

Viktor Milardić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
viktor.milardic@fer.hr

Kristijan Špoljarić
TTK Karlovac
kspoljaric@gmail.com

Maja Fištrić
HŽ-Infrastruktura
maja.fistric@fer.hr

ANALIZA PRENAPONSKE ZAŠTITE 110 kV DALEKOVODA PRIMJENOM EMTP PROGRAMA

SAŽETAK

Ispadi 110 kV dalekovoda najčešće su posljedica atmosferskih pražnjenja, a uzrok ispada je udar munje u stup, zaštitno uže ili izravni udar u fazni vodič (greška štice).

U radu je najprije opisan model 110 kV dalekovoda koji je korišten za simulacije u EMTP-ATPu. Analizirana je ovisnost nastanka povratnog preskoka na dalekovodu o amplitudi i strmini struje munje, otporu rasprostiranja uzemljivača stupa dalekovoda te vrijednostima faznih napona u trenutku udara munje. Također je analizirana i ovisnost nastanka povratnog preskoka o mjestu udara munje (vrh stupa ili zaštitno uže u rasponu) te postojanju jednog ili dva odvodnika prenapona na stupu.

Ključne riječi: EMTP-ATP model, simulacija, udar munje, povratni preskok, odvodnik prenapona, 110 kV dalekovod

ANALYSIS OF 110 kV LINE OVERVOLTAGE PROTECTION USING EMTP PROGRAM

SUMMARY

Transmission line outages are mostly due to lightning and the cause of the failure is lightning flash to the tower, shield wire or direct flash to the phase conductor (shielding failure).

The paper describes the model of the 110 kV transmission line that is used for EMTP-ATP simulation. The power line back-flashover dependence is analyzed on the amplitude and steepness of lightning current, tower footing resistance and values of phase voltages at the time of lightning. It is also analyzed the back-flashover dependence on the lightning location (tower top or shielding wire in the span) and the existence of one or two line surge arresters.

Key words: EMTP-ATP model, simulation, lightning flash, back-flashover, line surge arrester, 110 kV transmission line.

1. UVOD

Uobičajena gromobranska (prenaponska) zaštita dalekovoda sastoji se od zaštitnog uža i uzemljivača stupa. Zaštitno uže djeluje kao gromobranska zaštita i trebalo bi spriječiti izravne udare munja u fazne vodiče. U skladu s elektro-geometrijskim modelom udara munje, samo munje manjih

amplituda struje mogu pogoditi izravno fazne vodiče. Najveći dio munja, i većih i manjih amplituda struje, pogađa zaštitno uže i vrh stupa. Udarom munje u vrh stupa, ili zaštitno uže u rasponu, dolazi do prijelaznog porasta napona pogođenog stupa, ili prvih susjednih stupova, pri udaru munje u raspon. Nastaje prenapon između stupa (konzole kod ovjesišta izolatora) i faznih vodiča. Da li će nastupiti preskok izolatora ovisi o mnogo čimbenika. U prvom redu to su amplituda i strmina struje munje te otpor rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa, zatim preskočni razmak izolatorskog lanca, atmosferski uvjeti (koji utječu na preskočni napon izolatorskog lanca), vrijednost faznog napon u trenutku udara, da li je udar u vrh stupa ili raspon. Ako je na pogođenom stupu instaliran jedan ili više odvodnik prenapona nastanak preskoka je manje vjerojatan, [1].

Odvodnici prenapona djeluju kao nelinearni otpori i služe za zaštitu opreme od prenapona. Osim smanjenja broja preskoka na izolatorskim lancima, primjena odvodnika prenapona na dvosistemskom dalekovodu smanjuje broj dvostrukih ispada dalekovoda, poboljšava prenaponsku zaštitu transformatorskih stanica, smanjuju sklopne prenapone te je neophodna pri kompaktiranju dalekovoda.

U radu je, koristeći EMTP program, istražen utjecaj navedenih čimbenika na nastanak preskoka. U EMTP programu su, na pogodnom modelu 110 kV dalekovoda, provedene simulacije različitih scenarija pri udaru munje. EMTP program diferencijalne jednačbe, koje se pojavljuju prilikom analize električnih krugova, rješava iterativno, odnosno korak po korak, jednostavnim metodama integracije, [2]. Iz poznatih vrijednosti prethodnog vremenskog koraka određuje se novo stanje mreže. Elementi dalekovoda koji se modeliraju su oni koji su važni za odziv dalekovoda prilikom udara munje: zaštitno uže, stup i uzemljivač, fazni vodiči, izolatori i odvodnici prenapona (ako postoje). Prikladni modela elemenata dalekovoda mora odgovarati frekvencijskom rasponu prijelaznih pojava. Postoje više preporučenih modela navedenih elemenata, a njihov odabir ovisi o vrsti proračuna.

2. MODEL

2.1. Podaci o dalekovodu

Podaci o vodičima i glavama stupova prikazani su u Tablicama I-III. Model se sastoji od jedanaest čelično-rešetkastih stupova oblika jela.

Tablica I. Položaj vodiča na stupu

Položaj vodiča na stupovima	Horizontalni razmještaj vodiča (m)	Vertikalni razmještaj vodiča (m)
Faza A	2,5	14
Faza B	-3	11,5
Faza C	3,5	9
Zaštitno uže	0	19

Tablica II. Karakteristike vodiča

Vodiči	Fazni vodiči	Zaštitni vodiči
Naziv	Al/Če	Al/Če
Presjek (mm ²)	150/25	95/55
Vanjski promjer (mm)	0,855	0,8
DC otpor (Ω/km)	0,1939	0,2992

Tablica III. Podaci o dalekovodu u modelu

Nazivni napon	110 kV
Duljina (km)	22,4
Duljina raspona 1 (m)	100
Duljina raspona 2 (m)	200
Duljina raspona 3 (m)	300
Duljina raspona 4 (km)	10

2.2. Stupovi

Stupovi dalekovoda su modelirani valnom impedancijom prema sljedećem izrazu, [3]:

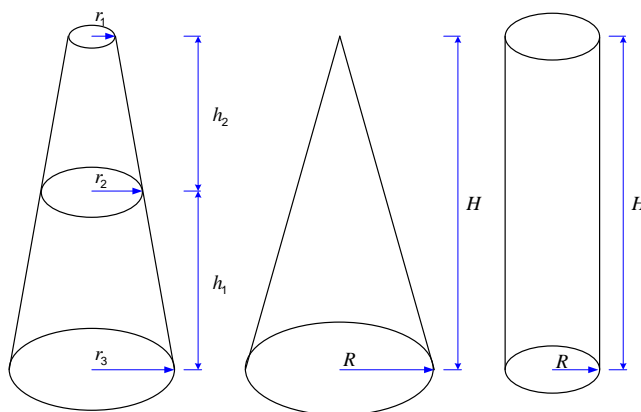
$$Z = 60 \left\{ \ln \frac{H}{R} - 1 \right\} \quad R \ll H \quad (1)$$

Ekvivalentni radijus stupa R u gornjem izrazu je određen nadomještanjem stupa cilindrom, slika 1. R je definiran sljedećim izrazom:

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

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].

Računajući na gornji način valne impedancije stupova dobije se vrijednosti od 135 Ω .



Slika 1. Ekvivalentni radijus stupa

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.

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/ μ s (80% brzine svjetlosti).

2.3. Fazni vodiči i zaštitno uže

Fazni vodiči i zaštitno uže dalekovoda modelirani u 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 1 Hz do 100 MHz (8 dekada). Korištena je realna transformacijska matrica. U model je uključen skin efekt.

Korišteni su geometrijski parametri vodiča i zaštitnog užeta te ranije navedene visine i razmaci između pojedinih vodiča. Kada se promatraju preskoci preko izolatora modelira se nekoliko raspona sa obje strane od mjesta udara munje. Kraj voda se zaključuje sa obje strane odgovarajućim otporom ili dovoljno dugim sekcijama voda, kako bi se spriječile refleksije koje mogu utjecati na rezultate simulacija.

2.4. Otpori rasprostiranja uzemljivača

Otpori rasprostiranja uzemljivača svih stupova dalekovoda su modelirani uzimajući u obzir eventualni nastanak ionizacije okolnog tla. Model uzima u obzir efekt ionizacije tla, koja se događa u slučaju velikih amplituda struje munje, koje odvodi uzemljivač stupa.

Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa R_i može se predstaviti kao nelinearni otpor:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)^2}} \quad (3)$$

gdje je: R_0 - otpor rasprostiranja uzemljivača stupa pri maloj struji i niskoj frekvenciji (50 ili 60 Hz) [Ω], I - struja munje kroz uzemljivač [kA], I_g - granična struja za nastanak dovoljne ionizacije u tlu [kA].

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

$$I_g = \frac{\rho E_0}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2} \quad (4)$$

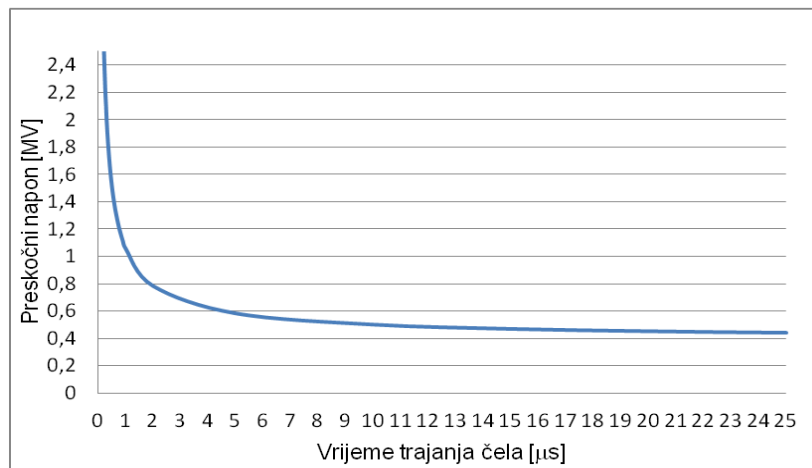
gdje je: ρ - specifični otpor tla [Ωm], E_0 - je gradijent ionizacije tla (preporučena vrijednost: 400 kV/m). Za specifični otpor tla usvojeno je 500 Ωm .

2.5. Preskočna karakteristika

Pri udaru munje u fazni vodič ili vrh stupa, može nastupiti povratni preskok. Preskočna karakteristika 110 kV izolatorskog lanca (slika 2.) vremenski je ovisna i može se modelirati sljedećim izrazom:

$$U_{pr} = K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \quad (5)$$

gdje je: U_{pr} - preskočni napon [MV], $K_1 = 0,4l$, $K_2 = 0,71l$, l - duljina iskrišta izolatorskog lanca = 0,955 [m], t - vrijeme trajanja čela [μs].



Slika 2. U-t krivulja izolatorskog lanca

2.6. Struja munje

Udar munje u stup ili fazni vodič može se nadomjestiti strujnim izvorom. Odnos između strmine S i struje munje I može se dati općom jednadžbom:

$$S = aI^b \quad (6)$$

gdje je: S - strmina struje [kA/ μs], I - struja [kA], a - konstanta [3,3-10,6], b - konstanta [0,5-0,85].

Za usvojene struje munje mogu se izračunati maksimalne strmine S_m pomoću izraza (6) i koeficijenta $\alpha=3,9$ i $\beta=0,55$.

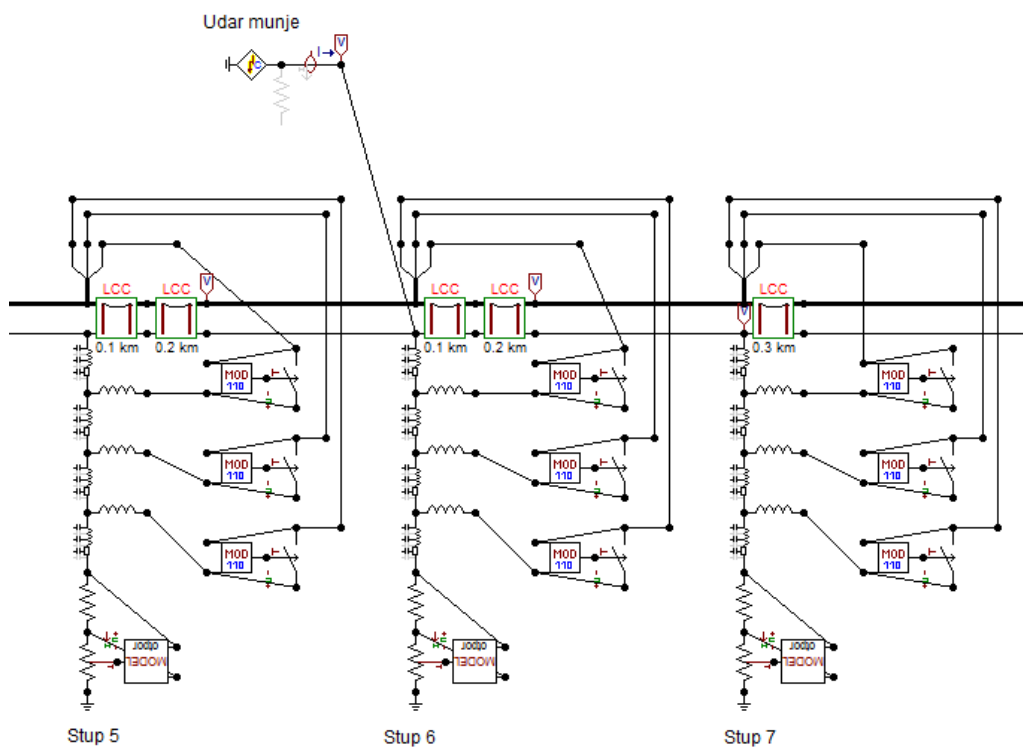
Osnovna veličina potrebna za provedbu simulacije je amplituda struje munje za koju je poznata statistička raspodjela. Najčešće se koristi log-normalna raspodjela koju je moguće aproksimirati sljedećim izrazom:

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (7)$$

gdje je: P - vjerojatnost pojave amplitude struje munje veće od I , I - amplituda struje munje [kA].

Prema ranije navedenom izrazu (7) 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 % slučajeva udara munje.

Dio modela DV 110 kV u računalnom programu EMTP-ATP prikazan je na slici 3.



Slika 3. Nadomjesna shema dijela dalekovoda u EMTP-ATPu

3. REZULTATI SIMULACIJA

U Tablicama IV-XIV. prikazani su rezultati simulacija za različite otpore rasprostiranja uzemljivača stupa te vrijednosti struja munje koje će biti premašeni u 80%, 70%, 50%, 30%, 20%, 10%, 5% i 2% slučajeva, u skladu sa (7). Zelena boja prikazuje kombinacije u kojima neće nastupiti povratni preskok niti u jednoj fazi, za bilo koju trenutnu vrijednost faznih napona. Nepovoljan kut faznog napona je onaj pri kojemu je fazni napon vodiča suprotnog polariteta od prijelaznog polariteta stupa pogođen munjom. Siva boja označava ovisnost nastanka povratnog preskoka o kutu faznih napona. Crvena boja označava da će nastupiti povratni preskok, barem u jednoj fazi neovisno o kutu faznih napona.

Analizirajući Tablicu IV. može se zaključiti da postoji određena korelacija između otpora rasprostiranja uzemljivača stupa dalekovoda i nastanka povratnog preskoka. Za relativno male amplitude struje munje (npr. 18,2 kA) povratni preskok će sigurno nastupiti samo ako munja pogodi stup čiji je otpor rasprostiranja uzemljivača relativno visok (npr. 100 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. 6 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 koja može izazvati povratni preskok.

Tablica IV. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u vrh stupa)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/μs	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/μs	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/μs	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/μs	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/μs	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/μs	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/μs	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/μs
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Tablica V. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u zaštitno uže u rasponu 100 m od stupa)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/μs	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/μs	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/μs	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/μs	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/μs	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/μs	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/μs	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/μs
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Uspoređujući tablice IV i V može se zaključiti da je udar munje u zaštitno uže u raspon ipak nešto povoljniji od udara munje u vrh stupa sa stajališta pojave povratnog preskoka.

Ponavljajući simulaciju za slučaj kada je odvodnik prenapona postavljen u gornju (A) fazu, dobije se Tablica VI. Jedan ugrađeni odvodnik prenapona poboljšava prenaponske karakteristike dalekovoda. Npr. za slučaj struje munje amplitude 18,2 kA sada je granična vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača stupa, za koju sigurno neće nastupiti povratni preskok oko 70 Ω, dok je za isti slučaj ali bez odvodnika prenapona, tablica IV, ta vrijednosti bila oko 40 Ω.

Tablica VI. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u vrh stupa, odvodnik prenapona u gornjoj fazi stupa, faza A)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/ μ s	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/ μ s	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/ μ s	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/ μ s	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/ μ s	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/ μ s	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/ μ s	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/ μ s
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Tablica VII. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u vrh stupa, odvodnik prenapona u srednjoj fazi stupa, faza B)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/ μ s	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/ μ s	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/ μ s	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/ μ s	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/ μ s	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/ μ s	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/ μ s	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/ μ s
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Tablica VIII. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u vrh stupa, odvodnik prenapona u donjoj fazi stupa, faza C)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/ μ s	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/ μ s	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/ μ s	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/ μ s	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/ μ s	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/ μ s	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/ μ s	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/ μ s
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Tablica IX. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u vrh stupa, odvodnik prenapona u gornjoj i srednjoj fazi stupa)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/ μ s	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/ μ s	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/ μ s	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/ μ s	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/ μ s	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/ μ s	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/ μ s	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/ μ s
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Tablica X. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u zaštitno uže u rasponu 100 m od stupa, odvodnik prenapona u gornjoj i srednjoj fazi stupa)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/ μ s	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/ μ s	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/ μ s	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/ μ s	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/ μ s	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/ μ s	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/ μ s	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/ μ s
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Tablica XI. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa (udar u vrh stupa, odvodnik prenapona u srednjoj i donjoj fazi stupa)

R (Ω)	P(18,2 kA) =80% S _m =19,23 kA/ μ s	P(22,4 kA) =70% S _m =21,55 kA/ μ s	P(31,0 kA) =50% S _m =25,78 kA/ μ s	P(42,9 kA) =30% S _m =30,84 kA/ μ s	P(52,8 kA) =20% S _m =34,57 kA/ μ s	P(72,2 kA) =10% S _m =41,04 kA/ μ s	P(96,2 kA) =5% S _m =48,06 kA/ μ s	P(138,5 kA) =2% S _m =58,73 kA/ μ s
2								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
70								
80								
90								
100								
120								

Iz provedenih simulacija može se zaključiti da je ugradnja odvodnika prenapona na određeni način ekvivalentna smanjenju otpora rasprostiranja uzemljivača stupa. Stoga 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 usporediti 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 uzemljivača.

4. ZAKLJUČAK

Napravljen je odgovarajući model dalekovoda 110 kV za simulaciju prijelaznih pojava koje nastaju pri udaru munje u vrh stupa ili zaštitno uže dalekovoda. Rezultati simulacije ukazuju na ovisnost nastanka preskoka o amplitudi i strmini struje munje, trenutnim vrijednostima pogonskog napona te otporu rasprostiranja uzemljivača stupova. Za relativno male amplitude struje munje povratni preskok će sigurno nastupiti samo ako munja pogodi stup čiji je otpor rasprostiranja uzemljivača relativno visok. Naravno, ako neka struja munje veće amplitude pogodi vrh stupa, povratni preskok će sigurno nastupiti i pri manjim vrijednostima otpora rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa.

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 precizno izmjeriti vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača stupova. Potrebno je ocijeniti koji uzemljivači bi se mogli sanirati, a cijenu sanacije pojedinog uzemljivača treba usporediti s cijenom instalacije odvodnika prenapona.

5. LITERATURA

- [1] V. Milardić, I. Uglešić, A. Xemard: Optimal Line Surge Arresters Installation Using Lightning Location System, International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 7, N. 2, March-April 2012.
- [2] ATPDraw, Windows version 5.6p6, NTNU/SINTEF Norway, 2010.
- [3] I. Uglešić, V. Milardić, M. Mandić, B. Filipović-Grčić, B. Milešević: Primjena odvodnika prenapona na DV 220 kV Pehlin - Plomin, Studija FER, siječanj 2009.g.