

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

Amir Tokić
Univerzitet u Tuzli
Fakultet elektrotehnike Tuzla, BiH
amir.tokic@untz.ba

NESIMETRIČNA IZOLACIJA NA DVOSISTEMSKOM 220 KV DALEKOVODU

SAŽETAK

Udari munje u zaštitno uže ili vrh stupa mogu izazvati povratni preskok na jednom ili više izolatorskih lanaca faznih vodiča. Da li će doći do povratnog preskoka ovisi o amplitudi i strmini struje munje, otporu rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa ili susjednih stupova (pri udaru munje u zaštitno uže u rasponu), broju zaštitnih užadi, vrijednostima faznim naponima u trenutku udara munje u odnosu na polaritet munje, izvedbi izolacije na pogođenom stupu (npr. mehanički i električki pojačana) i vremenskim uvjetima.

Jedna od mogućih zaštitnih mjera je povećanje izolacije dalekovoda – odnosno izvedba nesimetrične izolacije na dvije trojke dalekovoda. Naravno, mora se voditi računa o prostornim ograničenjima i sigurnosnim visinama i udaljenostima, ali je za pretpostaviti da povećanje dužine izolatora od približno 300 mm ne bi trebalo ugroziti sigurnosne visine i udaljenosti. U radu je ukratko prikazan model korišten u simulaciji, objašnjen mehanizam nastanka povratnog preskoka te prikazani rezultati simulacija udara munje u dvosistemski 220 kV dalekovod s nesimetričnom izolacijom. Odgovoreno je na pitanje kada bi takva mjera bila djelotvorna u smanjenju povratnih preskoka na sustavu s povećanom izolacijom a u kojim slučajevima ta mjera ne bi pomogla.

Ključne riječi: Nesimetrična izolacija, 220 kV dalekovod, udar munje, preskok i povratni preskok

UNBALANCED INSULATION OF 220 KV DOUBLE-CIRCUIT TRANSMISSION LINE

SUMMARY

Lightning strokes to the shielding wire or to the top of transmission line tower can produce backflashover on one or more insulation strings. Whether the backflashover will occur, it depends on amplitude and steepness of the lightning current, grounding resistance of tower (or towers in case of lightning stroke to the span), the number of shielding wires, value of phase voltages in the moment of lightning stroke in relation to the lightning polarity, insulation string design on the stroked tower (mechanical or electrical reinforced insulation) and weather condition.

One of the possible protective measure is the reinforced insulation i.e. the design of unbalanced insulation on two systems. Of course, it is necessary to take into account the space limitation and safety heights and distances. It is to be assumed that the increase in the insulation string length of approximate 300 mm should not endanger the safety heights and distances. The brief description of the model used in simulation, an explanation of the backflashover mechanism and the results of lightning stroke simulation to the unbalanced 220 kV double-circuit transmission line is shown in the paper. The question is answered, when such measure will be effective in reducing the number of the backflashover in the system with reinforced insulation and in which cases this measure will not be effective.

Key words: Unbalanced insulation, 220 kV transmission line, lightning stroke, flashover and backflashover.

1. UVOD

Ispadi visokonaponskih dalekovoda su najčešće posljedica atmosferskih pražnjenja, odnosno udara munje u vrh stupa ili zaštitno uže, odnosno izravnog udara manjih struja munje u fazne vodiče. Ispadi VN dalekovoda koji su posljedica atmosferskih pražnjenja se ne mogu jednostavno eliminirati. Ispadi VN dalekovoda zbog pada drveta ili dodira s granama drveća se mogu eliminirati boljim održavanjem trase (prosjeka) dalekovoda.

Zašto dolazi do ispada VN dalekovoda uslijed atmosferskih pražnjenja? Kada se razmatraju 220 kV dalekovodi, inducirani naponi zbog udara munje u blizinu dalekovoda nisu opasni, jer inducirani naponi nemaju toliku amplitudu da bi mogli prouzročiti preskok na izolatorskom lancu. Dakle, uzrok ispada dalekovoda je udar munje u zaštitno uže ili stup, ili izravni udari munja, manjih amplituda, u fazne vodiče. Simulacija udara munje, provedena u studiji [1] je pokazala da oko 8,85% svih udara munje u dalekovod završava pogotkom u fazni vodič. Ostali udari munje završavaju pogotkom u zaštitno uže ili stup dalekovoda. Udari munje u fazni vodič će u najvećem broju slučajeva dovesti do preskoka na izolatorskom lancu pogođene faze, jednog ili više stupova. Da li će doći do preskoka, pri direktnom udaru munje u fazni vodič, u prvom redu zavisi o amplitudi struje munje te o trenutnim vrijednostima faznih napona u trenutku udara u odnosu na polaritet struje munje.

Udari munje u zaštitno uže ili vrh stupa također mogu izazvati preskok na jedan ili više faznih vodiča. Da li će doći do preskoka ovisi o amplitudi i strmini struje munje, otporu rasprostiranja uzemljivača pogođenog stupa ili susjednih stupova (pri udaru munje u zaštitno uže u rasponu), broju zaštitnih užadi, vrijednostima faznim naponima u trenutku udara munje u odnosu na polaritetu munje, izvedbi izolacije na pogođenom stupu (npr. mehanički i električki pojačana) i vremenskim uvjetima.

Iz navedenog, jasne su zaštitne mjere u cilju smanjenja broja povratnih preskoka:

1. Povećanje broja zaštitnih užeta i uzemljenih vodiča - mjera koju je gotovo nemoguće provesti na izgrađenim dalekovodima;
2. Povećanje izolacije dalekovoda - mjera koja se može provesti ali treba zadovoljiti prostorna ograničenja, sigurnosne visine i udaljenosti;
3. Smanjenje otpora rasprostiranja uzemljivača stupova - mjera je opravdana ako se može provesti, što ovisi o lokalnim karakteristikama tla. Npr. ako je neki stup na "živoj" stijeni tada je vrlo teško smanjiti njegov otpor rasprostiranja uzemljivača;
4. Ugradnja odvodnika prenapona na dalekovod (eng. Line Surge Arrester - LSA) - mjera je sve popularnija u svijetu zbog razvoje tehnologije MO odvodnika prenapona s polimernim kućištem [2], koji ne izazivaju značajnija dodatna mehanička naprezanja konstrukcije dalekovodnih stupova a i cijena im je sve pristupačnija.

U radu je objašnjen model korišten pri simulaciji, mehanizam nastanka povratnog preskoka te detaljno razmotrena mjera nesimetrične izolacije na dvosistemsom 220 kV dalekovodu.

2. SIMULACIJA NASTANKA POVRATNOG PRESKOKA

2.1. Model za simulaciju 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]-[4]. Danas se za takve analize obično koristi neka od verzija EMTP programa [5]-[6]. Slijedi skraćeni opis najvažnijih komponenti korištenog modela.

2.1.1. Stupovi

Stupovi dalekovoda su modelirani valnom impedancijom koristeći slijedeći izraz:

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

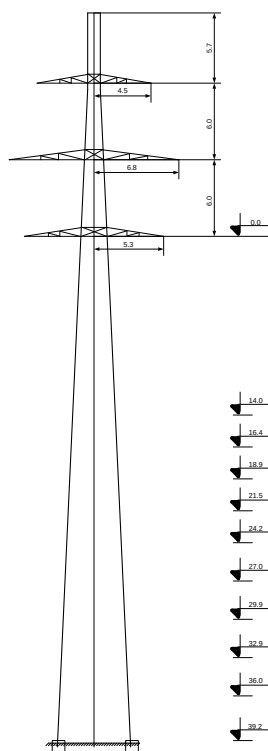
Ekvivalentni radijus stupa R u gornjem izrazu je određen nadomještanjem stupa cilindrom. R je definiran slijedećim izrazom:

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

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],
 H – visina stupa [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).



Slika 1. Nosni stup DV 220 kV

2.1.2. Preskočna karakteristika izolatorskog lanca

Preskočna karakteristika izolatorskog lanca je vremenski ovisna i može se modelirati slijedećim izrazom:

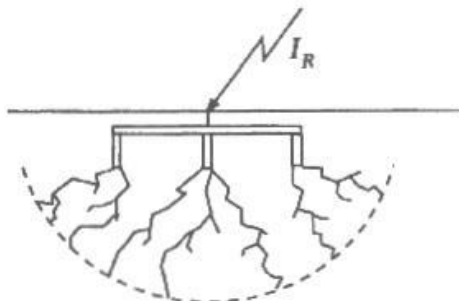
$$\int_{t_0}^{t_f} \left(|v_{gap}(t)| - U_0 \right)^K dt \geq D \quad (3)$$

gdje je: t_0 - vrijeme od kojeg je v_{gap} postao veći od U_0 (kada napon v_{gap} padne ispod U_0 integral se resetira).

Vrijednosti konstanti K , U_0 (kV) i D ovisi o preskočnom razmaku. Za preskočni razmak 1610 mm usvojene su slijedeće vrijednosti konstanti: $K = 1$; $U_0 = 958$ kV; $D = 0,3805718$.

2.1.3. Otpor 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 [7] uzima u obzir efekt ionizacije tla, koja se događa u slučaju velikih amplituda struje munje, koje odvodi uzemljivač stupa, slika 2.



Slika 2. Ionizacija u tlu pri odvođenju velikih struja munje [8]

Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa može se predstaviti kao nelinearni otpor:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)^2}} \quad (4)$$

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:

$$I_g = \frac{\rho \cdot E_0}{2 \cdot \pi \cdot R_o^2} \quad (5)$$

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

2.2. Rezultati simulacije

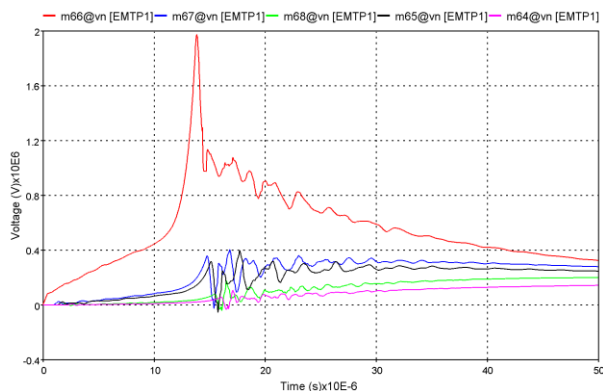
Da li će pri udaru munje u stup DV 220 kV nastupiti povratni preskok, a samim time i kratki spoj ovisi o više parametara. U prvom redu to je tjemena vrijednost struje munje i njena strmina čela, otpor rasprostiranja uzemljivača stupa, preskočni razmak izolatorskih lanaca na pogođenom stupu, amplituda i fazni kut pogonskog napona, atmosferski uvjeti (kiša, snijeg, tlak, temperatura i vlažnost).

Da bi se bolje razumjele prijelazne pojave pri udaru munje u vrh stupa, prvo će se prikazati nekoliko konkretnih oscilograma dobivenih pri EMTP simulaciji.

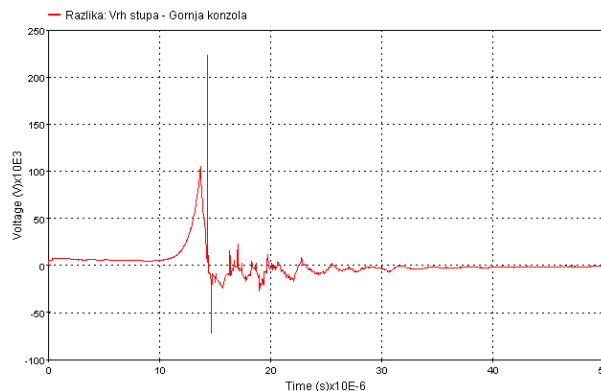
Neka npr. struja munje amplitude 72 kA, vremena trajanja čela 8 μs , maksimalne strmine čela 40,98 kA/ μs i hrpta 161 μs (vrijeme za koje amplituda padne na 50% vrijednosti), pogodi vrh stupa DV 220 kV. Usvojene vrijednosti otpora rasprostiranja uzemljivača svih stupova u simulaciji su 23,25 Ω . Pretpostavljene trenutne vrijednosti faznih napona u trenutku udara munje su, gornja faza (A) -180 kV, srednja faza (B) i donja faza (C) 90 kV.

Slika 3. pokazuje prijelazne napone vrhova pogođenog stupa (crvena krivulja) i po dva susjedna stupa na obje strane. Najveći dio struje munje prolazi pogođenim stupom prema zemlji pa je stoga i njegov prijelazni napon najveći. Slika 4. prikazuje razliku prijelaznih napona vrha pogođenog stupa i gornje

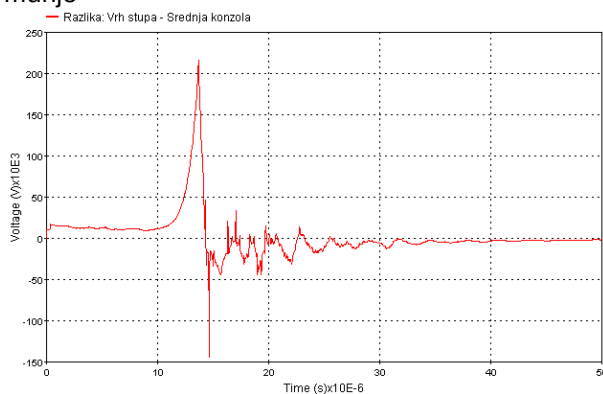
konzole. Kako je između te dvije točke stupa 5,7 m čelično-rešetkaste konstrukcije to nije za očekivati velike razlike prijelaznih napona, ali ipak razlika prijelazni napona vrha stupa i gornje konzole dostiže približno 100 kV (prije nastupa povratnog preskoka). Razlika prijelaznih napona vrha stup i srednje konzole na slici 5. prelazi 200 kV, a vrha stupa i donje konzole na slici 6. prelazi 300 kV. Razlika prijelaznih napona je veća jer je razmak između vrha stupa i ovih konzola 11,7 m odnosno 17,7 m.



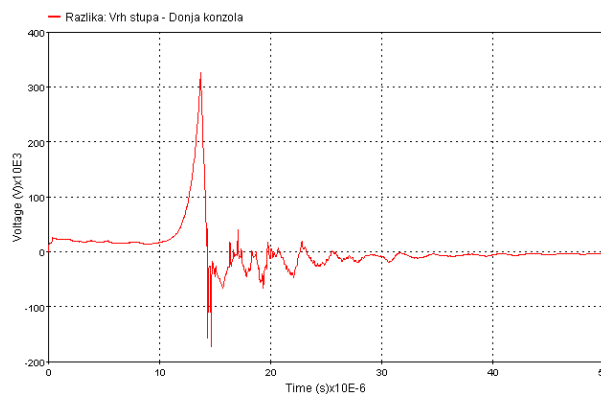
Slika 3. Prijelazni naponi vrhova pogođenog stupa i po dva susjedna stupa na obje strane pri udaru munje



Slika 4. Razlika prijelaznih napona vrha pogođenog stupa i gornje konzole

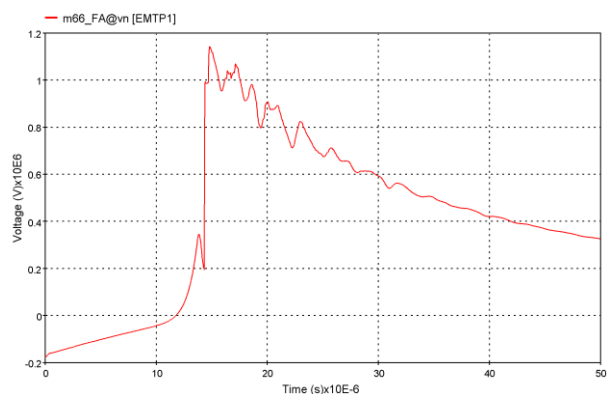


Slika 5. Razlika prijelaznih napona vrha pogođenog stupa i srednje konzole

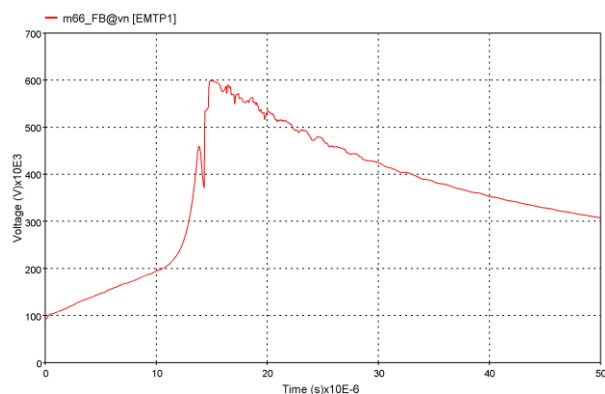


Slika 6. Razlika prijelaznih napona vrha pogođenog stupa i donje konzole

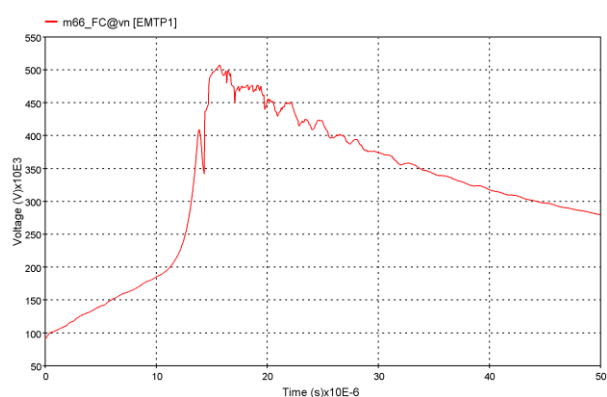
Što je s naponima faznih vodiča pri udaru munje u vrh stupa? Na prvi pogled bi se moglo zaključiti da porast potencijala pogođenog stupa i zaštitnog užeta nema nikakve veze s naponima faznih vodiča (u koliko nije nastupio preskok) jer su međusobno izolirani. Ta konstatacija nije točna zbog postojanja elektromagnetske sprege svih vodiča (fazni vodiči, zaštitno uže i stup). Slika 7. prikazuje prijelazni napon gornjeg vodiča (faza A). Treba podsjetiti da je u trenutku udara munje napon gornjeg vodiča bio -180 kV i on bi se zadržao na toj vrijednosti ukoliko ne bi postojala elektromagnetska sprega. Na slikama 8 i 9. su prikazani prijelazni naponi srednje i donje faze. Ovi fazni naponi u trenutku udara munje imaju vrijednost 90 kV. Kako je pri usvojenom udaru munje prijelazni napon pogođenog stupa i zaštitnog užeta pozitivan, to elektromagnetska sprega "vuče" napone faznih vodiča prema pozitivnim vrijednostima (analogno vrijedi i za negativni udar munje). Npr. u trenutku 13,58 μ s od udara munje naponi svih faznih vodiča na stupu su pozitivni (gornja faza A 265,9 kV, srednja faza B 405,2 kV i donja faza C 362,8 kV). Na slici 10. su prikazani prijelazni naponi gornje konzole (plava krivulja) i gornjeg vodiča (crvena krivulja). U trenutku 14,39 μ s dolazi do preskoka u gornjoj fazi (faza A) te gornja konzola i gornji vodič dolaze na približno isti napon. Na slikama 11. i 12. su prikazani naponi srednje konzole (plava krivulja) i srednjeg vodiča (crvena krivulja) te donje konzole (plava krivulja) i donjeg vodiča (crvena krivulja). Zašto je došlo upravo do preskoka u gornjoj fazi? Iz razloga što je razlika prijelaznih napona gornje konzole i gornjeg vodiča bila najveća, što je stvorilo uvjete za nastanak preskoka upravo u toj fazi u skladu s izrazom (3).



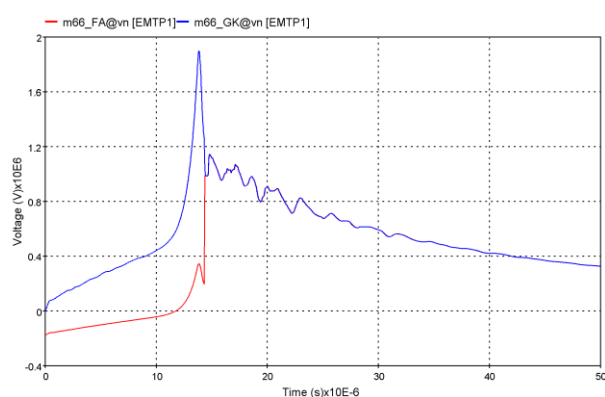
Slika 7. Prijelazni naponi gornjeg vodiča (faza A)



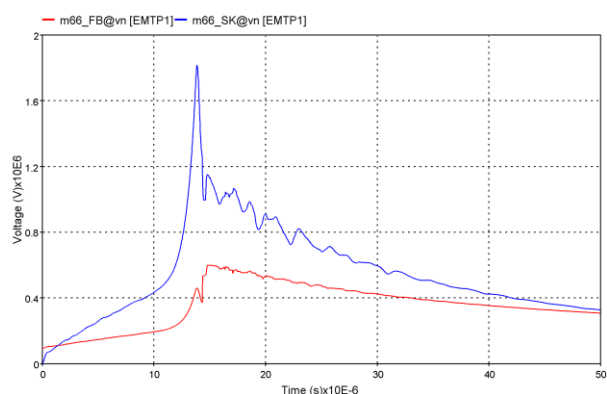
Slika 8. Prijelazni naponi srednjeg vodiča (faza B)



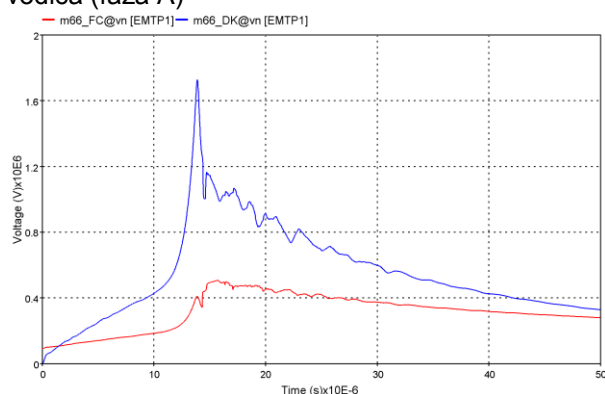
Slika 9. Prijelazni naponi donjeg vodiča (faza C)



Slika 10. Prijelazni naponi gornje konzole i gornjeg vodiča (faza A)



Slika 11. Prijelazni naponi srednje konzole i srednjeg vodiča (faza B)



Slika 12. Prijelazni naponi donje konzole i donjeg vodiča (faza C)

2.2.1. Nesimetrična izolacija na trojkama

Kao što je u uvodu kazano, kako bi se smanjio broj ispada dalekovoda jedna od mogućih mjera je i povećanje izolacije dalekovoda. Naravno, mora se voditi računa o prostornim ograničenjima i sigurnosnim visinama i udaljenostima.

S obzirom na izolaciju tipičnog 220 kV dalekovoda koja se sastoji od 13 ili 15 staklenih članaka jedna od mogućnosti je nesimetrična izolacija na dvije trojke dalekovoda. Time bi se postiglo, da se u slučaju udara munje u vrh stupa ili zaštitno uže spriječi ispad na jednoj trojci a eventualno dozvoli na drugoj. Dakle, na jednoj trojci bi se zadržala postojeća izolacija a na drugoj trojci bi se dodalo još 2 kapasta staklena izolatora po izolatorskom lancu. Na taj način bi se dobilo da npr. na jednom nosivom stupu budu u jednoj trojci 13 a u drugoj 15 kapastih staklenih izolatora. U slučaju električki pojačane izolacije od 15 kapastih staklenih izolatora druga trojka bi bila 17 kapastih staklenih izolatora.

Što to znači za atmosferske prenapone na dalekovodu? Atmosferski prenaponi valnog oblika 1,2/50 μ s, amplitude između 920 kV i 925 kV, mogu prouzročiti preskok preko izolatorskog lanca razmaka između zaštitnih armatura 1610 mm (sastoji se od 13 kapastih staklenih izolatora).

Atmosferski prenaponi valnog oblika 1,2/50 μ s, amplitude između 1090 kV i 1100 kV, mogu prouzročiti preskok preko izolatorskog lanca razmaka između zaštitnih armatura 1910 mm (sastoji se od 15 kapastih staklenih izolatora). Upravo gornji slučaj (13 i 15 kapastih staklenih izolatora) je razmatran u simulacijama koje slijede.

U tablici 1. su prikazani rezultati preko 600 simulacija, za različite otpore rasprostiranja uzemljivača stupa, različite vrijednosti faznog kuta napona te vrijednosti struja munje koje će biti premašen u 50 %, 20 %, 10 %, 5 % i 2 % slučajeva. Zelena boja prikazuje kombinacije u kojima neće nastupiti povratni preskok u trojci s dva kapasta staklena izolatora više, niti u jednoj fazi, niti za bilo koji fazni kut pogonskog napona (preskok može nastupiti u drugoj trojci). Siva boja označava ovisnost nastanka povratnog preskoka, u trojci s dva kapasta staklena izolatora više, o faznom kutu napona. Crvena boja označava da će nastupiti povratni preskok, barem u jednoj fazi trojke dalekovoda s dva staklena kapasta izolatora više, neovisno o faznom kutu napona u trenutku udara.

Analizirajući tablicu 1. može se zaključiti da preskok u trojci s dva kapasta izolatora više može nastupiti, ali samo za struje munje koje će biti premašene u približno 10 % slučajeva i u kombinaciji s nešto višim otporima rasprostiranja uzemljivača stupa.

Zaključno se može kazati da bi instalacija dodatna 2 kapasta staklena izolatora u jednu trojku dalekovoda značajno smanjila broj ispada te trojke dalekovoda i značajno doprinijela očuvanju te trojke dalekovoda pri udaru munje u vrh stupa ili zaštitno uže.

Izravni udari munje u trojku s 2 dodatna staklena izolatora (greška štice) mogu prouzročiti ispad te trojke ali bi se broj takvih ispada smanjio zbog dužeg izolacionog razmaka. Za izolator sastavljen od 15 kapastih staklenih izolatora razmaka zaštitnih armatura 1910 mm preskok bi nastupio pri izravnom udaru munje amplitude veće od 6,5-7 kA u fazni vodič.

Tablica 1. Ovisnost nastanka povratnog preskoka o struji munje i otporu rasprostiranja uzemljivača stupa

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

4. ZAKLJUČAK

U radu je ukratko objašnjen model korišten pri EMTP simulaciji, mehanizam nastanka povratnog preskoka te detaljno razmotrena mjera nesimetrične izolacije na dvosistemskom 220 kV dalekovodu.

S obzirom na izolaciju tipičnog dvosistemskog 220 kV dalekovoda koja se sastoji od 13 ili 15 staklenih članaka, jedna od mogućnosti za smanjenje broja povratnih preskoka je nesimetrična izolacija na dvije trojke dalekovoda. Time bi se postiglo, da se u slučaju udara munje u vrh stupa ili zaštitno uže, spriječi

ispad na jednoj trojci a eventualno dozvoli na drugoj čime bi se očuvao prijenos električne energije dalekovodom. Razmatrana je mjera da se na jednoj trojci zadrži postojeća izolacija a na drugoj trojci se dodaju još 2 kapasta staklena izolatora po izolatorskom lancu. Na taj način bi se dobilo da na jednom nosivom stupu budu u jednoj trojci 13 a u drugoj 15 kapastih staklenih izolatora. U slučaju električki pojačane izolacije od 15 kapastih staklenih izolatora druga trojka bi bila 17 kapastih staklenih izolatora.

Rezultati simulacije pokazuju da bi instalacija dodatna 2 kapasta staklena izolatora u jednu trojku dalekovoda značajno smanjila broj ispada te trojke dalekovoda i značajno doprinijela očuvanju te trojke dalekovoda pri udaru munje u vrh stupa ili zaštitno uže.

Izravni udari munje u trojku s 2 dodatna staklena izolatora (greška štíćenja) mogu prouzročiti ispad te trojke ali bi se broj takvih ispada smanjio zbog dužeg izolacionog razmaka. Za izolator sastavljen od 15 kapastih staklenih izolatora razmaka zaštitnih armatura 1910 mm preskok bi nastupio pri izravnom udaru munje amplitude veće 6,5-7 kA u fazni vodič.

5. LITERATURA

- [1] I. Uglešić, V. Milardić, M. Puharić, B. Filipović-Grčić, B. Franc, "Analiza prenaponske zaštite dvosistemskog 220 kV voda primjenom odvodnika prenapona, izbor, način ugradnje i raspored odvodnika prenapona za DV 2x220 kV Plomin – Pehlin / Plomin – Melina, Studija, FER Zagreb, travanj 2016.
- [2] ABB, High Voltage Surge Arresters, Buyer's Guide, Document ID 1HSM 9543 12-00en, Edition 12, 2016-11.
- [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] Zhen Li, Zhanqing Yu, Xi Wang, Jinliang He „A Design of Unbalanced Insulation to Improve the Lightning Performance of Multi-circuit Transmission Lines“, 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria September 2-7, 2012.
- [5] EMTPWorks Version 2.1.0 (www.emtp-software.com/Software_for_power_systems_transients)
- [6] P. Sarajčev, J. Vasilj, P. Sereči „Estimating BFOR on HV Transmission Lines Using EMTP and Curve of Limiting Parameters, International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia June 15-18, 2015.
- [7] IEC 60071-4: Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks, 2004.
- [8] Andrew R. Hileman "Insulation Coordination for Power Systems", Marcel Dekker, Inc, 1999.

Zahvala:

Ovaj rad je djelomično sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost u okviru projekta DAHVAT.