

8. savjetovanje HRO CIGRÉ
Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

Ivo Uglešić
Viktor Milardić
Milivoj Mandić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivo.uglesic@fer.hr
viktor.milardic@fer.hr
milivoj.mandic@fer.hr

Božidar Filipović-Grčić
Boško Milešević
Fakultet elektrotehnike i računarstva
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr
bosko.milesevic@fer.hr

PRIMJENA ODVODNIKA PRENAPONA NA DVOSTRUKOM DV 220 KV

SAŽETAK

U radu su predstavljeni rezultati studije koja je obradila mjere za smanjenje broja preskoka na dvosistemskom 220 kV dalekovodu. Uz poznatu geometriju stupa i gustoću udara munje u zemlju moguće je izračunati očekivani broj preskoka. Postupak za izračun broja preskoka se sastoji iz tri koraka: primjena elektro-geometrijskog modela udara munje, simulacija elektromagnetskih prijelaznih pojava uslijed udara munje te izračun očekivanog broja preskoka. Prikazano je modeliranje slijedećih elemenata za proračun: udar munje, stup, vodiči, izolatorski lanac, odvodnik prenapona i otpor rasprostiranja uzemljivača stupa. Postupak je proveden za slučaj dvosistemskog 220 kV dalekovoda u cilju poboljšanja njegovih preskočnih karakteristika. Za prevenciju preskoka mogu biti primijenjene različite mjera a jedna od najučinkovitijih je instalacija odvodnika prenapona na dalekovod. Konačni izbor rješenja ovisi o broju odvodnika prenapona, njihovoj lokaciji i cijeni. Proračuni su provedeni pomoću programa EMTP-RV i LIPS.

Ključne riječi: Dvosistemski 220 kV dalekovod, modeliranje, EMTP-RV, LIPS, preskok, preskočne karakteristike, odvodnika prenapona na dalekovodu

LINE SURGE ARRESTERS ON 220 KV DOUBLE-CIRCUITS LINE

SUMMARY

The paper presents the results of a study for the reduction of the number of flashovers on a 220 kV double-circuit line. With known geometry of the tower and ground-flash density it is possible to calculate the number of flashovers. The procedure for the calculation of flashovers includes three steps: application of an electro-geometric model, simulation of the electromagnetic transients due to lightning strokes, and evaluating the flashover rate. Models of the elements in the calculation are presented: source of lightning stroke, tower, conductors, insulator string, line surge arrester (LSA) and tower footing resistance. The case study for the 220 kV double-circuit overhead line is conducted in order to improve its lightning performance. Different mitigation measures on a line for prevention of flashovers could be applied and one of the most effective means is the installation of LSAs. The final choice of the best solution depends on the number of LSAs, their location and their price. Calculations are conducted using the software EMTP-RV and LIPS.

Key words: 220 kV double-circuit line, modeling, EMTP-RV, LIPS, flashover, lightning performance, LSA.

1. UVOD

Kvarovi na dalekovodima uzrokovani udarima munje mogu se klasificirati kao povratni preskoci i preskoci uslijed greške štice. Povratni preskoci na izolatorskom lancu mogu nastupiti u jednoj ili više faza jednog ili oba sistema (trojke) dvosistemskog voda. Da bi se izbjegli povratni preskoci zbog udara munje u stup ili zaštitno uže, otpor rasprostiranja uzemljivača stupa treba biti što manji. U područjima s visokim specifičnim otporom tla vrlo je teško, a ponekad i nemoguće, smanjiti otpor rasprostiranja uzemljivača pojedinih stupova na zadovoljavajuću vrijednost.

Jedno od rješenja koje se koristi za izbjegavanje istovremenog ispada obje trojke dvosistemskog dalekovoda je električki pojačana izolacija jedne trojke [1].

Povećanje broja zaštitnih užeta i uzemljenih vodiča (sidara) je mjera koju je teško provesti na izgrađenim dalekovodima. Nabrojane mjere često nisu dovoljne da spriječe pojavu preskoka a instalacija odvodnika prenapona može biti efikasna mjera za sprječavanje istovremenog ispada obje trojke. Na taj način je osigurana neprekinutost opskrbe a broj ispada dvosistemskog dalekovoda znatno smanjen. Svjetska iskustva pokazuju da je instalacija odvodnika na dalekovod efikasnija od drugih konvencionalnih mjera, naročito u sprječavanju ispada oba sistema dvosistemskog dalekovoda, koji se mogu skoro potpuno eliminirati [2].

Primjer pokazan u ovom članku se odnosi na poboljšanje preskočnih karakteristika dvosistemskog 220 kV dalekovoda koji povezuje termoelektranu s ostatkom elektroenergetskog sustava. Nekoliko ispada obje trojke dalekovoda, prouzročenih udarima munje, imala su za posljedicu prekid (ispad) rada termoelektrane i isporuke električne energije. Stoga je potrebno prvo razumjeti, a zatim i spriječiti takve ispade. Uspoređeni su slučajevi proračuna bez i s instaliranim odvodnicima prenapona na dalekovodu.

2. SIMULACIJA UDARA MUNJE U DALEKOVOD

Simulacijom se želi odrediti raspodjela amplituda struja munje koje udaraju u trasu dalekovoda, odnosno direktno u fazni vodič. Također se žele odrediti karakteristične veličine kao na primjer minimalna, maksimalna, te kritična amplitudu struje koja udara u fazni vodič. Za simulaciju se koristi poznata metoda Monte Carlo koja se primjenjuje kada se prilikom proračuna ne poznaju egzaktno svi ulazni parametri, ali su poznate funkcije distribucije prema kojima se parametri mijenjaju. U ovom proračunu nepoznata je amplituda struje munje, ali je poznata raspodjela. Velikim brojem simulacija dobivaju se relevantne vrijednosti koje su statistički obrađene, te se kasnije koriste u proračunu atmosferskih prenapona.

Osnovna veličina potrebna za provedbu simulacije je amplituda struje munje za koju je poznata statistička raspodjela. Najčešće se koristi log - normalna raspodjela, koju je moguće aproksimirati slijedećim izrazom:

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (1)$$

gdje je: P vjerojatnost pojave amplitude struje munje veće ili jednake od I;
I amplituda struje munje.

Snimanjem razvoja udara munje, utvrđeno je da se munja širi stohastički i skokovito. Brojnim istraživanjima utvrđeno je da probojna udaljenost ovisi, između ostalog, direktno o amplitudi struje munje, te se može odrediti iz izraza:

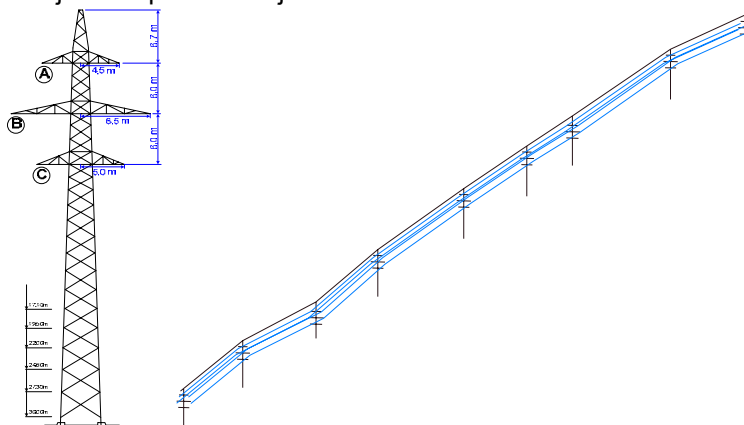
$$R = a \cdot I^b \quad (2)$$

gdje je: R probojna udaljenost u metrima
I amplituda struje u kA
a konstanta [3,3 ; 10,6]
b konstanta [0,5 ; 0,85]

Izraz (2), a i drugi slični izrazi povezuju električnu i geometrijsku veličinu, čime je stvorena osnova za simulaciju pomoću elektro-geometrijskog modela udara munje u trasu dalekovoda.

Modelirani stup i dalekovod prikazani su na slici 1. Zbog jednostavnijeg unosa u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu DV je prikazan kao pravac po osi x što u stvarnosti nije slučaj, ali to

pojednostavljenije nema utjecaja na rezultate simulacije. Pravcima je modelirano zaštitno uže u osam raspona te devet stupova zajedno s konzolama. Ovo čini sustav zaštitnih elemenata (crna boja). Sustav šticećenih elemenata sastoji se od pravaca kojima su modelirani fazni vodiči.



Slika 1. Stup i 3D prikaz modeliranog sustava dalekovoda

Simulacija se provodi za veći broj generiranih amplituda struje munje, dok se ne dobije dovoljan broj podataka za statističku obradu.

Simulacije su provedene za slijedeće vrijednosti parametara:

- $a=7,2$
- $b=0,65$
- $I_{\min}=1 \text{ kA}$
- $I_{\max}=190 \text{ kA}$
- visina oblaka = 1000 m

Promatrano je osam raspona (devet stupova) dalekovoda i to redom:

62. nosni stup Nd 1.1 (visina do donje konzole 18,9 m) ;
63. nosni stup Nd 1.1 (27,0 m);
64. zatezni stup ZDp 120/130 (13,5 m);
65. nosni stup Nd 1.1 (27,0 m);
66. nosni stup Nd 1.1 (29,9 m);
67. nosni stup Nd 1.1 (29,9 m);
68. zatezni stup ZDKp/130 (26,0 m);
69. nosni stup Nd 1.1 (29,9 m);
70. nosni stup Nd 1.1 (14,0 m);

Budući je pojava udara munje slučajna, to se za njeno kvantificiranje koriste metode statističke matematike. Rezultati statističke obrade su to vjerodostojniji što je broj uzoraka veći. Zato su provedene simulacije s velikim brojem udara, kako bi se dobila što bolja predodžba o odnosu broja udara u zemlju, zaštitnu užad i stupove, te fazne vodiče.

Ukupno je provedeno 37932 simulacije, od čega je 25635 završilo pogodcima u zemlji, 11297 pogodaka u zaštitno uže i stup, te 1000 u fazni vodič. Statističkom obradom dobivene su slijedeće vrijednosti za struje koje su pogodile fazne vodiče:

- srednja vrijednost: 15,40 kA
- varijanca: 98,36 kA
- standardna devijacija: 9,92 kA
- maksimalna struja koja je pogodila fazni vodič: 42,80 kA
- kritična struja iznosi: 47,30 kA.

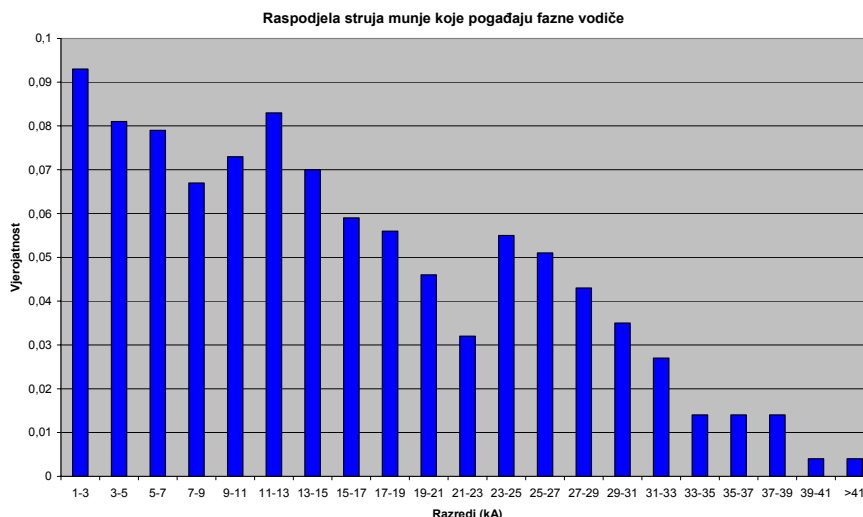
Kritična struja izračunata je za nosne stupove Nd 1.1 (br. 66, 67 i 69.) koji su viši od ostalih.

Ako se napravi omjer pogodaka u fazne vodiče (1000) te pogodaka u zaštitno uže dalekovoda i stupove (11297) dobije se omjer 0,088519. To nadalje znači, oko 8,85% svih udara munje u dalekovod će završiti pogotkom u fazne vodiče (greška šticećenja). Ovo potvrđuje poznatu činjenicu, dalekovodi s jednim zaštitnim užetom nisu najbolje zaštićeni od direktnog udara munje u fazne vodiče. Također, struje munje koje mogu direktno pogoditi fazne vodiče su relativno velikih amplituda.

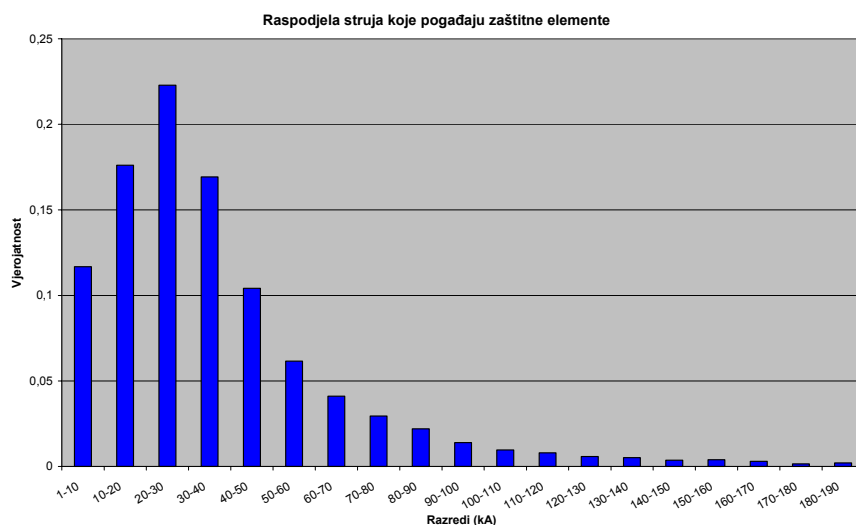
Zbog svega rečenog se sugerira slijedeće. Pri izgradnji novih ili rekonstrukciji postojećih VN dalekovoda (osobito se to odnosi na naponske razine 220 kV i 400 kV) potrebno je razmotriti mogućnosti uporabe glava stupova s dva zaštitna užeta te manjim zaštitnim kutom, što je uobičajena praksa u mnogim zemljama.

Na slici 2. je prikazana raspodjela po razredima, struja munje koje pogađaju fazne vodiče. Iz slike 2. se može zaključiti, amplitude struje munje, koje pogađaju fazne vodiče, podliježu očekivanoj distribuciji, s očekivanjem srednje vrijednosti rezultata simulacije, te gornjom granicom kritične amplitude struje munje.

Vrh stupa ili zaštitno uže može pogoditi bilo koja struja munje, slika 3.



Slika 2. Distribucija struja munje koje pogađaju fazne vodiče pri simulaciji bez uračanog provjesa



Slika 3. Distribucija struja munje koje pogađaju vrh stupa ili zaštitno uže

Distribucija udara munje po fazama pokazuje da 66,18% udara munje, koji pogađaju fazne vodiče pogađa gornje faze. Približno 32,35% udara u fazne vodiče pogađa srednje faze a oko 1,47% pogađa donje faze. Struje munje koje pogode donje faze su malih amplituda (npr. 2,56 kA, 3,06 kA) i ne mogu prouzročiti preskok.

3. MODELIRANJE ZA SIMULACIJU ELEKTROMAGNETSKIH PRIJELAZNIH POJAVA

Elektromagnetski prijelazni proces koji nastaje pri udaru munje u vrh stupa dalekovoda je izuzetno složen. Računalnim programima za simulaciju elektromagnetskih prijelaznih procesa može se približno odrediti elektromagnetski odziv dalekovoda pri udaru munje, [3]. Danas se za takve analize obično koristi neka od verzija EMTP programa [4]. Slijedi opis korištenog modela.

3.1. Struja munje

Odnos između strmine S i struje munje I može se dati općom jednačinom:

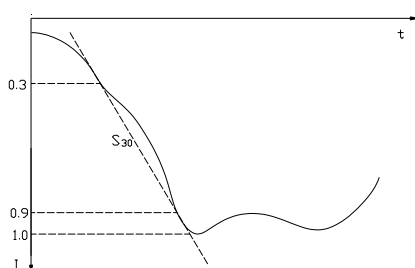
$$S = \alpha \cdot I^\beta \quad (3)$$

gdje je: S - strmina struje [kA/μs],
I - struja [kA],

Faktori α i β su dani u tablici I. za strminu definiranu na slici 4. kao S_{30} .

U proračunima se simulira prvi udar. Za prvi udara je strmina vala manja nego li za ponovni (uzastopni) udar.

Prema ranije navedenom izrazu (1) može se izračunati koliki postotak struja munje je veći od određene vrijednosti struje munje. Npr. tjemena vrijednost struje munje od 31 kA biti će premašena u 50% udara munje. Tjemena vrijednost struje munje 72 kA biti će premašena u 10% udara munje, a 96 kA u 5% udara. Konačno, tjemena vrijednost struje munje 138 kA biti će premašena u 2% udara munje. Za usvojene struje munje se mogu izračunati maksimalne strmine S_m pomoću izraza (3) i tablice I.



Slika 4. Izgled čela struje groma i strmine vala

Tablica I. Iznosi koeficijenata α i β u ovisnosti o vrsti i tipu strmine struje groma

Faktori	α	β
Prvi udar		
S_{30}	3,2	0,25
S_m	3,9	0,55
Uzastopni udar		
S_{30}	6,9	0,42
S_m	3,8	0,93

3.2. Fazni vodiči i zaštitno uže

Fazni vodiči i zaštitno uže dalekovoda su modelirani frekvencijski zavisnim modelom, koji predstavlja prirodni model prijenosnog voda, uzimajući parametre voda kao distribuirane i frekvencijski ovisne. Frekvencijski ovisni parametri voda su računati za raspon frekvencija od 0,1 Hz do 10 MHz. Korištena je realna transformacijska matrica, a optimalna frekvencija modela je određena programski. U model je uključen skin efekt. Korišteni su geometrijski parametri vodiča i zaštitnog užeta te stvarne visine i razmaci između pojedinih vodiča.

3.3. Stupovi

Stupovi dalekovoda su modelirani valnom impedancijom koristeći slijedeći izraz:

$$Z = 60 \left\{ \ln \left(\frac{H}{R} \right) - 1 \right\} \quad (R \ll H) \quad (4)$$

Ekvivalentni radijus stupa R u gornjem izrazu je određen nadomještanjem stupa cilindrom. Srednji radijus R je definiran slijedećim izrazom:

$$R = \frac{(r_1 h_2 + r_2 H + r_3 h_1)}{2H} \quad (5)$$

gdje je: r_1 - radijus vrha stupa [m],
 r_2 - radijus na sredine stupa [m],
 r_3 - radijus baze stupa [m],
 h_1 - visina od baze do sredine stupa [m],
 h_2 - visina od sredine stupa do vrha [m].

Stupovi su u EMTP modelu podijeljeni na četiri dijela (od vrha stupa do gornje konzole, od gornje do srednje konzole, od srednje do donje konzole te od donje konzole do tla) kako bi se mogao izračunati prijelazni napon pojedinih konzola, odnosno ovjesišta izolatorskih lanaca, pri udaru munje, slika 1. Premda se može usvojiti brzina gibanja prenaponskog vala duž stupa dalekovoda jednaka brzini svjetlosti, rešetkasta struktura stupa i konzole uzrokuju određeno vremensko kašnjenje. Kao posljedica toga vrijeme refleksije od baze stupa (zemlje) je duže nego bi se dobilo dijeljenjem visine stupa i brzine svjetlosti. Zbog toga se brzina gibanja prenaponskog vala u gornjem modelu može smanjiti u cilju uzimanja u obzir opisanog efekta. U modelu je usvojena brzina gibanja prenaponskog vala 240 m/μs (80% brzine svjetlosti).

3.4. Fazni napon

Fazni napon u trenutku udara munje u dalekovod mora biti uključen u model. Najveći napon na izolatoru nastaje u trenutku vršne vrijednosti faznog napona, koji je suprotnog polariteta od strujnog i naponskog vala nastalog udarom munje.

3.5. Izolatori

Izolator na dalekovodu predstavlja kapacitet s vrlo malim utjecajem na prenapone. Najvažniji parametar za opis odziva izolatora pri atmosferskim prenaponima je njegov preskočni napon, koji ovisi o naponskoj razini dalekovoda odnosno udaljenosti između zaštitnih armatura izolatora (preskočni razmak). Preskočna karakteristika izolatorskog lanca je vremenski ovisna, a može se modelirati kriterijem jednakih površina:

$$\int_{t_0}^t (|v_{\text{gap}}(t)| - v_0)^K dt \geq D \quad (6)$$

gdje je: t_0 - vrijeme od kojeg je napon v_{gap} postao veći od napona v_0 (kada napon v_{gap} padne ispod v_0 integral se resetira),

Vrijednosti konstanti K , v_0 (kV) i D ovisi o preskočnom razmaku. Za preskočni razmak 1610 mm usvojene su slijedeće vrijednosti konstanti: $K = 1$; $v_0 = 958$ kV; i $D = 0,3805718$. Preskok nastupa kada vrijednost integrala postane veća ili jednaka D .

3.6. Otpori rasprostiranja uzemljivača

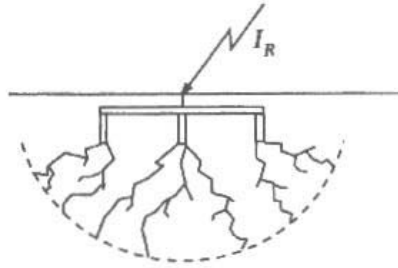
Otpori rasprostiranja uzemljivača svih stupova dalekovoda su modelirani konstantnim djelatnim otporom, osim otpora rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa za koji je usvojen model ionizacije okolnog tla. Model [5] uzima u obzir efekt ionizacije tla, koja se događa u slučaju velikih amplituda struje munje, koje odvodi uzemljivač stupa, slika 5.

Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa može se predstaviti kao nelinearni otpor:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)}} \quad (7)$$

gdje je: R_0 - otpor rasprostiranja uzemljivača stupa pri maloj struji i niskoj frekvenciji (50 ili 60 Hz) [Ω],

I - struja munje kroz uzemljivača [kA],
 I_g - granična struja za nastanak dovoljne ionizacije u tlu [kA].



Slika 5. Ionizacija u tlu pri odvođenju velikih struja munje [6]

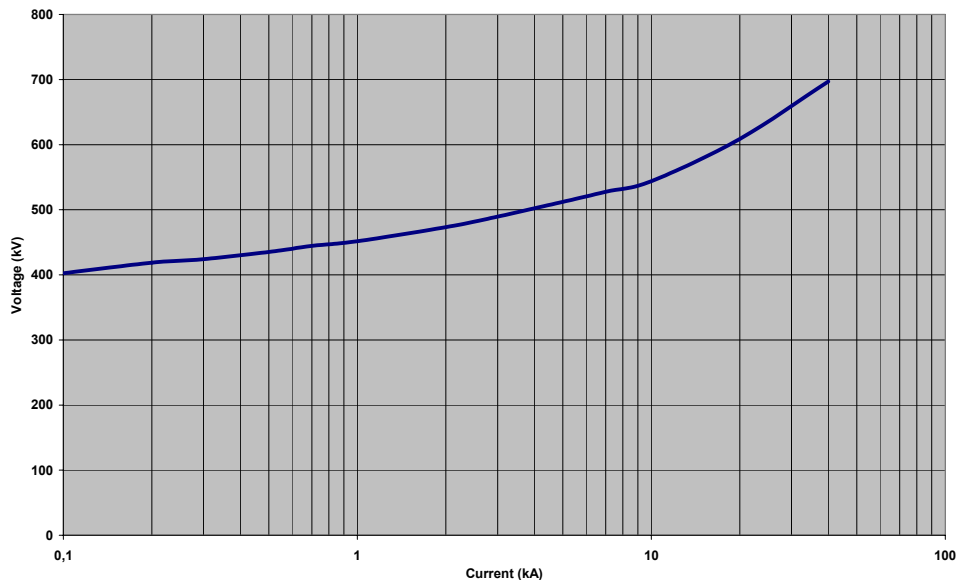
Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa ostaje $R_i = R_0$ ako je $I < I_g$ a mijenja se u skladu s izrazom (7) u slučaju $I > I_g$. Granična struja je određena izrazom:

$$I_g = \frac{\rho \cdot E_0}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2} \quad (8)$$

gdje je: ρ - specifični otpor tla [Ωm],
 E_0 - je gradijent ionizacije tla, preporučena vrijednost: 400 [kV/m].

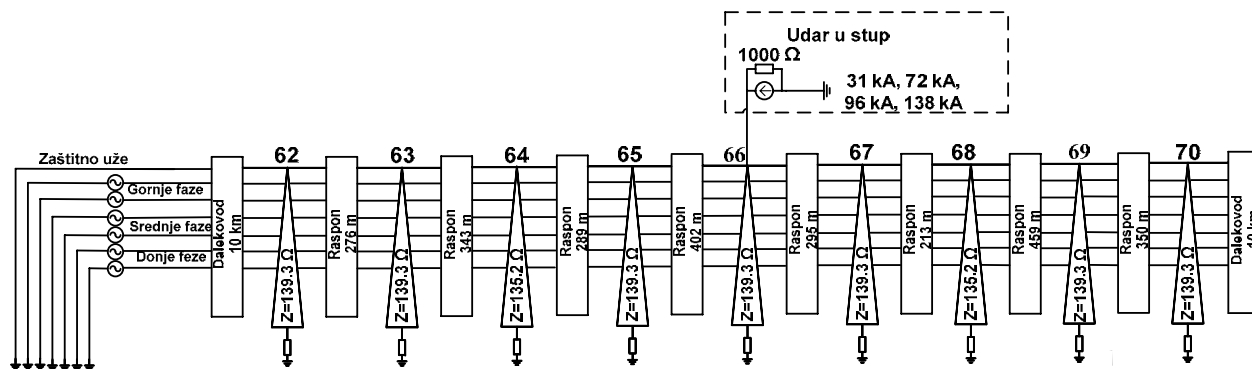
3.7. Odvodnik prenapona

Model odvodnika prenapona uključuje nelinearni dinamički odziv pri nailasku prenapona. Nelinearna U-I karakteristika odvodnika prenapona prikazana je na slici 6.



Slika 6. U-I karakteristika odvodnika prenapona za 220 kV dalekovod ($U_f=210$ kV)

Model DV 220 kV od stupa 62 do stupa 70, korišten za računalni program EMTP-RV [4] je prikazan na slici 7.



Slika 7. Nadomjesna shema dijela dalekovoda između stupova 62 i 70.

4. REZULTATI SIMULACIJA

Da li će pri udaru munje u konkretni stup DV 220 kV nastupiti povratni preskok, a samim time i kratki spoj ovisi o više parametara. U prvom redu to je tjemena vrijednost struje munje i njena strmina čela, otpor rasprostiranja uzemljivača stupa, preskočni razmak izolatorskih lanaca na pogođenom stupu, amplituda i fazni kut pogonskog napona, atmosferski uvjeti (kiša, snijeg, tlak, temperatura i vlažnost), itd. U tablici II. su prikazani rezultati stotinjak simulacija, za različite otpore rasprostiranja uzemljivača stupa te ranije određene vrijednosti struja munje koje će biti premašeni u 50%, 20%, 10%, 5% i 2% slučajeva. Zelena boja prikazuje kombinacije u kojima neće nastupiti povratni preskok niti u jednoj fazi i za bilo koji fazni kut pogonskog napona. Siva boja označava ovisnost nastanka povratnog preskoka o faznom kutu napona. Crvena boja označava da će nastupiti povratni preskok, barem u jednoj fazi razmatrane trojke dalekovoda, neovisno o faznom kutu napona u trenutku udara.

Analizirajući tablicu II. lako je zaključiti da postoji određena korelacija između otpora rasprostiranja uzemljivača stupa dalekovoda i nastanka povratnog preskoka. Za relativno male amplitude struje munje (npr. 31 kA) povratni preskok će sigurno nastupiti samo ako munja pogodi stup čiji je otpor rasprostiranja uzemljivača relativno visok (npr. 75 Ω). Naravno, ako neka struja munje veće amplitude (npr. 96 kA) pogodi vrh stupa, povratni preskok će sigurno nastupiti i pri manjim vrijednostima otpora rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa (npr. 17 Ω).

Osim navedene ovisnosti, nastanak povratnog preskoka ovisi i o (maksimalnoj) strmini čela struje munje. Što je strmina čela struje munje veća, to je za određeni otpor rasprostiranja uzemljivača stupa potrebna manja amplituda struje munje a koja može izazvati povratni preskok.

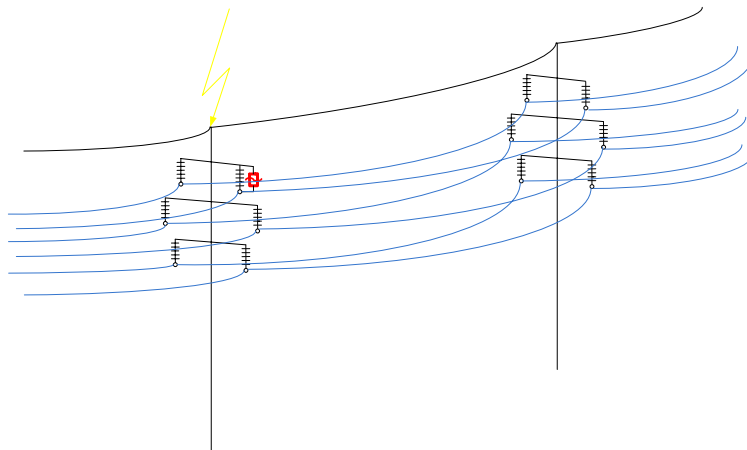
Tablica II. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa

ρ (Ωm)	R (Ω)	P(31 kA) = 50% $S_m=25,78$ kA/ μs	P(52,8 kA) = 20% $S_m=34,56$ kA/ μs	P(72 kA) = 10% $S_m=40,98$ kA/ μs	P(96 kA) = 5% $S_m=48,00$ kA/ μs	P(138 kA) = 2% $S_m=58,61$ kA/ μs
100	2,32	Green	Green	Green	Green	Green
200	4,65	Green	Green	Green	Green	Green
300	6,97	Green	Green	Green	Green	Green
400	9,30	Green	Green	Green	Green	Green
500	11,62	Green	Green	Green	Green	Green
600	13,95	Green	Green	Green	Green	Green
700	16,27	Green	Green	Green	Green	Green
800	18,60	Green	Green	Green	Green	Green
900	20,92	Green	Green	Green	Green	Green
1000	23,25	Green	Green	Green	Green	Green
1200	27,90	Green	Green	Green	Green	Green
1400	32,55	Green	Green	Green	Green	Green
1600	37,20	Green	Green	Green	Green	Green
1800	41,85	Green	Green	Green	Green	Green
2000	46,49	Green	Green	Green	Green	Green
2400	55,79	Green	Green	Green	Green	Green
2800	65,09	Green	Green	Green	Green	Green
3200	74,39	Green	Green	Green	Green	Green
3600	83,69	Green	Green	Green	Green	Green
4000	92,99	Green	Green	Green	Green	Green

Ponavljajući simulaciju za slučaj kada je odvodnik prenapona postavljen u gornju (A) fazu, slika 8., dobije se tablica III. Jedan ugrađeni odvodnik prenapona poboljšava prenaponske karakteristike

dalekovoda, što se jasno vidi iz tablice III. Npr. za isti slučaj struje munje amplitude 31 kA sada je granična vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača stupa, za koju će sigurno nastupiti povratni preskok, oko 160 Ω .

Dakle, ugradnja jednog odvodnika prenapona je na određeni način ekvivalentna smanjenju otpora rasprostiranja uzemljivača stupa. S tim u vezi je oportuno, prije odluke o ugradnji odvodnika prenapona na dalekovod, izmjeriti točne vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača pojedinih stupova, te ocijeniti koji uzemljivači bi se mogli sanirati. Cijenu sanacije pojedinog uzemljivača potrebno je komparirati s cijenom ugradnje odvodnika prenapona, te tako donijeti odluku na kojim stupnim mjestima ugraditi odvodnik prenapona a na kojim stupnim mjestima sanirati uzemljivač i smanjiti otpor rasprostiranja.



Slika 8. Odvodnik prenapona u gornjoj fazi šticeenog sustava

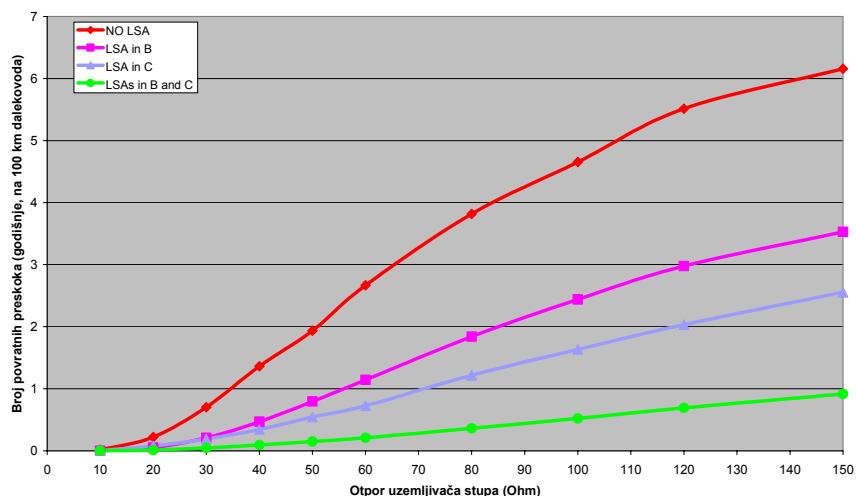
Tablica III. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu uzemljenja stupa za odvodnik prenapona u fazi A jednog sustava

ρ (Ωm)	R (Ω)	P(31 kA) = 50% $S_m=25,78$ kA/ μs	P(72 kA) = 10% $S_m=40,98$ kA/ μs	P(96 kA) = 5% $S_m=48,00$ kA/ μs	P(138 kA) = 2% $S_m=58,61$ kA/ μs
100	2,32	Green	Green	Green	Green
200	4,65	Green	Green	Green	Green
300	6,97	Green	Green	Green	Green
400	9,30	Green	Green	Green	Green
500	11,62	Green	Green	Green	Green
600	13,95	Green	Green	Green	Green
700	16,27	Green	Green	Green	Green
800	18,60	Green	Green	Green	Green
900	20,92	Green	Green	Green	Green
1000	23,25	Green	Green	Green	Green
1200	27,90	Green	Green	Green	Green
1400	32,55	Green	Green	Green	Green
1600	37,20	Green	Green	Green	Green
1800	41,85	Green	Green	Green	Green
2000	46,49	Green	Green	Green	Green
2400	55,79	Green	Green	Green	Green
2800	65,09	Green	Green	Green	Green
3200	74,39	Green	Green	Green	Green
3600	83,69	Green	Green	Green	Green
4000	92,99	Green	Green	Green	Green
5000	116,24	Green	Green	Green	Green
6000	139,48	Green	Green	Green	Green
7000	162,73	Green	Green	Green	Green
8000	185,98	Green	Green	Green	Green

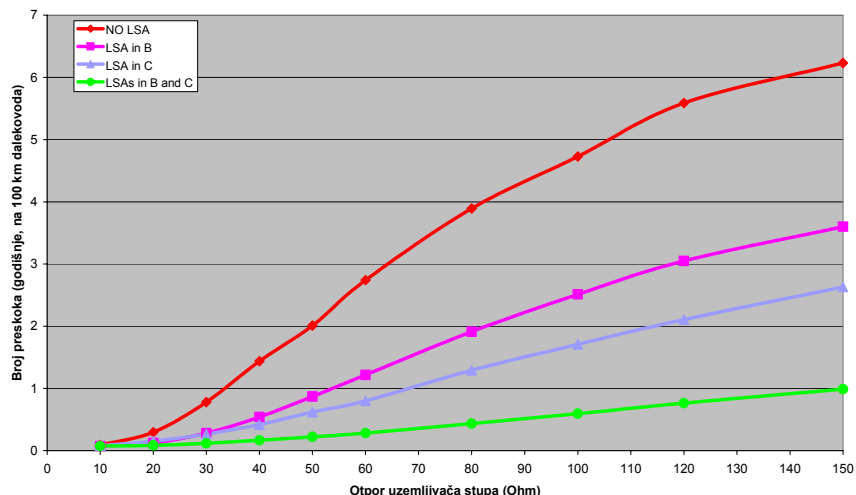
Ponavljajući simulacije za slučaj kada je odvodnik prenapona postavljen u srednju fazu (B), u donju fazu (C), te u srednju i donju fazu (B i C) dobiju se odgovarajuće tablice.

Ako se usvoji broj udar $N_L = 11.011$ (na 100 km duljine u godini) 220 kV dalekovoda dobiju se slike 9 i 10. Slike su dobivene pomoću EMTP-RV LIPS simulacija velikog broja udara munje. LIPS je razvijen partnerstvom EDF, RTE i HYDRO-QEBEC. LIPS računa broj preskoka dalekovoda višestrukim simulacijama pomoću EMTP-RV [7].

Ukupni broj preskoka (povratni preskoci i greške štíćenja) jednog sistema 220 kV dalekovoda je nešto veći, slika 10.



Slika 9. Broj povratnih preskoka jednog sistema 220 kV dalekovoda bez instaliranih odvodnika prenapona, s instaliranim odvodnikom u srednju fazu (B), donju fazu (C) te srednju i donju fazu (B i C)



Slika 10. Ukupni broj preskoka (povratni preskoci i greške štíćenja) jednog sistema 220 kV dalekovoda bez instaliranih odvodnika prenapona, s instaliranim odvodnikom u srednju fazu (B), donju fazu (C) te srednju i donju fazu (B i C)

Provedene su i simulacije s udarom struje manje velike amplitude 138 kA u stup s visokim otporom rasprostiranja uzemljivača (npr. $R=250 \Omega$). Rezultati se mogu sažeti u slijedećem: Ako u trasi dalekovoda postoji npr. jedan stup s jako visokim otporom rasprostiranja uzemljivača, tada ugradnja odvodnika prenapona i u sve tri faze na tom stupu sprečava samo preskok na istomu (u štíćenom sustavu), ali su mogući preskoci na susjednim stupovima (u štíćenom sustavu) neovisno o njihovim otporima rasprostiranja uzemljivača. To je posljedica jako visokog prijelaznog napona faznih vodiča štíćenog sustava (putni valovi se šire od pogođenog stupa i mogu prouzročiti preskoke na susjednim stupovima).

5. ZAKLJUČAK

Razmatrana je mogućnosti smanjenja ispada dvostrukog DV 220 kV uslijed atmosferskih pražnjenja u dalekovod, pri čemu u najvećoj mogućoj mjeri treba izbjeći istovremeni ispad obje trojke DV 220 kV.

Smanjeni broj povratnih preskoka na izgrađenim dalekovodima praktično se može ostvariti:

1. Poboljšanjem otpora rasprostiranja uzemljivača stupova; mjera je opravdana ako se može provesti, što ovisi o lokalnim karakteristikama tla.
2. Instalacijom odvodnika prenapona na vodu; mjera se provodi kao samostalna ili u kombinaciji s mjerom 1.

Instalacija jednog a osobito dva odvodnika prenapona poboljšava prenaponske karakteristike dalekovoda i na određeni način je ekvivalentna smanjenju otpora rasprostiranja uzemljivača stupa. Prije odluke o instalaciji odvodnika prenapona na dalekovod, treba točno poznavati vrijednosti impulsnog otpora rasprostiranja uzemljivača stupova. Potrebno je ocijeniti koji uzemljivači bi se mogli sanirati, a cijenu sanacije pojedinog uzemljivača treba komparirati s cijenom instalacije odvodnika prenapona.

Prema rezultatima simulacije usvojeni su slijedeći kriteriji za instalaciju odvodnika prenapona na DV 220 kV:

- Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa manji od 21Ω , ne treba instalirati odvodnik prenapona.
- Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa veći od 21Ω a manji od 47Ω instalirati odvodnik prenapona u jednu fazu štíčene trojke.
- Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa veći od 47Ω , instalirati dva odvodnika prenapona u srednji i donju fazu štíčene trojke.
- Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa veći od 150Ω , instalirati tri odvodnika prenapona u sve tri faze štíčene trojke.

Ako u trasi dalekovoda postoji stup s jako visokim otporom rasprostiranja uzemljivača (npr. 250Ω), ugradnja odvodnika prenapona i u sve tri faze na tom stupu sprečava samo preskok na istomu (u štíčenom sustavu), ali su mogući preskoci na susjednim stupovima (u štíčenom sustavu) neovisno o njihovim otporima rasprostiranja uzemljivača.

5. LITERATURA

- [1] Wei-Gang H., "Lightning performance of 500 kV double-circuit line schemes for the Three-Gorge project", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 2, pp. 736-743, Apr. 2006.
- [2] Shigeno T., "Experience and effectiveness of transmission line arresters", Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, vol.1, 636 – 639, Oct. 2002.
- [3] J. A. Martinez, F. Castro-Aranda: "Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using the EMTP", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005.
- [4] EMTPWorks Version 2.1.0, www.emtp.com
- [5] IEC 60071-4: "Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks", 2004.
- [6] Hileman R. A., "Insulation coordination for power systems", Power Engineering Book, Marcel Dekker, Inc., 1999.
- [7] A. Xemard, S. Denetiere, J. Michaud, P.Y. Valentin, Q. Bui-Van, A. Dutil, M. Giroux, J. Maheserdjian, "Methodology for the calculation of the lightning flashover rate of a line equipped or not with line arresters", report of the study committee C4, CIGRE general session 2006, Paris.