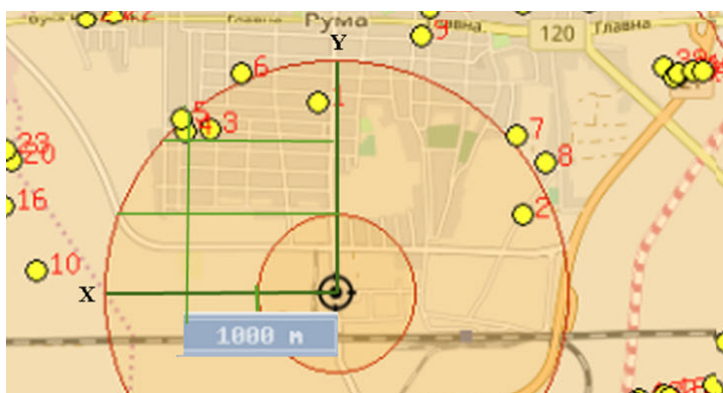
I1 i I2 - Simbolična oznaka deonica na kojima se indukuju prenaponi.

Na provodnicima K2 i K3 se indukuju prenaponi koji su izazvali preskok ispred MRO. Pošto se događaj desio u toku noći, smatra se da nije bilo nikakvog opterećenja na kraju provodnika K3.

8.2 Hipoteza o nastanku požara

Požar je iniciran na kablovskim regalima unutar objekta. Predpostavlja se da je do proboja izolacije koji je inicirao požar došlo između faznog i neutralnog provodnika. Nije bilo moguće da se probije zajednički izolacioni omotač oko sva tri fazna i neutralnog provodnika prema uzemljenom regalu, jer je spoljašnji izolacioni sloj na kablju znatno veće debljine od izolacije pojedinačnih faznih provodnika i neutralnog provodnika. Kratak spoj između faznog provodnika i neutralnog provodnika nije izazvao brzo topljenje osigurača u KPK zbog velike impedanse petlje, tako da je došlo do paljenja izolacije kabla, razvoja električnog luka i mogućeg pada delova zapaljive izolacije ili istopljenih metalnih kapljica na zapaljivu kartonsku ambalažu koja se nalazila ispod kablovskog regala.

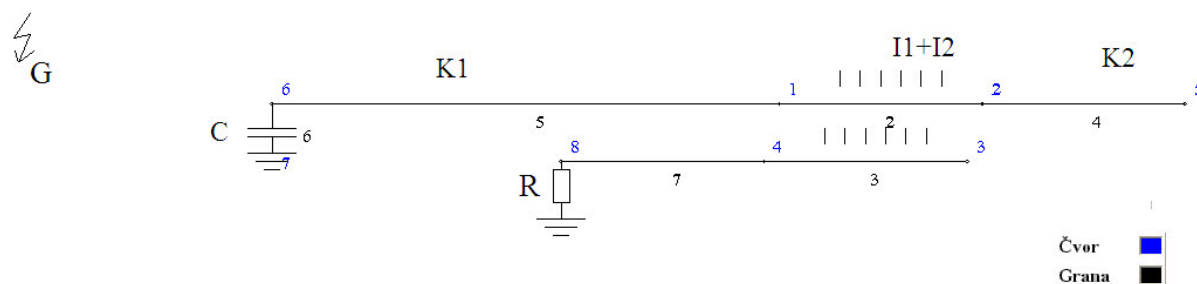
Da bi se izvršila simulacija indukovanih prenapona usled atmosferskih udara korišćeni su rezultati registracije sistema za lokaciju pražnjenja "SKALAR" koji je deo evropskog sistema **EUCLID** koji predstavlja skraćenicu od "European Cooperation for Lightning Detection". Sistem SCALAR je počeo sa radom 1997 god i sada ima instalirane senzore u svim zemljama regiona. U našoj zemlji se koriste 2 senzora, dok je treći senzor u BiH. Na slici 8.2 prikazan je deo mape područja sa centrom u oštećenom objektu i označenim krugom poluprečnika 1000 m.



Slika 8.2: Deo rezultata registracije atmosferskih pražnjenja u okolini analiziranog objekta

Odabran je udar broj 3 sa slike 8.2, sa izmerenom amplitudom struje 51 kA, koji se nalazi na rastojanju od 960 m od oštećenog objekta. Strmina struje atmosferskog pražnjenja je usvojena 37 kA/ μ s.

Na slici 8.3 dat je ekranski prikaz zamenske šeme koja je korišćena za procenu indukovanih prenapona. Za proračun je korišćen program GROM sopstvene izrade, sa teorijskim objašnjenjem metode date u poglavlju 9 na strani 365 (I deo).



Slika 8.3: Ekranski prikaz zamenske šeme koja je korišćena za procenu indukovanih prenapona

Oznake na slici 8.3 imaju sledeće značenje:

G -mesto atmosferskog udara,

- 2 -fazni provodnik na kome se indukuje napon između čvorova 1 i 2,
- 3 -neutralni provodnik na kome se indukuje napon između čvorova 4 i 3,
- 4, 5 -fazni provodnici podzemnih kablova između tačaka 2 i 5, odnosno 6 i 1, na kojima nema indukovanja napona,
- 7 -neutralni provodnik kabla između tačaka 8 i 4, na kome nema indukovanja napona,
- C - kapacitivnost namotaja transformatora u TS 20/0.4 kV,
- R - Otpornost uzemljenja koja je pretpostavljena da iznosi 5Ω .

Iako su na zamenskoj šemi fazni provodnik i neutralni provodnik razdvojeni, njihove koordinate u programu su identične. Do razlika u naponima na faznom i neutralnom provodniku nastaje zbog toga što je fazni provodnik na jednom kraju vezan za kondenzator, koji reprezentuje ulaznu kapacitivnost transformatora, a neutralni provodnik je na istom kraju uzemljen. Induktivitet namotaja transformatora se zanemaruje zbog toga što na učestanostima prelaznog režima usled atmosferskog pražnjenja induktivna impedansa transformatora je praktično premošćena kapacitivnom admitansom.

Podaci o parametrima udara i elementima šeme dati su u tabeli 8.1

Parametri neutralnog provodnika su identični parametrima faznog provodnika.

Pri proračunu su sledeći parametri usvajani:

- uticaj metalnih regala, za koje se ne zna da li su uzemljeni ili ne,
- usvojena je nepoznata strmina talasa,
- procenjene su dužine provodnika koje su izložene uticaju indukovanih prenapona.

Maksimalne absolutne vrednosti izračunatih napona prikazane su u tabeli 8.2.

Na slici 8.4 prikazani su talasni oblici napona na fazi $U(2)$ i na neutralnom provodniku $U(3)$, kao i razlika ova dva napona $\Delta U(23)$.

Može se zaključiti da je maksimalna razlika napona između faznog i neutralnog provodnika 31.6 kV. Prenapon je viši od podnosivog napona koji je usvojen da iznosi 6 kV i znači da prenapon može da ugrozi izolaciju između faze i neutralnog provodnika u instalacionim kablovima na regalima u objektu i da izazove požar.

Tabela 8.1: Podaci o parametrima udara i elementima šeme

Br.	Opis	oznaka	vrednost
1	Amplituda struje pražnjenja	$I_{max}(kA)$	51
2	Strmina struje pražnjenja	$S(kA/\mu s)$	37
3*	Trajanje začelja struje pražnjenja	$T(\mu s)$	72
4*	Relativna brzina povratnog udara u odnosu na brzinu svetlosti	β (rj)	0.3
5*	Visina oblaka	H (km)	3
6	Udaljenost po X osi do levog početka faze	X(m)	-150
7	Udaljenost po Y osi do faze	Y(m)	948
8	Udaljenost mesta udara od levog početka provodnika	$D4 = \sqrt{X^2 + Y^2}$	960
9	Dužina faze po kojoj se indukuje napon	$I1+I2$ (m)	40
10	Karakteristična impedansa faze i neutralnog provodnika u objektu (grane 2, 3, 4 i 9)	Z_c (Ω)	507
11	Dužina kabla od TS do KPK	K1 (m)	90
12	Karakteristična impedansa faze kabla	Z_c Ω	40
13	Duzina kabla iza provodnika sa indukovanjem	K2(m)	40
14	Kapacitivnst namotaja transformatora	C(pF)	3
15	Visina provodnika na kome se indukuje napon	h(m)	10

Napomena: Veličine označene zvezdicom * uz redni broj elementa nemaju bitnog uticaja na rezultate proračuna.

Tabela 8.2: Maksimalni prenaponi na faznom provodniku $U_{max}(2)$, neutralnom provodniku $U_{max}(3)$ i njihova razlika ΔU

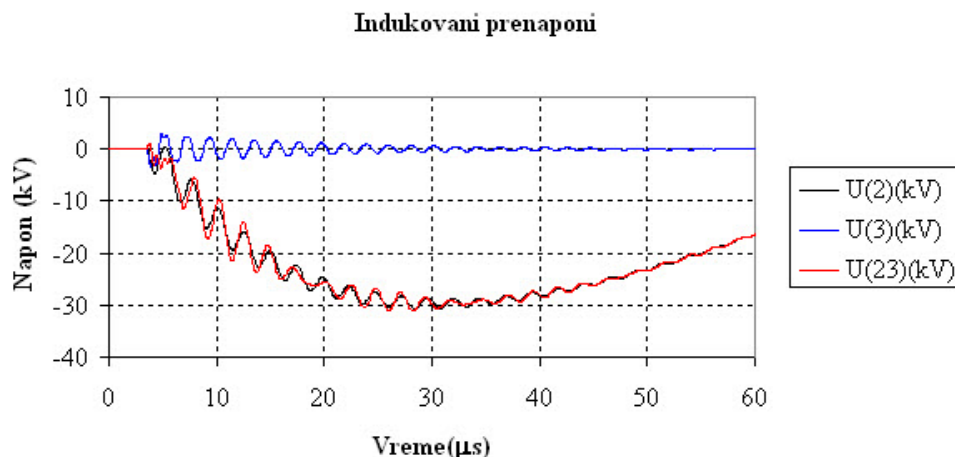
$U_{max}(2)(kV)$	$U_{max}(3)(kV)$	$\Delta U_{max}(kV)$
30.6	3.52	31.6

8.3 Primena zaštitnih mera

U zaštitne mera od uticaja atmosferskog pražnjenja spada zaštita od direktnog udara i zaštita od elektromagnetnih impulsa nastalih pražnjenjem u okolinu objekta. U ovom primeru težište je zaštita od indukovanih uticaja atmosferskog pražnjenja.

Za zaštitu elektroenergetskih električnih instalacija od atmosferskih prenapona najvažnija mera koja se primenjuje je izjednačenje potencijala koja se vrši na dva načina:

- Primena prenaponskih zaštitnih uređaja (SPD - skraćeno od engleskog Surge Protective Devices), koji u slučaju prenapona reaguju i ograničavaju potencijalnu razliku između delova električne instalacije na različitim potencijalima,



Slika 8.4: Talasni oblici napona na fazi **U(2)** i na neutralnom provodniku **U(3)**, kao i razlika ova dva napona

- Povezivanje svih metalnih masa koje bi trebalo da su na potencijalu zemlje, najkraćom vezom.

Prema ugroženosti od delovanja atmosferskih udara se definišu se zone zaštite (LPZ od engleskog Lightning Protection Zone). Zona LPZ 0 definiše prostor u kome ne postoji nikakva zaštita, LPZ 1 je prostor koji se štiti najgrubljom prenaponskom zaštitom, itd.

Prenaponski zaštitni uređaji SPD se postavljaju na granicama zona zaštite. U slučaju razmatranog objekta prelazak iz zone LPZ 0 u LPZ 1 je kablovska priključna kutija.

Prenaponski zaštitni uređaji se dele na tri vrste:

- SPD sa naponskim obaranjem (naglim smanjenjem napona), baziran na delovanju iskrišta, gasnih odvodnika i slično. Po pravilu su ovi uređaji sposobni da provode veće struje, odnosno podnesu veću enegiju, ali sporije reaguju. Zovu se još i odvodnici struje. U klasifikaciji se svrstavaju u SPD tipa 1,
- SPD sa naponskim ograničenjem, baziran na delovanju varistora ili prenaponskih dioda. Ovi uređaji brže reaguju, sposobni su da ograniče napon na nižu vrednost, ali su energetski i strujno manje izdržljivi. U klasifikaciji se svrstavaju u SPD tipa 2.
- Kombinovan SPD sadrži oba tipa komponenti. U klasifikaciji se svrstavaju u SPD tipa 1+2.

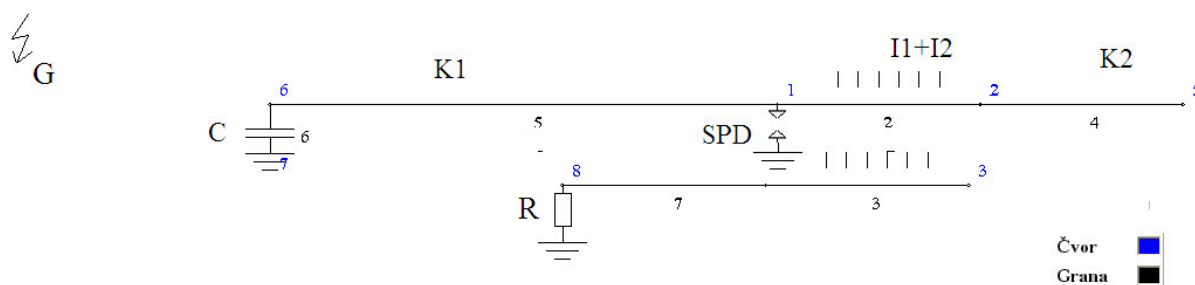
Na slici 8.5 dat je ekranski prikaz šeme sa identičnim mestom pražnjenja kao na slici 8.3, kada su u kablovskoj priključnoj kutiji (KPK) postavljeni odvodnici struje na

bazi iskrišta. Karakteristike predloženog zaštitnog uređaja na osnovu kataloga su date u tabeli 8.3.

Tabela 8.3: Karakteristike primenjenog prenaponskog zaštitnog uređaja

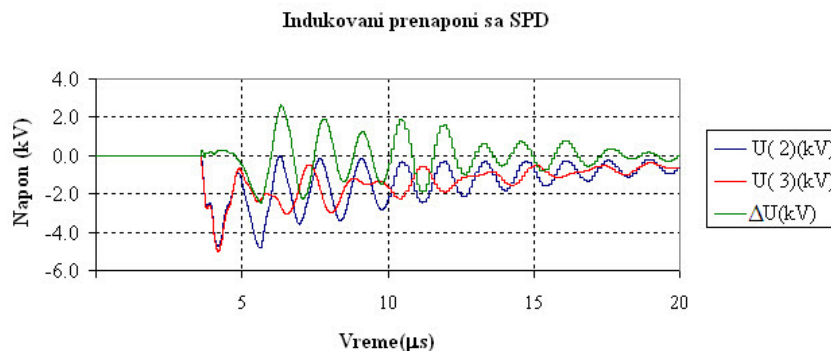
Maksimalni radni AC napon	U_C (V)	255
Amplituda udarne struje oblika (10/350) μ s	I_{ud} (kA)	50
Podnosivi privremeni prenapon (TOV)	U_T (V)	440
Zaštitni nivo pri atmosferskoj udarnoj struji	U_P (kV)	1.3
Sposobnost prekidanja propratne struje pri naponu U_C	I_F (kA)	12

Napon U_C predstavlja trajni radni napon za SPD.



Slika 8.5: Ekranski prikaz zamenske šeme koja je korišćena za procenu indukovanih prenapona kada se primenjuje SPD

Rezultati proračuna talasnih oblika indukovanih prenapona na faznom provodniku $U(F)$, neutralnom provodniku $U(N)$ i razlika ova dva napona ΔU kada se primenjuju SPD u KPK prikazani su na slici 8.6.



Slika 8.6: Talasni oblici napona na fazi $U(2)$ i na neutralnom provodniku $U(3)$, kao i razlika ova dva napona u prisustvu SPD

Maksimalne vrednosti po absolutnoj vrednosti izračunatih napona prikazane su u tabeli 8.4.

Tabela 8.4: Maksimalni prenaponi na faznom provodniku $U_{\max}(F)$, neutralnom provodniku $U_{\max}(N)$ i njihova razlika ΔU_{\max} u prisustvu prenaponskih zaštitnih uređaja

$U_{\max}(F)$	$U_{\max}(N)$	ΔU_{\max}
4.82	5	2.51

Može se uočiti da su maksimalni prenaponi na najudaljenijem kraju instalacije niži od podnosivog napona, koji je 6 kV.

Primer 9

Uticaj jonizacije tla

Koautor: Tomislav Rajić

9.1 Uvodne napomene i numerički proračun

Cilj projektnog zadatka na osnovu koga je ovaj primer pripremljen je bio da se proveri u kojoj meri je dalekovod koji prolazi kroz planinske predele sa izrazito kamenitom podlogom ugrožen od preskoka na izolatorskim lancima prilikom atmosferskog pražnjenja. Mesto pražnjenja je varirano duž raspona između dva stuba pri statističkom proračunu koristeći pojednostavljenu metodu opasnih parametara. Proračuni su rađeni pomoću programa EMTP-atp uz dodatni upravljački softver pripremljen u programskom okruženju Visual Basic posebno za ovu svrhu. AtpDraw grafički predprocesor programa EMTP-atp omogućava generisanje fajlova sa ulaznim podacima koji se mogu učitati u upravljački softver i izvršiti programiranje automatske varijacije više parametara u isto vreme u cilju ubrzanja proračuna. Upravljački program omogućava čitanje izlaznih rezultata i upisivanje odgovarajućih podataka za statističku analizu u Microsoft Excel tabelu. Za statistički proračun se koristi jednoparametarski zakon raspodele struja i strmina struje groma na čelu talasa, koji je predložen u [13], odnosno u poglavlju 8.1.7 na strani 313 (I deo). Po ovoj metodi se varira samo amplituda struje linearno rastućeg čela, a usvojena je funkcionalna veza između amplitude i vremena čela struje u sledećem obliku:

$$T_m = a \times I_m^b \quad (9.1)$$

gde su empirijske konstante date izrazima:

$$\begin{aligned} a &= 0.154 \\ b &= 0.624 \end{aligned} \quad (9.2)$$

Na osnovu izračunatog vremena trajanja čela, za svaku amplitudu struje atmosferskog pražnjenja I_j određuje se strmina čela struje S_j :

$$S_j = \frac{I_j}{T_m} \quad (9.3)$$

Amplituda struje I data je u kA, strmina struje S data je u kA/ μ s, a vreme čela T_m je dato u μ s.

U programu ATPDraw varira se amplituda talasa I_m , a trajanje čela T_m se prema formuli 8.17 na strani 313 (I deo) podešava prema svakoj amplitudi.

Verovatnoća pojave struje veće od granične struje koja izaziva preskok vrši se putem izraza:

$$P(I_m > I_g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (9.4)$$

gde je: $x = \frac{\ln \frac{I_m}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}}$

Integral 9.4 dobija se na osnovu sledećeg izraza, koji se može izračunati u Microsoft Excel tabeli.

$$P(I_m > I_g) = 1 - 0.5 \times [1 + \text{ERF}(x)] \quad \text{za } x \geq 0 \quad (9.5)$$

$$P(I_m > I_g) = 1 - 0.5 \times [1 - \text{ERF}(x)] \quad \text{za } x < 0 \quad (9.6)$$

Funkcija $\text{ERF}(X)$ naziva se Funkcijom greške i spada u grupu funkcija koja je Microsoft Excel svrstana u grupu "engineering" funkcija.

9.2 Primenjeni modeli

9.2.1 Model stuba

U slučaju analize broja preskoka na izolaciji visokonaponskog voda 110 kV ili više, važan podatak je da li se radi o jednopolnom kvaru, jer se on eliminiše tehnikom jednopolnog brzog automatskog ponovnog uključanja (APU). Ako se radi o višefaznom kvaru, tada sva tri pola prekidača moraju da isključe (bez obzira da li je kvar dvofazni ili trofazni). Iz tog razloga se proračuni rade trofazno. Detaljno je objašnjen model trofaznog stuba u poglavlju 7.3.2, a dat je na slici 7.19, na strani 216 (I deo). U slučaju srednjenaponskih vodova jednopolno APU se ne praktikuje, jer je mehanizam za pokretanje kontakata obično zajednički za sva tri pola.

9.2.2 Model uzemljivača stubova

Na osnovu dostupnih podataka može se zaključiti kolike su otpornosti rasprostiranja uzemljivača stubova na osnovu merenja na terenu. Merenja se odnose na otpornost rasprostiranja uzemljivača pri struji frekvencije 50 Hz. S obzirom da se analiziraju atmosferski prenaponi, postoje dva pristupa problemu:

- kada se ne uvažava pojava jonizacije tla oko uzemljivača u slučaju male specifične otpornosti tla,
- kada se uvažava pojava jonizacije tla oko uzemljivača usled pojave velikih vrednosti električnog polja.

U oba slučaja problem se može pojednostaviti pretpostavljajući da impedansa stuba ima rezistivnu prirodu.

Ukoliko se ne uvažava pojava jonizacije, dovoljno je usvojiti da je impulsni koeficijent jednak $K_{ud}=1$. To znači da je otpornost rasprostiranja uzemljivača za visokofrekventne pojave isti kao i za struju frekvencije 50 Hz. Impulsni koeficijent može da bude veći ili manji od 1 u zavisnosti da li postoji dvoslojno tlo i kakav je odnos otpornosti gornjeg i donjeg sloja, što je objašnjeno u poglavlju 7.4.2 na strani 229 (I deo). Ako se uvaži jonizacija tla, što je neminovno u kamenitim predelima veće specifične otpornosti tla, otpornost rasprostiranja uzemljivača zavisi od amplitude struje koja se sa uzemljivača odvodi u tlo. Izrazi po kojima se računa otpornost rasprostiranja uzemljivača dati su u standardu [3]. U daljem tekstu je opisan način modelovanja nelinearnog otpora rasprostiranja uzemljivača u uslovima jonizacije tla.

Otpornost rasprostiranja se računa na sledeća dva načina, a u zavisnosti kolika je struja kroz uzemljivač, što je opisano u poglavlju 7.4.2 na strani 229 (I deo), odnosno dato je izrazom:

$$R = R_o \text{ za struju } I < I_g \quad (9.7)$$

$$R(I) = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (9.8)$$

R_o -stacionarna otpornost pri struji pogonske učestanosti od 50 Hz.

I_g - granična struja pri kojoj dolazi do jonizacije, koja se računa prema izrazu:

$$I_g = \frac{E_o \cdot \rho}{2\pi \cdot R_o^2} \quad (9.9)$$

E_o je jonizacioni gradijent za koji se uzima vrednost 400 kV/m,

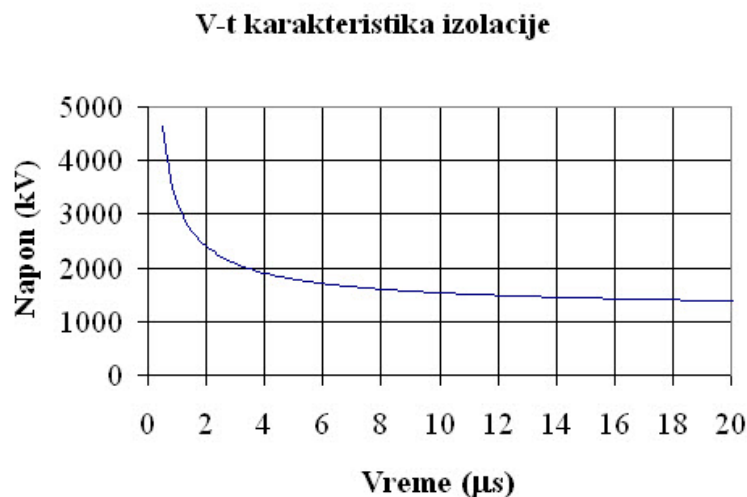
ρ je specifična otpornost tla u kome se nalazi uzemljivač.

Za trenutnu vrednost električnog polja iznad E_o , kojoj odgovara granična struja pražnjenja I_g , dolazi do jonizacije tla, a ispod te vrednosti, otpornost rasprostiranja ima fiksnu vrednost.

9.2.3 Preskočni napon

U poglavlju 7.5.4, strana 240 (I deo), objašnjeno je usvajanje podnosivog napon izolacije za standardni ispitni udarni napon. Standardni udarni ispitni napon za 400 kV mrežu iznosi $U_w = 1425$ kV. Umesto da se računa sa rasipanjem preskočnog napona, usvojeno je da svaka vrednost napona preko podnosivog napona U_w izaziva preskok, što predstavlja idealizovanu karakteristiku preskočnog napona, umesto realne karakteristike preskoka, sa uvažavanjem slučajne prirode koja izaziva rasipanje napona pri kome dolazi do preskoka. Na ovaj način se dobijaju kritičniji rezultati.

Za izolaciju za 400 kV oblik podnosivog napona izolacije je dat na slici 9.1 za dužinu izolacionog razmaka 2.54 m. Ukoliko se koristi produženi razmak za veće nadmorske visine, smanjenje preskočnog napona se kompenzuje produženjem razmaka, tako da podnosivi napon ostaje nepromenljiv.



Slika 9.1: : Kriva V-t karakteristike preskočnog napona za slučaj 400 kV izolatora

9.2.4 Parametri analiziranog voda

Analiza je izvršena na osnovu srednjih vrednosti geometrijskih podataka za analiziran dalekovod nazivnog napona 400 kV, koji su dati u tabeli 9.1.

Tabela 9.1: Tipični geometrijski podaci za nadzemni vod 400 kV

Stub br.	Visina n.m. (m)	H_z (m)	H_{GF} (m)	H_{SF} (m)	H_{DF} (m)	R_{uz} Ω	Raspon (m)
1	1292	48.3	40	31.5	23	74	260
2	1247	39.5	30.5	22	13.5	123	146
3	1207	45.5	36.5	28	19.5	141	

Oznake u tabeli 9.1 imaju sledeće začenje:

Stub - broj stuba,

Visina n.m - Nadmorska visina podnožja stuba,

H_z - visina zaštitnog užeta,

H_{GF} - visina gornje faze,

H_{SF} - visina srednje faze,

H_{DF} - visina donje faze,

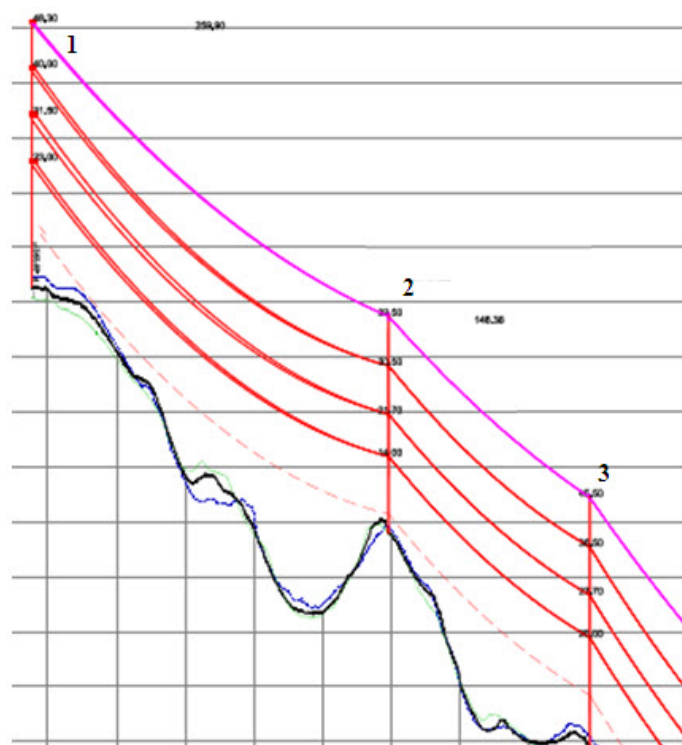
R_{uz} - otpor rasprostiranja uzemljivača stuba pri struji industrijske frekvencije.

Profil trase na razmatranom rasponu prikazan je na slici 9.2 između stubova 1 i 2. Pri proračunu atraktivne površine korišćena je srednja visina stubova u odnosu na temelje stubova.

Otpornosti uzemljenja stubova su dati u tabeli 9.2 zajedno sa graničnom strujom pražnjenja, koja izaziva jonizaciju, prema izrazu 7.77 na strani 231 (I deo).

Tabela 9.2: Otpornosti uzemljenja stubova

Br. stuba	1	2	3
Otpor R_{uz}	74	123	141
Granična struja	28.9	17.7	13.58



Slika 9.2: Profil trase na razmatranom rasponu

9.3 Rezultati proračuna

9.3.1 Opis proračuna prenapona

Izvršen je proračun maksimalnih prenapona sistematskim variranjem mesta udara duž raspona. Prikazani su rezultati samo za raspone voda između stubova 2 i 3, jer su tu otpornosti veće. Istovremeno je varirana amplituda talasa struje atmosferskog pražnjenja i trajanje čela. Mesto udara u zaštitno uže je varirano sa korakom 30 m duž raspona koji je 146 m dugačak, stim što je početna tačka na 10 m od vrha stuba Vrh2, a kraj variranja na 10 m od vrha stuba Vrh3. Na slici 9.3 dat je ekranski prikaz šeme u programu ATPDraw.

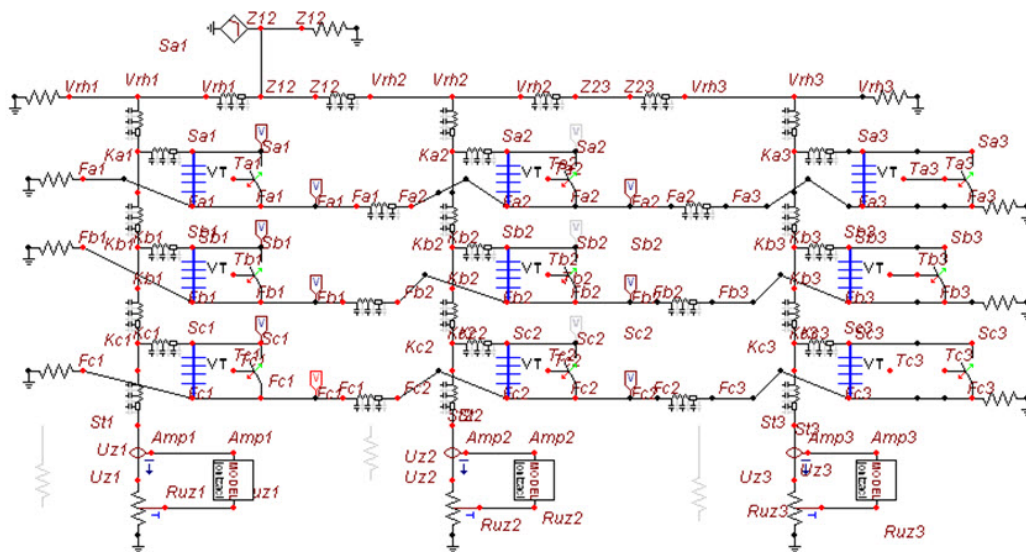
Uvedene su sledeće konvencije obeležavanja čvorova u šemi u programu ATPDraw:

Vrx -Vrh stuba bure, $x=1, 2$ i 3 za stubove 1, 2 i 3,

Kyx - čvor konzole na stubu $x=1, 2$ i 3 , za odgovarajuće faze $y=a, b, c$,

Syx - čvor na kraju konzole u tački vešanja izolatora, sa istim značenjem za x i y ,

Fyx -čvor na fazi u tački vešanja za izolator, sa istim značenjem za x i y ,



Slika 9.3: Ekranski prikaz šeme trofaznog voda sa dva raspona i 3 stuba

Tyx -pomoćni čvor za upravljanje modelom izolatora sa preskočnom karakteristikom. Kada model preskoka pošalje signal CLOSE=1 prekidaču, prekidač premošćuje izolator i nastaje kratak spoj preko izolatora. Oznake za x i y imaju isto značenje kao i ranije,

Stx - tačka u podnožju stuba ispred uzemljivača, za stubove $x = 1, 2, 3$,

Ampx - proba za merenje struje čija se vrednost šalje u model jonizacije tla, gde je $x = 1, 2, 3$ za pojedine stubove,

Uzx - čvor iza sonde za merenje napona na ulazu u uzemljivač, za stubove $x = 1, 2, 3$.

VT - kreirana ikona izolatora sa programom u jeziku MODELS iz paketa EMTP za simulaciju V-t karakteristike izolacije,

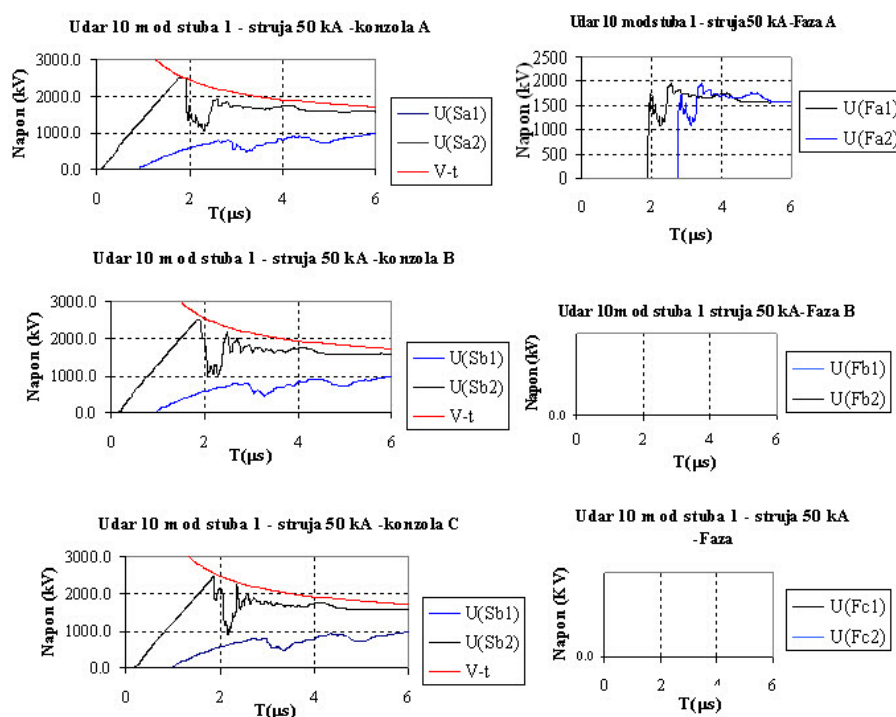
Ruzx - strujno zavisna otpornost upravljana iz programa u jeziku MODELS, za stubove $x=1,2$ i 3.

Levo od čvorova **Fy1** i desno od čvorova **Fy3** za $y=a, b$ i c , su otpornici koji simuliraju beskonačno dugačke fazne provodnike. Levo od čvora Vrh1 i desno od čvora Vrh3 su otpornici koji simuliraju beskonačno dugačku zaštitnu užad.

9.3.2 Deterministički proračun

Izvršen je radi ilustracije proračun kada se atmosferski udar odvija na 10 m od stuba 1, u tačku **Z12**. Amplituda struje je izabrana da bude 50 kA, a vreme čela 1.7 μs .

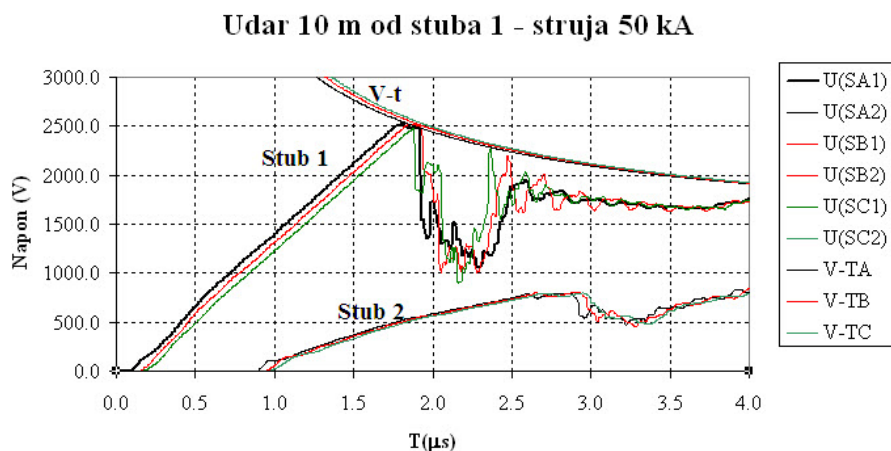
Na slici 9.4 prikazani su naponi na krajevima konzole a, b i c prvog stuba (čvorovi Sa1, Sb1 i Sc1) i drugog stuba (čvorovi Sa2, Sb2 i Sc2), kao i na faznim provodnicima faza a, b i c ispod izolatora prvog stuba (čvor Fa1, Fb1 i Fc1) i ispod izolatora drugog stuba (čvorovi Fa2, Fb2 i Fc2). Na fazama se pojavljuju naponi samo na fazi a, što znači da na fazama b i c ne dolazi do preskoka. Takođe je nacrtana i V-t karakteristika za izolatore prvog stuba.



Slika 9.4: Talasni oblici napona na krajevima sve 3 konzole i na sve 3 faze na prvom i drugom stubu

Mora se naglasiti da se pri određivanj $V - t$ karakteristike napona vreme računa od trenutka nailaska napona u čvor na kraju konzole. To znači da su vremenske karakteristike preskočnih napona pomerene na pojedinim fazama. To je prikazano na slici 9.5. Takođe se može uočiti da su naponi na stubu 2 značajno manji nego na stubu 1 zbog toga što kroz stub 1 protiče veća struja pražnjenja zbog njegove blizine i uticaja njegovog uzemljivača.

Programom za sistematsku varijaciju podataka izvršeno je izračunavanje najmanje amplitude struje groma koja izaziva preskok na jednoj fazi (oznaka 1F), ili dve, odnosno sve tri faze (oznaka 3F). Varijacija struje rađena je od dovoljno velike struje da izaziva preskok na sve 3 faze. Postepeno se smanjuje amplituda struje pražnjenja za 1 kA i ponavljaju se proračuni sve do slučaja kada bar na jednoj fazi ne dolazi do preskoka. Tada smatramo da je najmanja struja koja izaziva dvofazni ili trofazni preskok (3F) prva veća struja. Daljim smanjivanjem struja dolazimo do struje kada ne dolazi do preskoka ni



Slika 9.5: Naponi na pojedinim fazama i V-t karakteristike pojedinih faza

na jednoj od tri faze. U tom slučaju prva veća struja je struja jednofaznog preskoka, koju može da prekine brzo APU i da kvar bude prolaznog karaktera. Broj jednofaznih preskoka se dobija kada se od ukupnog broja pojavljivanja 1F preskoka oduzme broj 3F preskoka, čime izdvajamo samo preskoke na jednoj fazi, koje ćemo obeležavati kao APU kvarovi, odnosno kvarovi koji mogu biti eliminisani tehnikom isključenja sa brzim automatskim ponovnim uključanjem (APU). Proračuni prelaznog procesa rađeni su programom EMTP-atp.

9.3.3 Primene excel tabele za statistički proračun

U tabeli 9.3 prikazani su rezultati izračunatih prenapona na fazama prvog stuba Fa1, Fb1, Fc1 za struju pražnjenja I_{max} i odgovarajuće trajanje čela talasa T_c .

Tabela 9.3: Tabela sa udarnim strujama i naponima koje izazivaju preskoke prema faznim provodnicima.

Slučaj br.	I_{max} (kA)	T_c (μs)	Fa1 (kV)	Fb1 (kV)	Fc1 (kV)	Kvar
1	49	1.7	2203	1805	0	
2	48	1.7	2163	1775	0	
3	47	1.7	2122	1747	0	
4	46	1.7	1987	1678	0	
5	45	1.7	1134	1268	0	3F
6	44	1.6	1360	0	0	1F
7	43	1.6	0	0	0	

Na osnovu tabele 9.3 može se videti da u slučajevima od 1 do 5 preskok nastupa

na fazama a i b, ali ne na fazi c, jer je napon na toj fazi 0. To znači da usled tih struja dolazi do preskoka na dve faze, što izaziva trofazno isključenje. U slučaju broj 6 preskok nastupa samo prema fazi a, ali ne prema fazi b, odnosno c. To znači da u slučaju broj 5 postoji minimalna struja pražnjenja koja izaziva preskok na 2 faze, odnosno izaziva trolno isključenje, tako da se ta struja računa kao granična struja koja izaziva višefazni kvar i taj slučaj je obeležen kao 3F. U slučaju broj 7 uopšte ne dolazi do preskoka ni na jednoj fazi, pa se zato slučaj 6 smatra kao graničan slučaj za nastanak jednopolnog preskoka koji je obeležen kao 1F.

Proračuni su rađeni za udar u levi stub 1, zatim za udar na rastojanju 10 m od stuba, a zatim za udare koji su pomerani sa korakom od 30 m do rastojanja 250 m od stuba 1 i konačno za udar u stub 2 koji je na 260 m daleko od levog stuba 1.

Formule i oznake korišćene u statističkom proračunu godišnjeg broja preskoka:

I_{3F} - Minimalna struja koja izaziva preskok na najmanje dve ili sve tri faze,

I_{1F} - Minimalna struja koja izaziva preskok na samo jednoj fazi,

X_{3F} - Normalizovana vrednost logaritma I_{3F}

$$X_{3F} = \frac{\ln\left(\frac{I_{3F}}{I_{50}}\right)}{\sqrt{2}\sigma_{\ln I}}$$

X_{1F} - Normalizovana vrednost logaritma I_{1F}

$$X_{1F} = \frac{\ln\left(\frac{I_{1F}}{I_{50}}\right)}{\sqrt{2}\sigma_{\ln I}}$$

I_{50} - struja pražnjenja koja se pojavljuje sa verovatnoćom od 50%,

$\sigma_{\ln I}$ - standardno rasipanje logaritma normalizovane struje

$P(I > I_{3F})$ - Kumulativna verovatnoca struje veće od minimalne struje koja prouzrokuje višefazni preskok,

$P(I > I_{1F})$ - Kumulativna verovatnoca struje veće od minimalne struje koja prouzrokuje jednofazni preskok,

N_{r3F} - Godišnji broj preskoka na deonici dužine Δd prema dve ili sve tri faze:

$$N_{r3F} = A_D \times \Delta d \times N_G \times P(I > I_{3F})/1000$$

A_D - ekvivalentna prhvatna površina jediničnoj dužini voda (br. udara/m),

Δd - Dužina dužina elementarne deonice (m) u koju se razmatra udar groma,

N_G - godišnja gustina pražnjenja po km^2 ,

N_{r1F} - Godišnji broj preskoka na elementarnoj dužini, prema samo jednoj fazi (preskok zaštitno uže - faza):

$$N_{r1F} = Ae \times \Delta d \times N_G \times P(I > I1F)/1000$$

$N_{3F100km}$ - broj preskoka prema 2 ili sve 3 faze sveden na 100 km voda, koji se izračunava iz izraza:

$$N_{3F100km} = N_{r3F} * 100/d_{uk}$$

d_{uk} - ukupna dužina voda u (km),

$N_{1F100km}$ - broj preskoka prema jednoj fazi sveden na 100 km voda, koji se izračunava iz izraza:

$$N_{1F100km} = N_{r1F} * 100/d_{uk}$$

N_{g100km} - godišnji broj udara u dalekovod na 100 km:

$$N_{g100km} = Ae \times N_G \times 100$$

$N_{3F100km\%}$ - procentualan broj 3F preskoka na 100 km u odnosu na broj udara u 100 km voda (%)

$$N_{3F100km\%} = 100 \frac{N_{3F100km}}{N_{g100km}}$$

$N_{1F100km\%}$ - procentualan broj 1F preskoka na 100 km u odnosu na broj udara u 100 km voda (%)

$$N_{1F100km\%} = 100 \frac{N_{1F100km}}{N_{g100km}}$$

U tabeli 9.4 dat je prikaz iz excel tabele sa proračunom statističkih parametara po pojedinim deonicama duž raspona, na osnovu čega se može odrediti ukupan broj jednopolnih i trolnih isključenja:

U tabeli 9.5 prikazan je broj jednofaznih i višefaznih preskoka na 100 km voda, kao i procentualan broj jednofaznih i višefaznih preskoka u odnosu na broj udara u vod.

9.3.4 Uticaj uzemljenja stubova na broj preskoka

Izvršena je analiza uticaja vrednosti otpora uzemljenja stuba br. 2 i br. 3, na godišnji broj preskoka na izolaciji stubova. Proračuni su rađeni tako da se smanjivala vrednost otpora uzemljenja levog i desnog stuba za iznos od 10% od početne vrednosti, koje su iznosile $R1=123 \Omega$ za levi stub i $R2=141 \Omega$ za desni stub.

Tabela 9.4: Proračun broja preskoka po pojedinim deonicama dužina Δd sa svim međurezultatima

Deonica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ukup
Δd (m)	10	30	30	30	30	30	30	30	30	10	260
I3F	44	44	48	59	63	58	54	49	47	44	-
IIF	44	44	48	58	62	54	53	48	46	44	-
X3F	0.45	0.45	0.56	0.80	0.88	0.78	0.69	0.58	0.53	0.45	-
X1F	0.45	0.45	0.56	0.78	0.86	0.69	0.67	0.56	0.51	0.45	-
Erf(X3F)	0.48	0.48	0.57	0.74	0.79	0.73	0.67	0.59	0.55	0.48	-
Erf(X1F)	0.48	0.48	0.57	0.73	0.78	0.67	0.66	0.57	0.53	0.48	-
P(I>I3F)	0.26	0.26	0.22	0.13	0.11	0.14	0.16	0.21	0.23	0.26	-
P(I>IIF)	0.26	0.26	0.22	0.14	0.11	0.16	0.17	0.22	0.24	0.26	-
N_{r3F}	0.005	0.014	0.011	0.007	0.006	0.007	0.009	0.011	0.012	0.005	0.086
N_{r1F}	0.005	0.014	0.011	0.007	0.006	0.009	0.009	0.011	0.013	0.005	0.089

Tabela 9.5: Broj jednofaznih i višefaznih preskoka na 100 km voda, kao i procentualan broj jednofaznih i višefaznih preskoka u odnosu na broj udara u vod

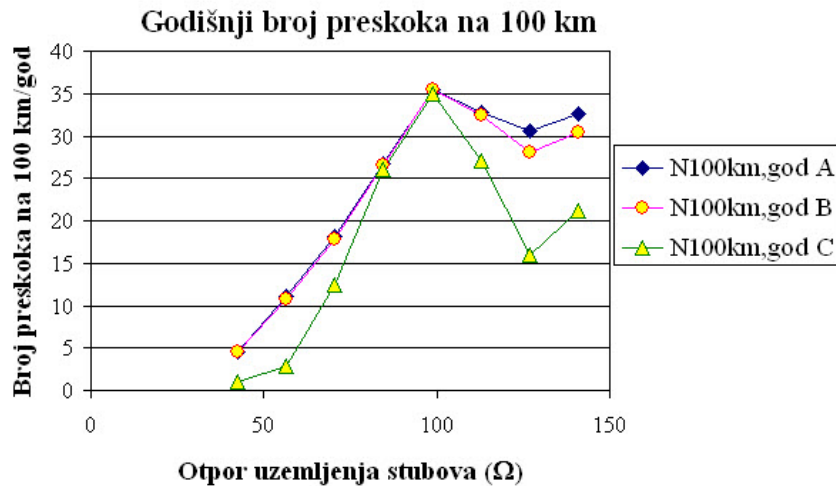
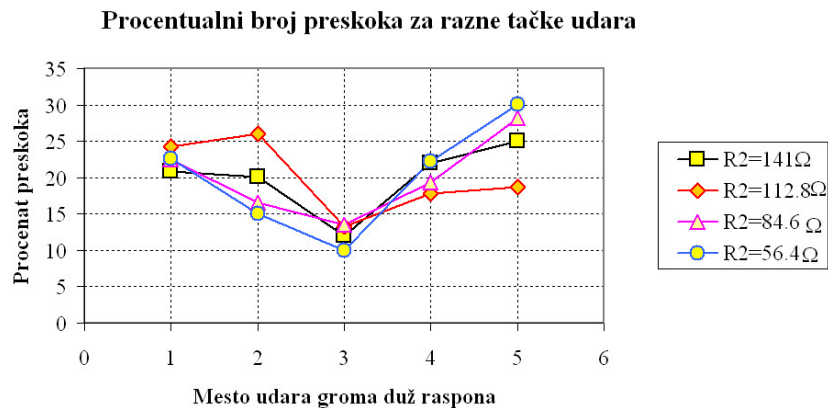
$N_{r3F100km}$	32.99
$N_{r1F100km}$	34.37
N_{g100km}	176.69
$N_{p3F(\%)}$	18.67
$N_{p1F(\%)}$	19.45

Na slici 9.6 prikazan je broj preskoka izražen u funkciji otpora uzemljenja stuba br.3. Otpornosti uzemljenja su varirane tako da su na sva tri stuba srazmerno smanjivane u odnosu na početnu maksimalnu vrednost koja je data u tabeli 9.2. Rezultati su dati za sve 3 faze.

Može se uočiti da broj preskoka raste sa porastom otpora uzemljenja do oko 100 Ω , a zatim sa daljim porastom otpora se smanjuje do oko 130 Ω , a posle se ponovo povećava. Ovaj efekat se pojavljuje zbog uticaja jonizacije tla koja prouzrokuje smanjivanje otpornosti uzemljivača kada struja pređe graničnu vrednost za nastanak jonizacije.

Na slici 9.7 grafički je prikazana je promena broja preskoka za razne tačke udara duž raspona izražena u procentima u odnosu na ukupan broj preskoka na rasponu, za različite otpornosti uzemljenja R2. Uzemljenje stubova R1 i R2 je menjano proporcionalno u odnosu na početnu vrednost.

Može se zapaziti da postoji pravilnost u raspodeli broja preskoka prema tački udara, tako da je najmanji broj preskoka usled udara u sredinu raspona (tačka 3), a da raste kada je tačka udara bliže krajevima raspona. Međutim, zbog jonizacije se dešavaju određene nelogičnosti, tako da se u tački 2 pojavljuje veći procenat preskoka nego u tački 1, kao i da se u tački 5 pojavljuje najveći broj preskoka pri najmanjem otporu uzemljenja. Ovo je posledica efekta jonizacije tla, koji dovodi u određenom opsegu otpornosti do jonizacije i iskrenja, što ima za posledicu smanjivanje napona na uzemljivaču i smanjivanje broja preskoka.

Slika 9.6: Broj preskoka u funkciji otpora uzemljenja R_2 na pojedinim fazama

Slika 9.7: Procentualni broj preskoka za razne tačke udara duž raspona

Zahvalnica

Primer je nastao na osnovu studije Koordinacija izolacije 400 kV dalekovoda Lastva - Pljevlja (Deonica Čevo-Pljevlja), radene za naručioca Kodar energomontaža, doo Beograd, Autoput za Zagreb 22, Beograd, 2021.

Primer 10

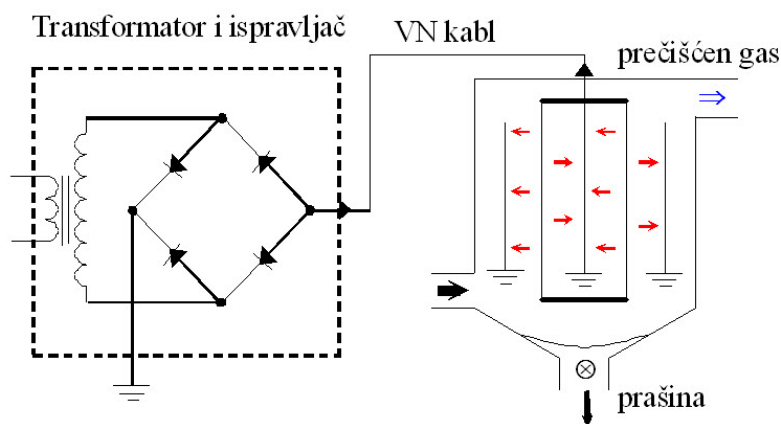
Analiza proboja u postrojenju elektrofiltra

Koautor: Jovan Mikulović

10.1 Princip rada elektrofiltra

Princip elektrostatičkog filtriranja se primenjuje pri odvajanju čvrstih i tečnih čestica iz otpadnih gasova u industrijskim pogonima [118]. Najčešće korišćeni tipovi elektrofiltra su cevasti i pločasti filtri. Elektrostatički filtar (skraćeno elektrofiltrar) se sastoji od jedne ili više uzemljenih elektroda koje se nazivaju kolektorske, odnosno taložne, između kojih struje čestice prašine nošene gasom. Između kolektorskih elektroda su postavljene emisione elektrode na koje je priključen visoki jednosmerni pulsirajući napon (negativan ili pozitivan) dobijen ispravljanjem naizmennog napona industrijske učestanosti, vrednosti 15 do 80 kV. U filtru dolazi do elektrostatičke indukcije i korone usled čega čestice poprimaju određeni električni naboj. Pod delovanjem električnog polja koje vlada u prostoru elektrofiltra naelektrisane čestice skreću i talože se na kolektorskim elektrodama. Povremenim otresanjem specijalnim čekićima (ili ispiranjem) nakupljene čestice se otklanjaju u sabirne prostore. Na slici 10.1 je data šema elektrofiltra. Naizmennični napon se dovodi na primarnu stranu visokonaponskog transformatora. Sekundar transformatora je spojen sa monofaznim Greovim ispravljačem koji se koristi za dobijanje jednosmernog napona. Jedan izvod ispravljača je povezan na masu, a drugi se vodi na emisionu elektrodu filtra.

Efikasnost elektrofiltra zavisi od mnogih parametara kao što su količina i sastav industrijskog gasa, brzina proticanja gasa, temperatura, vlažnost, kvalitet elektroda, [119]. Jedan od problema koji se javlja kod elektrofiltra je u vezi naponom pri kome se po-



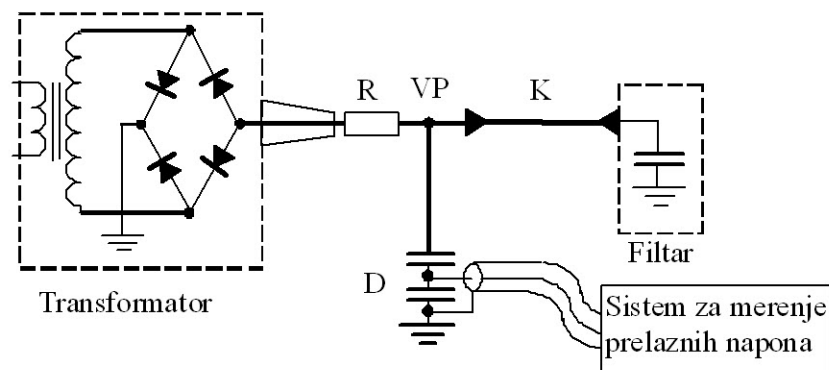
Slika 10.1: Princip rada elektrofiltra

javljuje varničenje između elektroda. Optimalan rad elektrofiltra se postiže kada visoki jednosmerni napon prati napon iskrenja. Zbog toga je potrebno da se u svakom trenutku pojave iskre visoki jednosmerni napon naglo smanji da bi se izbegla mogućnost pretvaranja iskre u električni luk pri kome je neefikasno izdvajanje čestica prašine. Cilj je da se iskrenje stalno ponavlja, a da ne pređe u trajni električni luk. Svako iskrenje u elektrofilteru je praćeno pojavom strujnog impulsa. Zbog ovakvog režima rada elektrofiltra postoji mogućnost nastanka visokofrekventnih prelaznih procesa i prenapona koji mogu da oštete elemente za napajanje filterskog postrojenja.

U analiziranom pogonu više puta je dolazilo do kvarova na izolaciji transformatora za napajanje elektrofiltra mlina cementa. Cilj eksperimentalnih i teorijskih istraživanja je bio da se utvrdi da li postoje izraženi prelazni režimi pri pojavi varničenja i električnog luka unutar elektrofiltra i da se predlože mere da se prelazni režimi priguše.

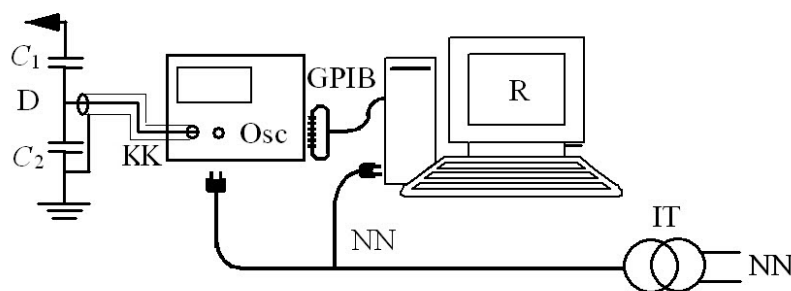
10.2 Opis sistema

Elektrofilter se napaja preko visokonaponskog transformatora, nazivnog sekundarnog napona 50 kV, struje 0,75 A i snage 70,3 kVA. Ispravljač u obliku Grecovog spoja nalazi se integralno u posudi transformatora. Na slici 10.2 je prikazana zamenska šema postrojenja elektrofiltra i mernog sistema sa oznakom mesta gde je bilo izvršeno merenje. Iza uvodnog izolatora u transformator postavljen je prigušni otpornik $R=40 \Omega$. Filtersko postrojenje je povezano preko vazдушnih provodnika VP dužine 10 m i kabla K, dužine oko 60 m. Elektrofilter je u zamenskoj šemi predstavljen kondenzatorom koji se u toku rada kratkospaja kada dođe do iskrenja ili pojave električnog luka. D predstavlja kapacitivno delilo napona.



Slika 10.2: Zamenska šema postrojenja elektrofiltra i mernog sistema

Merni sistem je sastavljen od kapacitivnog delila napona D, osciloskopa i računara. Detaljna šema mernog sistema je prikazana na slici 10.3.



Slika 10.3: Detaljna šema mernog sistema

Oznake na slici 10.3 imaju sledeće značenje:

C_1 -kondenzator u visokonaposojoj grani delila kapacitivnosti $C_1 = 62.5$ pF.

C_2 -kondenzator u niskonaposojoj grani delila kapacitivnosti $C_2 = 6000$ pF.

KK -koaksijalni kabl dužine 20 m

GPIB -oklopljeni komunikacioni kabl GPIB interfejsa.

Osc- Korišćen je digitalni osciloskop koji se sa računarom vezuje preko paralelnog komunikacionionog interfejsa GPIB. Za upravljanje i akviziciju podataka korišćen je specijalizovani program sopstvene izrade.

NN -niskonaponski kabl za napajanje oscilskopa i računara.

IT- izolacioni transformator odnosa preobražaja 230/230 V koji služi da galvanski odvoji kolo napajanja instrumenata od napojne mreže zbog moguće pojave razlika potencijala u vidu visokofrekventnih smetnji između uzemljenja delila napona D i napojne mreže NN.

NN-niskonaponsko napajanje mernih uređaja iz lokalne transformatorske stanice.

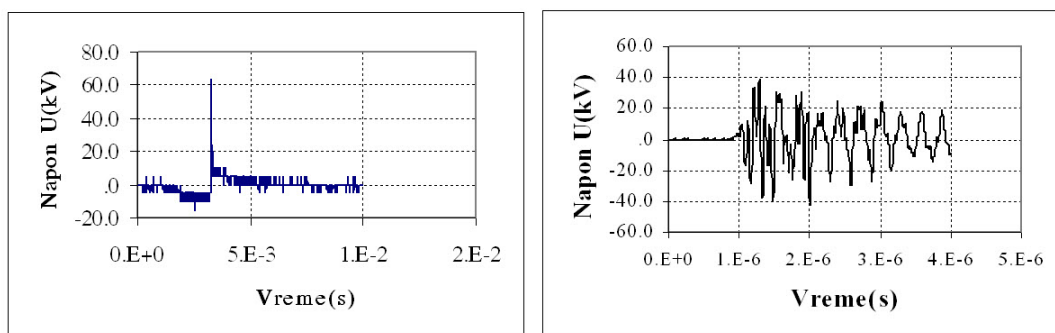
10.3 Rezultati merenja

Merenje prelaznih procesa na napojnom sistemu elektrofiltra rađeno je neposredno pred početak remonta kada je proizvodnja bila zaustavljena. Iz tog razloga je opterećenje filtra bilo značajno smanjeno, pa se očekivalo i da pojave prelaznih procesa u filtru budu znatno manje izražene. Snimanje jednosmernog izlaznog napona rađeno je kapacitivnim delilom napona, koje je pogodno za snimanje brzih prelaznih stanja, ali nije pogodno za snimanje ustaljenih jednosmernih napona. Delilo napona je bilo priključeno na provodnik iza prigušnog otpornika.

Na osnovu snimanja je ustanovljeno da se pri pojavi iskre u filtru pojavljuju oscilatorno prigušeni prelazni režimi veoma visoke frekvencije (reda nekoliko MHz). Amplituda prenapona pri prelaznom procesu se može samo proceniti zbog teškoća oko merenja jednosmernog napona, ali se zato može ustanoviti veoma izražen prelazni režim. Na slici 10.4 levo prikazan je tipičan oblik prelaznog režima pri rezoluciji 0.5 ms/podeoku. Može uočiti da se u trenutku pojave varnice javlja izražen pik napona koji pri radnom naponu filtra od 20 kV dostiže čak 61,4 kV. U preostalom intervalu merenja se pojavljuje samo šum usled greške digitalizacije.

Da bi se sagledao tačan oblik brzo-promenljivog napona, izvršeno je snimanje sa velikom rezolucijom. Na slici 10.4 desno prikazan je tipičan oblik prelaznog režima pri rezoluciji 500 ns/podeoku. Radni napon filtra je bio 20 kV. Sa snimka se može uočiti da pri prelaznom režimu napon dobija oscilatornu vrednost koja se kreće od -40 kV do + 40 kV. Učestanost prelaznog režima iznosi oko 10 MHz. Snimci levo i desno na slici 10.4 odgovaraju različitim registrovanim talasima.

Na osnovu rezultata merenja se može zaključiti da se pri radu filtra, kada se pojavljuje varničenje, događaju prelazni procesi veoma visoke učestanosti, koja se kreće čak do 10 MHz. Amplituda prenapona može višestruko da premaši vrednost radnog napona. Ovakav režim veoma napreže izolaciju, pa je to uzrok pojava kvarova na izolaciji kablova i na ispravljačima. Otežavajuća okolnost je visoka frekvencija prelaznog procesa, koja izaziva dodatna naprezanja usled mogućnosti pojave povećanih dielektričkih gubitaka pri



Slika 10.4: Talasni oblik napona prelaznog režima pri rezoluciji 0,5 ms/pod. (levo) i 0,5 μ s/pod. (desno)

visokoj frekvenciji, posebno ako je pojava varničenja česta. Pri velikom opterećenju filtra povećava se učestanost pojave varničenja i prelaznih procesa, čime se može objasniti da se kvarovi uvek pojavljuju na postrojenju koje je najopterećenije.

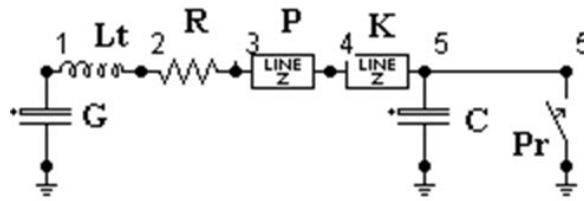
10.4 Računska simulacija prelaznih procesa u elektrofiltru

Izvršena je računarska simulacija prelaznih procesa u elektrofiltrima da bi se sagledali procesi koji dovode do izraženih prenapona i da bi se mogle preduzeti mere za smanjivanje prenapona. Za računarsku simulaciju je korišćen programski paket ATP-EMTP za proračun prelaznih procesa u elektroenergetici, razvijen od Boneville Power Administration, USA, sa predprocesorom za pripremu podataka i upravljanje programom ATPDraw. U programu je kreirano nekoliko ekvivalentnih šema koje su poslužile za modelovanje prelaznih procesa u elektrofiltru.

Na slici 10.5 prikazana je ekvivalentna šema u kojoj se napojni transformator modeluje napunjenim kondenzatorom G napona $U_g = -20$ kV. Reaktansa transformatora je usvojena da iznosi $x_t = 0,1\%$. Kada se izračuna induktivnost rasipanja transformatora svedena na visokonaponsku stranu, dobija se $L_t = 1.13$ H. Iza induktivnosti L_t kojom se modeluje transformator nalazi se otpornik čija je otpornost $R = 40$ Ω . Izvor je modelovan velikim kondenzatorom od 200 μ F da bi se izbegle teškoće oko modelovanja ispravljača u obliku Grecovog spoja, a efekat je potpuno isti jer se kondenzator tako velike kapacitivnosti ponaša kao idealan naponski generator.

Oznake na slici 10.5 imaju sledeće značenje:

G - kondenzator koji zamenjuje elektromotornu silu transformatora temene vrednosti



Slika 10.5: Zamenska šema električnog napojnog sistema filtra kao ekranski prikaz iz programa ATPDraw

$E=20$ kV,

L_t - induktivitet transformatora $L_t = 1.13$ H,

R - otpornik otpornosti $R=40$ Ω .

P - vazdušni provodnik dužine $d=20$ m i karakteristične impedanse $Z_c=500$ Ω .

K - izolovan kabl dužine $d=60$ m i karakteristične impedanse $Z_c=40$ Ω .

C - kapacitet filtra čija je vrednost usvojena da iznosi $C=1$ nF. Vrednost kapaciteta ne utiče na prelazni režim jer je u trenutku kada nastupa prelazni režim kondenzator C premošćen prekidačem.

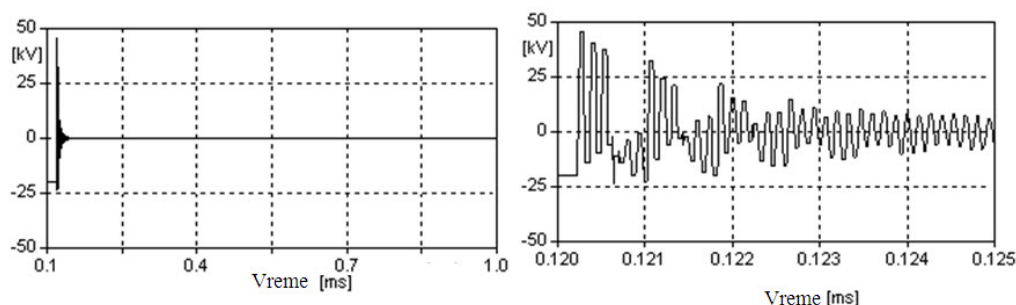
Pr - prekidač koji simulira svojim zatvaranjem nastanak kratkog spoja u filtru usled varnice.

Registracija napona vršena je u tačkama 2 koja se nalazi na izlazu iz ispravljača unutar transformatora, tački 3 koja se nalazi iza otpornika i tački 4 koja se nalazi na početku kabla, kao i tački 5 koja se nalazi iza kabla ispred filtra.

10.4.1 Prelazni procesi pri uspostavljanju iskre

Prelazni proces pri uspostavljanju iskre se modeluje kontaktima prekidača koji premošćuju kondenzator koji modeluje filter. Na slici 10.6 prikazan je izračunati prelazni napon registrovan ispred otpornika R u tački 2 pri uspostavljanju iskre, sa malom vremenskom rezolucijom (levo) i velikom vremenskom rezolucijom (desno).

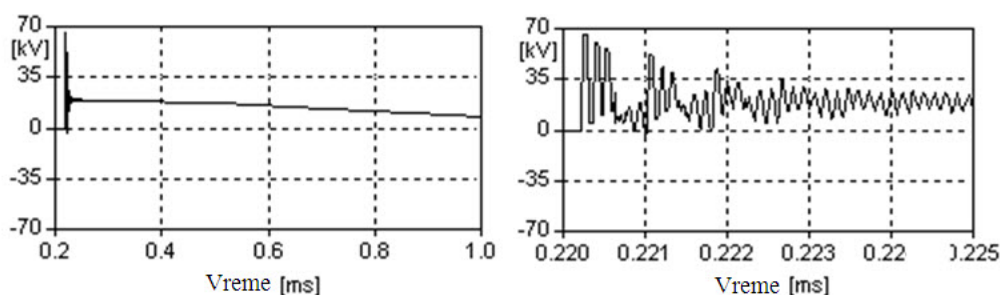
U ovom primeru došlo je do izraženih oscilacija, pri kojima je napon varirao do $U_{max}=48.6$ kV. Napon u tački 3 ima veoma sličan oblik. Napon teži sa vrednosti -20 kV da padne na nulu pri uspostavljanju iskre i tom prilikom zaosciluje oko nulte vrednosti koju postiže posle završetka prelaznog režima.



Slika 10.6: : Izračunati napon u tački 2 na šemi sa slike 5 (levo sa manjom vremenskom rezolucijom, desno sa većom vremenskom rezolucijom)

10.4.2 Prelazni procesi pri prekidanju iskre

Prekidanje iskre se modeluje isključenje prekidača koji prespaja kondenzator. Proračuni su rađeni prema zamenskoj šemi na slici 10.5. Modelovanje isključenja vršeno je u ustaljenom stanju kada kroz kolo sa prespojenim elektrofiltrom protiče jednosmerna struja. Na slici 10.7 prikazana je vremenska promena u tački 2 sa malom (levo) i velikom rezolucijom (desno). U tačkama 2 i 3 dobijena je gotovo identična promena napona. Maksimalni napon iznosi u tački 2 $U_{max}=65.6$ kV, u tački 3 $U_{max}=65.5$ kV.

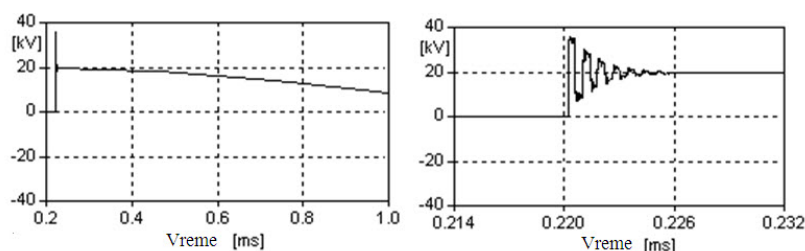


Slika 10.7: Vremenska promena napona u tački 2 pri prekidanju varnice (mala vremenska rezolucija - levo, velika - desno)

U tački 4 na kablovskoj glavi oblik napona prikazan je na slici 10.8, levo sa malom rezolucijom i desno sa velikom vremenskom rezolucijom. Maksimalni prenapon u čvoru 4 je 34.7 kV.

Može se uočiti da i pri uspostavljanju i pri prekidanju varnice dolazi do izraženog prelaznog procesa, koji se odvija sa visokom učestanošću.

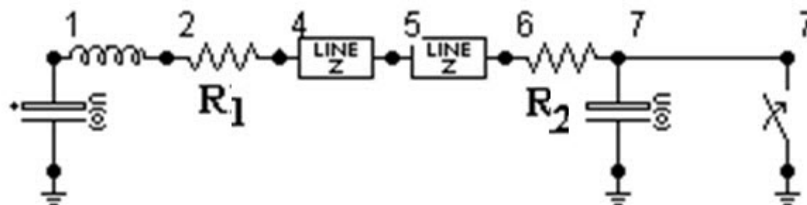
Pri prekidanju varnice napon teži da sa nulte vrednosti dostigne vrednost od 20 kV, što pistiže kroz prelazni režim.



Slika 10.8: Napon u čvoru 4 na kablovskoj glavi pri prekidu varnice (levo - mala vremenska rezolucija, desno - velika vremenska rezolucija)

10.5 Mogućnost prigušenja prelaznih procesa u elektrofiltru

Veoma brzi prelazni procesi na elektrofiltru mogu se prigušiti ugradnjom dodatnih elemenata. Najjednostavniji način je postavljanje dodatnih prigušnih otpornika. Na slici 10.9 prikazana je zamenska šema sa dodatnim prigušnim otpornikom R_2 koji je postavljen između kablovske završnice sa strane filtra i samog filtra.



Slika 10.9: : Ekvivalentna šema po kojoj je vršen proračun sa dodatnim prigušnim otpornikom R_2

Oznake na slici 10.9 imaju sledeće značenje: R_1 -prigušni otpornik iza transformatora, R_2 - prigušni otpornik ispred filtra.

10.5.1 Uspostavljanje iskre

Proračun je vršen sa više vrednosti otpora R_1 i R_2 . Na slici 10.10 prikazan je slučaj prelaznog napona kada je $R_1 = 40 \Omega$ i $R_2 = 40 \Omega$. Može se uočiti da je došlo do značajnog smanjenja prenapona. Upoređivanjem slike 10.6 na kojoj su prikazani naponi kada postoji samo otpornik R_1 sa napojne strane sa slikom 10.10, na kojoj je prikazan prelazni napon kada postoji i otpornik R_2 sa strane filtra, može se uočiti veoma značajno smanjivanje prenapona uvođenjem dodatnog otpornika sa maksimalne vrednosti prenapona od 48.6 kV

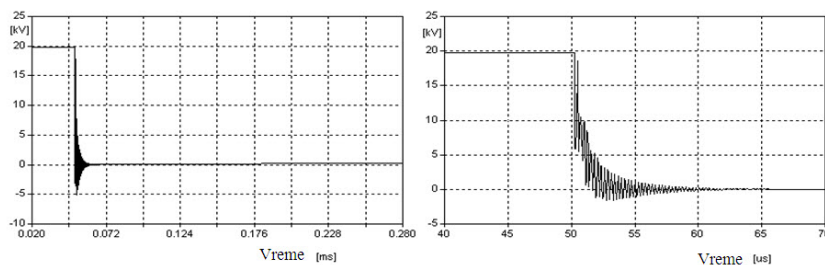
u slučaju samo jednog otpornika, napon je opao na $U_{min}=5.1$ kV. Upoređujući slike 10.10 i 10.6 može se takođe uočiti da u slučaju primene samo jednog otpornika oscilacije imaju znatno višu amplitudu nego što je napojna vrednost napona i odvijaju se na obe strane u odnosu na inicijalnu vrednost napona. Postavljanjem dodatnog otpornika oscilacije se događaju samo posle kratkog spoja usled iskre oko nulte vrednosti napona. Izvršena je varijacija vrednosti dodatnih otpornika R_1 i R_2 da bi se sagledao njihov uticaj. U tabeli 10.1 prikazani su rezultati kada je varirana otpornost otpornika R_1 , a otpornik R_2 nije postojao.

Tabela 10.1: Maksimalni prenapon pri prelaznom režimu za različite vrednosti otpora R_1 , kada je $R_2 = 0$

R_1 (Ω)	40	100	200
R_2 (Ω)	0	0	0
U_{Max2} (kV)	54.6	54.6	54.6
U_{Max3} (kV)	54.6	54.6	54.6
U_{Max4} (kV)	15.7	15.7	15.7

Može se uočiti da vrednost otpornika R_1 apsolutno nema nikakvog uticaja na visinu prenapona.

Na slici 10.10 prikazan je slučaj kada je vrednost otpora $R_2 = 80 \Omega$. Može se uočiti da je prelazni proces u ovom slučaju gotovo potpuno prigušen. Napon posle uspostavljanja iskre varira oko nule i veoma se brzo prigušuje. Maksimalno previšenje napona na suprotnu stranu od vrednosti napojnog napona, koji je 20 kV, iznosi svega $U_{min}=-1.5$ kV. Proračun je ponovljen kada je otpornik otpornosti $R_1 = 40 \Omega$, a vrednost otpornosti otpornika R_2 je varirana. Rezultati proračuna previšenja na suprotnu stranu od napojnog napona su dati u tabeli 10.2 za tačku 3 sa šeme.



Slika 10.10: : Prelazni procesi pri uspostavljanju iskre kada je kada je $R_1=40$ i $R_2=80$ (levo veliki korak proračuna, desno mali korak)

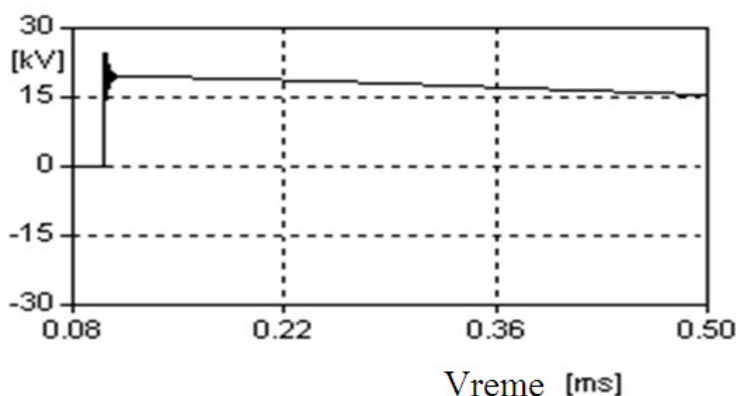
Naponi u tačkama 2 i 3 se veoma malo razlikuju. Na osnovu Tabele 10.2 se može zaključiti da otpornik R_2 postavljen između kablovske završnice i filtra ima veoma pogodno dejstvo na prigušenje prenapona.

Tabela 10.2: Vrednost previšenja napona na suprotnu stranu od napojnog napona u čvorovima 2, 3 i 4

R_1 (Ω)	40	100	200
R_2 (Ω)	40	80	120
U_{Max2} (kV)	5.06	1.528	0.58
U_{Max3} (kV)	5.06	1.531	0.56
U_{Max4} (kV)	0.975	0.376	0.321

10.5.2 Prekid iskre

Proračuni su urađeni u slučaju prekida iskre za više vrednosti otpora R_1 i R_2 . Na slici 10.11 prikazan je slučaj prekida iskre kada je $R_1 = 40 \Omega$ i $R_2 = 40 \Omega$.

Slika 10.11: Prelazni proces u tački 3 pri prekidu iskre kada je $R_1 = 40 \Omega$ i $R_2 = 40 \Omega$ Tabela 10.3: Maksimalni prenaponi u tačkama 2, 3 i 4 za različite vrednosti otpornika R_2 pri prekidu iskre

R_1 (Ω)	40	40	40
R_2 (Ω)	40	80	120
U_{Max2} (kV)	24.6	20.8	20.0
U_{Max3} (kV)	24.7	20.8	20.1
U_{Max4} (kV)	19.5	18.5	19.3

Ba osnovu tabele 10.3 može se zaključiti da pri prelaznom režimu napon vrlo malo osciluje oko ustaljene vrednosti od 20 kV za bilo koju vrednost otpornika R_2 . Usvaja se da je optimalna vrednost otpornika $R_2 = 40 \Omega$ iz praktičnih razloga jer je jednaka otporniku R_1 . Optimalna vrednost otpornika je jednaka karakterističnoj impedansi kabla jer sprečava višestruke refleksije.

10.6 Zaključak

Sprečavanje oscilacija pri radu elektrofiltra može se postići postavljanjem prigušnih otpornika ispred i iza napojnog kabla za filter identične otpornosti kao što je karakteristična impedansa kabla.

Zahvalnica

Primer je nastao na zahvaljujući istraživanja uzroka čestih kvarova na kablu za napajanje elektrofiltra u Fabrici cementa "Lafarge" u Beočinu 2005 god.

Primer 11

Zaštita instalacija u tunelima

Koautor: Tomislav Rajić

11.1 Cilj analize

U primeru se razmatraju mogući prenaponi u sistemima za elektroenergetskog napajanje automobilskih tunela usled atmosferskih udara u napojnu transformatorsku stanicu.

- Prenaponi mogu da nastanu direktnim atmosferskim pražnjenjem u zgradu pogonske stanice (PS) u kojoj se nalazi energetski transformator 10/0.4 kV, što može da podigne potencijal uzemljivača i izazove atmosferske prenapone koji moraju biti ograničeni. U tu svrhu će biti procenjen broj atmosferskih udara u zgradu PS, a zatim procenjen napon na uzemljivaču u skladu sa zahtevom da gromobranski nivo zaštite bude II, za koji se testiranje zaštite vrši strujom groma od 150 kA. Stepen zaštite II se bira na osnovu [16], po kriterijumu da kvar na opremi tunela predstavlja gubitak servisa. Na osnovu analize će se odlučiti da li su potrebni odvodnici prenapona na strani 10 kV transformatora.
- Prenaponi nastali usled povećanja napona na uzemljivaču utiču na naprezanje izolacije između namotaja 0.4 kV prema masi, odnosno priključaka transformatora na 0.4 kV i kućišta, što se rešava postavljanjem prenaponskih zaštitnih uređaja (SPD-Surge Protective Devices), između faznih priključaka na transformatoru i šine za izjednačenje potencijala koja je najkraćim putem vezana za uzemljivač u razvodnom ormanu [15]. Zadatak je da se proverí da li je potrebno postavljanje dodatnih SPD uređaja u razvodne ormene u PS osim uz priključke transformatora na strani 0.4 kV.

- Uređaji napajani naponom 0.4 kV u tunelu i ostalim objektima koji služe za napajanje tunela i osvetljenje i signalizaciju prilazima tunelu moraju da budu provereni da li postoji opasnost od opasnih prenapona. Zadatak je da se provere karakteristike odabranih SPD uređaja sa uslovima koji vladaju na mestima ugradnje.

11.2 Gromobranska zaštita pogonske stanice

11.2.1 Atraktivna zona pogonske stanice

Na slici 11.1 prikazana skica Pogonske stanice sa bočne strane sa ucrtanim približnim dimenzijama, a na slici 11.2 prikazan je pogled odozgo, sa ucrtanom opremom i glavnim dimenzijama zgrade.

Na osnovu standarda [16], za izdvojeni pravougaoni objekat dužine L , širine W i visine H na ravnom zemljištu, definiše se prihvatna površina objekta prema slici 11.3. Da bi pojednostavili procenu prihvatne površine objekta, kosi krov ćemo aprosimirati horizontalnim krovom koji se nalazi na srednjoj visini $H_{sr} = (4 + 7)/2 = 5.5$ m.

Izračunavanje prihvatne površine objekta oblika pravouglog paralelopipeda se sprovodi primenom sledećeg izraza za izdvojeni objekat:

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H_{sr}) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H_{sr})^2 \quad (11.1)$$

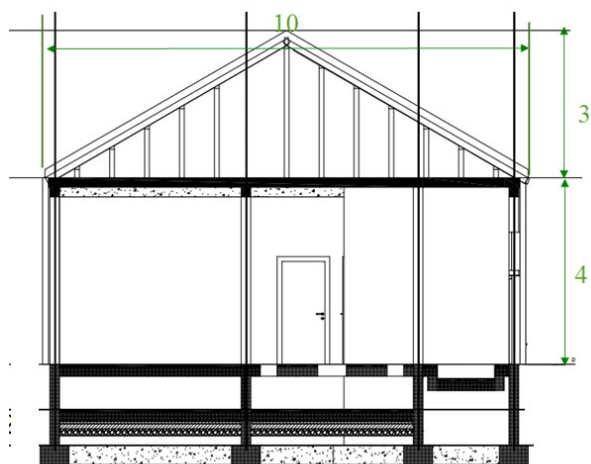
U tabeli 11.1 date su dimenzije objekta i izračunata prihvatna površina objekta pogonske stanice.

Tabela 11.1: Prihvatna površina objekta oblika pravouglog paralelopipeda

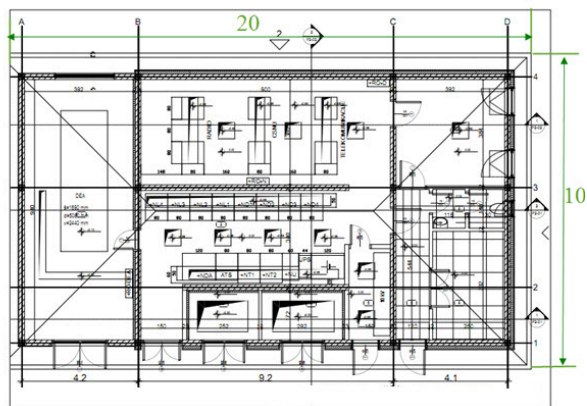
Dužina	L (m)	20
Širina	W (m)	10
Visina	H (m)	5.5
Atraktivna površina	A_D (m ²)	2045.3

11.2.2 Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja

Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja dobijena je na osnovu sistema za lokaciju pražnjenja koja pripadaju sistemu EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection),



Slika 11.1: Bočni crtež zgrade pogonske stanice sa upisanim dimenzijama



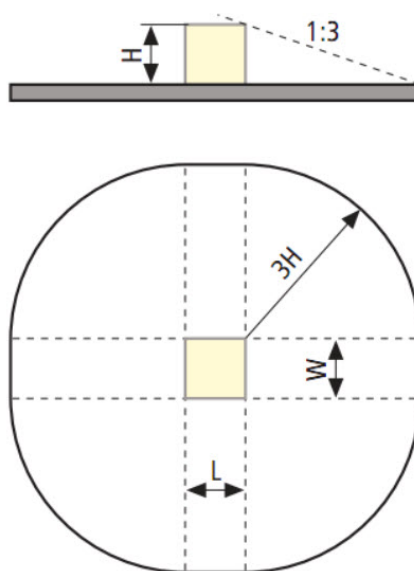
Slika 11.2: Crtež zgrade pogonske stanice sa opremom, pogled odozgo

na osnovu sistema koji meri vremensku razliku u prostiranju talasa prema [102]. Na slici 11.4 prikazan je uvećani deo slike prosečne godišnje gustine atmosferskih udara u periodu od 2008 do 2012 god za Republiku Srbiju. Zaokruženi deo na slici levo se odnosi se na područje gde se nalazi pogonska stanica, za koje se vrši analiza. Utvrđeno je da je prosečna godišnja gustina atmosferskih pražnjenja između 4 i 4.36 , pa je usvojena gornja granica oblasti 4.36.

11.2.3 Broj opasnih događaja za objekat

Broj atmosferskih udara N_D za pogonsku stanicu TS 10/0.4 kV izračunat je na osnovu [16], odnosno:

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} \quad (11.2)$$



Slika 11.3: Određivanje prihvatne površine izdvojenog pravougaonog objekta

gde je:

N_G - gustina atmosferskog pražnjenja prema zemlji ($1/\text{km}^2 \text{ god}$),

A_D - prihvatna površina objekta (m^2),

C_D - faktor lokacije za objekat.

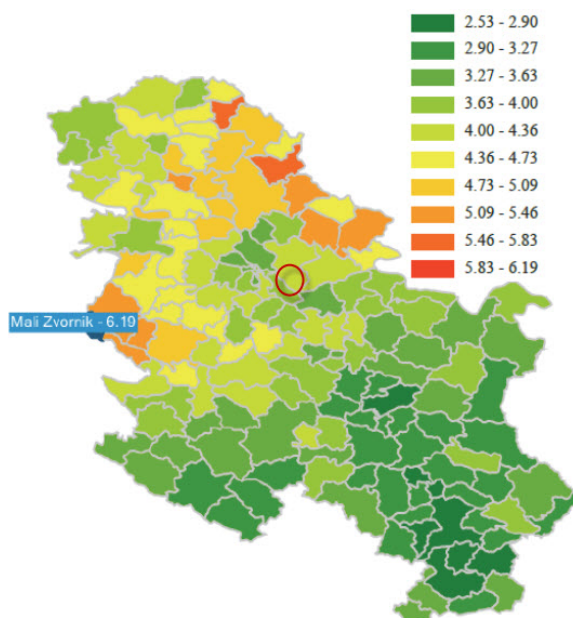
Usvaja se faktor lokacije za objekat $C_D = 1$ za izdvojeni objekat bez drugih objekata u blizini. Usvojeno je da je objekat usamljen smatrajući da u okolini od 30 m nema nikakvih objekata veće visine od analiziranog.

Kada se izračuna, dobija se broj atmosferskih udara za zgradu pogonske stanice:

$$N_D = 0.891 \times 10^{-2} (\text{udara/god}) \quad (11.3)$$

11.2.4 Usvajanje nivoa zaštite od atmosferskog pražnjenja objekta

Na osnovu [15] i [16], usvojen je nivo zaštite od atmosferskog pražnjenja (LPL-Lightning Protection Level) svih objekata za napajanja tunela na LPL=II. Nivo zaštite LPL=II je usvojen na osnovu činjenice da kvarovi usled atmosferskih pražnjenja mogu prouzrokovati gubitak servisa (signalizacija, osvetljenje), ali ne mogu prouzrokovati opasnost po život i zdravlje ljudi, kao i veliku materijalnu štetu. Na osnovu usvojenog LPL određuje



Slika 11.4: Prosečne godišnje gustine atmosferskih udara u periodu od 2008 do 2012 god za Republiku Srbiju

se kritična struja atmosferskog pražnjenja. Prema [15] za usvojen je nivo zaštite od atmosferskog pražnjenja LPL II, koristi se fiksirana temena vrednost struje atmosferskog pražnjenja za procenu ugroženosti 150 kA. Najveće vrednosti parametara struje atmosferskog pražnjenja za nivo LPL II ne smeju da budu prekoračene, sa verovatnoćom 98 % prema [15]. Odabrana je struja talasnog oblika 10/350 s.

11.2.5 Određivanje otpornosti uzemljenja objekta TS 10/0.4 kV

Uzemljenje objekta TS 10/0.4 kV potrebno je uraditi u skladu sa [47]. Postavljen je prsten oko objekta, na udaljenosti 0.5 m od zidova objekta, kao na slici 11.5 označen crvenom isprekidanom linijom.

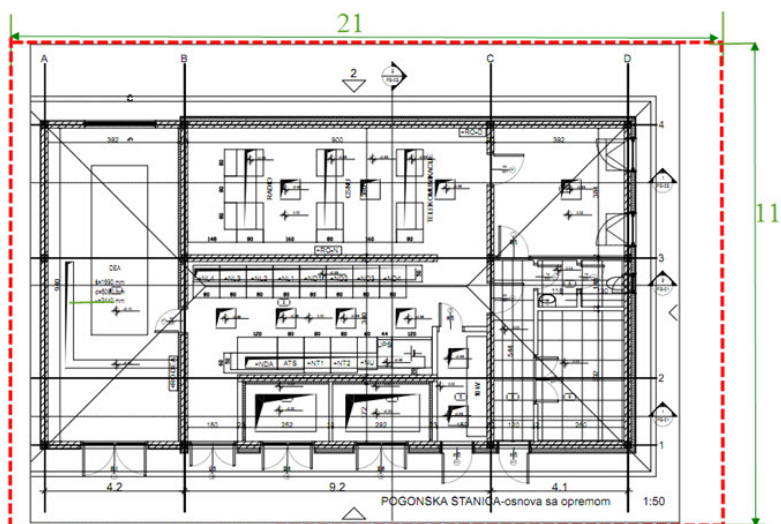
Otpornost rasprostiranja uzemljivača u obliku prstena određuje se na osnovu sledećeg izraza, prema [47]:

$$R_u = \frac{2}{3} \frac{\rho_z}{D_{ekv}} \text{ gde je } D_{ekv} = 1.13\sqrt{A} \quad (11.4)$$

$$R_u = \frac{2}{3} \frac{\rho_z}{D_{ekv}} \quad (11.5)$$

$$D_{ekv} = 1.13\sqrt{A} \quad (11.5)$$

$$A = a \times b \quad (11.6)$$



Slika 11.5: Skica prstenastog uzemljivača oko objekta na rastojanju 0.5 m od zidova gde su: $a=21$ m dužina i $b=11$ m širina pravougaonog prstena oko zgrade.

Specifična otpornost zemlje se može odrediti iz tabele 11.2.

Tabela 11.2: Specifična otpornost za različit sastav zemlje

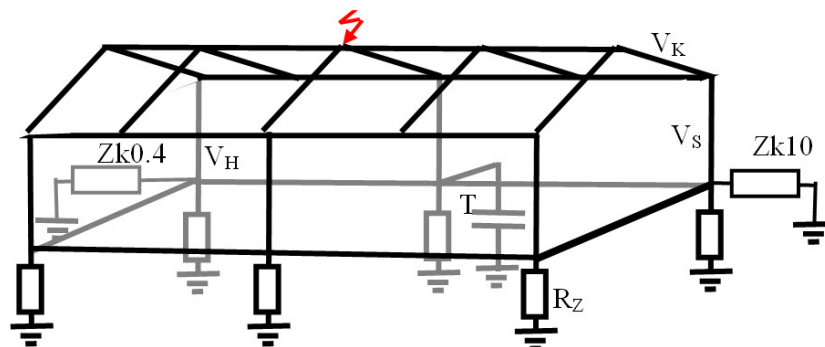
Vrsta tla	ρ (Ωm)
treset ili humus	20
bažtenska zemlja ili ilovača	40
glinasta zemlja	100
peskulja	300
Pesak	500

Ako se za specifičnu otpornost zemljišta usvoji vrednost od $\rho_z = 300 \Omega \text{ m}$, otpornost prstenastog uzemljivača iznosi $R_u = 11.6 \Omega$.

11.2.6 Ekvivalentna šema spoljašnjeg gromobranskog sistema

Na slici 11.6 nacrtana je ekvivalentna šema sistema koja se sastoji od vodova VH koji simuliraju horizontalne trake prihvatnog sistema, VS koji simuliraju vertikalne trake spusnog sistema, VK koji simuliraju krovne kose trake prihvatnog sistema i Vz koji simuliraju provodnika ispod zemlje. R_z označavaju skoncentrisane otpore rasprostiranja na mestu spoja spusnog provodnika sa uzemljivačkim sistemom.

Ukoliko ima ukupno n spusnih provodnika, tada je otpornost svakog pojedinačnog

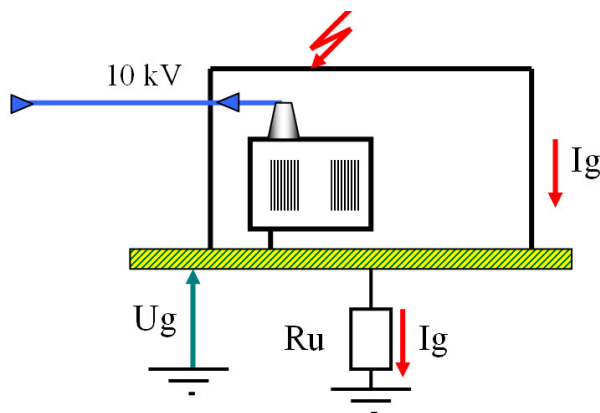


Slika 11.6: Skica spoljašnje gromobranske instalacije na zgradi TS

skoncentrisanog otpornika koji simulira konvencionalnu impedansu $R_z = nR_u$. U ovom slučaju to je:

$$R_z = 6 \times 11.6 = 69.6 \approx 70 \Omega \quad (11.7)$$

Predpostavljeno je najkritičnije mesto atmosferskog pražnjenja u sleme krova najbliže mestu uzemljenja transformatora. U šemi je transformator predstavljen ekvivalentnim kapacitetom namotaja visokog napona prema zemlji. Naprezanje visokonaponskog namotaja transformatora objašnjeno na slici 11.7.



Slika 11.7: Naprezanje visokonaponskog namotaja transformatora zbog porasta potencijala uzemljivača

Zbog proticanja struje atmosferskog pražnjenja kroz uzemljivač otpora rasprostiranja R_u , potencijal uzemljivača u odnosu na referentnu zemlju raste na napon U_g . Fazni pogonski napon napajanja sa strane 10 kV osciluje oko nulte vrednosti sa temenom vrednošću od $U_{fm} = 9.8$ kV koja odgovara najvišoj efektivnoj vrednosti pogonskog napona od 12 kV. Radni napon se može zanemariti u odnosu na porast napona na uzemljivaču, koji se prenosi na sud transformatora i napreže izolaciju namotaja.

U tabeli 11.3 date su usvojene vrednosti karakterističnih impedansi provodnika i

ekvivalentne vrednosti konvencionalnih impedansi uzemljivača na mestu priključka spusnog provodnika, kao i ekvivalentna kapacitivnost namotaja transformatora sa strane 10 kV. Takođe su date ekvivalentne karakteristične impedanse kablova 10 kV i 0.4 kV.

Tabela 11.3: Usvojene vrednosti karakterističnih impedansi provodnika, ekvivalentne vrednosti otpora uzemljenja na mestu priključka spusnog provodnika, kao i ekvivalentna kapacitivnost namotaja transformatora sa strane 10 kV

Naziv elementa elementa	oznaka veliĉine	Oznaka grane	Vrednost	Dužina (m) (m)
Z_c Horizontalnih traka	$Z_H(\Omega)$	V_H	255	5
Z_c Vertikalna traka	$Z_S(\Omega)$	V_s	255	4
Z_c Ekvivalentna impedansa provodnika uzemljivaĉkog prstena	Z_E	$V_E(\Omega)$	255	5.8
Ekvivalentna otpornost uzemljenja	$R_u(\Omega)$	R_u	70	-
Udarna kapacitivnost transformatora	C_t (nF)	C_t	3	-
Z_c kablova 10 kV	$Z_k(\Omega)$	Z_{k10}	30	-

Napomena: Z_c oznaĉava karakteristiĉnu impedansu. Karakteristiĉna impedansa dolaznog kabla 10 kV se ekvivalentira omskim otpornikom vrednosti otpora koja je jednaka karakteristiĉnoj impedansi da bi se spreĉile refleksije talasa.

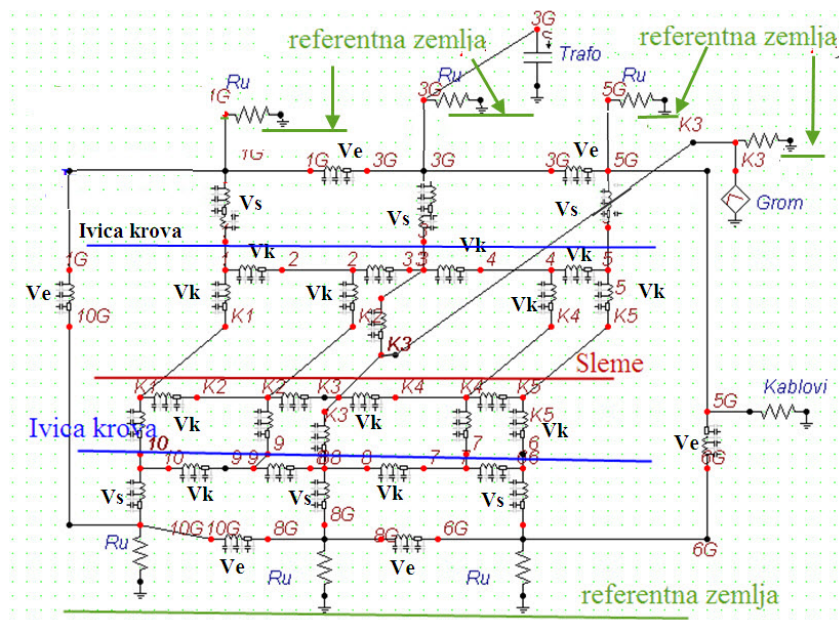
11.2.7 Proraĉun prenapona na kuĉištu transformatora bez prenaponske zašтите

Na slici 11.8 dat je ekranski prikaz zamenske šeme sistema spoljašnje gromobranske zaštite pogonske stanice, sa 6 spusteva. Na slici su dodate oznake gde se nalaze uzemljivaĉi prema referentnoj zemlji, kao i oznake vodova za ivicu krova i sleme. Usvojen je za struju atmosferskog udara talasni oblik struje $10/300 \mu s$, amplitude 150 kA, koja odgovara stepenu zaštite LPL II. Da bi se ispitala potreba za odvodnikom prenapona, u ovom primeru se transformator ne štiti odvodnikom prenapona.

U šemi na slici 11.8 transformator je zamenjen ulaznom kapacitivnošću. Proraĉunom je dobijen talasni oblik napona na transformatoru kao na slici 11.9.

Određena je struja atmosferskog pražnjenja koja je graniĉna za kvar izolacije transformatora sa strane 10 kV, odnosno struja koja izaziva prenapon koji je jednak podnosivom naponu izolacije od 75 kV. Amplituda kritiĉne struje je $I_{krit} = 17.4$ kA.

Izraĉunavanje verovatnoće pojave struje koja je veća od kritiĉne struje I_{krit} može se izvršiti na osnovu kumulativne krive logaritamsko-normalne raspodele verovatnoće pre-



Slika 11.8: Ekvivalentna šema za proračun napona na transformatoru pri delovanju atmosferske udarne struje, bez zaštite odvodnikom prenapona

mašenja struje, koja je data izrazom

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (11.8)$$

gde je: $x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}}$

I_{sr} -srednja vrednost amplitude struje pražnjenja, $I_{sr} = 30$ kA,

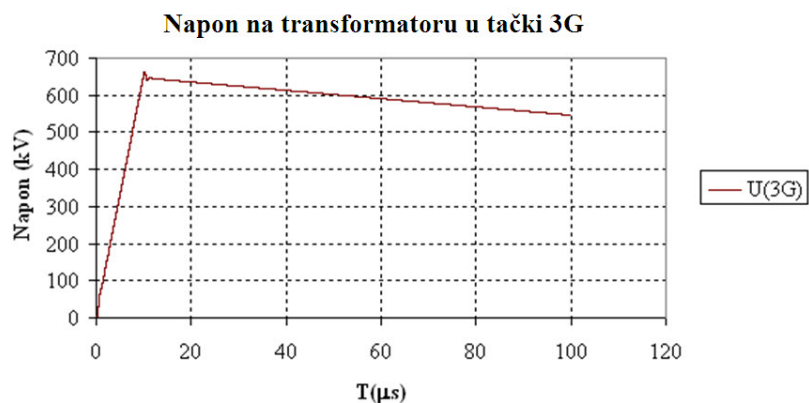
$\sigma_{\ln I}$ -srednje kvadratno odstupanje logaritma struje kod logaritamsko normalne raspodele, $\sigma_{\ln I} = 0.68$.

Posle izračunavanja dobija se da struje koje dostižu struju I_{krit} koja izaziva preskok imaju verovatnoću premašenja:

$$P(I > I_{krit} = 17.4kA) = 0.7908 \quad (11.9)$$

Na osnovu gustine pražnjenja N_G i atraktivne površine objekta A dobija se godišnji broj udara koji mogu da ugroze transformator. aproračuna se zaključuje da je rizik kvara transformatora:

$$R = P(I > I_{krit}) \times N_D \quad (11.10)$$



Slika 11.9: Talasni oblik napona na transformatoru bez zaštite odvodnikom prenapona

Odnosno kad se izračuna, dobija se $R=0.007$ (1/god)

Prema [16], dozvoljeni rizik gubitka servisa je $R_S = 0.001$ godišnje.

Prema [12], za elektroenergetske objekte se toleriše rizik kvara elemenata postrojenja u dijapazonu od $R_t = 0.001$ do $R_t = .004$ kvarova godišnje. Srednji broj godina između dva kvara $MTBF = 1/R_t$ se kreće u opsegu 1000 god do 250 god. Zbog toga se mora koristiti prenaponska zaštita za stranu 10 kV i za stranu 0.4 kV.

11.2.8 Zaštita visokonaponske strane energetskog transformatora od prenapona

Zahvaljujući primeni metal-oksidnih odvodnika prenapona u silikonskom kućištu moguće je postaviti odvodnike prenapona direktno na transformatorski sud. Na slici 11.10 prikazan je primer instalacije metal-oksidnog (MO) odvodnika sa mrežnim odvajanjem ugrađen je pomoću izolovanog držača direktno na transformatorski sud. Fleksibilni priključak za uzemljenje povezan je sa transformatorskim sudom što je moguće kraćom vezom. Visokonaponska veza se vodi od kablovske završnice direktno do odvodnika prenapona i odatle najkraćim putem do prolaznog izolatora transformatora.

Važno: Prilikom naručivanja transformatora se mora naglasiti da se odvodnici postavljaju direktno na transformator



Slika 11.10: Primer instalacije odvodnika prenapona sa mrežnim odvajanjem direktno na transformatorski sud

11.2.9 Karakteristike izabranog odvodnika prenapona

Karakteristike izabranog odvodnika prenapona prema proceduri opisanoj u poglavlju 7.6.7 na strani 265 (I deo) prikazane su u sledećoj listi:

KL - Klasa odvodnika DH

I_n - Nominalna struja pražnjenja oblika $8/20 \mu s$ $I_n = 10$ kA (temena vrednost)

Q_{th40} - Termička sposobnost višestrukog transfera električnih opterećenja kroz odvodnik pri temperaturi $40^\circ C$ $Q_{th}=1.1$ C.

Q_{th55} - Termička sposobnost višestrukog transfera električnih opterećenja kroz odvodnik pri temperaturi $55^\circ C$ $Q_{th}=0.94$ C.

I_m - Amplituda kratkotrajnog atmosferskog udarnog strujnog talasa oblika $4/10 \mu s$ 100 kA.

I_m - talas dugog trajanja amplitude 250 A i trajanja $2000 \mu s$, za ispitivanje sposobnosti podnošenja napreznja pri rasterećenju vodova pri sklopnim prenaponima.

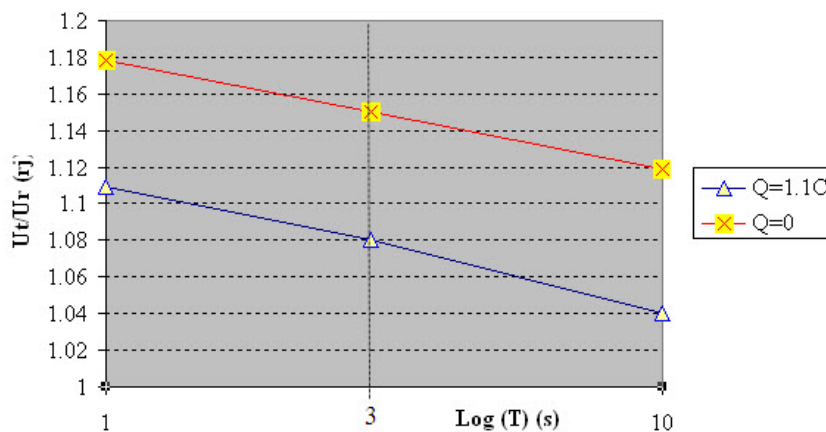
I_{ks} - Struja kratkog spoja 20 kAef u trajanju od 0.2 s.

Karakteristika podnošenja privremenih prenapona u funkciji njihovog trajanja data je u tabeli 11.4 za odabranu seriju odvodnika.

Podnosivi napon industrijske frekvencije pri privremenim prenaponima (U_{tov}) dat je na slici 11.11 za slučaj bez predhodnog termičkog opterećenja i sa predhodnim termičkim

Tabela 11.4: Karakteristika podnosivog privremenog prenapona u funkciji trajanja kvara za odabranu seriju odvodnika

Trajanje kvara	Podnosivi TOV
Bez predopterećenja	
1 sec	$1.178 \times U_r = 1.473 \times U_c$
3 sec	$1.150 \times U_r = 1.438 \times U_c$
10 sec	$1.119 \times U_r = 1.398 \times U_c$
Sa predopterećenjem $Q=1.1 C$	
1 sec	$1.109 \times U_r = 1.385 \times U_c$
3 sec	$1.080 \times U_r = 1.350 \times U_c$
10 sec	$1.040 \times U_r = 1.300 \times U_c$

Podnosivi TOV u funkciji trajanjaSlika 11.11: Privremeni prenapon U_{tov} za slučaj bez predhodnog termičkog opterećenja i sa predhodnim termičkim opterećenjem od $Q=1.1 As$

opterećenjem od $Q=1.1 As (C)$, kada se napon izražava u relativnim jedinicama u odnosu na naznačeni napon U_r .

Transformator u pogonskoj stanici radi sa strane 10 kV sa zvezdištem uzemljenim preko otpornika za ograničavanje struje na 300 A, koja se isključuje posle 1 s. U tom slučaju napon na neoštećenoj fazi raste na približnu vrednost $\sqrt{3} \cdot U_f$, gde je U_f efektivna vrednost maksimalnog trajnog radnog napona U_m . Predpostavljena je kritična opcija da zaštita ne isključuje kvar u 1. stepenu, tako da je izbor odvodnika urađen za trajanje kvara produženo na 3 s.

Zavisnost preostalog napona odvodnika prenapona u funkciji atmosferske udarne struje standardnog oblika koja je najvažnija za procenu ugroženosti transformatora, data

je u tabeli 11.5

Tabela 11.5: Zavisnost preostalog napona odvodnika prenapona u funkciji atmosferske udarne struje standardnog oblika $8/20 \mu s$

U _c	U _r	Amplituda struje				
		1	2.5	5	10	20
12	15	34.9	37	39.1	42	47.8

Postupak izbora odvodnika prenapona je dat u tabeli 11.6.

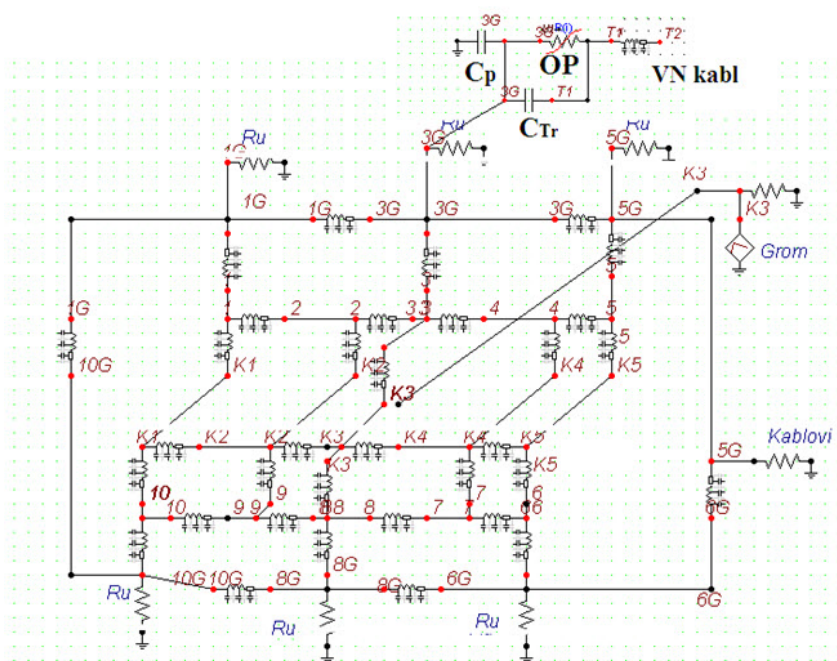
Tabela 11.6: Postupak izbora minimalnog naznačenog napona odvodnika prenapona

Br.	Naziv	Oznaka	Vrednost
Parametri mreže			
1	Nazivni napon mreže	U _n (kV)	10
2	Najviši radni napon mreže	U _m (kV)	12
3	Faktor uzemljenja mreže	K _z (rj)	1.732
4	Trajanje zemljospoja T _z (s)	3	
5	Faktor sigurnosti pri proračunu zemljospoja	K _s (rj)	1.1
6	Maksimalni prenaponi pri zemljospoju $U_{tz} = K_z K_s U_m / 1.73$	U _{tz} (kV)	12.3
Izbor odvodnika			
7	Tip odvodnika: MO u kompozitnom kućištu		
8	Trajni radni napon $U_c = U_m / 1.73$	U _c (kV)	6.9
9	Faktor proizvođača	K _o (rj)	0.8
10	Minimalni naznačeni napon odvodnika baziran na trajnom radnom naponu $U_{rc} = U_c / K_o$	U _{rc} (kV)	8.7
11	Predhodno energetske opterećenje odvodnika	Q _{th} (C)	1.1
13	Dozvoljeni porast napona na odvodniku usled zemljospoja u odnosu na naznačeni radni napon odvodnika	T _{pr} (rj)	1.08
15	Minimalni naznačeni napon odvodnika baziran na privremenom prenaponu pri zemljospoju $U_{rz} = U_{tz} / T_{pr}$	U _{rz} (kV)	12.3
16	Minimalni naznačeni napon odvodnika kao maksimalna vrednost između predhodnih vrednosti	U _r (kV)	12.3

Izabran je odvodnik prenapona naznačenog napona $U_r = 15$ kV trajnog radnog napona $U_c = 12$ kV. Odvodnik je direktno priključen na transformator, tako da je na transformatoru maksimalno mogući atmosferski prenapon neznatno viši od preostalog napona odvodnika. Odvodnik koji bi izdržao naprezanja pri zemljospoju čak i ako bi zemljospoj trajao više od 3 sec.

11.2.10 Proračun prenapona na transformatoru sa ugrađenim odvodnikom prenapona na 10 kV strani

Proračun prenapona na strani 10 kV transformatora je izvršen sa ugrađenim odvodnikom prenapona, prema šemi na slici 11.12. Usvojena je dužina spojnih provodnika između odvodnika i prolaznog izolatora i priključka za uzemljenje na kuštu transformatora 1 m. Transformator sa strane 10 kV je priključen na kabl dugačak 2 km, koji je na drugom kraju otvoren.



Slika 11.12: Zamenska šema gromobranske instalacije pogonske stanice sa ugrađenim odvodnikom naznačenog napona $U_r=15$ kV

Oznake na slici 11.12 imaju sledeće značenje:

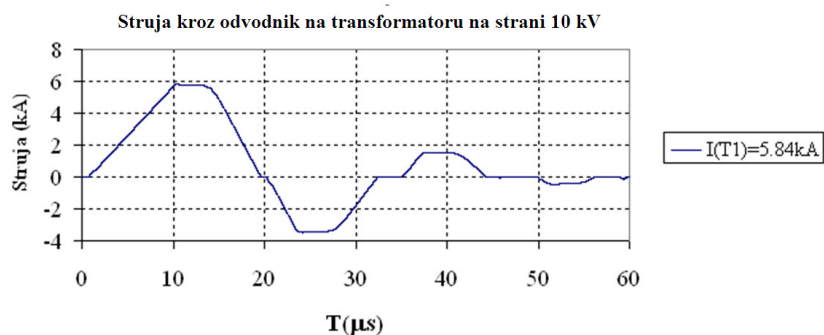
C_{TR} - kapacitet namotaja visokonaponskog namotaja prema masi.

OP - odvodnik prenapona.

VN -visokonaponski kabl dugačak 2 km.

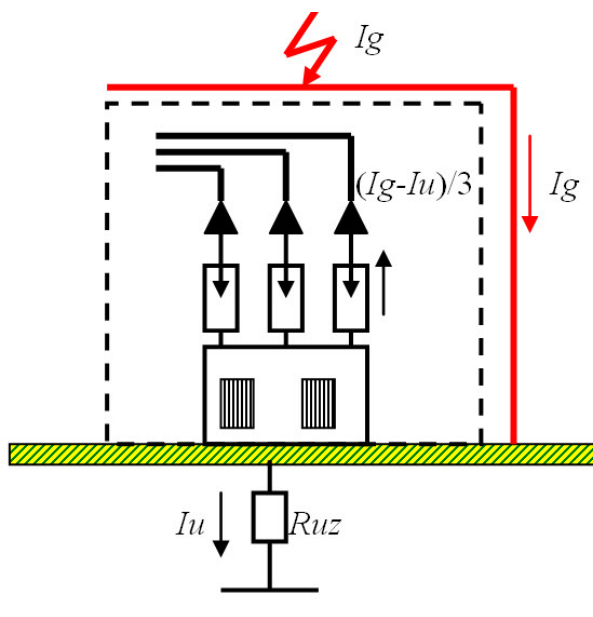
Na slici 11.13 prikazana je struja kroz odvodnik na strani 10 kV transformatora, usled atmosferskog udara čija je amplituda struje 150 kV.

Prilikom računanja struja koje opterećuju odvodnik prenapona, mora se voditi računa da je izvor prenapona porast napona na uzemljivaču, pa se ukupna struja deli na 3



Slika 11.13: Vremenski tok struje kroz odvodnik na strani 10 kV ispred transformatora

struje kroz tri odvodnika prenapon, prema slici 11.14. To je uzeto u obzir kod prikazivanja rezultata na slici 11.13.



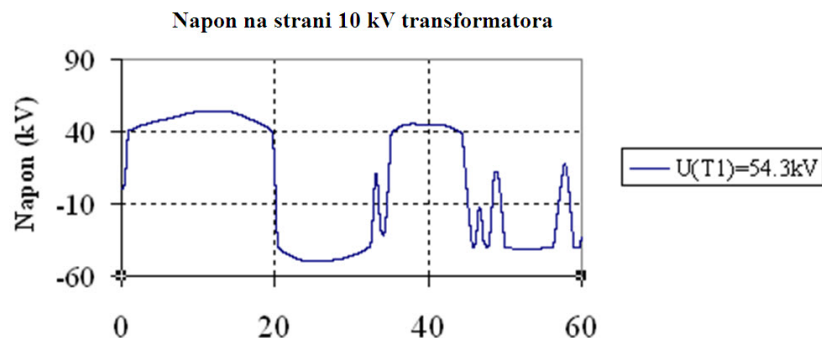
Slika 11.14: Opterećivanje odvodnika trećinom struje pražnjenja

Smanjivanjem otpora uzemljenja R_{uz} se povećava struja koja se preko uzemljivača prazni ka referentnoj zemlji I_u , a smanjuje struja kroz odvodnike prenapona prema izrazu:

$$I_{od} = (I_g - I_u)/3 \quad (11.11)$$

Na slici 11.15 prikazana je vremenska promena napona na transformatoru

Maksimalni prenapon je niži od 75 kV, koliko iznosi podnosivi napon transformatora. Mora se naglasiti da je proračun rađen pesimistički, sa većom dužinom spojnih



Slika 11.15: Vremenski tok napona na VN strani transformatora

provodnika između donjeg dela odvodnika i kućišta transformatora, koja je prilagođena koraku proračuna (dužina 2 m), tako da bi se realno pojavili još niži prenaponi.

Količina elektriciteta Q koja energetski opterećuje odvodnik se izračunava iz izraza:

$$Q = \int I_{od} dt \quad (11.12)$$

Integraljenje se obavlja u periodu trajanja strujnog talasa, koja je za posmatrani talas oblika 10/350 μs iznosi $2 \cdot 350 = 700 \mu s$. i_{od} je trenutna vrednost struje kroz odvodnik.

Proračuni prenapona na transformatoru U_{max} , maksimalne struje kroz odvodnik I_{max} i električno opterećenje koje energetski opterećuje odvodnik Q su rađeni za 3 vrednosti karakterističnih impedansi kabla 10 kV i rezultati su dati u tabeli 11.7.

Tabela 11.7: Vrednosti maksimalnih napona na transformatoru, struja kroz odvodnik prenapona i transfera količine naelektrisanja u zavisnosti od karakteristične impedanse napojnog kabla

Z_c (Ω)	U_{max} (kV)	$3 \times I_{max}$ (kA)	I_{max} (kA)	Q (C)
30	54.3	17.44	5.84	0.11
20	58.2	24.1	8.03	0.22
10	65.8	40.5	13.50	0.30

Može se videti da je maksimalni napon na transformatoru $U_{max} < 75$ kV, koliko je podnosivi napon. Udarana struja kroz odvodnik $I_{max} < 20$ kA, koliko je atmosferska udarna struja kojom se određuje preostali napon. Ove struja se ne mogu porediti sa kratkotrajnom podnosivom udarnom strujom odvodnika oblika 4/10 s, koja iznosi 100 kA, jer su ove struja dužeg trajanja. Podnosivi transfer naelektrisanja $Q < 1.1$ C, koliko je

deklarisana podnosiva vrednost, dokazuje energetska sposobnost odvodnika koja je veća od izračunate.

Proračun pokazuje da pri struji atmosferskog pražnjenja od 150 kA svi parametri odvodnika zadovoljavaju.

11.3 Prenaponska zaštita niskog napona transformatora

11.3.1 Postavljanje niskonaponskog odvodnika prenapona

Niskonaponski namotaj transformatora je na isti način ugrožen od atmosferskih prenapona kao visokonaponski namotaj, usled podizanja potencijala uzemljivača i transformatorskog suda u odnosu na niskonaponski razvod. Zbog toga je neophodno sprovesti zaštitu niskonaponskih izvoda odvodnicima prenapona niskog napona. Na slici 11.16 predstavljen je način fiksiranja niskonaponskog odvodnika prenapona na transformatorski sud.



Slika 11.16: Način fiksiranja odvodnika na transformatorski sud

Na slici 11.16 oznake imaju sledeće značenje:

1. niskonaponski odvodnik prenapona,

2. metalni nosač odvodnika fiksiran na prolazni izolator transformatora,
3. provodnik za vezu za sa priključkom za uzemljenje na kućištu transformatora,
4. prolazni izolator transformatora.

11.3.2 Karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona za transformator sa strane 0.4 kV

U tabeli 4.2.1 date su osnovne karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona proizvođača Tyco-Electronic/Raychem naznačenog napona 280 V.

Tabela 11.8: Osnovne karakteristike niskonaponskog odvodnika prenapona proizvođača Tyco-Electronic/Raychem

Prema IEC 61643 od 2005	Klasa II
Fazni napon sistema U_s (V)	230
Trajni radni napon U_c (V)	280
Mrežni odvajač	Interni
Nominalna struja pražnjenja I_n (kA) temena vrednost	10
Maksimalna struja pražnjenja (8/20 μ s) I_{max} (kA) temena vrednost	40
Podnosiva struja pražnjenja (4/10 μ s) I_{max} (kA) temena vrednost	100
Energetska apsorpciona moć (J/V) od U_c	4

Može se uočiti da je podnosiva struja pražnjenja oblika 4/10 μ s kojs služi za proveru odvodnika na razaranje 100 kA, što daleko prevazilazi očekivanu struju.

U tabeli 11.9 data je karakteristika preostalog napona u funkciji struje pražnjenja standardnog oblika 8/20 μ s.

Tabela 11.9: Karakteristika preostalog napona u funkciji struje pražnjenja standardnog oblika 8/20 μ s

I (kA)	1	2	5	10	20
U_p (kV)	0.76	0.82	0.96	1.2	1.58

U tabeli 11.9 vrednosti preostalog napona su date zajedno sa padom napona na provodniku dužine 15 cm za povezivanje sa kućištem. U slučaju primene veće dužine provodnika, za struju od 10 kA se može očekivati porast preostalog napona za oko 0.8 kV za povećanje dužine veze sa 15 cm na 60 cm.

11.3.3 Karakteristike prenaponskih zaštitnih uređaja (SPD) u razvodu 0.4 kV

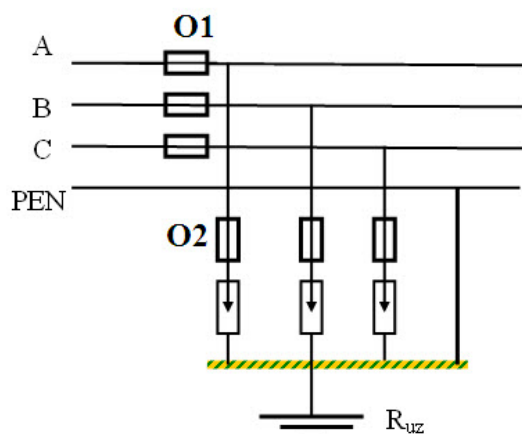
Za ograničavanje prenapona na strani 0.4 kV na mestima gde je potrebno odvesti veliku struju pražnjenja koriste se uređaji koji se zovu strujni odvodnici (current arresters), koji se deklariraju da su klase 1 ili tip 1. Izabrani su SPD u kompletu od 3 jedinice koje se vezuju između faza i PEN provodnika. Glavne karakteristike su date u tabeli 11.10.

Tabela 11.10: : Karakteristike odvodnika za 0.4 kV tipa 1

Opis	Karakteristike
Nazivni napon U_n (V)	230
Najviši rafni napon U_c (V)	255
SPD prema EN 61643-11	Tip 1
Za zonu zaštite od groma (LPZ)	0-1
Udarna struja pražnjenja (10/350 μ s) I_{ud} (kA)	50
Zaštitni nivo V_p (V)	2
Vreme odziva	<100 ns
Prekidanje prapratne struje I_{ks} (kA) eff	25 kA
Maksimalni preventivni osigurač (A)	500
Radna temperatura	-40°C do +80°C
Optička indikacija stanja odvodnika na licu mesta	Da

Označavanje SPD uređaja karakteritika sličnih kao u tabeli 11.10 u daljem tekstu će biti SPD 1 jer se deklariraju kao odvodnici struje pražnjenja.

Sva tri SPD uređaja su postavljena između faza i PEN provodnika (zaštitna zemlja i neutralni provodnik zajedno). Na slici 11.17 prikazan je spoj SPD.



Slika 11.17: šema sprege SPD uređaja u TN-C sistemu

Za ograničavanje prenapona na strani 0.4 kV na mestima gde je potrebno limitirati napon koriste se uređaji koji se zovu odvodnici prenapona (voltage arresters) klase 2 ili tip 2. Izabrani su SPD u kompletu od 3 jedinice koje se vezuju između faza i PEN provodnika naznačenog napona 280 V sa daljinskim očitavanjem stanja. Glavne karakteristike su date u tabeli 11.11, za maksimalnu podnosivu atmosfersku udarnu struju od 20 kA, koja će se u daljem tekstu obeležavati kao SPD 2.

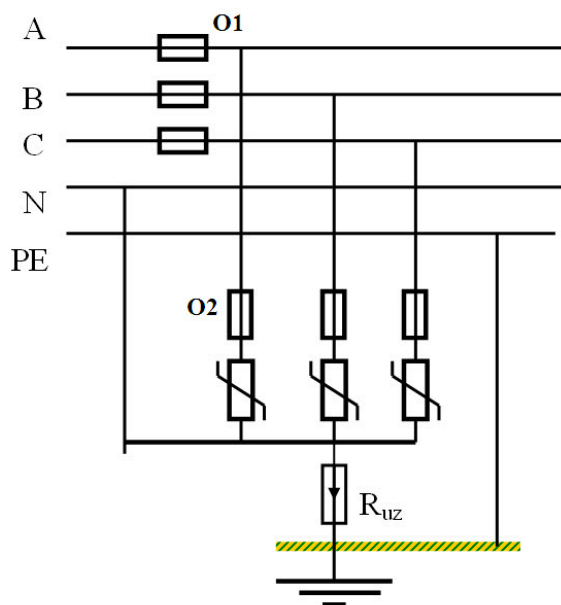
Tabela 11.11: Karakteristike odvodnika tip 1 za niski napon

Opis	Karakteristike
Nazivni napon U_n (V)	230
Najviši rafni napon U_c (V)	280
SPD prema EN 61643-11	Tip 2
Nominalna struja odvođenja $(8/20)\mu s$ I_{ud} (kA)	20
Udarana struja pražnjenja $(10/350 \mu s)$ I_{ud} (kA) (L-N)	40
Udarana struja pražnjenja $(10/350 \mu s)$ I_{ud} (kA) (N-G)	120
Zaštitni nivo V_p (V)	1.3
Preostali napon za 1 kA U_p (kV)	0.8
Preostali napon za 5 kA U_p (kV)	1
Vreme odziva	<100 ns
Podnosiva struja KS u mreži I_{ks} (kA)	50
Radna temperatura	-40 °C do +80°C
Optička indikacija stanja odvodnika na licu mesta	Da

U ovom slučaju tri SPD uređaja su postavljena između faza i neutralnog provodnika N i jedan između N i zaštitne zemlje PE. Na slici 11.18 prikazan je spoj SPD.

U slučaju prikazanom na slici 11.18 tri SPD priključena između faza i N su naponski limiteri predviđeni za manje naprezanje, a SPD između N i PE je strujni odvodnik koji provodi 3 puta veću struju.

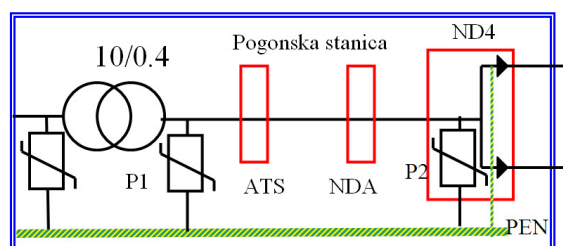
U obe sprege se mogu postaviti osigurači O2 koji u slučaju kvara SPD, kada oni počinju da provode veliku struju industrijske učestanosti, osigurači isključuju granu sa SPD. Kvar se dešava u slučaju iskrišta sa aktivnim gašenjem luka ako iskrište ne može da prekine luk, dok u slučaju varistora u slučaju kada varistor izgubi nelinearnu karakteristiku. U tom slučaju osigurač O2 isključuje kvar, a potrošači ne ostaju bez napajanja. Tada je potrebno zameniti SPD i resetovati osigurač O2 ukoliko je automatski. Poželjna je signalizacija da je SPD u kvaru, bilo daljinska ili direktno na uređaju. Ponekad se osigurači O2 izostavljaju, kada glavni osigurači O1 isključuju potrošače, pa je u tom slučaju potrebno hitno zameniti SPD koji je u kvaru i resetovati osigurač O2.



Slika 11.18: Sprega tri SPD, koja su postavljena između faza i neutralnog provodnika N i jedan između N i zaštitne zemlje PE

11.4 Proračun prenapona u NN mreži

Blok šema Pogonske stanice sa oznakama razvodnih ormana na strani 0.4 kV prikazana je na slici 11.19.



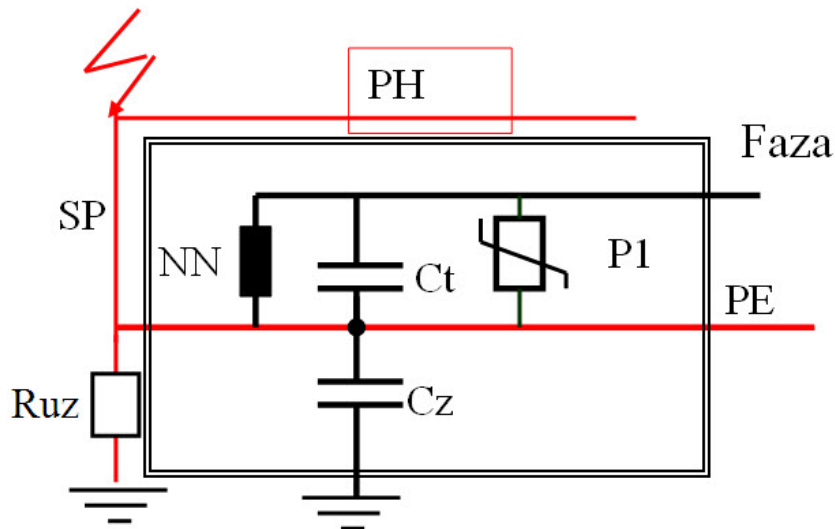
Slika 11.19: Blok šema pogonske stanice

Oznake na slici 11.19 imaju sledeće značenje:

- P1-prenaponska zaštita na strani 0.4 kV uz transformator,
- ATS, NDA i ND4 pojedini razvodni ormani unutar Pogonske stanice,
- P2 - prenaponska zaštita u ormanu ND4.

Unutar transformatorske stanice primenjen je TN-C sistem, a u ormanu ND4 razdvajaju se N i PE i napajanje se na dalje vodi u tunnel petožilnim kablom 3F+N+PE.

Na slici 11.20 prikazano je modelovanje transformatora 10/0.4 kV u transformatorskoj stanici.



Slika 11.20: Modelovanje transformatora 10/0.4 kV u transformatorskoj stanici

Oznake na slici 11.20 imaju sledeće značenje:

PH-prihvatni sistem na krovu,

SP-spusni provodnici,

R_{uz} -ekvivalentna otpornost kompletnog uzemljivača,

NN -namotaj niskog napona transformatora koji se zamenjuje kapacitivnošću C_t ,

C_t -uzdužna kapacitivnost namotaja niskog napona (usvojeno 3 nF),

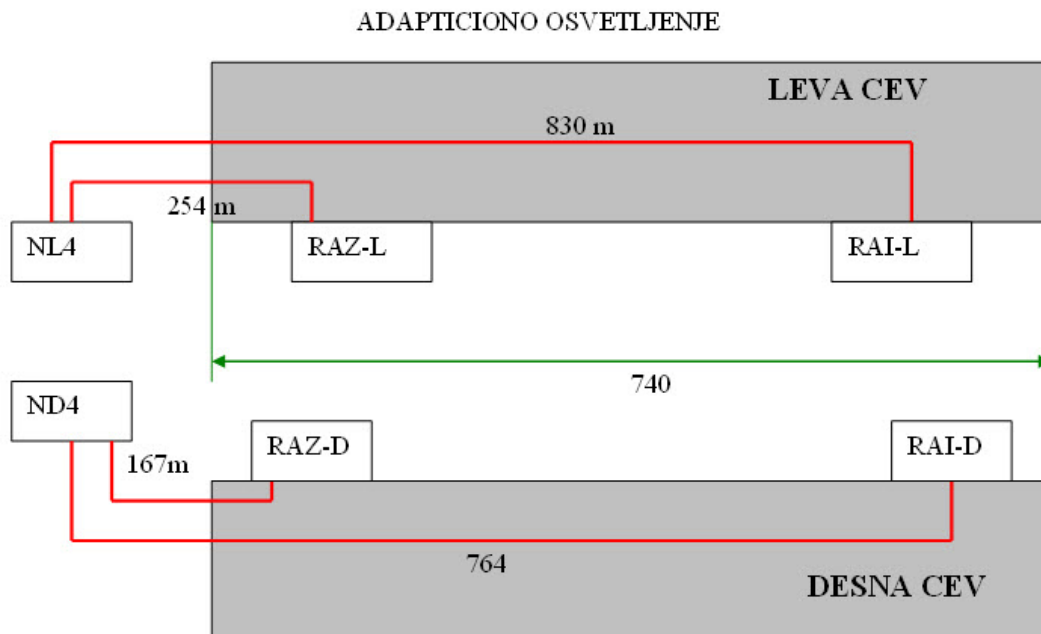
C_z -kapacitivnost namotaja niskog napona prema zemlji (usvojena 1 nF, ali nema uticaja na rezultate jer je premošćena otporom uzemljenja),

PE -zaštitna zemlja koja je na povišenom potencijalu zbog proticanja struje kroz otpor uzemljenja,

R_{uz} -otpor uzemljenja.

Po ovom modelu se predpostavlja da fazni provodnik preko potrošača na potencijalu udaljene zemlje, ako se zanemari radni napon, dok neutralni provodnik i PE su na povišenom potencijalu usled atmosferskog pražnjenja.

U primeru se analizira ugroženost napajanja adaptacionog svetla na početku i kraju tunela. Na slici 11.21 prikazana je skica napajanja adaptacionim svetlom leve i desne tunelske cevi. Biće prikazana samo analiza ugroženosti desne tunelske cevi, a u analiziranoj cevi orman za napajanje početka tunela RAZ-D i orman za napajanje kraja tunela RAI-D.



Slika 11.21: šema napajanja adaptacionim svetlom leve i desne tunelske cevi

Zamenska šema za proračun prenapona na niskonaponskoj strani transformatora sa modelovanim delom niskonaponske mreže za napajanje osvetljenja desne tunelske cevi iz ormana ND4 prikazama je na slici 11.22. Šema je data kao ekranski prikaz iz programa EMTP-atp. Na šemi je uklonjen deo šeme koji se odnosi na model gromobranske zaštite objekta pogonske stanice. Grana u šemi od ND4 do RAI-D je kabl dužine 764 m, a od ND4 do RAZ-D je kabl dužine 167 m

Oznake na slici 11.22 imaju sledeće značenje:

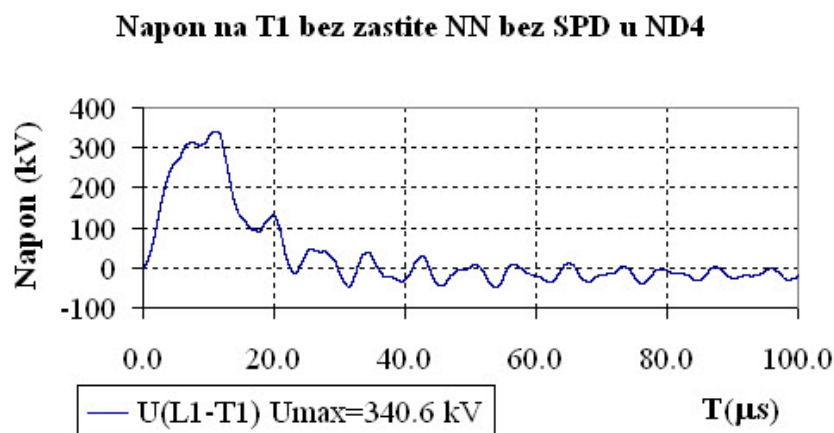
P1-prenaponska zaštita 0.4 strane transformatora, odvodnik prenapona na transformatoru,

P2 - SPD klase 2 u ormanu ND4 za ograničavanje prenapona između L-PEN,

P3 - SPD klase 2 u ormanu Raz-D za ograničavanje prenapona između L-N,

P4 - SPD klase 1 u ormanu Raz-D za ograničavanje prenapona između N-PE,

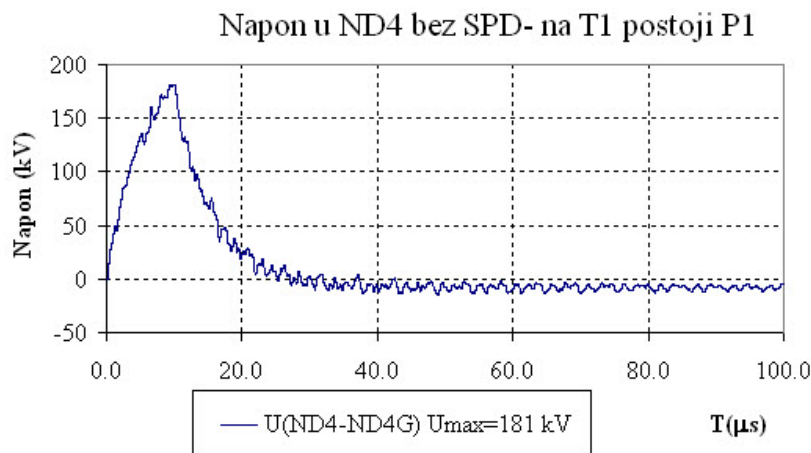
P5 - SPD klase 2 u ormanu Rai-D za ograničavanje prenapona između L-N,



Slika 11.23: Napon na transformatoru T1 kada zaštita P1 na transformatoru i u PS u ormanu ND4 ne postoji

Analiza prenapona u ormanu ND4 kada sve ostale zaštite postoje

Proračun je ponovljen kada je transformator T1 zaštićen sa P1, a u ormanu ND4 ne postoji P2, dok u tunelu zaštite postoje. Talasni oblik napona dat je na slici 11.24.

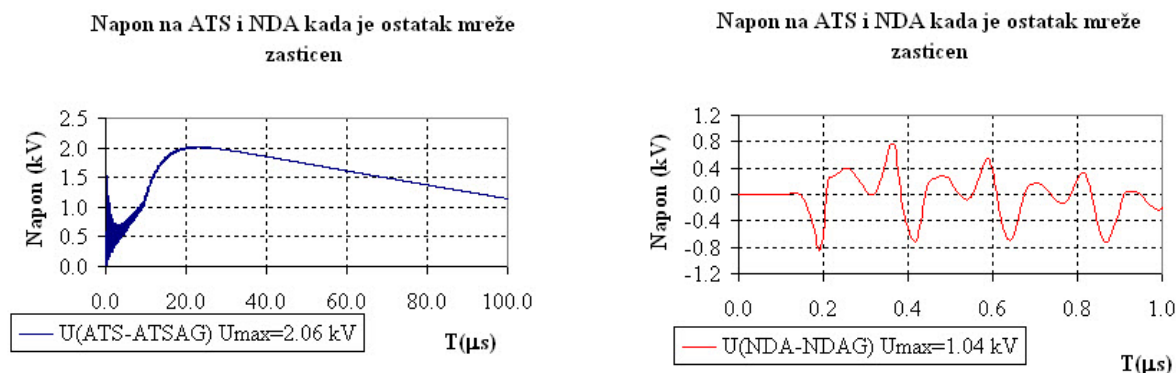


Slika 11.24: Napon na niskonaponskom izvodu kada transformator nije zaštićen odvodnikom prenapona

Odvodnik prenapona P1 mora biti primenjen i na transformatoru na strani 0.4 kV i SPD P2 u ormanu ND4 jer inače napon prevazilazi dozvoljenih 6 kV jer iznosi 181 kV u ND4.

Analiza prenapona u ormanu ATS i NDA u pogonskoj stanici kada sve ostale zaštite postoje

Izvršena je provera visine prenapona u ormanima ATS i NDA u kojima nije primenjena zaštita. Transformator T1 je zaštićen odvodnikom P1 i orman ND4 je zaštićen SPD P2. Razvodni ormani u tunelskim cevima su takođe zaštićeni od prenapona odgovarajućim SPD. Talasni oblici napona prikazani su na slici 11.25.



Slika 11.25: Talasni oblici napona u ormanima ATS i NDA

Vidi se da su prenaponi niži od maksimalno dozvoljenih prenapon od 6 kV.

Provera talasnih oblika i amplituda struja kroz P1 i P2

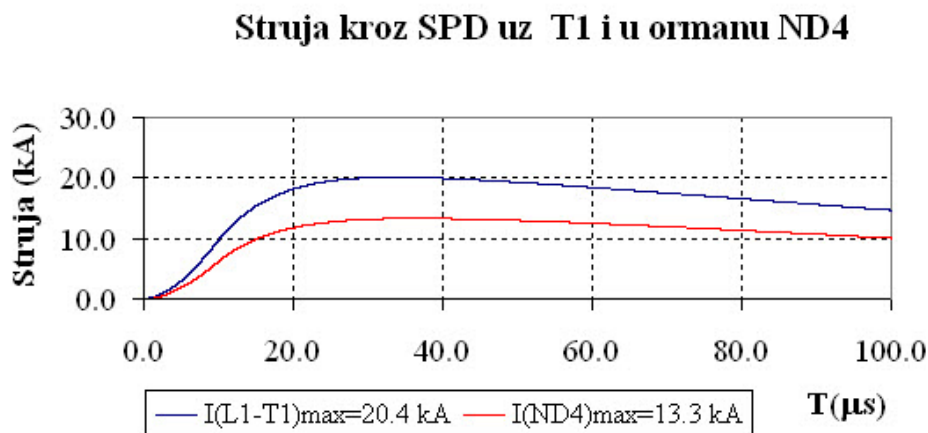
Izvršena je provera talasnog oblika i amplitude struje kroz odvodnik prenapona P1 na transformatoru T1 i na SPD u ormanu ND4. Rezultati su prikazani na slici 11.26.

Struje kroz odvodnike P1 i P2 su daleko manje od maksimalno dozvoljenih. To se može tumačiti odvođenjem struja kablovima u tunele i podela struje sa ostalim prenaponskim zaštitnim uređajima. Mora se voditi računa da se struja deli na 3 komponente koje od N teku prema fazama.

11.4.2 Zaštita razvodnih ormana u tunelckim cevima koji se napajaju iz ormana ND4, odnosno direktno iz mreže 0.4 kV

U tunelskim cevima postoje sledeći razvodni ormani koji se napajaju iz mreže 0.4 kV:

- Ormani adaptivnog svetla desne tunelske cevi



Slika 11.26: Talasni oblik i amplitude struje kroz odvodnik prenapona P1 na transformatoru T1 i na SPD u ormanu ND4

- Ormani adaptivnog svetla leve tunelske tunelske cevi
- Ormani osvetljenja desne tunelske cevi
- Ormani osvetljenja leve tunelske cevi
- Ormani za napajanje ventilatora

Analiziraće se samo potreba za zaštitom u ormanima RAZD i RAID, kada su u pogonskoj stanici primenjeni odvodnici P1 i P2. U tunelskim cevima N i PE je razdvojeno, a provodnik PE je spojen sa lokalnom zemljom na mestu ormana preko otpora uzemljenja koji je usvojen da iznosi $R_t = 1 \Omega$.

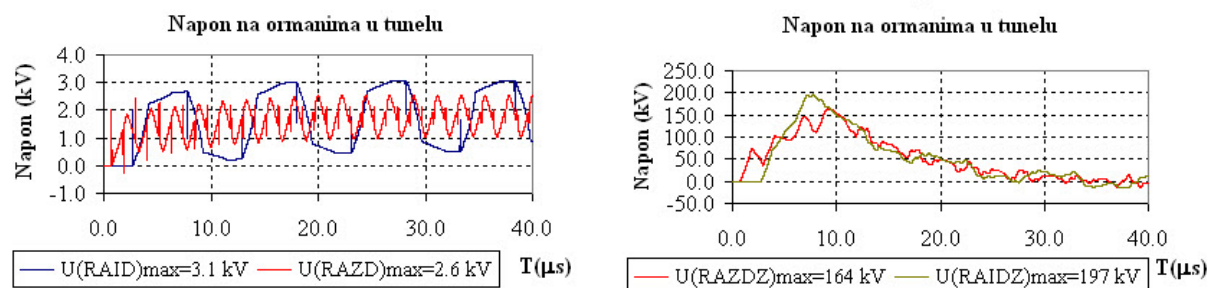
Slučaj kada se na ne primenjuje zaštita u ormanima u tunelu

Prvo je analiziran slučaj kada se u ormanima RAID i RAIL ne primenjuje prenaponska zaštita, a sve ostale zaštite postoje. Talasni oblik napona prikazan je na slici 11.27. Oznake imaju sledeće oznake:

RAID i RAZD -naponi u ormanu RAID i RAZD između F (faza) i N,

RAIDZ i RAZDZ -naponi u ormanima RAID i RAZD između N i PE.

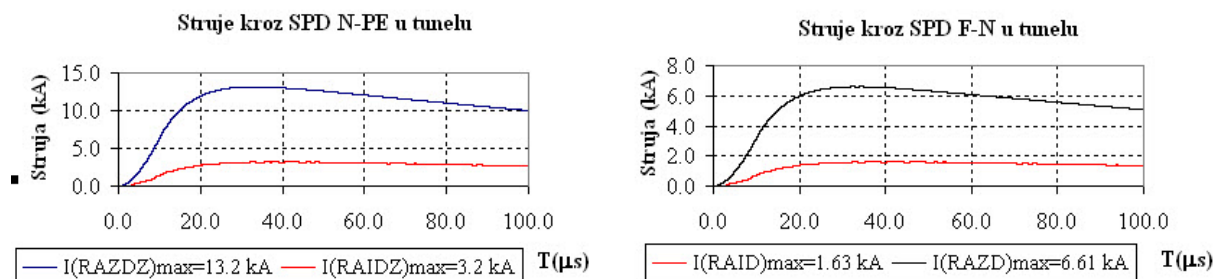
Može se videti da je prenaponska zaštita neophodna između N-PE zbog izuzetno opasnih prenapona ukoliko se prenaponska zaštita ne primenjuje.



Slika 11.27: Vremenski tok prenapona u ormanu RAID i RAZD kada se ne bi primenijivala prenaponska zaštita (levo napon između F-N, desno između N-PE)

Slučaj kada se primenjuje zaštita u ormanima u tunelu

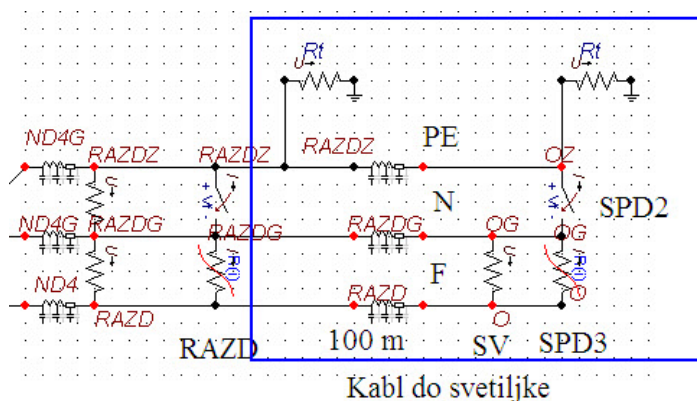
Pokazuje se da je neophodno ugraditi u prenaposke zaštite u ormanima između N i PE. Iz razloga sigurnosti ugrađene su zaštite i između F i N i između N i PE. Izvršena je provera struja kroz sve SPD uređaje u razvodnim ormanima RAZD i RAID. Rezultati su prikazani na slici



Slika 11.28: Talasni oblici struja u ormanima RAID i RAZD između N-P (levo) i F-N (desno)

Izvršena je provera da li se može pojaviti opasan prenapon kada se iz ormana adaptacionog osvetljenja RAZD vodi trožilni kabl dužine 100 m do svetiljke. Kabl se sastoji od F, N i PE provodnika. U ormanu je PE provodnik povezan za lokalno uzemljenje. Predpostavljeno je da je ulazna impedansa svetiljke veoma velika (1Ω), što čini rezultate kritičnijim.

Zamenska šema dela kola od značaja data je na slici 11.29 i odnosi se na desnu tunelsku cev.

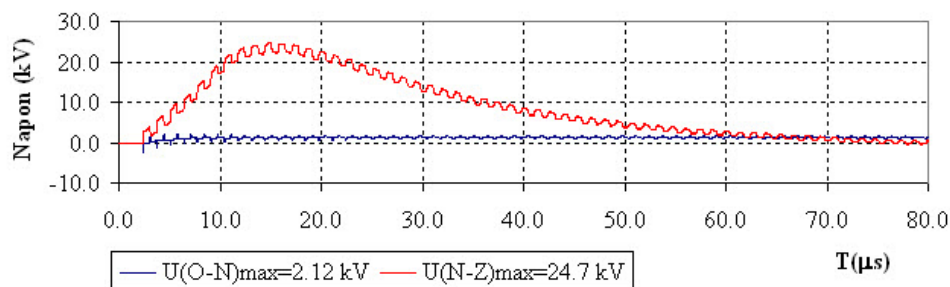


Slika 11.29: Deo kola koji se sastoji od dvožilnog kabla od ormara RAZD koji je dugačak 100 m i napaja svetiljku dugačak 100 m

Prvo je predpostavljeno da nije primenje

U tom slučaju talasni oblik napona na svetiljci izgleda kao na slici 11.30.

Napon na svetiljci u tunelu



Slika 11.30: Talasni oblik napona na svetiljci napajanog iz ormara RAIL dvožilnim kablom F-PEN dužine 100 m

Može se videti da u ovom slučaju napon između F i N ne prelazi 2.5 kV, ali između N i PE iznosi skoro 25 kV, što znači da treba primeniti prenaponsku zaštitu. Prenaponska zaštita se mora primeniti ispred svetiljke u ormanu. U tabeli 11.12 date su karakteristike prenaponskog zaštitnog uređaja.

Posle ugradnje struja kroz SPD ima oblik kao na slici 11.31.

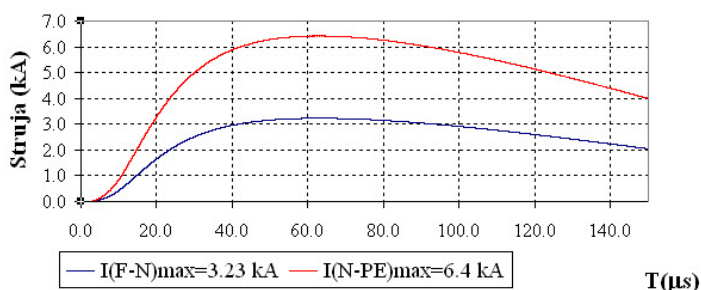
Može se zaključiti da struja pri pražnjenju kroz SPD između F-N je 3.23 kA, a između N i PE 6.4 kA.

Struja zadovoljava u pogledu dozvoljenih udarnih struja iz tabele 11.12.

Tabela 11.12: Karakteristike odvodnika tip 3 za niski napon

Opis	Karakteristike
Nazivni napon U_n (V)	230
Maksimalnatrajna radna struja I_m (A)	20
Najviši rafni napon U_c (V)	255
SPD prema EN 61643-11	Tip 3
Nominalna struja odvođenja F-N (8/20) μ s Iud(kA)	5
Nominalna struja odvođenja N-PE (8/20) μ s Iud(kA)	20
Zaštitni nivo V_p (V) F-N	1000
Zaštitni nivo V_p (V) N-PE	1500
Vreme odziva	<25 ns
Optička indikacija stanja odvodnika na licu mesta	Da

Struja kroz SPD uz svetiljku u tunelu



Slika 11.31: Struja na SPD između F-N i između N-PE

11.5 Zaključak

Izvršena je provera prenaponske zaštite sistema napajanja tunela i prilaza tunelu na bazi 3 kriterijuma:

- Naprezanje energetskog transformatora sa strane 10 kV i 0.4 kV usled atmosferskog pražnjenja u prihvatni sistem gromobranske zaštite Pogonske stanice.
- Naponsko naprezanje razvodnih ormana u Pogonskoj stanici i tunelima.
- Strujno naprezanje SPD u razvodnim ormanima u Pogonskoj stanici i tunelima.

Proračuni su uvek rađeni za slučaj da nije primenjena zaštita na nekom razvodnom ormanu pa se računa naponskom naprezanje i kada je primenjena zaštita proverava se da li je struja manja od dozvoljene.

Na osnovu analiza donete su sledeće preporuke:

- 1 Svaki transformatora 10/0.4 kV, potrebno je zaštititi sa visokonaponske strane odvodnikom prenapona. U slučaju da je zvezdište uzemljeno preko otpornika, a vreme isključenja je 3 s, preporučuje se odvodnik prenapona izabran prema proizvođačkoj proceduri, u primeru je izabran odbodnik naznačenog napona 15 kV.
- 2 Svaki transformatora 10/0.4 kV, potrebno je zaštititi sa niskonaponske strane odvodnikom prenapona. Preporučuje se odvodnik prenapona naznačenog napona 275 V ili više nominalne struje $I_n = 10$ kA ili više, podnosive kratkotrajne udarne struje oblika 4/10 μ s temene vrednosti 100 kA.
- 3 Kod naručivanja transformatora se mora naglasiti proizvođaču da je potrebno postaviti nosače za odvodnike prenapona na kućište transformatora sa strane 10 kV i sa strane 0.4 kV.
- 4 U Pogonskoj stanici potrebno je primeniti prenaponsku zaštitu u ormanima primenom prenaponskih zaštitnih uređaja klase 1 (SPD 1) sa podnosivom atmosferskom udarnom strujom oblika 8/20 μ s ne manjom od 20 kA. Svaki komplet se sastoji od tropolnog spoja između faza i PEN.
- 5 Svetiljke u tunelu se moraju napajati monofazno sa 3 žile F, N i PE. Zaštira treba da se sprovodi između F-N klasom SPD 3 sa udarnom strujom 5 kA i između N i PE SPD klase 2 sa udarnom strujom 10 kA.

Zahvalnica

Zahvaljujemo projektantskoj firmi Elektrovat DOO iz Čačka koja je radila na projektu elektro-napajanja na Koridoru 10 na finansiranje studije prenaponske zaštite 2018 god.

Primer 12

Analiza rizika preskoka na 110 kV vodovima sa linijskim odvodnicima prenapona

12.1 Uvodna razmatraja

Do preskoka na nadzemnom prenosnom vodu visokog napona usled atmosferskih pražnjenja može da dođe usled sledećih događaja:

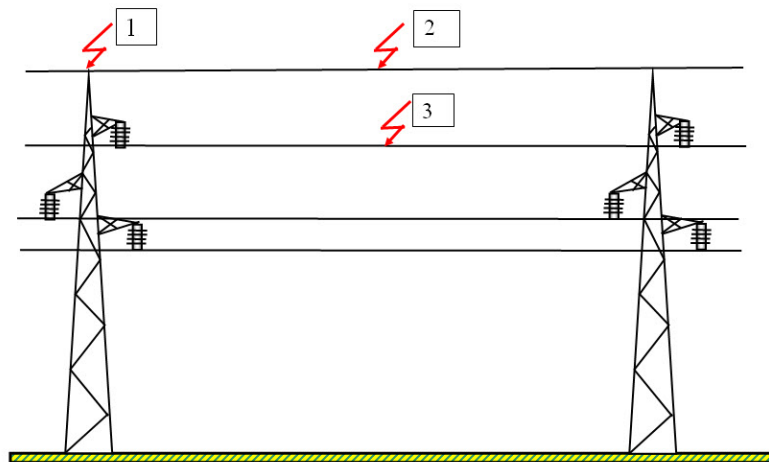
- pražnjenje u zaštitno uže i povratni preskok,
- pražnjenje mimo zaštitnog užeta u fazni provodnik.

Pri pražnjenjima u zaštitno uže razlikujemo pražnjenja u raspon i pražnjenja u stub.

Na slici 12.1 prikazani su tipovi atmosferskih udara koji mogu da izazovu preskoke na izolaciji visokonaponskih vodova.

Na slici 12.1 oznake imaju sledeće značenje:

1. udar u vrh stuba ili okolinu stuba u tačku koja nije dalje od 30% od dužine raspona,
2. udar u raspon, daleko od stuba najmanje 30% od dužine raspona,
3. udar u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta.



Slika 12.1: Tipovi atmosferskih udara koji mogu da izazovu preskoke na izolaciji visokonaponskih vodova

Smatra se da pri udarima koji su bliže stubu od 30% od dužine raspona najveći deo struje ide kroz jedan stub, dok na rastojanjima koja su dalje od 30 % dužine raspona stubovi dele struju.

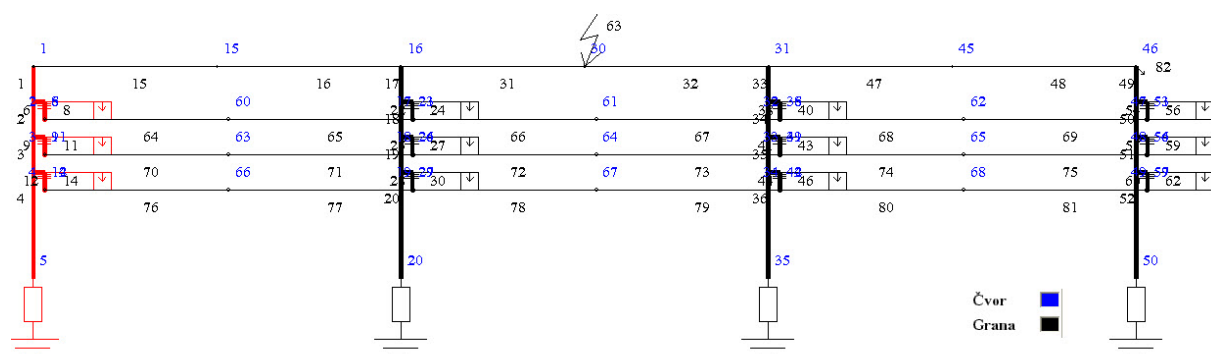
U slučaju nadzemnih sredjenaponskih vodova preskoci se mogu javiti usled pražnjenja okolinu voda koja izazivaju indukovane prenapone koji mogu imati dovoljnu amplitudu da izazovu preskok.

Postavljanje metal-oksidnih odvodnika prenapona smanjuje broj preskoka na nadzemnim prenosnim vodovima prouzrokovanih direktnim atmosferskim pražnjenjima u zaštitno užeta koji prouzrokuju povratni preskok ili pražnjenjima mimo zaštitnog užeta. Najčešće se odvodnici prenapona postavljaju na sve tri faze voda, u kritičnim delovima trase, gde praktično eliminišu preskoke na izolatorima voda. Veliki broj preskoka usled atmosferskih pražnjenja nastaje zbog atmosferskih udara na deonicama voda sa povećanom grmljavinskom aktivnošću, odnosno na ograničenom broju deonica voda [87], [91]. Radi smanjenja troškova se razmatra parcijalna upotreba odvodnika u sledećim slučajevima:

- instalacija odvodnika se vrši samo u oblastima sa visokom otpornošću tla,
- instalacija odvodnika se vrši samo na izloženim fazama ako je primenjeno delimično ekraniranje provodnika jednim zaštitnim užetom na vodovima kod kojih potpuno ekraniranje zahteva 2 užeta,
- na kritičnim fazama voda bez zaštitnog užeta (gornje faze koje ekraniraju niže faze).

12.2 Upoređenje broja ispada sa i bez linijskih odvodnika

Na slici 12.2 dat je ekranski prikaz u programu GROM, 3 raspona 110 kV voda sa stubovima tipa "jela" i odvodnicima prenapona postavljenim paralelno štitičnoj izolaciji, sa atmosferskim pražnjenjem u sredinu drugog raspona koji je 300 m dugačak. Odvodnici prenapona su sa eksternim iskrištem (EGLA) uz svaki od linijskih izolatora na svim stubovima.

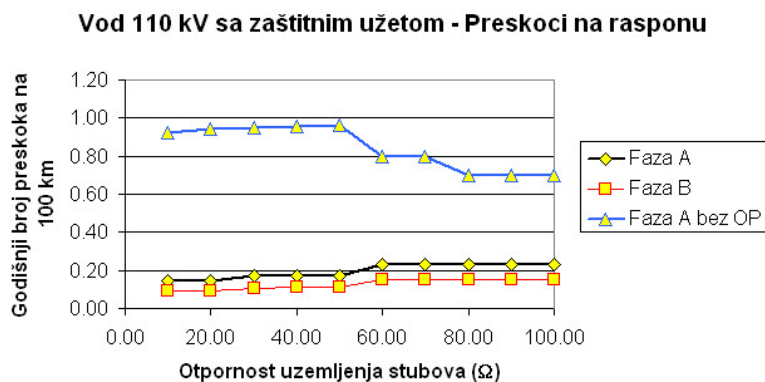


Slika 12.2: Zamenska šema deonice voda koja se sastoji od 3 raspona sa portalnim stubovima sa odvodnicima prenapona EGLA

12.2.1 Uticaj otpornosti uzemljenja stubova

Analiziran je 110 kV vod sa zaštitnim užadima. Izvršen je proračun godišnjeg broja preskoka na izolaciji stubova i na rasponu u slučaju kada je primenjen odvodnik prenapona naznačenog napona 96 kV sa eksternim iskrištem. Proračunom je dobijen rezultat da na izolaciji stubova nikada ne dolazi do preskoka, već isključivo na međufaznom rastojanju na rasponu.

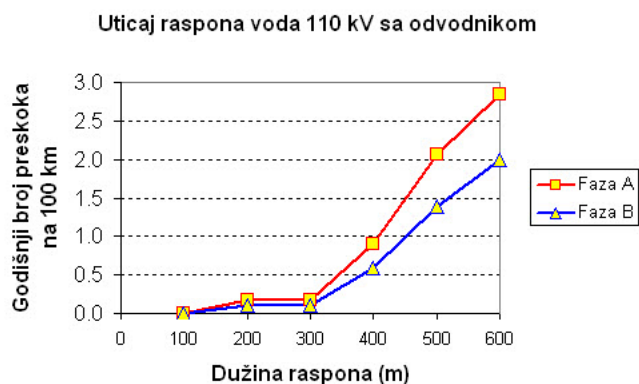
Sa slike 12.3 se može se uočiti da u slučaju kada se primenjuju odvodnici prenapona, broj preskoka na vodu je značajno manji nego kada se ne primenjuju (faza A bez OP na slici 12.3). Interesantno je uočiti da je broj preskoka između faza A i B (što predstavlja dvofazni kratak spoj), pri primeni odvodnika prenapona veći nego kada se ne primenjuju. Kvar na fazi A predstavlja kratak spoj između zaštitnog užeta i faze A, odnosno jednopolni kvar. To znači da u slučaju kada ne postoje odvodnici prenapona dolazi do preskoka na stubovima, pa se smanjuje broj preskoka na rasponu. Broj dvofaznih kvarova na rasponu pri primeni odvodnika iznosi ispod 0,15, a broj jednofaznih kvarova iznosi 0,23 kvarova godišnje na 100 km pri otporu uzemljenja od 100 Ω .



Slika 12.3: Poređenje godišnjeg broja preskoka na rasponu voda 110 kV u slučaju kada se primenjuje odvodnik prenapona sa brojem preskoka bez odvodnika prenapona

12.2.2 Uticaj dužine raspona na broj preskoka

Izvršen je proračun broja preskoka na rasponu za 110 kV vod sa primenjenim odvodnicima za slučaj kada je vod sa zaštitnim užetom. Svi proračuni su rađeni kada je otpornost uzemljenja stubova iznosila 40Ω . Na slici 12.4 prikazan je godišnji broj preskoka na vodu 110 kV sa portalnim stubovima i zaštitnim užadima sa primenjenim odvodnicima prenapona u funkciji dužine raspona. Na osnovu slike 12.4 mogu se doneti sledeći zaključci:



Slika 12.4: Godišnji broj preskoka na vodu 110 kV sa portalnim stubovima i zaštitnim užadima sa primenjenim odvodnicima prenapona, u funkciji dužine raspona

- Sa porastom dužine raspona broj preskoka na rasponu značajno raste,
- Broj međufaznih preskoka je manji nego broj preskoka prema fazi A.

Zahvalnica

Primer je nastao na osnovu studije *Primena prenaponske zaštite prenosnih nadzemnih vodova visokog napona u cilju smanjenja broja kvarova usled atmosferskih prenapona*, koju je naručio JP Elektroistok (kasnije Elektromreža Srbije), 2012-2014.

Primer 13

Razvoj udarnog generatora od 1000 kV

Godine 2011 Dr. Mladen Kekez, bivši student ETF iz Beograda, pri svom penzionisanju je donirao ETF Beograd, komponente iz svoje laboratorije HEFTI (High-Energy Frequency Tesla) Ottava u Kanadi, čiji je bio vlasnik. Donacija je realizovana iz saradnje sa firmom ELBI iz Valjeva, čiji je vlasnik i direktor Živorad Cvetković, dipl. ing, sa kojim Fakultet ima dugogodišnju veoma uspešnu saradnu. Dogovoreno je da se deo komponenti iskoristi za manji udarni naponski generator za Laboratoriju za visoki napon u Beogradu, za izradu udarnog naponskog generatora do 400 kV, koji se uklapa u prostorne mogućnosti Fakulteta. Za potrebe Laboratorije Elbi predviđena je izrada udarnog naponskog generatora do 1000 kV u novom laboratoriskom prostoru.

13.1 Hala i konstrukcija udarnog generatora

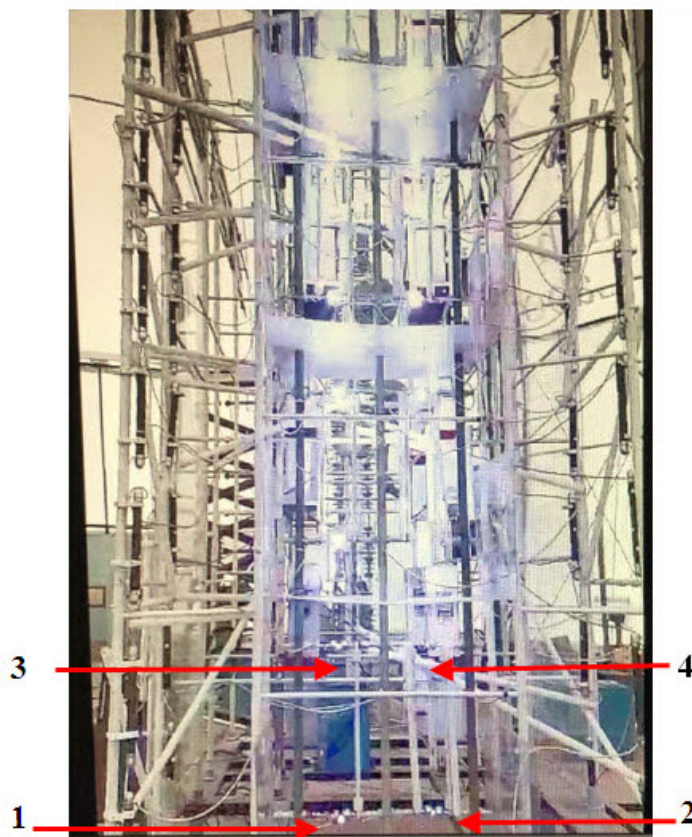
Na slici 13.1 prikazana je spoljašnji izgled visokonapostnske laboratorije ELBI (levo), kao i unutrašnji izgled (desno).

Na slici 13.2 prikazana je fotografija generatora u trenutku reagovanja izdvajanjem karakteristične slike iz video snimka. Može se uočiti da pri reagovanju javlja jaka svetlost usled iskri između svih kugli, ali je intenzitet iskre najslabija između kugli prvog iskrišta, a na svakom višem nivou se svetlost sve više pojačava. Ovo pokazuje da je svih 16 stepeni udarnog generatora reagovalo.

Crvenim strelicama su označena preskočna mesta na prvoj etaži.



Slika 13.1: Spoljašnji izgled visokonaponske laboratorije (levo), kao i unutrašnji izgled (desno)



Slika 13.2: Snimak udarnog generatora u trenutku reagovanja

C_2 -kondenzatori rasterećenja koji definišu čelo talasa,

R_1 -otpornik koji definiše čelo talasa,

R_2 -otpornik koji definiše začelje talasa,

T -iskrište koje se sastoji od dve kugle između kojih dolazi do preskoka kada napon pređe preskočni napon,

T_1 -iskrište koje se sastoji od dve kugle, od kojih kugla koja je vezana za uzemljenje ima šupljinu kroz koju se dovodi visokonaponski impuls na treću elektrodu, koja se zove elektroda za trigerovanje.

Na slici desno oznake imaju značenje:

TR -Transformator čiji se napon ispravlja, maksimalne vrednosti E_{DC} ,

R_z -otpornik koji ograničava struju punjenja kondenzatoram

R_{1i} -interni otpornik koji je deo otpornika koji definiše čelo talasa,

R_{1e} -eksterni otpornik koji je deo otpornika koji definiše čelo talasa,

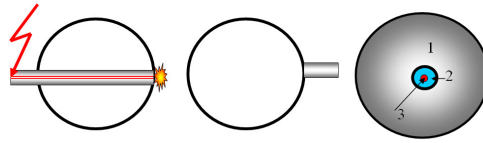
Uobičajena konstrukcija udarnih generatora je da se otpornik R_1 deli na n manjih otpornika, gde je n broj stepeni, koji se postavljaju u granu sa iskrištem, a postoji i dodatni (eksterni) otpornik na izlazu iz generatora, kao na slici 13.3. Suma otpornosti raspoređenih otpornika jednaka je otporniku R_1 sa slike levo, a n je broj stepeni generatora. U posmatranom slučaju $n = 4$.

$$R_1 = \sum_1^n R_{1i} + R_{1e} \quad (13.1)$$

Rešenje sa jednim otpornikom je izabrano zbog lakšeg podešavanja vrednosti otpornosti, ali je mana veća dužina otpornika R_1 , što može da povećava horizontalnu dimenziju generatora (ukoliko je R_1 postavljen horizontalno, kao u našem slučaju). Kako je veći problem bio visina generatora od horizontalnih dimenzija, odabrano je ovo rešenje.

Nakon reagovanja iskrišta T_1 dolazi do povećanja napona na svim kondenzatorima i do preskoka na svim iskrištima, tako da se kondenzatori preko iskrišta prevezuju na red, jer su otpornici R_c i R_d velike vrednosti. Dobija se ekvivalentni kapacitet punjenja koji iznosi:

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (13.2)$$



Slika 13.4: Troelektrodno iskrište sa internim okidanjem

Prva kugla iskrišta, koja je vezana za uzemljenje, ima specijalnu konstrukciju. Konstrukcija troelektrodnog iskrišta sa internim okidanjem prikazana je na slici 13.4.

- 1 - metalna kugla iskrišta,
- 2 - izolacioni prsten u otvoru kugle,
- 3 - centralna elektroda na koju se dovodi visokonaponski impuls,

Preskok između centralne elektrode i površine metalne kugle izaziva jonizaciju okolnog vazduha i inicira preskok između kugli koji nastaje neposredno nakon nastanka inicijalne varnice.

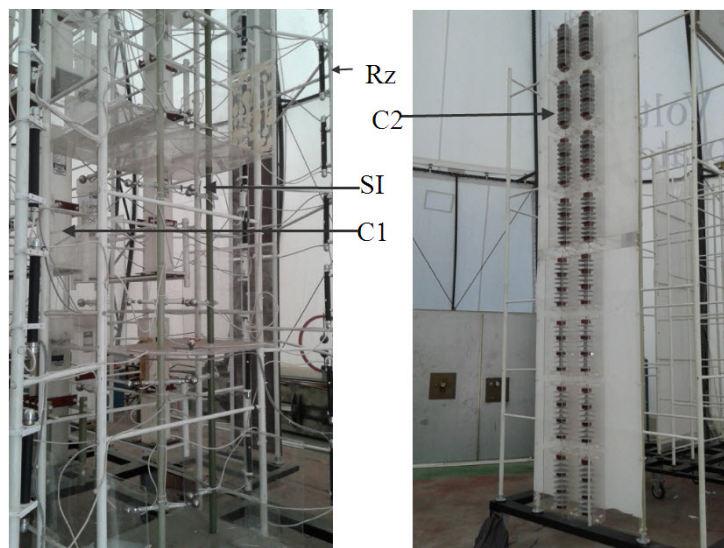
13.3 Konstrukcija udarnog generatora do 1000 kV

Udarni generator je napravljen od 16 stepeni smeštenih na 4 etaže.

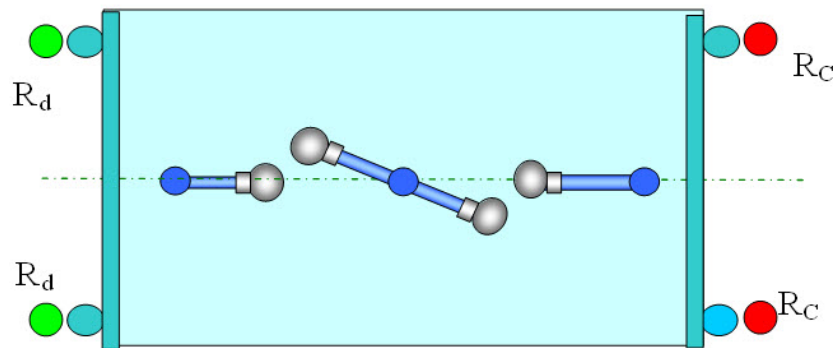
Mehaničke konstrukcije udarnog generatora sa elementima prikazan je na slici 13.5 levo sa otpornicima za raspodelu napona između etaža R_z , kondenzatorima za punjenje C_1 i obrtnim sfernim iskrištima SI , a desno su prikazana 2 niza kondenzatora C_2 .

13.3.1 Elementi konstrukcije

U konstrukciji udarnog naponskog generatora za 1600 kV napravljeno je specifično rešenje kod koga se nalaze na jednoj etaži 4 kondenzatora koji čine 4 stepena udarnog generatora. Zbog uštede u prostoru, koriste po etaži 2 para iskrišta vezana za istu obrtnu osovinu na istoj visini. Na slici 13.6 prikazan je izgled dvostrukog iskrišta iz ptičje perspektive. U sredini se nalazi vertikalna osovina sa daljinskim upravljanjem koja nosi pokretna iskrišta. Sa obe strane se nalaze dve osovine koje nose iskrišta koja se mogu ručno podešavati pre početka merenja.



Slika 13.5: Fotografija konstrukcije udarnog generatora iz dva ugla



Slika 13.6: Skica dvostrukog iskrišta - pogled odozgo

Centralna izolaciona osovina sa kuglama služi za promenu rastojanja između sfera iskrišta u toku rada uređaja komandovanjem iz kabine. Dve bočne osovine nose kugle čiji se položaj menja ručno u skladu sa naponom sa kojim će biti rađeni eksperimenti.

Na slici 13.7 levo prikazan je bočni pogled na dve etaže, od kojih se na svakoj etaži nalaze po 4 kondenzatora koji čine C_1 , koji nisu prikazani na slici, kao i dva para dvostrukih iskrišta. Otpornici velikog otpora za sprečavanje rasterećenja kondenzatora nakon reagovanja označeni su sa R_d i R_c . Desno je prikazan je sklop od 4 kondenzatora koji su deo kondenzatora C_2 , kod koga je pomoću šupljih izolacionih umetaka postignuto sigurno preskočno rastojanje između površine gornjeg kondenzatora i donjeg kondenzatora, što je označeno linijom P završenom strelicama. Svaki kondenzator podnosi 50 kV, što znači da prikazani sklop podnosi 200 kV. Ukupan broj redno vezanih kondenzatora je 32 u jednom vertikalnom nizu. Po potrebi se mogu koristiti 2 niza kondenzatora, kao na slici 13.5

desno. Oznake na slici 13.7 imaju sledeće značenje:

T -Transmisija kojom se smanjuje brzina obrtanja osovine koja nosi sfere pokretnog iskrišta,

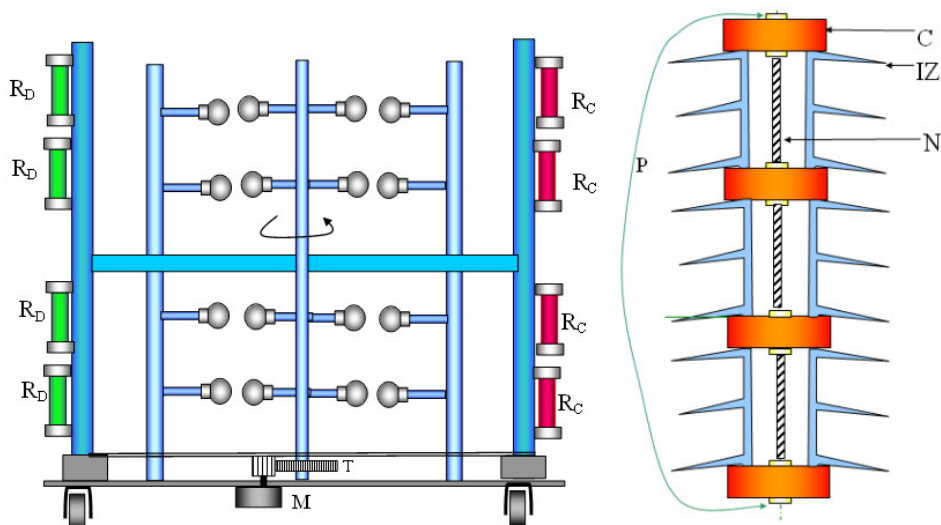
M -motor za pokretanje obrtnog iskrišta, sa upravljanjem sa komandnog stola,

C -jedan od kondenzatora koji čine kapacitivnost C_2 ,

IZ - šupalj izolator od silikonske gume koji služi da produži preskočnu stazu između metalnih priključaka krajnjih kondenzatora sloga,

N -metalni štap sa navojem kojima su priključci pojedinih kondenzatora međusobno spojeni i pritegnuti,

P -preskočna staza oko sklopa kondenzatora.



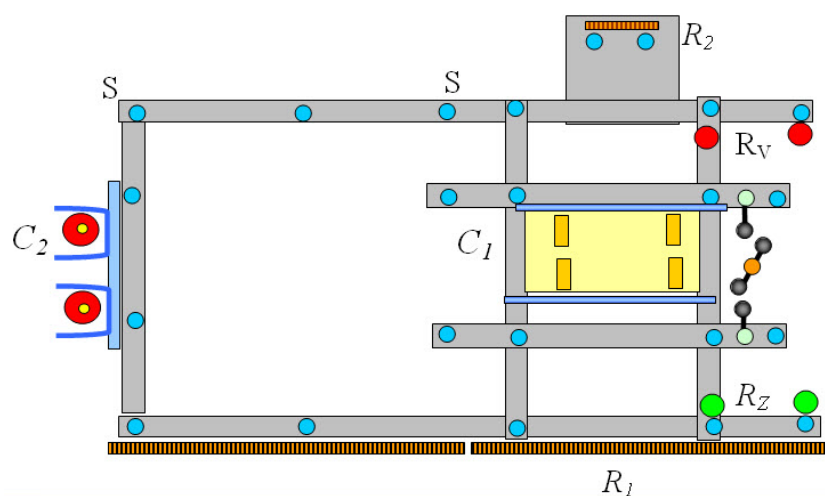
Slika 13.7: Prikaz obrtnih iskrišta za dve etaže udarnog generatora (desno) i jedan sklop od 4 kondenzatora

Na slici 13.8 prikazan je pogled odozgo na kompletnu konstrukciju udarnog generatora.

Oznake na slici 13.8 koje nisu ranije navedene, imaju sledeće značenje:

S -Izolacioni stubovi koji su nosači mehaničke konstrukcije,

C_2 -tanjirasti kondenzatori smešteni između silikonskih odstojnika koji obezbeđuju vazdušni preskočni razmak od 200 kV.

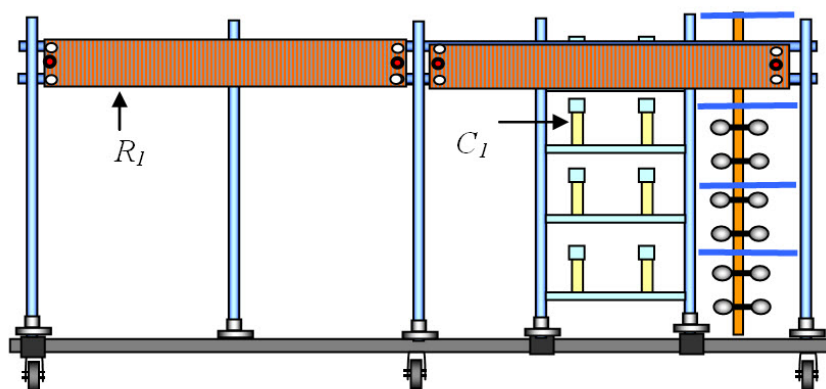


Slika 13.8: Prikaz kompletnog udarnog generatora odozgo

R_1 -dva otpornička segmenta vezana na red sa bifilarno namotanom otpornom žicom.

R_2 -vertikalni otpornik od 3 segmenta vezana na red sa namotanom otpornom žicom.

Crtež bočnog pogleda na konstrukciju udarnog generatora prikazan je na slici 13.9.



Slika 13.9: Grafički prikaz sa bočne strane kompletne konstrukcije udarnog generatora

13.4 Izbor elemenata udarnog generatora

Pri projektovanju udarnog naponskog generatora potrebno je odabrati elemente generatora na osnovu sledećih uslova:

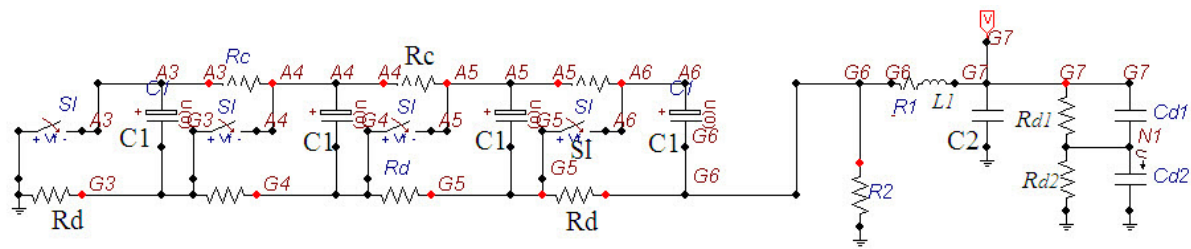
1. Podešavanje talasnog oblika napona koji generator daje,
2. provera da li otpornici mogu da podnesu termička naprezanja za sledeće procese:
 - proces generisanja udarnog talasa,
 - punjenje kondenzatora generatora,
 - proces rasterećenja generatora posle završetka rada.
3. Podešavanje vremena punjenja i vremena rasterećenja kondenzatora

13.4.1 Proračun talasnog oblika udarnog napona

Ispitivanja izolacije udarnim naponim se vrše standardizovanim oblicima napona. Jedan od standardnih oblika napona prema IEC standardu [11] za koordinaciju izolacije je atmosferski udarni talas oblika $1,2/50 \mu s$, što znači da je trajanje linearizovanog čela $T_f = 1,2 \pm 30\% \mu s$, a začelja $T_t = 50 \pm 20\% \mu s$. Trajanje linearizovanog čela talasa za udarni naponski talas se definiše preko prave koja prolazi kroz tačke u kojima napon postiže vrednost $0,3 \cdot U_{max}$ i $0,9 \cdot U_{max}$. Postavlja se prava kroz ove dve tačke i određuje vreme od preseka prave sa apscisnom osom do preseka prave sa horizontalnom linijom na visini U_{max} , što predstavlja vreme čela talasa T_f . Prava predstavlja linearizovano čelo talasa, a U_{max} je temena vrednost dobijenog napona. Začelje se određuje kao tačka kada napon opadne na $0,5 \cdot U_{max}$ na opadajućem delu talasa od trenutka početka talasa. Pored gore navedenog atmosferskog udarnog talasa koriste se i drugi standardni talasi, kao na primer prema standardima [15, 16, 17] koji se bave generalno zaštitom objekata od atmosferskog pražnjenja, posebno niskonaponskih instalacija u objektima, gde se koristi talas $10/300 \mu s$ (čelo talasa $10 \mu s$ i začelje $300 \mu s$).

Na slici 13.10 prikazana je ekvivalentna šema četvorostepenog naponskog udarnog generatora formirana u programskom okruženju ATPdraw (grafički korisnički interfejs koji se koristi za pripremu podataka za elektromagnetni tranzijentni program EMTP/atp) za proračun prelaznog procesa pri reagovanju generatora. Napunjeni kondenzatori se u programu modeluju elementom pod nazivom "CAP_U0".

Oznake na slici 13.10 imaju sledeće značenje:



Slika 13.10: Ekranski prikaz šeme četvorostepenog naponskog udarnog generatora iz programa AtpDrow predproceora EMTP/atp

SI -sferno iskrište modelovano naponski kontrlisanim prekidačem (oznaka u EMRP/atp modelu "SWITCHVC") koji uključuje u trenutku pojave napona iznad napona reagovanja U_r ,

C_1 -kondenzatori koji su napunjeni do napona $U = 80$ kV, tako da u trenutku početka proračuna napon na prekidačima ima vednost $U > U_r$, što izaziva njihovo trenutno zatvaranje i prevezivanje kondenzatora u rednu vezu. Na ovaj način se proračun skraćuje i pojednostavljuje, jer se ne modeluje punjenje kondenzatora C_2 .

R_d i R_c - otpornici velike otpornosti koji sprečavaju rasterećenje kondenzatora preko njih u trenutku reagovanja,

C_2 -kondenzator koji definiše trajanje čela talasa,

R_1 -otpornik koji definiše trajanje čela talasa,

L_1 -induktivitet koji obuhvata sve parazitne induktivnosti strujnog kola u kome se odvija pražnjenja kondenzatora C_1 ,

R_2 -otpornik koji definiše trajanje začelja talasa,

C_{d1} i C_{d2} -kondenzatori visokonaponske i niskonaponske grane mešovitog delila napona.

R_{d1} i R_{d2} -otpornici visokonaponske i niskonaponske grane mešovitog delila napona.

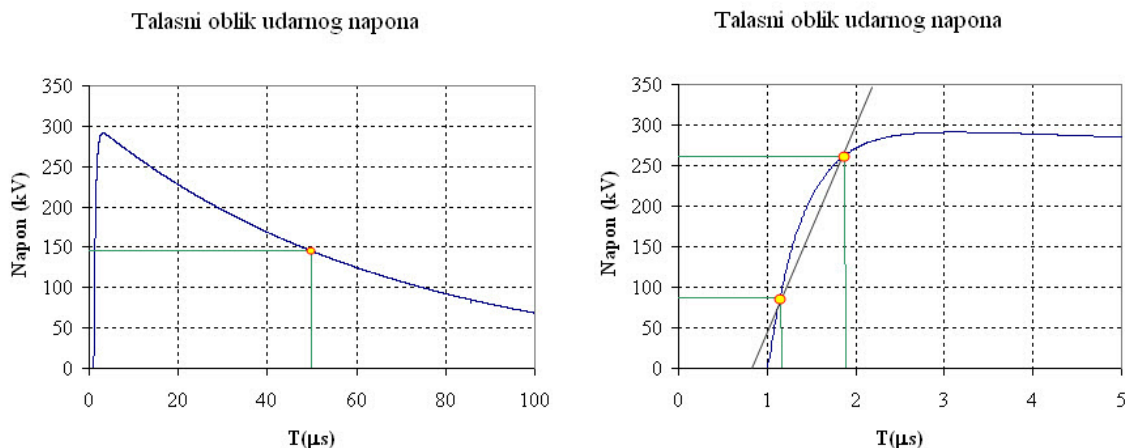
Izvršeno je variranje elemenata generatora R_1 i R_2 koji su konstruktivno izvedeni da se mogu menjati, za razliku od elemenata C_1 i C_2 koji imaju stalne vrednosti ili se eventualno mogu menjati prevezivanjem u rednu ili paralelnu vezu.

Vrednosti elemenata šeme sa slike 13.10 za koje su dobijene vrednosti parametara talasa koje su najbliže standardnom talasu oblika $1.2/50 \mu s$ date su u tabeli 13.1.

Mora se naglasiti da je induktivitet L_1 usvojen. Na slici 13.12 prikazan je talasni oblik kompletnog talasa i uvećano čelo sa prikazanim postupkom određivanja parametara talasa (čelo i začelje).

Tabela 13.1: Vrednosti elemenata udarnog naponskog generatora

C_1	C_2	R_1	L_1	R_2
μF	μF	Ω	μH	Ω
0.0012	0.8	350	0.001	350

Slika 13.11: Izračunati talasni oblik kompletnog talasa oblika 1.2/50 μs

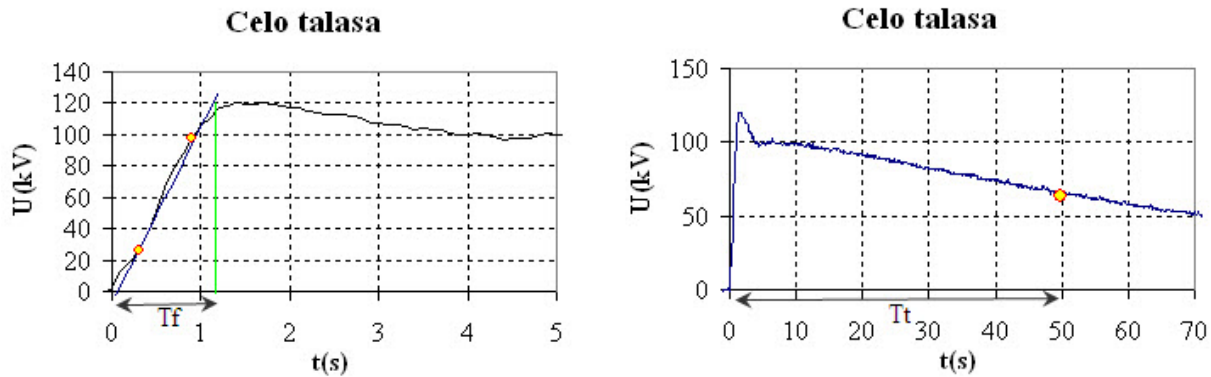
Tačke na dijagramu služe za određivanje čela i začelja talasa. Talas na dijagramu ima parametre $T_f = 1.23 \mu\text{s}$ i $T_t = 48.8 \mu\text{s}$, što se uklapa u granice tolerancije koje su za čelo talasa $\pm 30\%$ i za začelje $\pm 10\%$.

Na slici 13.12 prikazan je registrovan udarni naponski talas pomoću digitalnog osciloskopa. Udarni napon je dobijen pomoću četvorostepenog udarnog naponskog generatora koji je napravljen na ETF u Beogradu. Talas je obrađen i određeno je vreme čela talasa, koje iznosi $T_f = 1.1 \mu\text{s}$, amplitude 120 kV, začelja $T_t = 49.1 \mu\text{s}$ određeno na oscilogramu. Digitalni rezultat registracije je obrađen u programu MS Excel i predstavljen sa dva vremenska skaliranja. Levo je prikazano čelo talasa u opsegu od 0 do 5 μs , a desno je prikazan kompletan registrovan talas da bi se prikazao rezultat određivanja začelja.

Talas ima previšenje na čelu, koje se može tolerisati ako je manja od 10 %. Ova nepravilnost talasa se može smanjiti optimizacijom veza što utiče na smanjivanje induktiviteta

13.5 Termički proračun otpornika za struju punjenja

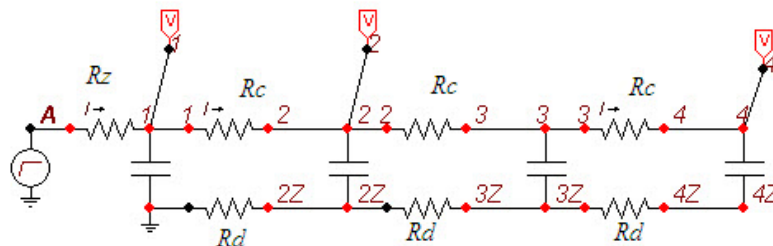
Iza izvora visokog jednosmernog napona za punjenje kondenzatora udarnog generatora koji su vezani paralelno, mora se postaviti otpornik velikog otpora koji služi da spreči

Slika 13.12: Talasni oblik izmerenog talasa 1.2/50 μ s

preopterećenje izvora. Ovaj otpornik se naziva zaštitni otpornik i obeležava kao R_Z . Punjenje kondenzatora udarnog generatora vrši se tako da se omogući da kondenzatori budu puni za vreme od oko 1 min. Propisima je definisano da vreme između dva udara ne sme da bude kraće od 1 min, stoga nema ni potrebe da izvor jednosmernog napona bude previše snažan da bi omogućio brže punjenje. Merenje napunjenosti generatora vrši se iza otpornika R_Z , i to je u stvari kontrola napunjenosti kondenzatora prvog stepena višestepenog udarnog generatora.

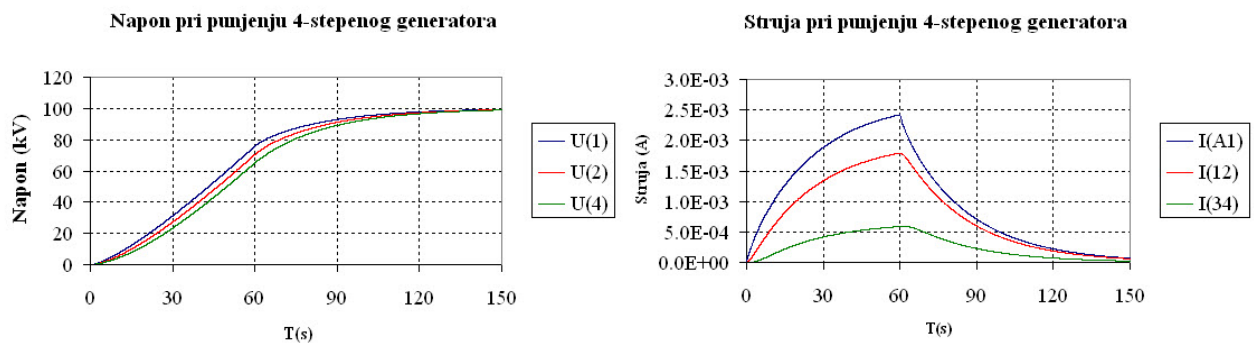
Visokoomski otpornici između pojedinih stepeni služe da onemoguće rasterećivanje kondenzatora u lokalnim konturama i da obezbede paralelno punjenje kondenzatora. Stepennost napunjenosti kondenzatora poslednjeg stepena udarnog generatora se ne može meriti, jer bi nakon reagovanja i prevezivanja kondenzatora na red uređaj za merenje bio podvrgnut n puta višem udarnom naponu, gde je n broj stepeni. Ne preporučuje se da otpornost otpornika između stepeni bude prevelika, da ne bi punjenje kondenzatora bilo previše dugo. Sa druge strane, ne preporučuje se ni premala vrednost zbog toga što bi se mogli kondenzatori prazniti posle reagovanja i efikasnost udarnog generatora bi se smanjivala. Ovi otpornici su obeleženi oznakama R_c i R_d . Otpornici R_c vezani su redno od izvora jednosmernog napona, a R_d redno od uzemljenog priključka.

Otpornici za ograničavanje struje ne moraju biti bezinduktivni jer služe samo za usporavanje punjenja kondenzatora. Na slici 13.13 dat je ekranski prikaz zamenske šeme udarnog generatora samo sa otpornicima za ograničavanje struje punjenja kondenzatora, bez otpornika za oblikovanje talasa R_1 i R_2 i iskrišta. Cilj proračuna iz prikazane šeme je da se vidi brzina punjenja prvog kondenzatora, na kome se kontroliše napon, kao i poslednjeg kondenzatora, od čije napunjenosti u trenutku okidanja zavisi maksimalni napon koji udarni generator realizuje. Izvor napona punjenja je visokonaponski transformator koji se napaja iz regulacionog transformatora. Sistem proizvodi linearno rastući napon do 100 kV u vremenskom intervalu podizanja od 1 min, nakon čega napon punjenja ostaje konstantan. Vrednost zaštitnog otpornika $R_z = 10 \text{ M}\Omega$ i vrednosti $R_c = R_d = 3 \text{ M}\Omega$. Na slici 13.14 prikazani su naponi na 1., 2. i 4. stepenu udarnog



Slika 13.13: Zamenska šema udarnog generatora samo sa otpornicima za ograničavanje struje

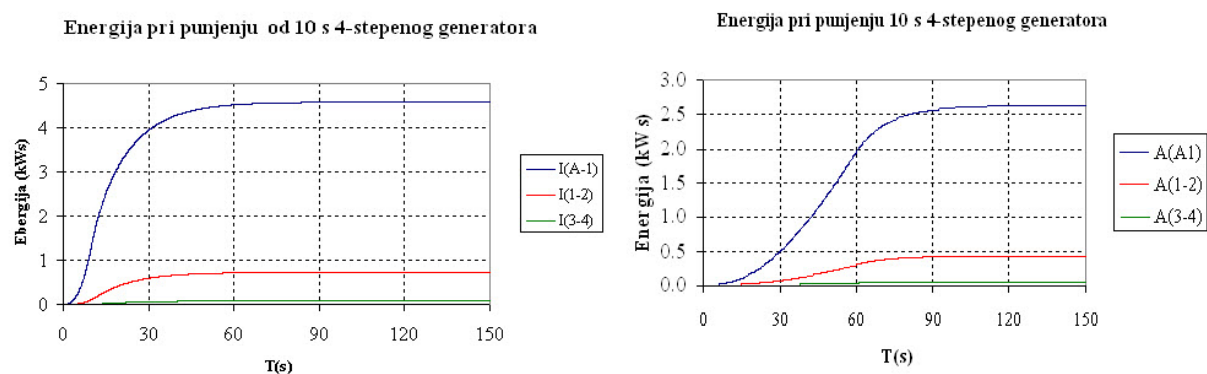
generatora (levo). Vidi se da se kondenzator 4. stepena puni sporije nego kondenzator 1. i 2. stepena, a sve se nalazi unutar vremenskog intervala od 2.5 min. Desno se vide struje, koje rastu u periodu od 1 min, a zatim opadaju. Struja zaštitnog otpornika je najveća, a struje ostalih otpornika su značajno niže.



Slika 13.14: Naponi na kondenzatorima prvog i petog stepena

Izvor visokog napona ima linearno rastući oblik napona kao posledicu postepenog podizanja napona na regulacionom transformatoru.

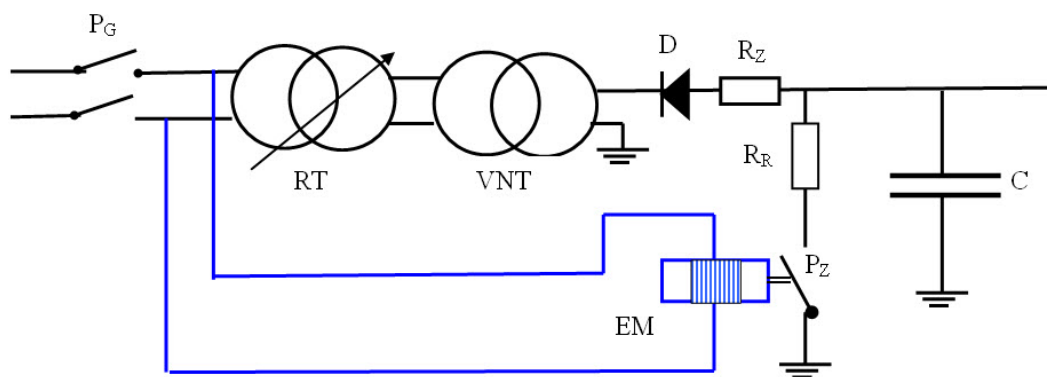
Na slici 13.15 prikazan je vremenski tok energije oslobođene na rezistorima R_z u grani sa zaštitnim otpornikom, kao i u prvom i poslednjem stepenu na otpornicima za ograničavanje struje punjenja kondenzatora. Grane u dijagramu su obeležene prema čvorovima $I(A - 1)$ za zaštitni otpornik, $I(1 - 2)$ prvog stepena generatora i $I(3 - 4)$ za poslednji stepen generatora. Dijagram levo odnosi se na slučaj podizanja napona od 0 do 100 kV za 10 s, a desno za 60 s. U zavisnosti brzine podizanja napona zavisi potrebna snage otpornika R_z .



Slika 13.15: Energija oslobođena na zašnomi otporniku, otporniku za punjenje prvog, drugog i četvero stepena generatora

13.6 Izbor otpornika za pražnjenje kondenzatora

Kada se isključi napajanje udarnog naponskog generatora, automatski se pomoću zemljospojnika i odgovarajućeg otpornika spajaju i uzemljuju svi krajevi kondenzatora i obezbeđuje se siguran pristup udarnom generatoru. Na slici 13.16 prikazana je šema po kojoj se vrši napajanje udarnog generatora i upravljanje zemljospojnikom.



Slika 13.16: Šema napajanja generatora i upravljanje zemljospojnikom za rasterećenje generatora

Oznake na slici 13.16 imaju sledeće značenje:

P_G - Glavni prekidač,

RT -Regulacioni transformator,

VNT - Visokonaponski transformator,

D - Dioda, koja se nalazi u zajedničkom kućištu sa transformatorom,

R_Z - Zaštitni otpornik za ograničenje struje punjenja kondenzatora,

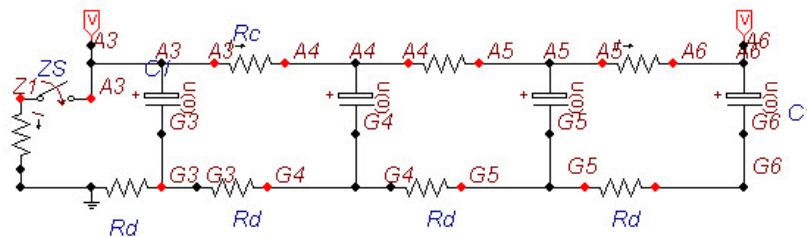
R_R - Otpornik za rasterećenje,

EM - Elektromagnet koji otvara zaštitni zemljospojnik kada je glavni prekidač uključen. Čim se otvori glavni prekidač, zemljospojnik se automatski zatvara obezbeđujući rasterećenje svih kondenzatora.

P_Z - Zaštitni rastavljač (zemljospojnik), za rasterećenje kondenzatora. Kada je glavni prekidač uključen, tada se rastavljač zemljospojnika dovodi u otvoren položaj sa rastavnim razmakom koji može da podnese DC napon viši od napona napajanja kondenzatora udarnog generatora (u ovom slučaju 100 kV).

C - kondenzatori udarnog generatora.

Na slici 13.17 prikazana je zamenska šema iz programa Atpdraw za upravljanje izvršnog programa EMTP-atp za proračun pojava pri rasterećenju udarnog generatora posle izključenja glavnog prekidača. Na šemi su svi kondenzatori napunjeni do 100 kV



Slika 13.17: Šema za modelovanje rasterećenja udarnog generatora u EMTP-atp

i posle 10 s se uključuje prekidač P_Z koji uzemljuje tačku Z udarnog generatora, iako udarni generator nije reagovao. Da bi program ispravno radio moraju se izabrati sledeći elementi u programu AtpDraw.

CAP_U0 - kondenzator sa početnim uslovima,

TSWITCH - vremenski kontrolisani prekidač.

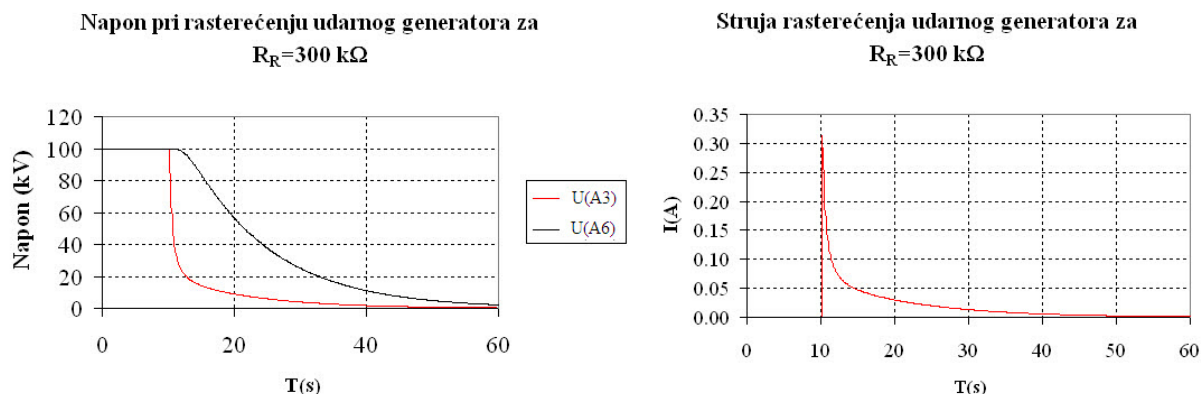
Prilikom podešavanja karakteristika prekidača u ovom slučaju mora se voditi računa da se moraju izabrati sledeća podešenja:

Tcl -vreme zatvaranja, izabrano 10 s da bi se jasno uočio proces rasterećenja,

Top -trenutak otvaranja, mora biti veći ili jednak vremenu proračuna,

Imar -granična struja sečenja, za $t > T_{top}$ za $|I| < I_{mar}$ struja se trenutno prekida. Može se usvojiti $I_{mar} = 0$.

Izvršen je proračun talasnog oblika napona na kondenzatorima prvog i četvrtog stepena i struje kroz otpornik za rasterećenje da bi sagledali brzinu rasterećenja, kada se pretpostavlja da nije došlo do reagovanja iskrišta. U tom slučaju se opterećenje svih kondenzatora rasterećuje kroz otpornik $R_R = 300\text{k}\Omega$ i zemljospojni prekidač. Na slici 13.18 prikazani su naponi na prvom i četvrtom kondenzatoru na granama A3 i A6 na šemi na slici 13.16 (levo) i struja kroz otpornik R_R (desno).

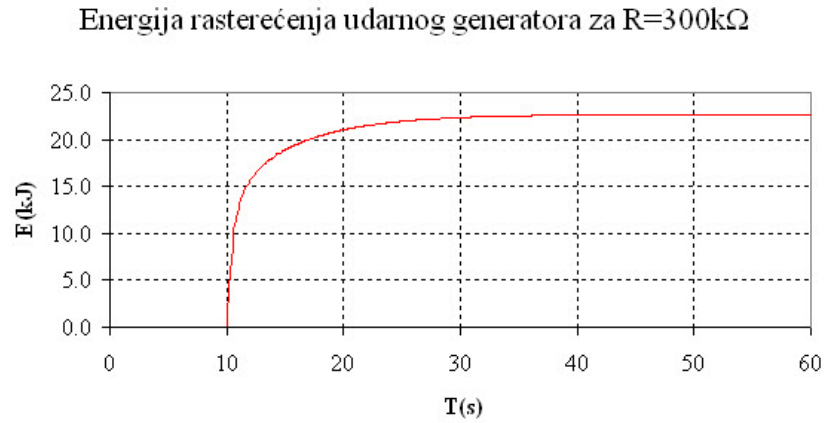


Slika 13.18: Talasni oblici napona i struja prilikom uključivanja zemljospojnika kada je otpornik za rasterećenje $300\text{ k}\Omega$

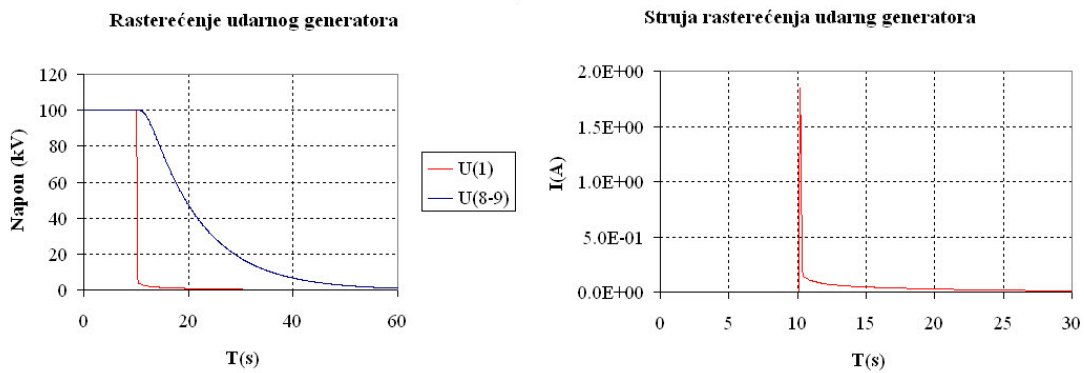
Može se uočiti da se rasterećenje kondenzatora vrši relativno sporo, tako da na prvom kondenzatoru napon dostiže vrednost od oko 10 kV posle 20 s, a posle 40 s postaje bezopasan. Naprotiv, na poslednjem kondenzatoru napon opada na oko 10 kV posle 40 s, a posle 60 s je vrlo nizak i dozvoljava se prilaz generatoru. Maksimalna struja rasterećenja iznosi $I_{max} = 0.3086\text{ A}$. Trenutna snaga oslobođena u trenutku maksimuma struje iznosi $P_{max} = RI^2$, odnosno $P_{max} = 28570\text{ W}$. Ukupna oslobođena energija kroz otpornik prikazana je na slici 13.19.

Proračun je ponovljen sa manjim otpornikom za rasterećenje, otpornosti $R_R = 30\text{k}\Omega$. Rezultati proračuna napona i struja u pri rasterećenju prikazani su na slici 13.20. Ukupna oslobođena energija kroz otpornik prikazana je na slici 13.21.

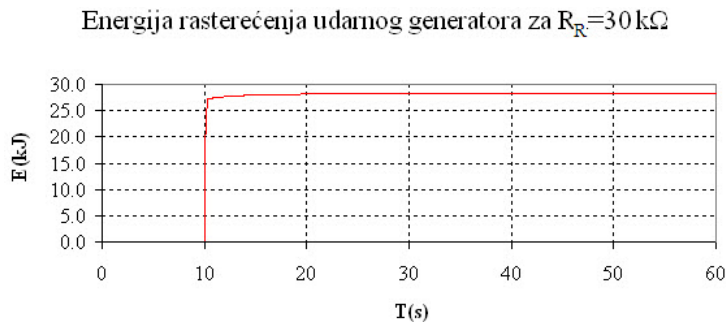
Može se uočiti da sa smanjenom vrednošću otpora za rasterećenje vrednost ukupne energije oslobođene na otporniku neznatno raste, iako je vrednost struje kroz i toplotne snage na otporniku znatno veća, ali je period proticanja kraći.



Slika 13.19: Energija oslobođena na otporniku za rasterećenje vrednosti otpora $300\text{ k}\Omega$



Slika 13.20: Talasni oblici napona prilikom uključenja zemljospojnika kada je otpornik za rasterećenje $30\text{ k}\Omega$



Slika 13.21: Energija oslobođena na otporniku za rasterećenje otpora $30\text{ k}\Omega$

13.7 Dodatne bezbednosne mere

Jedna od najvažnijih bezbednosnih mera pri visokonaponskim ispitivanjima je da se regulacioni transformator preko koga se reguliše izlazni napon visokonaponskog transformatora vrati na položaj minimalnog izlaznog napona (nulti položaj. Razlozi su sledeći.

Pojava velikih udarnih struja

Ako regulacioni transformator ostane na visokom položaju, tada je primar ispitnog transformatora naglo izložen visokom naponu, što izaziva pojavu velikih struja magnetizovanja, odnosno pojave udarnih struja koje mogu višestruko premašiti radne struje. Udarne struje mogu izazvati oštećenje regulacionog transformatora iz koga se ispitni transformator napaja, ali i pojavu visokih prenapona koji mogu oštetiti izolaciju ispitnog transformatora, ili oštećenje priključenog objekta za ispitivanje, koji može biti izložen višem naponu od ispitnog.

Bezbednost osoblja

Ako regulacioni transformator ostane na visokom položaju, posle isključenju ispitnog sistema, prilikom ponovnog uključenja se pojavljuje veliki ispitni napon. To može ugroziti ljude u blizini i opremu, jer ne očekuju pojavu visokog napona, posebno ako nisu sprovedene ostale mere bezbedosti.

Kontrola i ponovljivost ispitivanja

Vraćanjem regulacionog transformatora na nulu obezbeđuje se da svako ispitivanje počinje pod istim uslovima, što je važno za tačnost i uporedivost rezultata.

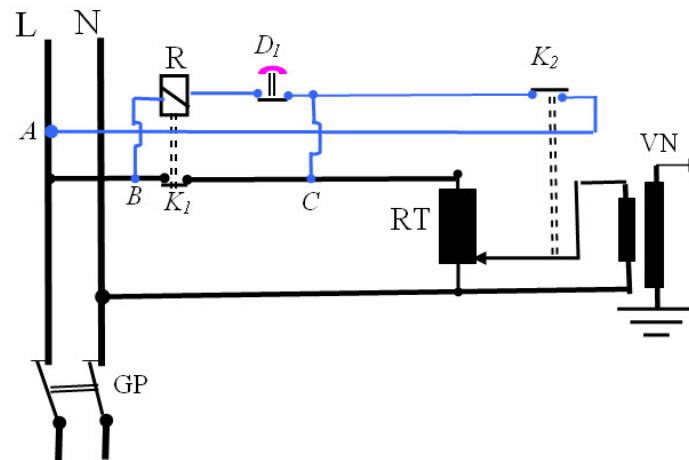
13.7.1 Način obezbeđenja uslova za vraćanje napona na nulu

Upravlja je regulacionim transformatorom se vrši na dva načina:

- Ručno
- Pomoću motora

Regulacioni transformator u nultom položaju

Na slici 13.22 prikazana je šema napajanja regulacionog transformatora sa ručnom regulacijom kada je klizač regulatora u nultom položaju, a glavni prekidač je uključen.



Slika 13.22: Slučaj kada je klizač regulatora u nultom položaju

Oznake na slici 13.22 imaju sledeće značenje:

L, N -fazni i neutralni provodnik,

R - elektromagnetni rele,

D_I -dugme za isključenje u slučaju iznenadnih situacija,

K_1 -normalno otvoreni kontakti elektromagnetnog releja R,

K_2 -kontakti sklopke koja je zatvorena kada je klizač u nultom položaju,

RT - regulacioni transformator,

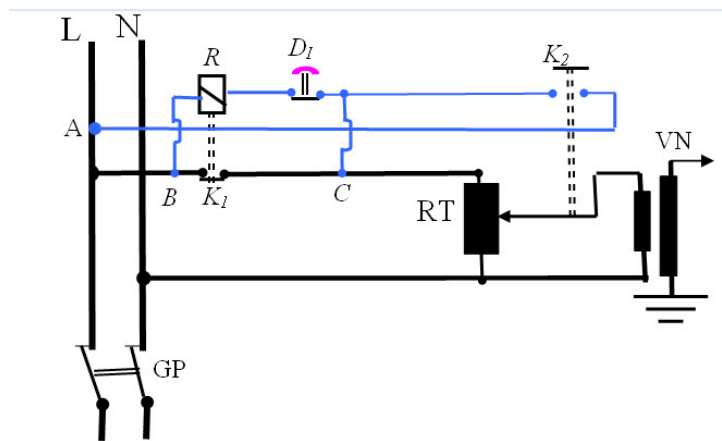
VN - visokonaponski transformator,

GP -glavni prekidač kojim se uključuje ceo sistem.

Kada je regulator u nultom položaju, kontakti K_2 su zatvoreni, kontakti dugmeta za isključenje u slučaju iznenadnih situacija su zatvoreni, tako da se elektromagnet napaja sa faznog provodnika iz tačke A iz koje se napaja kontakt K_2 i dok je magnet releja R pod naponom, on drži kontakte K_1 u zatvorenom položaju.

Regulator napona je podigao napon

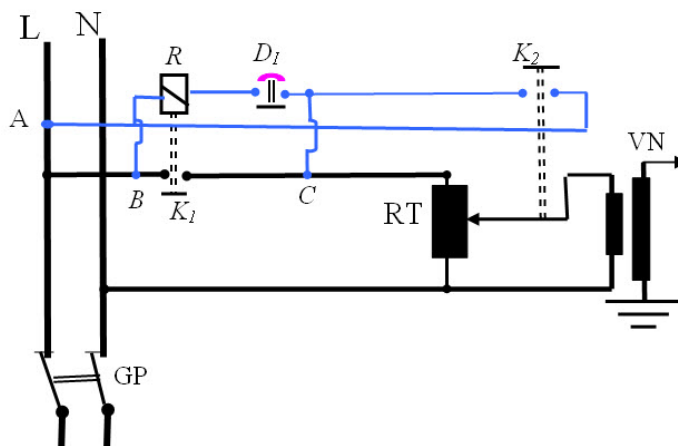
Kada se regulator napona pomeri iz nultog položaja, otvaraju se kontakti K_2 , međutim magnet releja R i dalje se napaja iz tačke C jer je kontakt K_1 releja zatvoren, kao što se vidi na slici 13.23.



Slika 13.23: Slučaj klizač regulatora u pomeren iz nultog položaja

Isključenje pomoću dugmeta za iznenadne situacije

Šema u slučaju kada je pritisnuto dugmeta za iznenadne situacije prikazana je na slici 13.24.



Slika 13.24: Slučaj kada je klizač regulatora u pomeren iz nultog položaja, a pritisnuto je dugme za iznenadne situacije

U ovom slučaju prekinuto je napajanje elektromagneta iz tačke C , pa se automatski otvaraju i kontakti K_1 releja R , čime se prekida napajanje regulacionog transformatora RT . Ako bi se želelo ponovno uključjenje sistema, prvo se mora regulacioni transformator vratiti u nulti položaj da bi se zatvorili kontakti K_2 i time ponovo napajao rele R , koji zatvara kontakte K_1 i napaja regulacioni transformator.

Motorom pokretan regulator napona

U slučaju kada se koristi regulacioni transformator sa klizačem pokretanim pomoću elektromotora, jako je važno da se motor ne isključuje prilikom pritiska na taster za iznenadne situacije već da ima nezavisno napajanje. U slučaju isključenja napajanja potrebno je da automatika komanduje motorom tako da vrati regulator u nulti položaj. U suprotnom bi se dogodilo da regulator ostane zaglavljnjen u položaju trenutno podešenog napona.

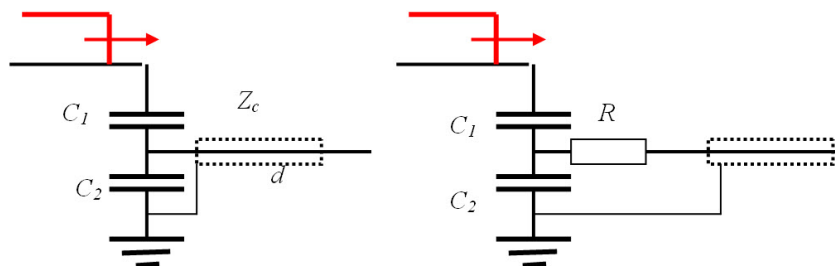
Primer 14

Razvoj delila za udarne napone

14.1 Visokonaponska delila za udarne napone

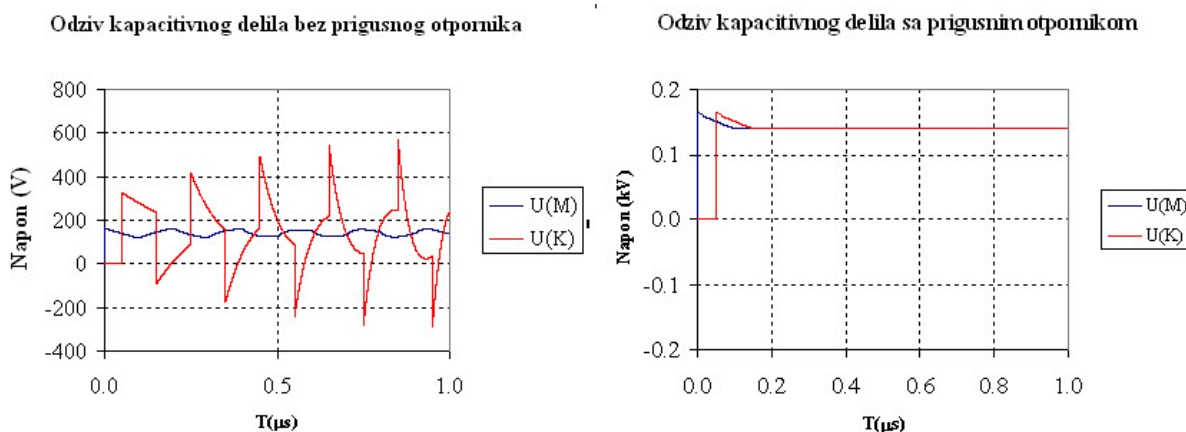
Delila napona za udarne talase su ili otporničkog tipa ili mešovita. Direktna primena kapacitivnih delila nije pogodna, jer se na niskonaponsku stranu priključuje koaksijalni kabl koji ima ulaznu impedansu jednaku karakterističnoj impedanse kabla. Kada izmereni signal stigne do kraja kabla, on se reflektuje od njega, ako je kabl zatvoren mernim instrumentom velike ulazne impedanse (obično reda $M\Omega$). Zbog toga se pojavljuju višestruke refleksije od kraja kabla.

Da bi se sprečile višestruke refleksije, postavlja se između izvoda za merenje napona i koaksijalnog kabla otpornik koji čija je vrednost jednaka karakterističnoj impedanse kabla. Ovaj otpornik igra ulogu da reflektovan talas od kraja kabla priguši. Kapacitivnost C_2 delila napona pri visokim učestanostima predstavlja malu impedansu preko koje se prigušni otpornik R praktično spaja sa zemljom i sprečava refleksiju talasa. Na slici 14.1 prikazano je delilo bez prigušnog otpornika (levo) i sa prigušnim otpornikom (desno).



Slika 14.1: Kapacitivno delilo bez prigušnog otpornika (levo) i sa prigušnim otpornikom (desno)

Izvršen je proračun odziva delila na pravougaoni talas amplitude 10 kV za $C_1 = 100\text{pF}$ i $C_2 = 6000\text{pF}$. Kabl je dužine $d = 15\text{ m}$, karakteristične impedanse $Z_c = 50\ \Omega$. Na slici 14.2 prikazan je odziv kapacitivnog delila bez prigušnog otpornika (levo) i sa prigušnim otpornikom (desno).



Slika 14.2: Odziv kapacitivnog delila bez prigušnog otpornika (levo) i sa prigušnim otpornikom (desno)

Može se zaključiti da se postavljanjem rednog otpornika ispred koaksijalnog kabla značajno snižavaju refleksije talasa.

Otporničko delilo napona

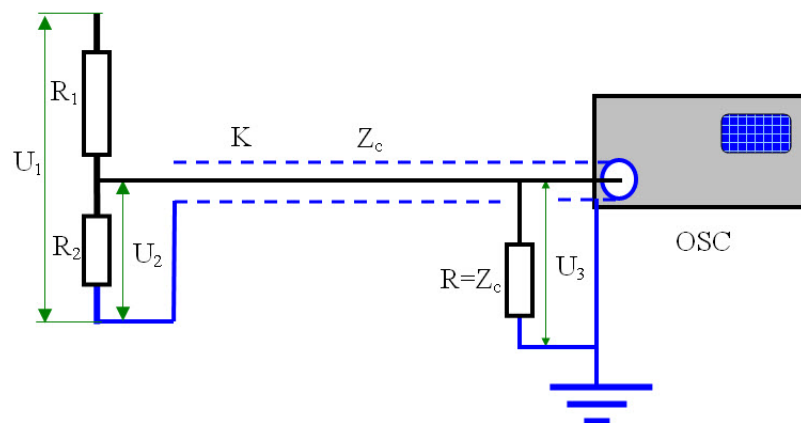
Otporničko delilo sa koaksijalnim kablom, koji je na drugom kraju ispred instrumenta završen otpornikom između centralne žile i plašta, koji je jednak karakterističnoj impedansi kabla, potpuno sprečava nastanak višestrukih refleksija.

Otpornička delila se mogu koristiti za udarne napone samo za niže napone (do najviše 100 kV) kada su dimenzije delila relativno male. Za visokonaponska udarna ispitivanja parazitni kapaciteti prema zemlji i okolnim objektima postaju značajan faktor i dovode do izobličenja merenog napona.

Najvažniji parametar delila napona je odnos deljenja $m = U_1/U_2$, gde je U_1 napon na potpunom delilu, a U_2 napon na niskonaponskoj grani. Osnovni zahtev koji treba da ispuni delilo za udarne napone je da odnos deljenja ne zavisi od oblika i frekvencije talasa, kao i od ambijentalnih uslova. Najteže je postići frekvencijsku nezavisnost odnosa deljenja za određeni opseg frekvencija. Ispitivanje kvaliteta delila vrše se određivanje odziva delila. Otpornička delila napona su najjednostavnija delila kod kojih se i visokonaponska (R_1) i niskonaponska grana (R_2) sastoje od čisto omskih otpora (uz zanemarljive parazitne

kapacitivnosti i induktivnosti).

Jedno od najvažnijih merenja koja se sprovode korišćenjem delila napona je snimanje udarnih napona. Kao merni uređaj se najčešće koristi osciloskop koji registruje talasni oblik udarnog napona. Da bi se izvršilo merenje udarnog napona, mora se osciloskop priključiti preko koaksijalnog kabla za niskonaponsku granu delila, kao što je prikazano na slici 14.3. Predpostavlja se da osciloskop ima beskonačno veliku ulaznu impedansu, mada realno ulazna otpornost osciloskopa je reda veličine $M\Omega$ i ulazna kapacitivnost reda desetak pF.



Slika 14.3: Merenje udarnog napona pomoću delila i osciloskopa priključenog preko koaksijalnog kabla

Oznake na slici 14.3 imaju sledeće značenje:

U_1 napon na visokonaponskom priključku delila,

U_2 napon na izlazu iz delila (napon na niskonaponskoj strani),

U_3 napon na kraju koaksijalnog kabla na ulazu u osciloskop,

R_1 otpornost visokonaponske grane delila,

R_2 otpornost niskonaponske grane delila,

K koaksijalni kabl za prenos niskonaponskog signala do osciloskopa,

Z_c karakteristična impedansa koaksijalnog kabla,

$R = Z_c$ završni otpornik na kraju koaksijalnog kabla povezan između centralne žile i plašta, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla,

OSC osciloskop koji služi kao instrumenat za registraciju napona.

Koaksijalni kabl ima centralnu žilu koja prenosi signal i metalni plašt postavljen preko izolacije centralne žile, koji služi kao povratni put za mereni signal, kao i za zaštitu centralne žile od elektromagnetnih uticaja. Centralna žila označena je crnom punom linijom, a plašt plavom isprekidanom linijom. Plašt koaksijalnog kabla je na jednoj strani povezan sa donjom tačkom delila koja nije uzemljena. Na drugoj strani plašt koaksijalnog kabla vezan je za kućište osciloskopa, koje je uzemljeno. Kod impulsnih ispitivanja je od izuzetne važnosti da se ili delilo veže za uzemljenje, ali onda osciloskop mora da bude neuzemljen, već se potencijal zemlje prenosi preko plašta koaksijalnog kabla, ili je osciloskop uzemljen, a donji kraj delila dobija potencijal preko plašta koaksijalnog kabla.

Završni otpornik ima ulogu da spreči refleksije talasa od ulaza u osciloskop, koji se može smatrati da ima beskonačno veliku ulaznu impedansu. Završni otpornik čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla ponaša se kao neograničeno dugačak vod koji se nastavlja na koaksijalni kabl, a u tački priključka se ne događaju refleksije zbog identičnih karakterističnih impedansi. Na taj način se postiže potpuno izbegavanje refleksije talasa od kraja kabla. Ulazna impedansa koaksijalnog kabla merena na mestu priključka kabla na delilo napona dobija se kao odnos napona i struja na tom mestu:

$$Z_{ul} = \frac{U_2}{I_k} \quad (14.1)$$

gde je I_k struja koja ulazi u koaksijalni kabl. Pošto se koaksijalni kabl zatvoren karakterističnom impedansom ponaša kao neograničeni vod, ulazna impedansa kabla jednaka je njegovoj karakterističnoj impedansi, odnosno:

$$Z_{ul} = Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (14.2)$$

gde je L_1 podužni induktivitet, a C_1 podužna kapacitivnost koaksijalnog kabla. Vreme prostiranja talasa kroz kabl je:

$$\Delta t = \frac{d}{v} \quad (14.3)$$

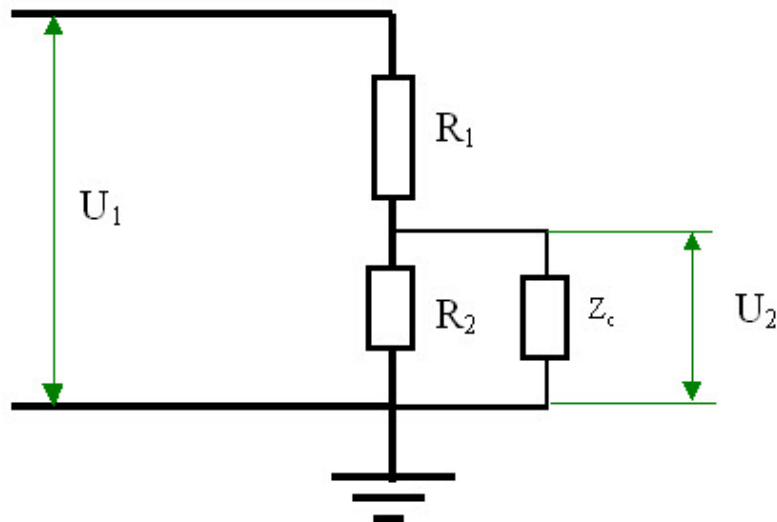
gde je d dužina kabla, a v brzina prostiranja, odnosno,

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (14.4)$$

Ulazna impedansa koaksijalnog kabla koji je završen omskim otpornikom otpornosti koja je jednaka karakterističnoj impedansi kabla može se ekvivalentirati koncentrisanim omskim otpornikom čija je vrednost jednaka karakterističnoj impedansi kabla, prema Petersenovom pravilu. Na slici 14.4 prikazana je šema sa ekvivalentnom otpornošću ni-skonaponske grane.

Odnos deljenja delila sa ekvivalentni otporom dat je izrazom:

$$m = \frac{R_1 + R_{2e}}{R_{2e}} \quad (14.5)$$



Slika 14.4: Zamenska šema ekvivalentnog delila kod koga je koaksijalni kabl zajedno sa završnim otpornikom zamenjen jednim skoncentrisanim omskim otporom

gde je:

$$R_{2e} = \frac{R_2 Z_c}{R_2 + Z_c} \quad (14.6)$$

R_{2e} je ekvivalentna otpornost paralelne veze niskonaponske grane delila i karakteristične impedanse koaksijalnog kabla (slika 14.4).

Kada se vrše merenja udarnog napona, ne smeju u mernom kolu postojati dva mesta uzemljenja. Ako se uzemlje i delilo napona i instrument, javila bi se dva povratna puta za struje, jedan kroz plašt kabla, a drugi kroz zemlju. Da bi se to izbeglo, uzemljuje se ili niskonaponska grana delila ili instrument kao na slici 14.3.

Teorijski gledano, otpornička delila napona bi trebalo da imaju idealne karakteristike, ali je te karakteristike teško postići kod delila za visoke napone zbog postojanja parazitnih uticaja, posebno parazitnih kapacitivnost prema zemlji ili okolnim objektima. Što su dimenzije delilaa veće, izraženije su parazitne kapacitivnosti. Drugi važan parazitni uticaj, koji takođe ima značajnu ulogu, a povećava se sa dimenzijama, je indukovanje elektromagnetnih smetnji usled prorade samog udarnog generatora, tako i usled drugih elektromagnetnih zračenja iz okoline.

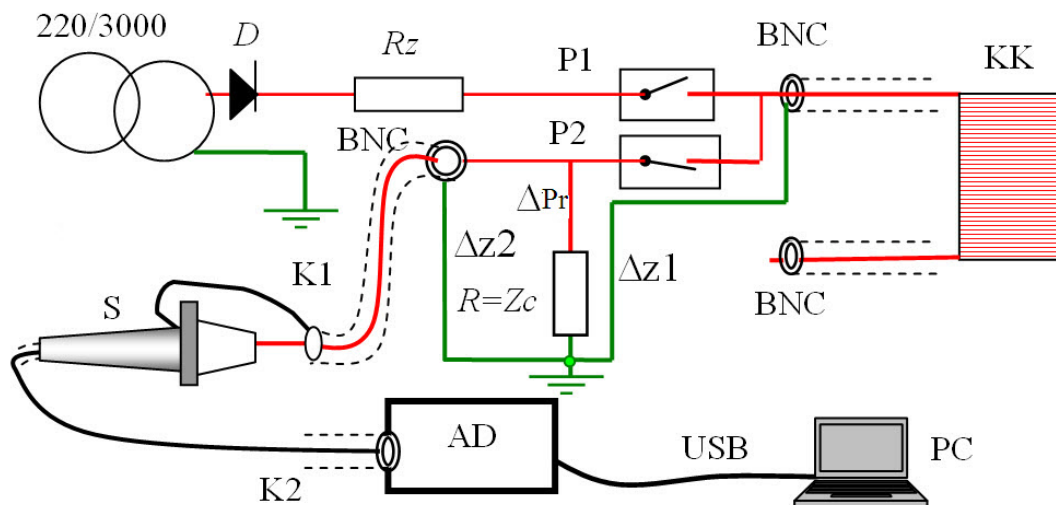
Omski otpornici se mogu napraviti da budu bezinduktivni, ali se parazitne kapacitivnosti ne mogu izbeći. Kvalitet delila se određuje odzivom delila na zadatu funkciju napona. Najpogodnije je određivati odziv delila na talas pravougaonog čela. U slučaju kada treba meriti veoma visoke napone, na primer reda veličine 1 MV, delilo napona treba da ima odnos deljenja takav da napon na niskonaponskoj strani bude prihvatljiv za merni instrument. U tom slučaju za testiranje delila treba koristiti visokonaponski pravougaoni

talas.

14.2 Visokonaponski generator pravougaonih talasa

Jedan od načina generisanja visokonaponskog pravougaonog talasa je da se dugačak koaksijalni kabl otvoren na jednom kraju napuni visokim jednosmernim naponom (kao kondenzator), a da se zatim isprazni kroz otpornik koji ima otpornost brojno jednaku karakterističnoj impedansi kabla, na kome se dobija pravougaoni talas kojim se testira delilo.

Ispitivanje generatora za proizvodnju pravougaonog impulsa pomoću dugačkog koaksijalnog kabla (u daljem tekstu step generator) izvršeno je prema šemi na slici 14.5. Prikazan je generator pravougaonih talasa napona oko $3 \times \sqrt{2}$ kV.



Slika 14.5: Šema za testiranje step generatora

Oznake na slici 14.5 imaju sledeće značenje:

230/3000 - transformator male snage odnosa preobražaja 220/3000 V,

D -dioda,

R_z -zaštitni otpornik koji treba da ograniči struju punjenja kabla. Izabran je otpornik reda veličine 100Ω koja omogućava brzo punjenje kabla. Može se raditi i bez zaštitnog otpornika bez posledica po kvalitet merenja.

P1 -prekidač sa minimalnim iskrenjem, koji prvi zatvara da bi napunio koaksijalni kabl KK naponom, kao kondenzator. Korišćeni su minijturni kontaktori u vakuumu.

KK -kotur koaksijalnog kabla, dužine oko 50 m. Što je duži kabl, veća je dužina dobijenog talasa,

K1 -koaksijalni kabl koji bi trebalo da bude što je moguće kraći, koji se nastavlja na visokonaponsku sondu. Ukoliko postoji mogućnost, najbolje bi bilo da je visokonaponska sonda vezana direktno na visokonaponski kraj otpornika R_z .

P2 -prekidač koji zatvara kada se otvori P1, da bi se praznio koaksijalni kabl kroz otpornik čija je vrednost brojno jednaka karakterističnoj impedansi kabla,

$R = Z_c$ -otpornik čija je vrednost jednaka karakterističnoj impedansi kabla, odnosno $R = 50 \Omega$.

$\Delta Z1$ -dužina veze između kraja plašta koaksijalnog kabla na koturu i priključka otpornika $R = Z_c$, koji se uzemljuje,

$\Delta Z2$ -dužina veze između početka plašta koaksijalnog kabla koji vodi do merne sonde i priključka otpornika $R = Z_c$, koji se uzemljuje.

ΔPr -dužina provodnika od izlaza prekidača P2 do otpornika $R = Z_c$. Dužina $\Delta Z1$, $\Delta Z2$, kao i ΔPr treba da budu što je moguće kraće da bi se smanjila induktivnost petlje koju čini provodnic $\Delta Z1$, $\Delta Z2$ i provodnik ΔPr .

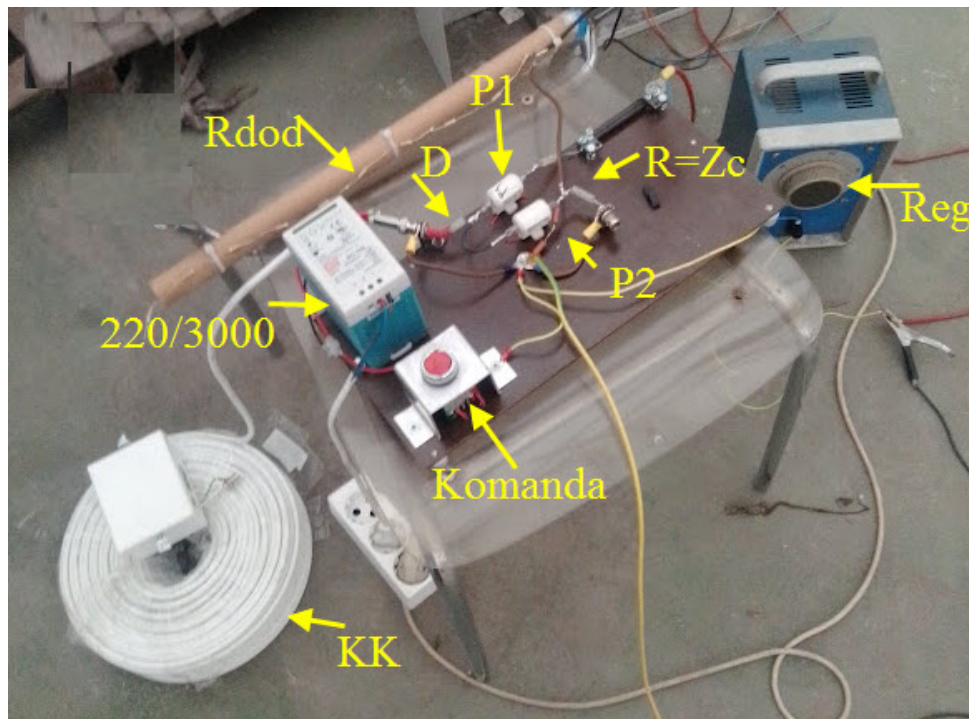
BNC - konektori za koaksijalne kablove,

S - visokonaponska sonda Tektronix P6015A sa frekvencijskim opsegom merenja od DC do 75 MHz, maksimalni napon do 15 kV DC, impulsni napon do 40 kV sa trajanjem impulsa 100 ms, odnosa deljenja 1000:1.

A/D - PC osciloskop kartica (A/D konvertor) sa BNC ulazom i USB izlazom za PC,

PC - laptop koji treba da bude za vreme udarnih ispitivanja odvojen od mrežnog napajanja.

Fotografija priručnog step generatora data je na slici 14.6.



Slika 14.6: Fotografija priručnog step generatora

Oznake koje nisu date na šemi, a date su na fotografiji imaju značenje:

Reg -regulacioni transformator od 0 do 230 V,

Rdod -niz otpornika od po 100Ω koji služe da spreče višestruke refleksije na provodniku između step generatora i delila. U slučaju testiranja step generatora otpornik je premošćen,

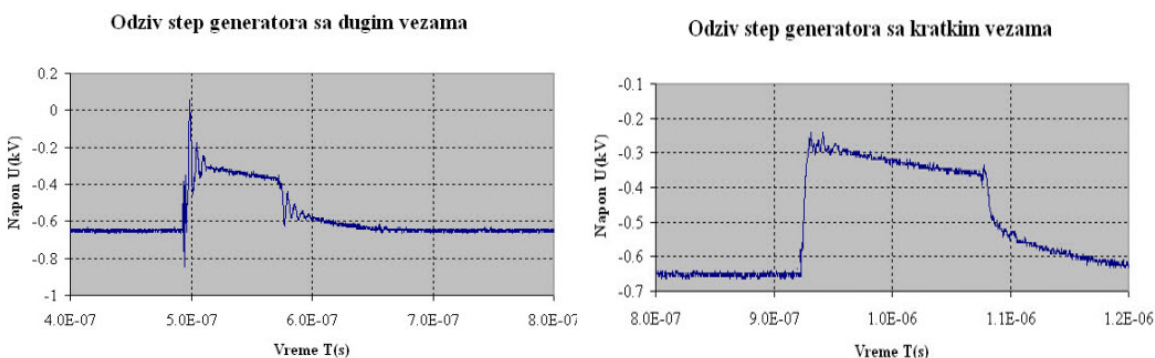
Komanda -komandna sklopka koja ima dva para kontakata. Radni kontakt uključuje magnet sklopke P1 za punjenje koaksijalnog kabla, a prestanak pritiska na dugme isključuje P1 i uključuje P2 za pražnjenje koaksijalnog kabla preko otpornika $R=Z_c$.

Odziv bi bio najbliži pravougaonom talasu kada bi se sonda direktno priključila na otpornik R_z , ili još bolje, kada bi napon mogao da se meri direktno na otporniku, što je u uslovima raspoloživih instrumenata bilo nemoguće.

14.3 Rezultati testiranja step generatora

Testiranje bez priključenog delila

Izvršeno je testiranje step generatora sa dužim vezama (levo) koje su naknadno skraćene od plašta koaksijalnog kabla do uzemljenja $\Delta Z1$ i od prekidača P2 do otpornika $R = Z_c$ obeležen kao ΔPr (desno). Step generator nije bio vezan za delilo napona. Rezultat testiranja prikazan je na slici 14.7.



Slika 14.7: Grafik napona koji daje step generator

Da bi se prigušile oscilacija usled induktivnosti veza sve provodnike za vezivanje elemenata treba skratiti na minimalne vrednosti, dužina reda veličine 2 do 3 cm.

Testiranja step generatora sa priključenim delilom

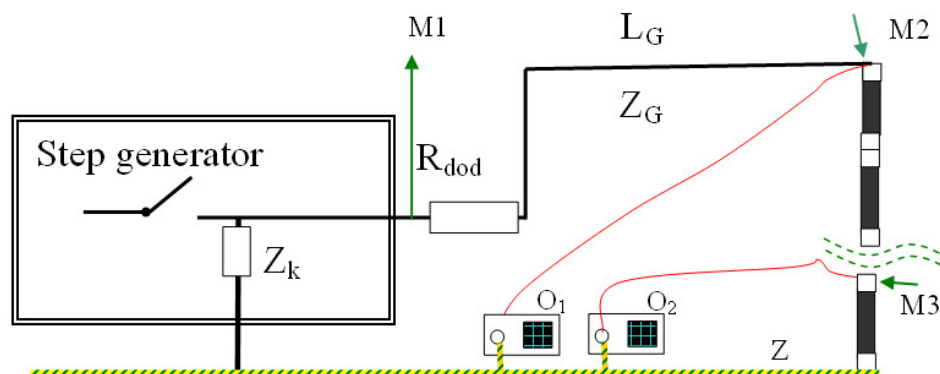
Izvršeno je testiranje step generatora koji je vezan običnim provodnikom postavljenim na visini od oko 8 m do delila napona. Da bi se sprečile višestruke refleksije talasa na provodniku između step generatora i delila, odmah iza step generatora, a ispred provodnika za vezu sa delilom, postavljen je niz dodatnih otpornika radi utvrđivanja optimalne vrednosti otpornosti za prigušenje višestrukih refleksija. Napravljen je niz od 10 otpornika od po 100Ω koji čine R_{dod} i ispitivani su talasni oblici napona u mernim tačkama M1 na izlazu iz step-generatora, M2 na vrhu delila i M3 na niskonaponskoj strani, za različite vrednosti R_{dod} premošćavanjem nepotrebnih otpornika.

Merna mesta imaju sledeće značenje:

M1 -tačka neposredno iza prekidača koji uključuje rasterećenje step generatora,

M2 -tačka na vrhu delila,

M3 - tačka na niskonaponskoj grani delila (otpornik R2),



Slika 14.8: Šema veza step generatora i delila napona sa oznakama mernih mesta

Z_k - otpornik koji ima vrednost karakteristične impedanse koaksijalnog kabla za generisanje pravougaonog talasa,

Z_G - karakteristična impedansa provodnika koji spaja step-generator sa vrhom delila napona,

L_G - dužina provodnika koji spaja step-generator sa vrhom delila napona, koji iznosi oko 10 m,

R_{dod} - otpornik za sprečavanje refleksija,

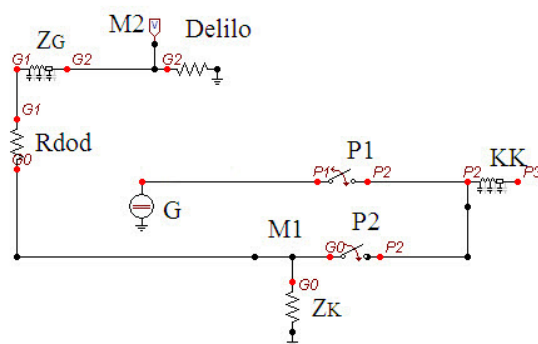
O_1, O_2 - osciloskopi br. 1 i 2 za snimanje napona u tačkama M2 i M3,

Z - zemljovod koji spaja tačku uzemljenja delila i tačku uzemljenja otpornika Z_k .

Mora se naglasiti da se snimanje napona mora raditi sa dva odvojena oscilskopa. U slučaju kada bi snimali sa dvokanalnim osciloskopom, kod snimanja visokofrekvencijskih pojava javljale bi se cirkularne struje kroz provodnike za uzemljenje i preko plašteva koaksijalnih kablova i koaksijalnih konektora kroz masu osciloskopa, što bi izazivlo dodatne smetnje u signalima. U slučaju kada step generator proizvodi impuls uvek identične amplitude, može se koristiti jedan osciloskop čiji se priključak premešta, a vertikalno pojačanje prilagođava visini napona.

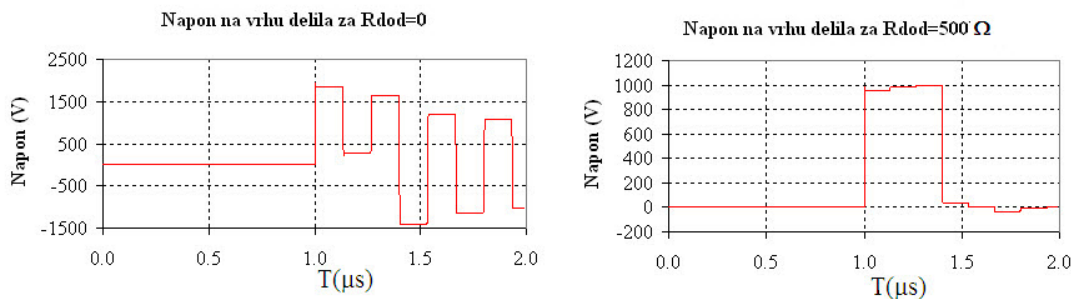
14.3.1 Numerička simulacija testiranja

Formirana je šema u programu ATPDraw za simulaciju napona na vrhu delila prilikom rasterećenja step generatora. Šema je prikazana na slici 14.9. Proračuni su rađeni za vrednosti otpornosti $R_{dod} = 0$ i $R_{dod} = 500 \Omega$. Oznake imaju isto značenje kao na slici 14.5 i 14.8 koje prikazuju kompletnu šemu step generatora i šemu veza sa delilom.



Slika 14.9: Zamenska šema u ATPDraw za testiranje uticaja otpornika za sprečavanje refleksije talas

Na slici 14.10 prikazani su prelazni naponi u tački M1 na vrhu delila kada je $R_{dod} = 0 \Omega$ (levo) i kada je $R_{dod} = 500 \Omega$ (desno). Može se uočiti da kada je otpornik

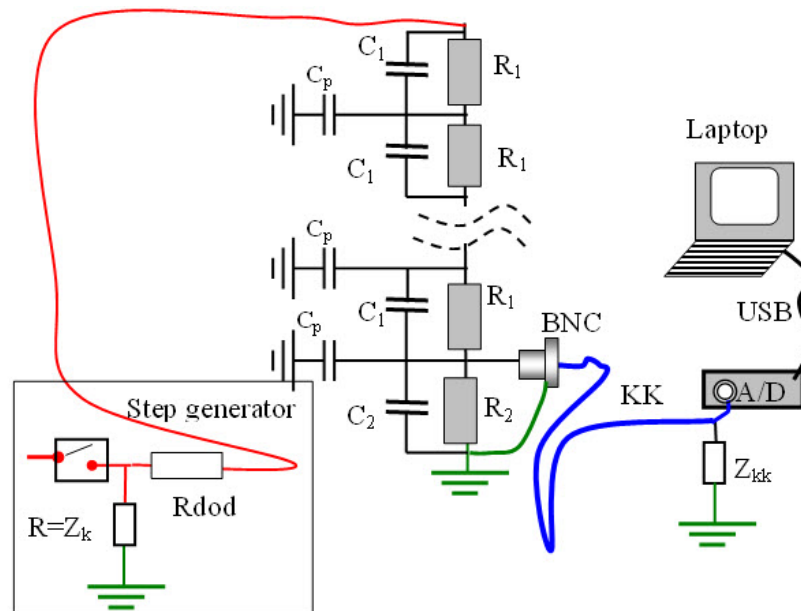


Slika 14.10: Izračunat naponi u tački M2 na vrhu delika kada je $R_{dod} = 0 \Omega$ (levo) i kada je $R_{dod} = 500 \Omega$ (desno)

$R_{dod} = 0 \Omega$ nastaju veoma izražene oscilacije napona na vrhu delila. U realnosti se oštri uglovi pravougaonih talasa prigušuju i naponski talasi dobijaju zaobljen oblik, što je posledica skin efekta, koji nije uključen u program. Naprotiv, kada je $R_{dod} = 500 \Omega$ oscilacije potpuno nestaju i dobija se skoro idealan pravougaoni talas amplitude koja je jednaka amplitudi napona punjenja generatora. Ovako idealni rezultati su dobijeni jer je pretpostavljeno da karakteristična impedansa provodnika u vazduhu od step-generatora do delila ima vrednost $Z_G = 500 \Omega$. U realnosti karakteristična impedansa provodnika može da se menja duž provodnika usled usponskog dela provodnika koji se podiže do visine od oko 8 m, na kojoj se vodi do delila.

14.4 Detaljno modelovanje delila napona

Omsko delilo napona zbog svojih parazitnih kapacitivnosti prema zemlji i rednih kapacitivnosti između priključaka otpornika ima složenu ekvivalentnu šemu. Na slici 14.11 prikazana je šema za određivanje odziva delila kada je uzeta u obzir složena struktura ekvivalentne šeme.



Slika 14.11: Šema za određivanje odziva delila kada se uzimaju u obzir parazitne kapacitivnosti prema zemlji i redne kapacitivnosti između priključaka otpornika

Oznake na slici imaju sledeće značenje

C_1 -kapacitivnost jednog kondenzatora visokonaponske grane delila,

R_1 -otpornost jednog otpornika visokonaponske grane delila,

C_p -parazitna kapacitivnost jednog otpornika visokonaponske grane delila prema zemlji i okolnim objektima, koja se menja sa visinom postavljanja otpornika,

R_2 -otpornost niskonaponske grane delila,

C_2 -kapacitivnost niskonaponske grane delila,

BNC -priključak koaksijalnog kabla za mereje napona na niskonaponskoj grani delila otpornosti R_2 ,

Z_k -završni otpornik koaksijalnog kabla za generisaje pravougaonog talasa, koji služi za sprečavanje refleksija, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi kabla za generisanje pravougaonog talasa.

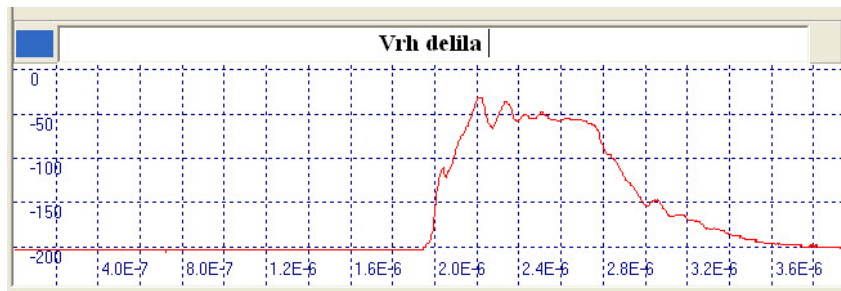
Z_{kk} -završni otpornik mernog koaksijalnog kabla KK prema osiloskopu, za sprečavanje refleksija od kraja kabla, čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi mernog kabla KK.

Ostale oznake su ranije objašnjene.

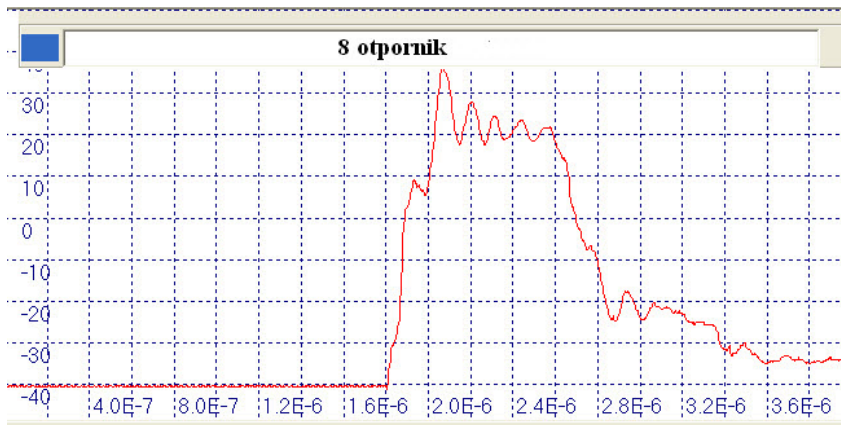
Odziv meren duž omskog delila

Izvršeno je merenje odziva delila direktno pomoću sonde 1:10 od vrha delila, na 8. etaži, 4. etaži i na 1. etaži (niskonaponska grana). Ustanovljeno je da se na niskonaponskoj grani dobijaju neodgovarajući odzivi, a oblik odziva se kvario sa približavanjem niskonaponskoj grani.

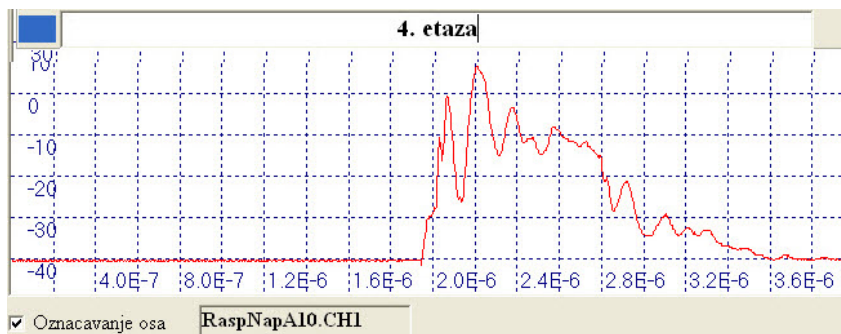
Može se uočiti da se pojavljuju dodatne oscilacije približavanjem niskonaponskoj grani delila. Ustanovljeno je da se oscilacije mogu značajno smanjiti skraćivanjem veza za uzemljenje i za merenje. Što se merenje napona vrši bliže niskonaponskoj grani, oscilacije u odzivu delila postaju izraženije. To se tumači postojanjem parazitnih kapaciteta prema zemlji, koji remete zahtevanu linearnu raspodelu napona po otpornicima od vrha delila do zemlje.



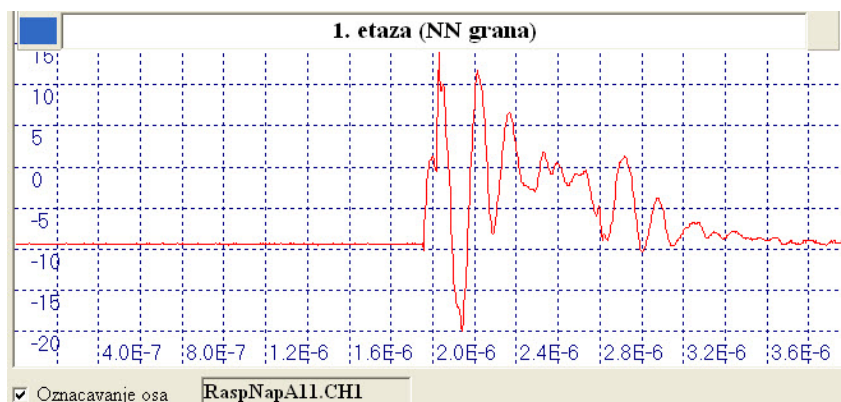
Slika 14.12: Ulazni napon na vrhu delila



Slika 14.13: Odziv na 8. etaži delila



Slika 14.14: Odziv na četvoro etaži delila

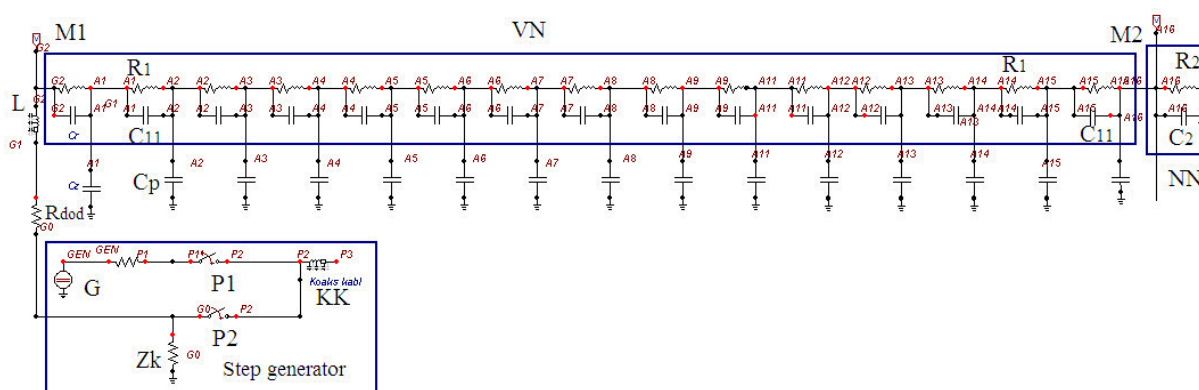


Slika 14.15: Odziv na NN grani delila delila

14.5 Numeričko određivanje odziva delila

Numeričko određivanje odziva delila na step funkciju urađeno je programom **EMTP-atp** (Electromagnetic transient program-alternative transient program), koji zajedno sa programom koji čini korisničko grafički interfejs ATPDraw čini jednu celinu.

Ekvivalentna šema delila odnosa deljenja 1:16 u okruženju programa ATPDraw prikazana je na slici 14.16.



Slika 14.16: Ekvivalentna šema delila odnosa deljenja 1:16 u okruženju programa ATPDraw

Na slici oznake imaju sledeće značenje:

R_1 - otpornost pojedinačnih otpornika otporničkog delila $R_1 = 4000 \Omega$, ukupan broj otpornika je 16.

C_{11} -redna kapacitivnost otpornika, usvojena vrednost je $C_{11} = 10^{-12} F$,

C_p -parazitna kapacitivnost prema zemlji otpornika. Ova kapacitivnost se varira.

G - Generator jednosmernog napona,

M_1 - Merna tačka na vrhu delila,

M_2 - Mesto priključka merne sonde,

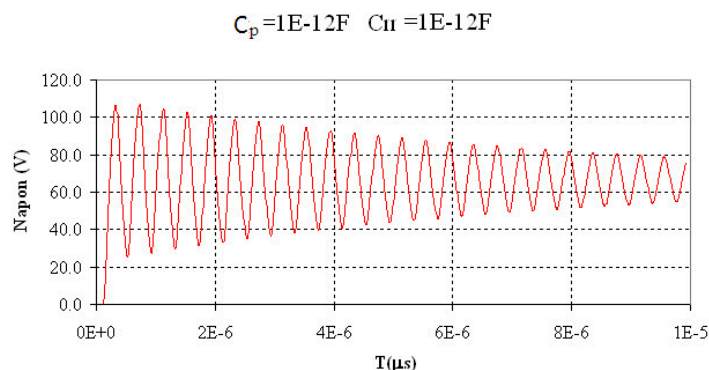
L - provodnik za vezu step generatora i delila dugačak 20 m,

VN - visokonaponka grana delila,

NN - Niskonaponka grana delila.

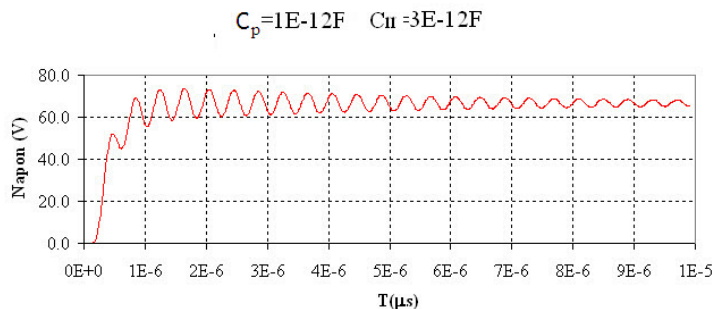
Izvršeno je variranje parazitne kapacitivnosti prema zemlji C_p u cilju ispitivanja osetljivosti na ovaj parametar zadržavajući parazitnu kapacitivnost otpornika fiksnom tako da ima vrednost $C_{11} = 1 \text{ pF}$.

Ma slici 14.17 prikazana je odziv otpornog delila napona za 1600 kV na pravougaoni napon od 1000 V, kada je parazitni kapacitet $C_p = 10^{-12}$ F.



Slika 14.17: Odziv delika kada je $C_p = 10^{-12}$

Ma slici 14.18 prikazana je odziv otpornog delila napona za 1600 kV na pravougaoni napon od 1000 V, kada je parazitni kapacitet $C_{11} = 3 \times 10^{-12}$ F.



Slika 14.18: Odziv delika kada je $C_{11} = 3 \times 10^{-12}$

Može se uočiti da povećanje redne kapacitivnosti smanjuje oscilacije odziva delila

14.6 Mešovito delilo napona paralelnog tipa

Da bi se kompenzovale parazitne kapacitivnosti otpornika prema zemlji, postavljaju se kondenzatori paralelni otpornicima, koji svojim kapacitetom dominiraju i određuju linearnu raspodelu napona od vrha delila do zemlje.

Osnovni uslov koji mora da ispunjava mešovito delilo:

$$R_1 \times C_1 = R_2 \times C_2 \quad (14.7)$$

gde je:

R_1 -ekvivalentna otpornost svih redno vezanih otpornika u visoknaponskoj grani delila,

C_1 -ekvivalentna kapacitivnost svih redno vezanih kondenzatora, koji su paralelni otpornicima u visoknaponskoj grani delila,

R_2 -ekvivalentna otpornost svih otpornika u niženaponskoj grani delila,

C_2 -ekvivalentna kapacitivnost svih kondenzatora niženaponskoj grani, koji su paralelni otpornicima R_2 .

Korišćeni su specijalni bezinduktivni kondenzatori paralelno sa svakim otpornikom. Na slici 14.19 prikazana je fotografija bezinduktivnog keramičkog kondenzatora.



Slika 14.19: Fotografija bezinduktivnog keramičkog kondenzatora

Napravljena je konstrukcija mešovitog delila paralelnog tipa sa 16 etaža, svaka za po 100 kV, sa visokonaponske strane. Na svakoj etaži su vezana na red 2 kondenzatora, svaki za 50 kV, kapaciteta 4800 pF, a paralelno jedan otpornik od 4000 Ω koji može da podnese kratkotrajno 100 kV.

Ukupan broj sekcija je 16. Najniža, 16. sekcija je uzemljena. Sve sekcije su identičnog oblika. U ovom slučaju, ako je ukupan mereni napon 1600 kV, što je teorijski maksimum, odnos deljenja bi bio 1:16, odnosno napon na niženaponskoj grani delila bi bio 100 kV.

Na fotografiji 14.20 prikazana je fotografija dela RC delila.

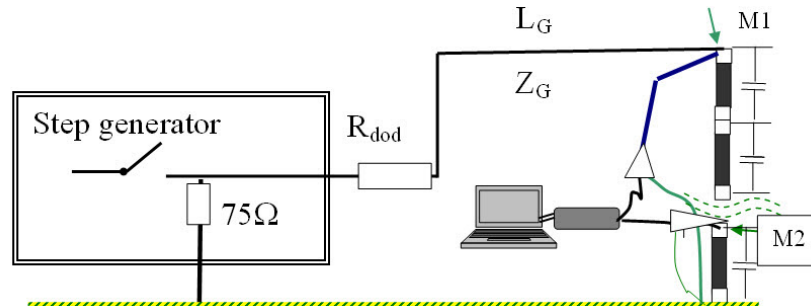
Šuplji izolatori od silikonske gume povezuju kondenzatore, ali sprečavaju preskok po površini kondenzatora između priključnih krajeva, koji se nalaze unutar šupljine izolatora.

Eksperimentalna određivanje dodatnog otpornika

Izvršena su merenja napona na vrhu delila kada je vrednost otpornika iza step generatora, a ispred provodnika za vezu sa delilom, menjana od $R_{dod} = 100$ do $R_{dod} = 500 \Omega$, prema slici 14.21.

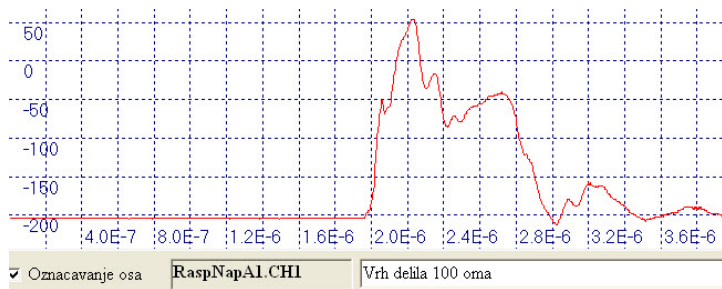
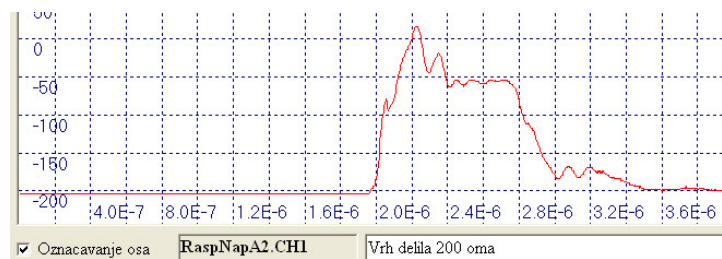
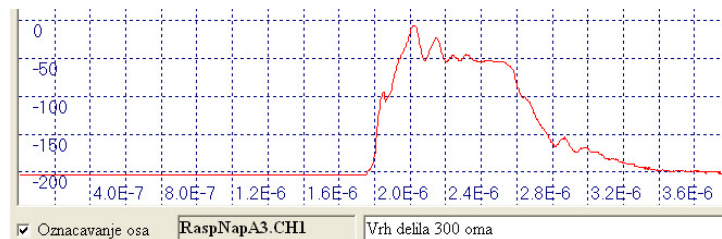
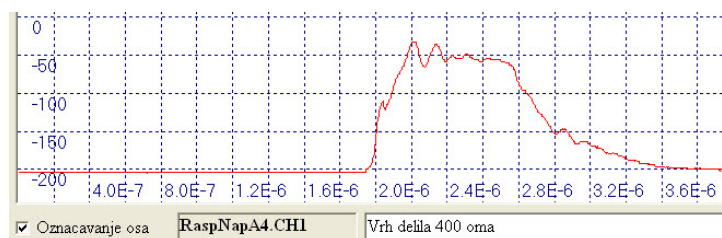
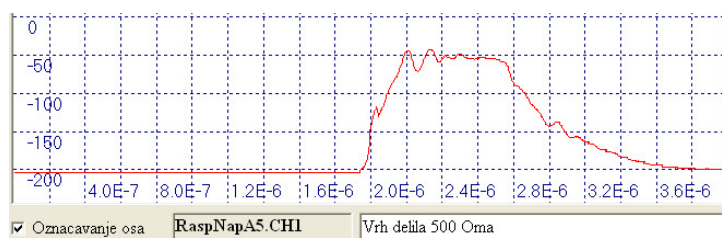


Slika 14.20: Fotografija donjeg dela visokonaponske grane i niskonaponska grana paralelnog mešovitog delila



Slika 14.21: Zamenska šema testiranja mešovitog delila

Na slikama 14.22, 14.23, 14.24, 14.25 i 14.26 prikazani su talasni oblici izmereni na vrhu delila kada je varirana otpornost dodatnog otpornika za prilagođeje talasnoj impedansi provodnika za vezu step-generatora i delila R_{dod} u opsegu od 100Ω do 500Ω .

Slika 14.22: Napon na vrhu delila za $R_{dod} = 100 \Omega$ Slika 14.23: Napon na vrhu delila za $R_{dod} = 200 \Omega$ Slika 14.24: Napon na vrhu delila za $R_{dod} = 300 \Omega$ Slika 14.25: Napon na vrhu delila za $R_{dod} = 400 \Omega$ Slika 14.26: Napon na vrhu delila za $R_{dod} = 500 \Omega$

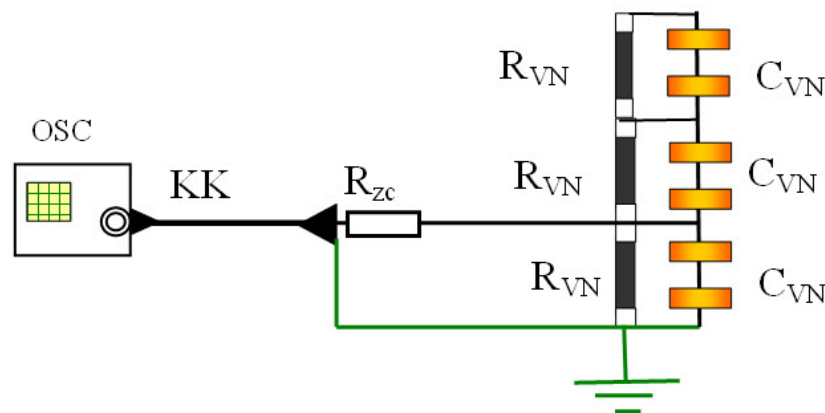
Odabrana je vrednost $R_{dod} = 500 \Omega$ kao optimalna. Trajanje čela na prednjoj strani talasa sa velikom strminom je 67 nS, stim što kasnije čelo postaje usporeno zbog kapacitivnog delovanja delila.

Mogu se uočiti značajne oscilacije kada je dodatni otpornik $R_{dod} = 100 \Omega$, koje se gotovo u potpunosti prigušuju kada je $R_{dod} = 500 \Omega$.

Mora se naglasiti da na odziv sistema za proizvodnju pravougaonog talasa na vrhu delila uopšte ne utiče niženaponska grana delila.

Ispitivanje odziva delila na niženaponskoj strani

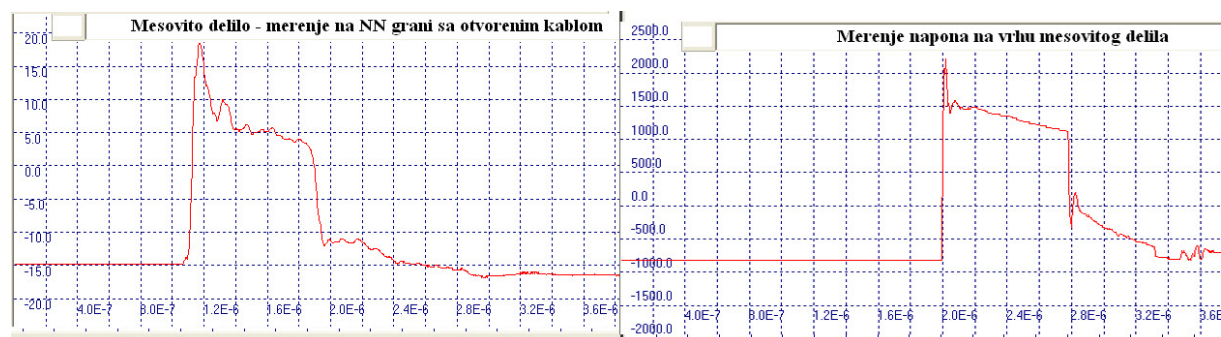
Ispitan slučaj kada je niskonaponska grana delila identična sa jednom od 16 visokonaponskih grana, sa bezinduktivnim kondenzatorima, kao na joptimalnija varijanta delila. Signal sa niskonaponske grane, preko prigušnog otpornika R_{zc} vodi se do osciloskopa preko kaksijalnog kabla, bez završne impedanse na kraju. Otpornik R_{zc} ima otpornost koja je jednaka karakterističnoj impedansi kabla.



Slika 14.27: Mešovito delilo napona sa niskonaponskom granom identičnom visokonaponskoj grani i rednim prilagodnim otpornikom

Odziv delila na niskom naponu je prikazan je na slici 14.28 sa leve strane. Sa desne strane je prikazan ulazni napon na visokonaponskoj strani delila.

Izmereni odziv ima jako previšenje na početku talasa, ali i originalni signal na vrhu delila ima takođe previšenje. Redno vezani otpornik R_{zc} jednak je karakteritičnoj impedansi kabla. U slučaju visokofrekvencijskih signala, kao što su atmosferski udarni naponi, kada se visokofrekvencijski signal reflektuje od kraja kabla, vraća se prema otporniku R_{zc} koji se ponaša kao da je na strani delila uzemljen, jer se kondenzator velikog kapaciteta C_{VN} u niskonaponskoj grani delila ponaša kao kratak spoj pri vrlo visokim frekvencijama



Slika 14.28: Odziv delila merenog na niskom naponu preko dugačkog kabla koji je na drugom kraju bez završne impedanse (levo), i napon na vrhu delila (desno)

koje odgovaraju čelu talasa. Ovaj efekat je moguć samo za koaksijalne kablove relativno male dužine. Registrovano trajanje čela talasa na vrhu delila nije bilo moguće izmeriti, pa je usvojeno $T_v = 0 s$, a trajanje čela izmerenog na niskonaponskoj grani je $T_{NN} = 33.8 ns$.

Problem ovakve konstrukcije delila je što napon nije dovoljno umanjen. Odnos deljenja ovoga delila je 1:16, što bi značilo da za ulazni signal od 1600 kV izlazni signal bi bio oko 100 kV.

Modifikacije niskonaponske grane delila

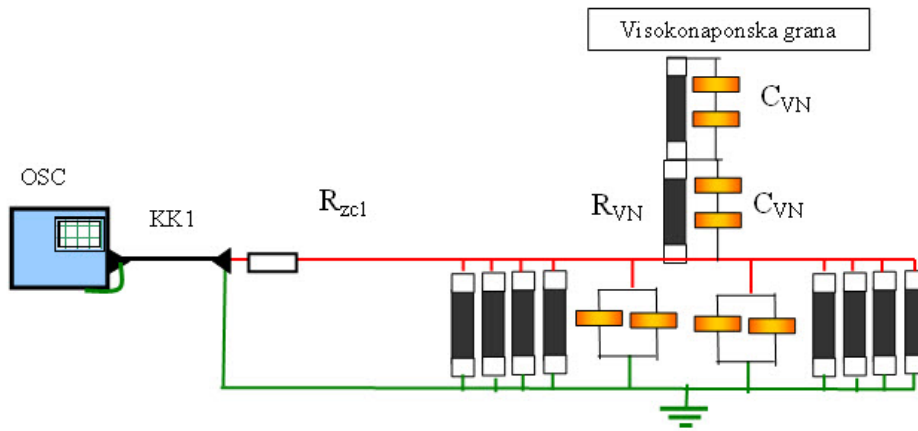
Da bi se postiglo dovoljno umanjenje napona, potrebno je napraviti dodatne modifikacije delila. Na visokonaponskoj strani se skidaju dva stepena, tako da se visokonaponska grana sastoji od 14 stepeni, jer nije bilo dovoljno kondenzatora na raspolaganju. Kondenzatori sa uklonjenjem grane se postavljaju na niskonaponsku granu paralelno tako da ima ukupno 4 kondenzatora od 4800 pF, što čini ukupno 19200 pF. Na niskonaponsku granu se postavlja 8 identičnih otpornika od $R_{VN} = 4000 \Omega$, što čini ekvivalentni otpornik $R_2 = 500 \Omega$. Na slici 14.29 prikazano je modifikovano delilo.

U tabeli 14.1 data je specifikacija delova i odnos deljenja.

Tabela 14.1: Određivanje odnosa deljenja delila posle modifikacije

Naziv	Oznaka	C(pF)	R(Ω)
Broj rednih elemenata u VN grani	N_{VN}	28	14
Ekvivalentna vrednost VN grane	C_{VNekv} R_{VNekv}	171.4286	56000
Broj paralelnih elemenata u NN grani	N_{NN}	4	8
Ekvivalentna vrednost NN grane	C_{NN} R_{NN}	19200	500
Odnos deljenja delila prema C i R	m_{1c} m_{1r}	113	113

Izračunavanje vrednosti ekvivalentnih parametara visokonaponske i niskonaponske



Slika 14.29: Modifikovana niskonaponska grana delila

grane dato je izrazima:

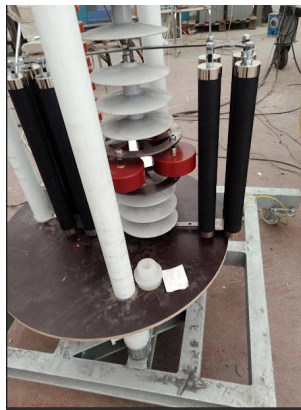
$$C_{VNekv} = \frac{C_{VN}}{N_{VN}} \quad (14.8)$$

$$R_{VNekv} = R_{VN} \cdot N_{VN} \quad (14.9)$$

$$C_{NNekv} = C_{VN} \cdot N_{VN} \quad (14.10)$$

$$R_{NNekv} = \frac{R_{VN}}{N_{NN}} \quad (14.11)$$

Na slici 14.30 prikazana je fotografija modifikovane niskonaponske grane delila.



Slika 14.30: Fotografija modifikovane grane delila

14.7 Uvođenje sekundarnog delila napona

Opisana konstrukcija mešovitog delila koja bi pri teorijski dobijenom maksimalnom udarnom naponu udarnog generatora od 1600 kV na niskonaponskoj grani dobio napon od 100 kV, što je neprihvatljivo za bilo koji merni instrument. Zbog toga su tražena različita rešenja i kao najprihvatljivije je izrada sekundarnog delila neposredno uz niskonaponsku granu ranije opisanog mešovitog delila, koje ćemo zvati primarno delilo. Na sekundarnom delilu postavljeni su u visokonaponsku granu kondenzatori, tako da ih ima ukupno 12 od 500 pF, a u niskonaponsku granu u paralelu je postavljeno 3 kondenzatora od 2000 pF i 7 od 1000 pF. U tabeli 14.2 data je specifikacija delova i odnos deljenja.

Tabela 14.2: Elementi sekundarnog delila napona i odnos deljenja

Naziv	Oznaka	Vrednost
Vrednost jediničnog kondenzatora VN grane	C_p (pF)	500
Broj rednih elemenata u VN grani	N_{1vn}	12
Ekvivalentni kapacitet VN grane	C_{1p} (pF)	41.7
Vrednost jediničnog kondenzatoratipa 1 u NN grani	C_{2n1} (pF)	2000
Broj paralelnih kondenzatora tipa 1 u NN grani	N_{2n1}	3
Vrednost jediničnog kondenzatoratipa 2 u NN grani	C_{2n2} (pF)	1000
Broj paralelnih kondenzatora tipa 2 u NN grani	N_{2n2}	7
Ekvivalentni kapacitet NN grane C_{2s}	$N_{2n1}C_{2n1} + N_{2n2}C_{2n2}$	13000
Odnos deljenja NN grane	m_2	313

Ukupna ekvivalentna kapacitivnost sekundarnog delila koja je priključena paralelno niskonaponskoj grani primarnog delila je:

$$C_{pekv} = \frac{C_{1p} \cdot (N_{2n1} \cdot C_{2n1} + N_{2n2} \cdot C_{2n2})}{C_{1p} + N_{2n1} \cdot C_{2n1} + N_{2n2} \cdot C_{2n2}} \quad (14.12)$$

Kada se izračuna, dobija se:

$$C_{pekv} = 41.5 \text{ pF} \quad (14.13)$$

Da bi sistem delila funkcionisao, neophodno je da bude ispunjen uslov da vremenska konstanta visokonaponske grane primarnog delila i vremenska konstanta niskonaponske grane primarnog delila zajedno sa ekvivalentnom kapacitivnošću sekundarnog delila budu usklađene, prema izrazu 14.7. U slučaju kada ne bi bilo sekundarnog delila, odnos vremenskih konstanti bi bio dat izrazom 14.14:

$$T_{RC} = C_{VNekv} \times R_{VNekv} = C_{NN} \times R_{NN} \quad (14.14)$$

gde je T_{RC} vremenska konstanta visokonaponske grane primarnog delila koja je jednaka vremenskoj konstanti niskonaponske grane primarnog delila.

U slučaju sistema dva delila, vremenska konstanta niskonaponske grane sistema data je izrazom 14.15:

$$T_{RCekv} = (C_{NN} + C_{pekv}) \times R_{NN} \quad (14.15)$$

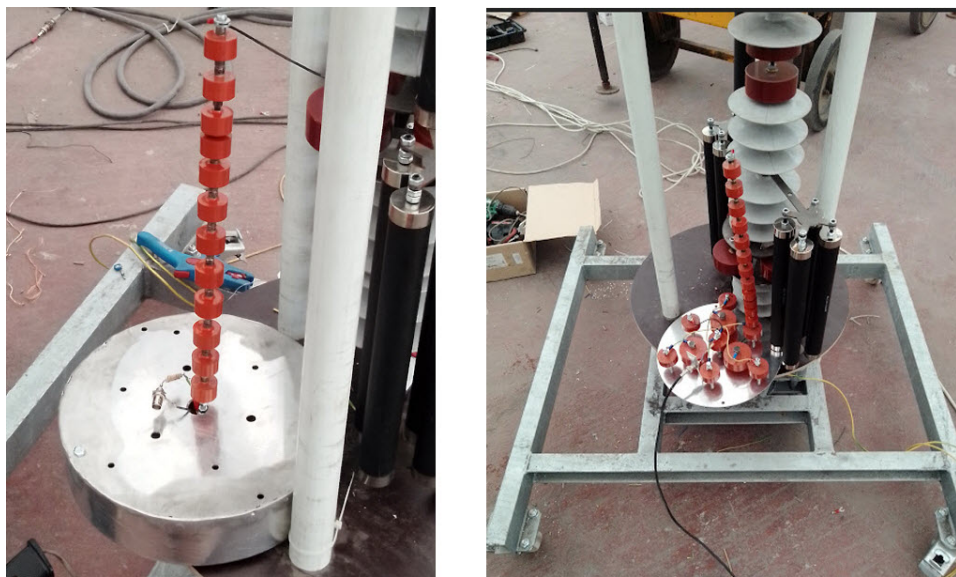
U tabeli 14.3 prikazane su vremenske konstante primarnog delila T_{RC} kada ne bilo sekundarnog delila izražene u sekundama (s), kao i vremenska konstanta ekvivalentne niskonaponske grane uvažavajući kapacitivnost sekundarnog delila T_{RCekv} i njihova procentualna razlika.

Tabela 14.3: Procena greške u vremenskim konstantama usled primene sekundarnog delila

T_{RC} (s)	T_{RCekv} (s)	ΔT (%)
9.6000E-03	9.6208E-03	2.17E-01

Razlika od 0.217% je dovoljno mala da se može smatrati da ne utiče bitno na tačnost merenja. Korišćene komponente su sa velikom tolerancijom, a postoji još značajnih efekata koji smanjuju tačnost merenja, kao na primer efekat priključenog koaksijalno kabla na kapacitivno delilo.

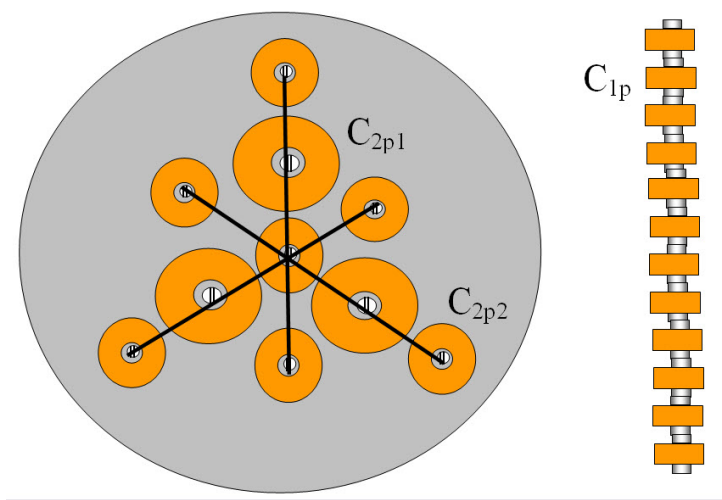
Na slici 14.31 prikazana je fotografija sa otvorenom niskonaponskom granom sa prikazanim rasporedom kondenzatora na donjoj ploči (desno), a levo je višenaponska grana i niskonaponska grana sekundarnog delila u oklopu.



Slika 14.31: Fotografija sekundarnog delila

visokonaponska grana vezana asimetrično, u konačnom izvođenju visokonaponska grana je u centru, kao na slici desno.

Na slici 14.32 prikazana je skica niskonaponske grane sekundarnih delila sa rasporedom kondenzatora na donjoj ploči (levo), a desno je višenaponska grana sekundarnog delila.



Slika 14.32: Skica sa rasporedom kondenzatora na niženaponskoj strani (levo) i višenaponskoj strani sekundarnog delila (desno)

Na slici 14.32 oznake imaju sledeće značenje:

C_{2p1} -kondenzatorati u NN grani sekundarnog delila, svaki vrednosti 2000 pF

C_{2p2} -kondenzatorati u NN grani sekundarnog delila, svaki vrednosti 1000 pF

C_{1p} -kondenzatorati u VN grani sekundarnog delila, svaki vrednosti 500 pF

U tabeli 14.4 prikazan je teorijski izračunat odnos deljenja sistema primarnog i sekundarnog delila i visina napona, ako je ulazni napon amplitude 1600 kV.

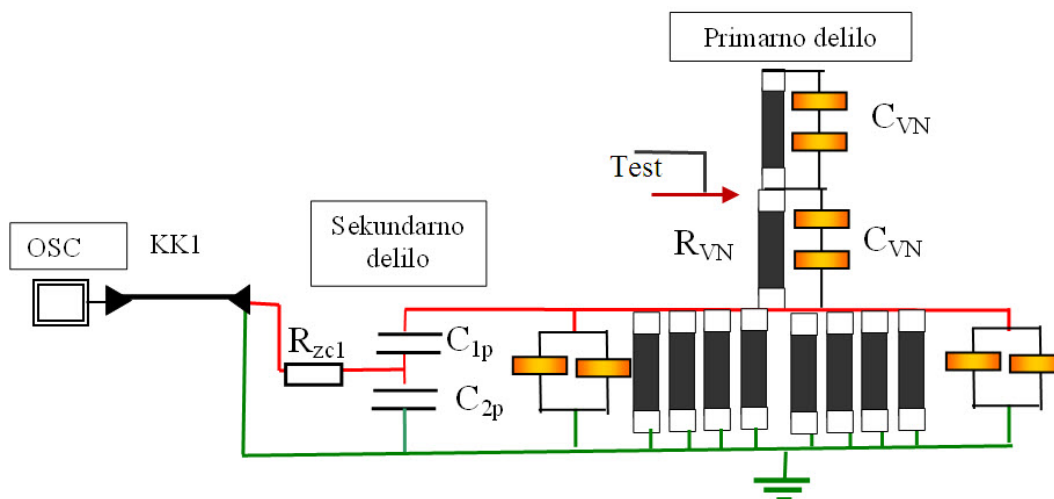
Tabela 14.4: Teorijski odnos deljenja sistema primarnog i sekundarnog delila i visina izlaznog napona

Ukupan odnos deljenja $m_1 \cdot m_2$ (rj)	35369
Ulazni napon $U_1(kV)$	1600
Izlazni napon koji se meri $U_2(V)$	45.23

Realno, udarni generator ne sme da radi u režimu u kojem bi davao napon viši od 1000 kV. U tom slučaju dovoljan je broj kondenzatora $N_{1vn} = 7$, da bi maksimalni napon na ulazu u osciloskop bio 48.4 V.

Povezivanje sekundarnog delila sa osciloskopom

Na slici 14.33 prikazan je sistem koji se sastoji od dela primarnog delila, sekundarnog delila, prigušnog otpornika R_{zc1} , koaksijalnog kabla KK1 i osciloskopa. Kada bi se dovodio pravougaoni talas napona 2 kV na vrh primarnog delila, napon na izlazu iz sekundarnog delila bi bio previše nizak. Stoga se napon dovodi na 2. stepen primarnog delila, a sa 1. stepena se napaja sekundarno delilo. Na taj način se dobija napon koji je manji od ulaznog napona $1/8 \times 1/313 = 1/2504 = 0.0003994$. Ukoliko bi testni napon bio 2000 V, mereni napon bi bio $0.7987 \approx 0.8$ V.



Slika 14.33: Sistem od donjeg dela primarnog delila i sekundarnog delila sa koaksijalnim kablom i mernim instrumentom

14.8 Numeričko ispitivaje uticaja koaksijalnog kabla

Formirana je šema u EMTP-atp programu sa sa sistemom primarnog i sekundarnog delila.

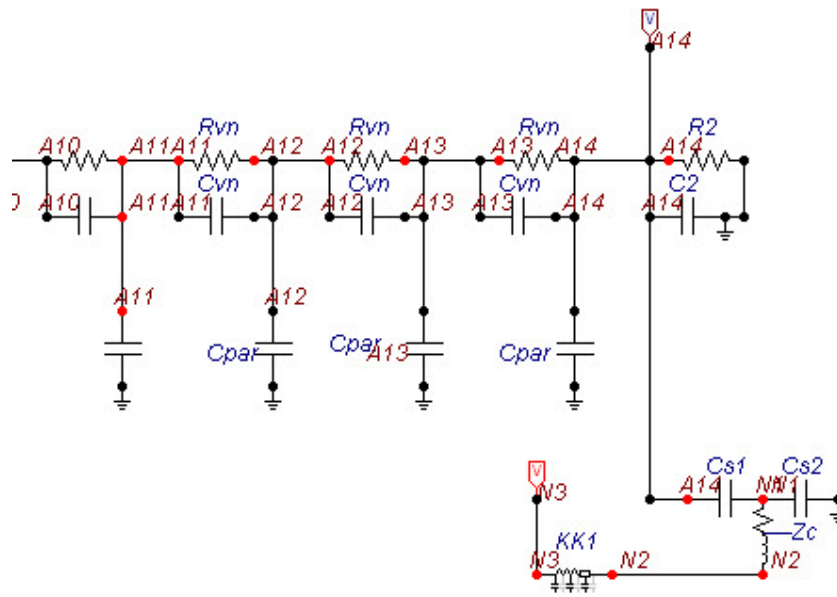
Na slici 14.34 prikazan je deo EMTP šeme modifikovanog sistema delila sa oznakama koje odgovaraju parametrima u tabelama 14.1 i 14.2. Otpornik za prilagođenje ispred koaksijalnog kabla ima vrednost $R_{zc1} = 50 \Omega$ za oba slučaja koaksijalnog kabla.

Oznake na šemi na slici 14.34, koje nisu ranije korišćene, imaju sledeće značenje:

C_{par} -parazitni kapaciteti primarnog delila prema zemlji,

R_2 -ekvivalentni otpor niskonaponske grane primarnog delila (ranije R_{NNekv}),

C_2 -ekvivalentni kapacitet niskonaponske grane primarnog delila (ranije C_{NNekv}),



Slika 14.34: Deo EMTP seme modifikovanog sistema delila

C_{S1} -ekvivalentni kapacitet visokonaponske grane sekundarnog delila (ranije C_{1p}) prema tabeli 14.2, na strani 210,

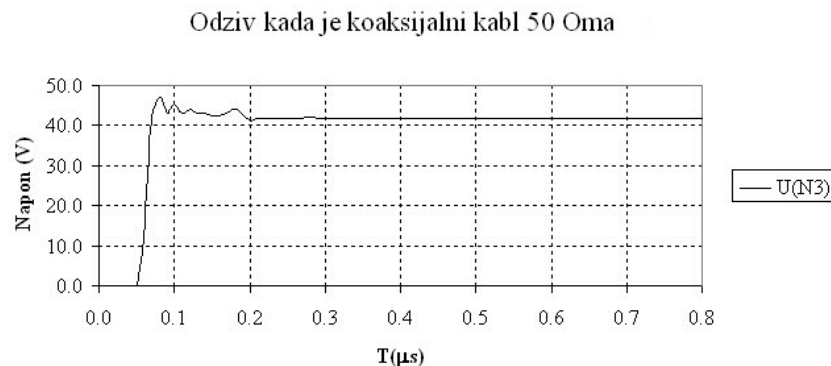
C_{S2} -ekvivalentni kapacitet niskonaponske grane sekundarnog delila (ranije C_{2s}) prema tabeli 14.2, na strani 210,

A14 - Merno mesto na niskonaponskoj grani primarnog delila (ranije M2),

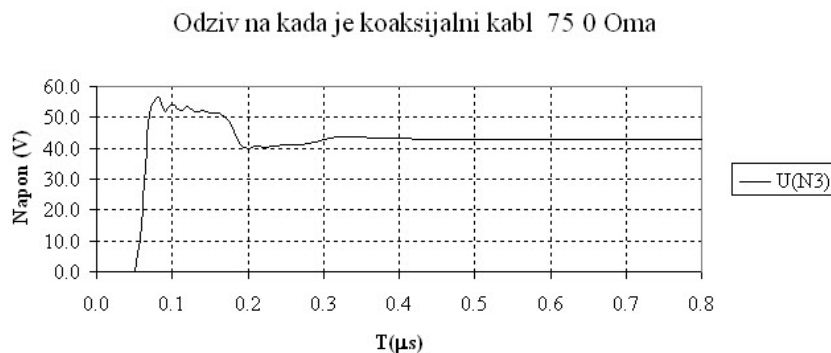
N3 - Merno mesto na mestu osciloskopa (ranije M3),

Na slici 14.35 prikazan je numerički određen odziv kada je kabl karakteristične impedanse 50Ω , a na slici 14.36 kada je kabl karakteristične impedanse 75Ω , a prilagodni otpornik ima vrednost $Z_c = 50 \Omega$.

Može se uočiti na osnovu poređenja numeričkog odziva sistema sa starim kablom iz nekoliko segmenata i novog kabla za koji je predpostavljeno da nije prilagođen jer ima po predpostavci karakterističnu impedansu 75Ω , da se pojavljuju oscilacije usled višestrukih refleksija, koje nisu tako izražene kao u eksperimentu.



Slika 14.35: Numerički izračunat odziv delila sa kablom karakteristične impedanse 50 Ω



Slika 14.36: Numerički izračunat odziv delila sa kablom karakteristične impedanse 75 Ω

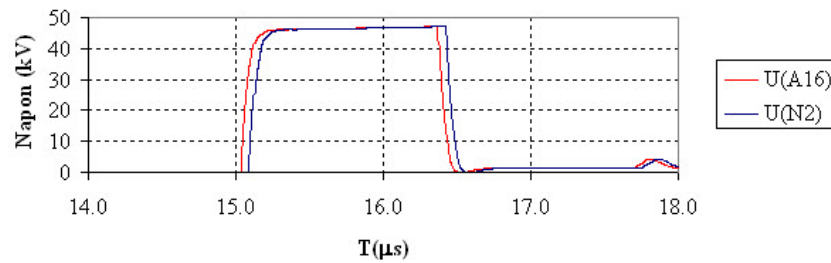
14.9 Uticaj dužine koaksijalnog kabla do osciloskopa

Numeričko modelovanje odziva sekundarnog delila za različite dužine koaksijalnog kabla

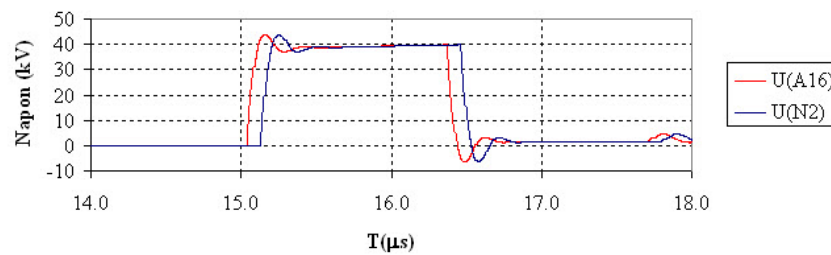
Ustanovljeno je da pri korišćenju kratkih kablova redni otpornik iza delila, a ispred koaksijalnog kabla, može da priguši refleksija, kada je u pitanju kapacitivno sekundarno delilo sa kondenzatorima velikog kapaciteta u NN grani delila, prema šemi na slici 14.33 na strani 213, odnosno na šemi u EMTP na slici 14.34 na strani 214.

Dužina koaksijalnog kabla je varirana da bi se ustanovio odziv u tački A16 i na kraju koaksijalnog kabla kod osciloskopa. Redna otpornost R_{zc} ima vrednost 50 Ω isto kao karakteristična impedansa kabla. Na slikama 14.37, 14.38 i 14.39 prikazani su odzivi za koaksijalni kabl 8 m, 14 m i 25 m.

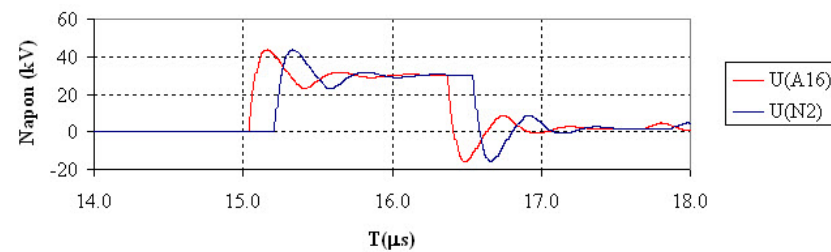
Uočeno je da za kablove kraće do 8 m ne postoji uticaj reflektovanih talasa i nema premašenja na čelu. Što su duži kablovi, premašenje je veće.

Delilo 1:16 sa otvorenim kablom 8 m

Slika 14.37: Talasni oblik napona u tački A16 i na kraju kabla u tački N2 za dužinu kabla 8 m

Delilo 1:16 sa otvorenim kablom 14 m

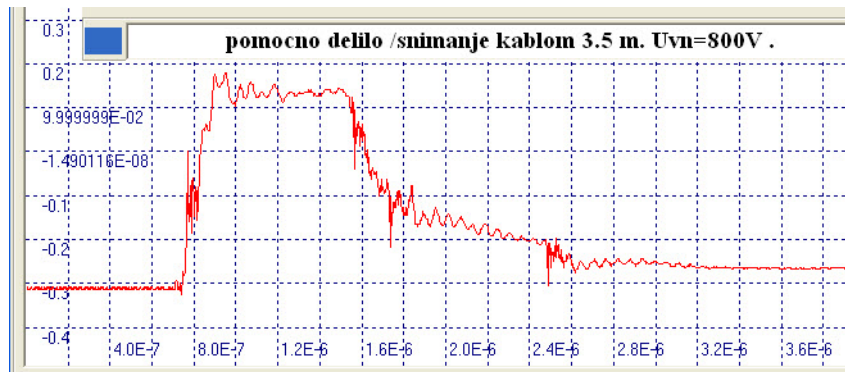
Slika 14.38: Talasni oblik napona u tački A16 i na kraju kabla u tački N2 za dužinu kabla 14 m

Delilo 1:16 sa otvorenim kablom 25 m

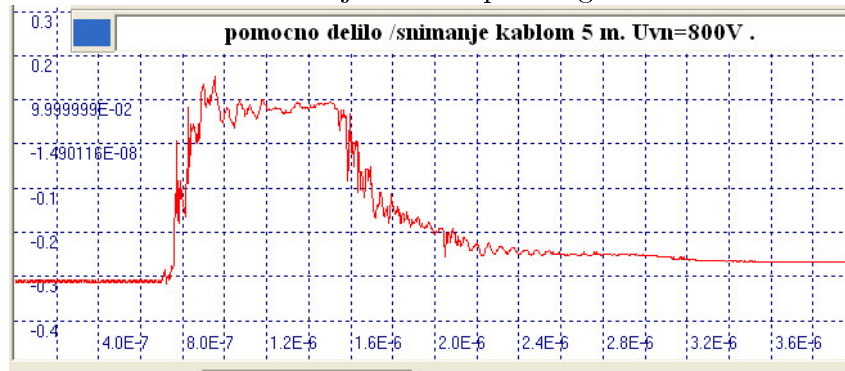
Slika 14.39: Talasni oblik napona u tački A16 i na kraju kabla u tački N2 za dužinu kabla 25 m

Eksperimentalno istraživanje uticaja dužine koaksijalnog kabla

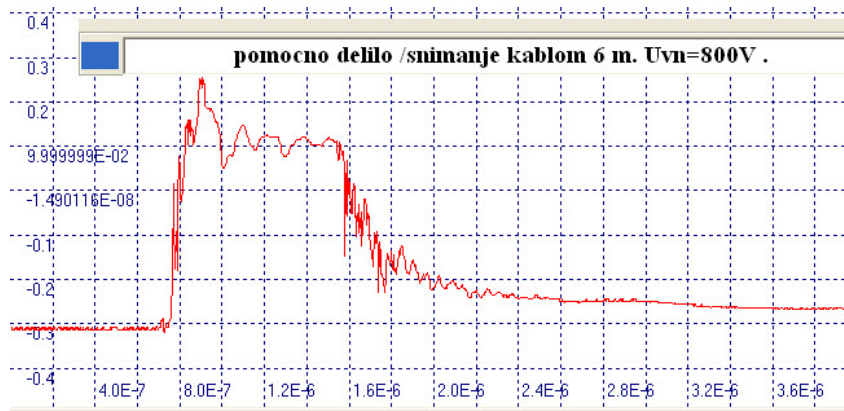
Na sledećim slikama prikazan su odzivi sa pomoćnog delila za različite dužine koaksijalnih kablova. Kablovi su nastavljani pomoću BNC konektora.



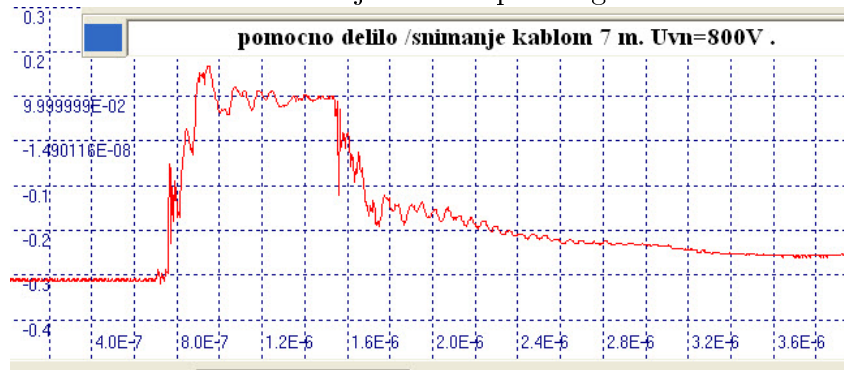
Slika 14.40: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 3.5 m



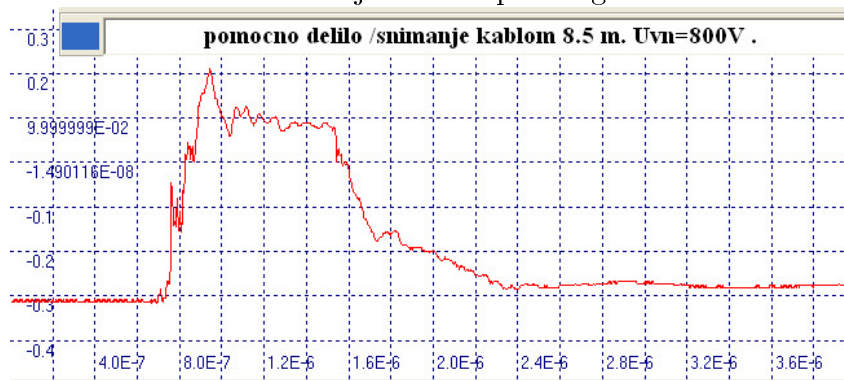
Slika 14.41: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 5 m



Slika 14.42: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 6 m

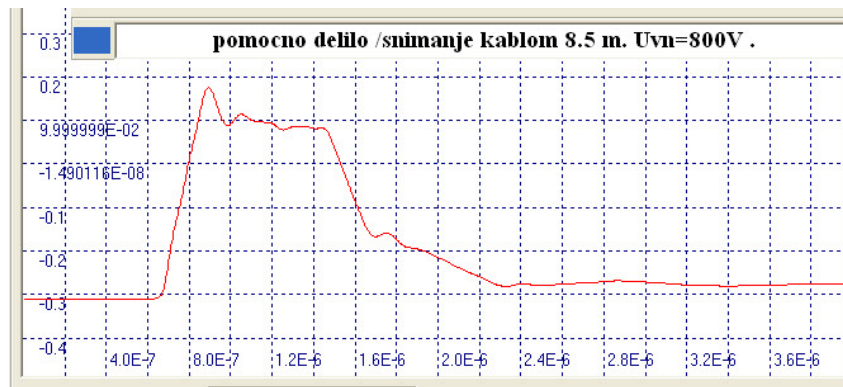


Slika 14.43: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 7 m



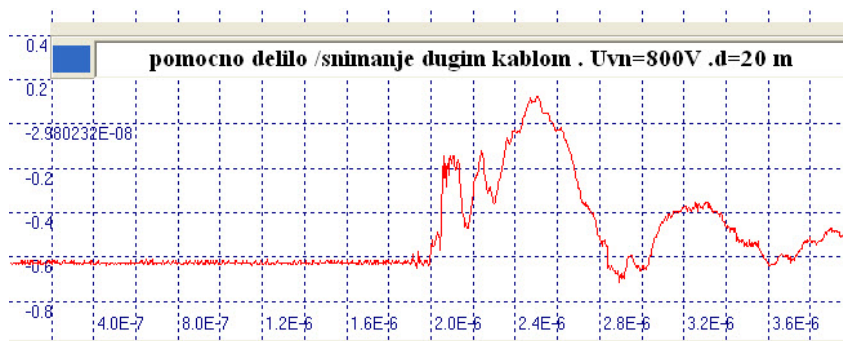
Slika 14.44: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 8.5 m

Izvršeno je numeričko filtriranje izlaznog signala za slučaj kabla dužine 8.5 m. Na slici 14.45 prikazan je odziv delila dužine 8.5 m posle filtriranja.



Slika 14.45: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 8.5 m posle filtriranja

Izvršeno je testiranje sa homogenim koaksijalnim kablom (iz jednog komada) dužine oko 20 m. Rezultati su prikazani na slici 14.46.



Slika 14.46: Odziv na kraju niskonaponskog kabla dužine 20 m

Visokofrekvencijske oscilacije se mogu eliminisati numeričkim ili hardverskim filtriranjem, a posledica su elektromagnetnih smetnji iz okoline.

Na osnovu snimka sa slike 14.46 vidi se da je odziv za dužinu kabla 20 m potpuno neadekvatan.

14.10 Zaključak

Merenje napona je realizovano delilom napona sa sekundarnim delilom i koaksijalnim kablom dužine 7 m. Sovtverskim filtriranjem se mogu ublažiti visokofrekvencijske oscilacije, što olakšava merenje visine napona i oblika talasa (vreme čela i začelja).

Zahvalnica

Pravljenje delila napona je deo projekta laboratorije za visoki napon firme "Elbi", Valjevo. Zahvaljujem vlasniku i direktoru Živoradu Cvetkoviću na podršci pri nabavci i transportu komponenti iz donacije iz Kanade, koje su korišćenje jednim delom i za pravljenje ispitne opreme u Laboratoriji za visoki napon na ETF u Beogradu.

Zahvaljujem na donaciji od laboratorije HEFTI (High-Energy Frequency Tesla) Otava, čiji je vlasnik Dr. Mladen Kekez, bivši student ETF iz Beograda, koji je pri penzionisanju donirao komponente iz svoje laboratorije ETF u Beogradu.

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 200četvoro
- [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 Ÿ Deo 2: Upravljanje rizikom, od 2017, identičan EN 62305-2 od 2012.
- [17] SRPS EN IEC 62305-3: Zaštita od atmosferskog pražnjenja Ÿ 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. Kröniger: Parameters of Lightning Flashes; Electra, No 41, Paris, July 1975, pp. 23–33.
- [40] R. Anderson, A. Erikson: 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 Polyp-hase 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 sredjenaponskih 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. Hosseinian, 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. Božičević, "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.