

Primena programskog alata ATP/EMTP u analizi atmosferskih prenapona

¹Jovan Mrvić, ¹Ranko Jasika, ¹Petar Vukelja, ²Goran Lepović, ¹Ninoslav Simić

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, , Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

²Siemens d.o.o. Beograd, Omladinskih brigada 21, 11070 Beograd, Srbija
jmrvic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je demonstriran postupak procene rizika kvara izolacije usled atmosferskih prenapona. Simulacije su sprovedene primenom programskog alata ATP/EMTP, pri čemu su prikazane prednosti primene Monte Karlo metode u statističkoj analizi koordinacije izolacije. Detaljno je opisan postupak modelovanja svih elemenata značajnih za analizu, u okviru čega su predstavljene mogućnosti programskog jezika MODELS koji omogućava formiranje i implementaciju novih složenih komponenti u sklopu programskog alata ATP.

Ključne reči: atmosferski prenaponi, ATP/EMTP, rizik kvara izolacije, Monte Karlo simulacija, koordinacija izolacije, MTBF, metoda progresivnog lidera

1. Uvod

Proračun atmosferskih prenapona ima značajnu ulogu pri projektovanju elektroenergetskih sistema (EES) i postrojenja. Pri direktnim atmosferskim pražnjenjima u elemente elektroenergetskih sistema mogu se javiti vrlo velike struje koje uzrokuju pojavu visokih prenapona, što često može izazvati privremene poremećaje ili prekide napajanja u EES.

Atmosferski prenaponi nastaju kao posledica direktnog udara groma u nadzemni vod ili indukcije pri udaru munje u obližnje tlo (indirektni udar). U radu su razmatrana samo atmosferska pražnjenja u nadzemne vodove koja se prema mestu udara mogu podeliti na:

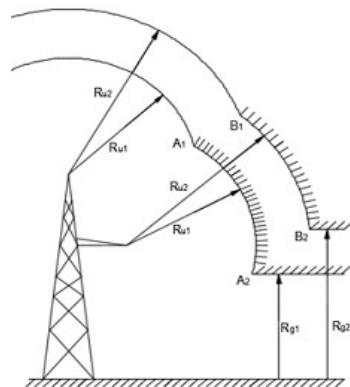
- udari groma u zaštitno uže ili stub,
- udari groma direktno u fazne provodnike.

Pri atmosferskim pražnjenjima u vrh stuba ili zaštitno uže, u slučaju velikih amplituda struja groma, može se dogoditi da potencijal konzole stuba u odnosu

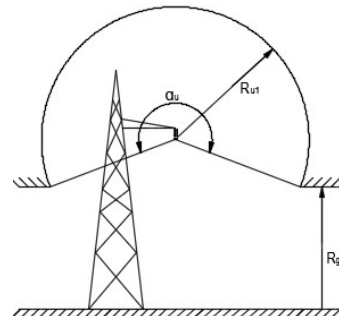
na fazni provodnik poraste iznad podnosivog napona izolacije. U tom slučaju dolazi do pojave preskoka sa konzole stuba na fazni provodnik (povratni preskok). Atmosferska pražnjenja najvećih amplituda najčešće pogađaju zaštitno uže dalekovoda, koje štiti fazne provodnike. Međutim, ovakva zaštita nikad nije potpuna, i uvek može doći do udara groma direktno u fazni provodnik. Amplitude struje groma koje mogu udariti direktno u fazni provodnik zavise od geometrijskih dimenzija dalekovodnog stuba i određuju se iz elektrogeometrijskog modela (EGM) [11, 5]. Elektrogeometrijskim modelom se određuje verovatnoća raspodela amplituda struja groma koje udaraju direktno u fazni provodnik, mimo zaštitnog užeta. Osnovna pretpostavka kod EGM-a je da je dužina poslednjeg skoka (udarno rastojanje R_u) skokovitog lidera srazmerna amplitudi struje groma (I), pri čemu se najčešće koristi sledeća relacija [11, 5]:

$$R_u = k \cdot I^n \quad (1)$$

gde su k i n empirijske konstante. U literaturi se vrednosti konstante k kreću u opsegu od 6 do 10, a za n u opsegu od 0.65 do 0.8 [5, 11, 1]. U radu su usvojene vrednosti $k = 10$ i $n = 0.65$ (Love's EGM [5, 11]).



Slika 1. Geometrija stuba za objašnjenje EGM



Slika 2. Izložena površina faznog provodnika bez zaštitnog užeta

Za udarno rastojanje od glave skokovitog lidera do zemlje (R_g) obično se usvaja nešto manja vrednost u odnosu na udarno rastojanje prema faznim provodnicima ili zaštitnim užadima. Vrednost koeficijenta korekcije udarnog rastojanja prema zemlji kreće se u opsegu od 0.64 do 1, u radu je usvojena vrednost koeficijenta 1 (Love's EGM [5, 11]).

Na Slici 1 prikazana je dispozicija dalekovodnog stuba za koji se određuje zona zaštite faznog provodnika. Oznake na slici imaju sledeće značenje:

- R_{u1} - udarno rastojanje do faznog provodnika odnosno do zaštitnog užeta za slučaj amplitude struje groma I_1 ,

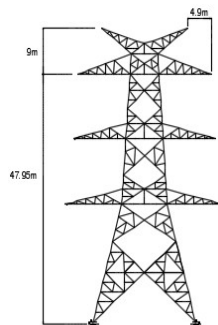
- R_{u2} - udarno rastojanje do faznog provodnika odnosno do zaštitnog užeta za slučaj amplitude struje groma I_2 , pri čemu je $I_2 > I_1$,
- R_{g1} - udarno rastojanje do zemlje za slučaj amplitude struje groma I_1 ,
- R_{g2} - udarno rastojanje do zemlje za slučaj amplitude struje groma I_2 , pri čemu je $I_2 > I_1$.

Šrafirana površina koju zauzima luk A_1A_2 , odnosno B_1B_2 , naziva se izložena površina faznog provodnika za amplitudu groma I_1 , odnosno I_2 . Prema EGM-u svako atmosfersko pražnjenje čija je očekivana amplituda struje I_1 (I_2), a čija se glava skokovitog lidera nađe u kružnom isečku koji formira fazni provodnik i luk A_1A_2 (B_1B_2) uvek dovodi do pražnjenja u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta.

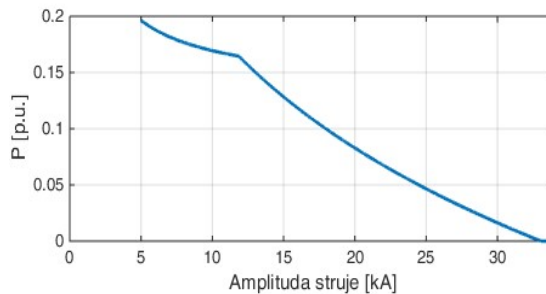
Verovatnoća prodora groma amplitude I_1 mimo zaštitnog užeta (P) definiše se kao odnos izložene površine faznog provodnika u prisustvu zaštitnog užeta (ugao koji određuju fazni provodnik i luk A_1A_2 na Slici 1) i izložene površine faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta (ugao označen sa α_u na Slici 2) [1]:

$$P(I) = \frac{a_1(I)}{a_u(I)} \quad (2)$$

Na Slici 4 prikazana je zavisnost verovatnoće prodora groma mimo zaštitnog užeta u funkciji amplitude struje groma, za stub koji je analiziran u radu i čija je skica sa potrebnim dimenzijama data na Slici 3.



Slika 3. Skica analiziranog stuba



Slika 4. Verovatnoća prodora groma mimo zaštitnog užeta

2. Modelovanje elemenata sistema

Tačnost simulacije prelaznih procesa u visokonaponskim postrojenjima usled atmosferskih pražnjenja zavisi od adekvatnosti načina na koji se modeluju elementi vodova i postrojenja. U daljem tekstu je opisan postupak modelovanja najznačajnijih elemenata za potrebe formiranja odgovarajućeg simulacionog modela.

2.1 Model faznog provodnika i zaštitnog užeta

Za analizu atmosferskih prenapona nadzemni vod po kome dolazi prenaponski talas najčešće se modeluje kao monofazan, pri čemu se posmatra samo prvih nekoliko raspona (2 do 4), na kojima atmosferska pražnjenja mogu imati uticaj na ugrožavanje izolacije elemenata postrojenja. Pri atmosferskom pražnjenju prenaponski talas se najčešće prostire samo po jednom provodniku dok se na preostalim provodnicima indukuje napon koji je znatno manjeg intenziteta i potpuno je bezopasan za izolaciju. Do prostiranja talasa po dva ili više provodnika dolazi samo pri pojavi povratnih preskoka (na dva ili više provodnika) ili pri pojavi indukovanih prenapona. U ovakvim slučajevima pojave su skoro identične na svim provodnicima tako da se vod može posmatrati monofazno i dovoljno ga je predstaviti faznim provodnikom i zaštitnim užetom (ukoliko ono postoji). Programski paket ATP/EMTP omogućava primenu brojnih modela dalekovoda (frekvencijski zavisni ili nezavisni modeli, modeli sa raspodeljenim ili koncentrisanim parametrima itd.). U radu je za analizu prelaznih procesa korišćen model voda sa raspodeljenim parametrima, koji je veoma pogodan za primenu jer zahteva samo poznavanje talasne impedanse voda kao i brzinu prostiranja talasa po vodu (pretpostavljeno je da je brzina prostiranja talasa jednaka brzini prostiranja svetlosti, 300 km/ms). Impedansa faznog (i zaštitnog) provodnika može se odrediti prema sledećoj relaciji:

$$Z = 60 \ln \left(\frac{2H_{ef}}{R_u} \right) \quad (3)$$

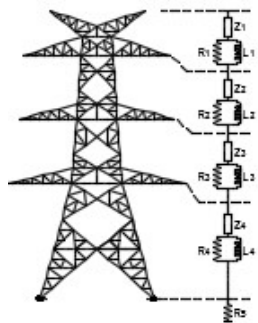
gde su:

- H_{ef} - efektivna visina provodnika iznad zemlje, koju određuju visina vešanja provodnika na stubu (H) i ugib provodnika na sredini raspona (f), $H_{ef} = H - 2/3f$;
- R_u – poluprečnik užeta, kod vodova sa provodnicima u snopu računa se ekvivalentni poluprečnik prema izrazu $R_{ekv} = \sqrt[n]{n \cdot R_1 \cdot R_s^{n-1}}$, gde je n broj provodnika u snopu, R_1 – poluprečnik jednog provodnika, R_s – poluprečnik snopa.

2.2 Model dalekovodnog stuba

Dalekovodni stub se najčešće modeluje kao kratak vod konstantne karakteristične impedanse na čijem kraju se nalazi otpornost uzemljivača dalekovodnog stuba (Slika 5). U literaturi se mogu pronaći brojni empirijski izrazi za karakteristične impedanse stubova, u radu je primenjen izraz (4) koji daje vrednost impedanse za svaki segment stuba [12], pri čemu je na kraju svakog segmenta dodato paralelno R-L kolo kojima se modeluje prigušenje i distorzija pri prostiranju talasa kroz stub (jednačine 6 i 7) [12].

$$Z_i = 60 \ln \left(\cot \left\{ 0.5 \tan^{-1} \left(\frac{r_i}{h_i} \right) \right\} \right) \quad (4)$$



Slika 5. Model dalekovodnog stuba

$$\Delta R_i = \begin{cases} \frac{2Z_i}{(l_1+l_2+l_3)} \ln\left(\frac{1}{a_i}\right) & (i = 1,2,3) \\ \frac{2Z_4}{l_4} \ln\left(\frac{1}{a_4}\right) & (i = 4) \end{cases} \quad (5)$$

$$R_i = \Delta R_i \cdot l_i \quad (6)$$

$$L_i = \frac{2H}{v} R_i \quad (7)$$

Izrazi za talasne impedanse segmenata stuba i parametre R i L

2.3 Model uzemljivača dalekovodnog stuba

Otpornost uzemljivača dalekovodnog stuba ima dominantnu ulogu na pojavu preskoka, zbog čega ga je veoma važno što vernije modelovati. Pri atmosferskim pražnjenjima velikog intenziteta usled pojave jakog električnog polja dolazi do jonizacije zemljišta. Ovaj efekat ima pozitivan uticaj jer utiče na smanjenje udarne otpornosti uzemljivača. Zbog pojave jonizacije tla otpor uzemljivača ima nelinearnu karakteristiku, čija se zavisnost od amplitude struje groma može predstaviti sledećim izrazom [14]:

$$R_i = R_s / \sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)^2} \quad (8)$$

gde je R_s - otpor uzemljenja stuba pri 50 Hz, I – amplituda struje groma koju odvodi uzemljivač stuba (u kA), I_g – granična struja groma (u kA), koja se računa prema izrazu: $I_g = \frac{\rho E_0}{2\pi R_s^2}$, gde su ρ – specifična električna otpornost tla i E_0 – jačina električnog polja pri kojoj dolazi do jonizacije zemljišta (400 kV/m).

2.4 Model preskoka na izolaciji voda

Na osnovu velikog broja ispitivanja uticaja talasnog oblika prenapona na vrednosti preskočnih napona u vazduhu razvijene su različite metode modelovanja preskoka na vazdušnoj izolaciji u slučaju delovanja atmosferskih prenapona. Danas se, za modelovanje preskoka na vazdušnoj izolaciji najčešće koristi neka od sledeće tri metode [14]:

- 1) Volt-sekundna (v-t) karakteristika izolacije,
- 2) Metoda destruktivnog efekta,
- 3) Metoda progresivnog lidera.

Prva metoda je najjednostavnija i najčešće korišćena. Glavni nedostatak ove metode je u tome što je v-t karakteristika dobijena pomoću standardnog naponskog talasa 1.2/50 $\mu s / \mu s$, tako da je metoda pogodna samo za proračun preskočnih napona pri delovanju prenapona standardnog oblika. Druge dve

metode ne zavise od oblika prenaponskih talasa, ali se metoda destruktivnog efekta najčešće koristi za izolacione razmake manje od 1.2m zbog čega je u ovom radu preskok na izolaciji voda modelovan metodom progresivnog lidera koja je implementirana u programski paket ATP/EMTP primenom programskog jezika MODELS.

Metoda progresivnog lidera zasnovana je na modelovanju stvarnih fizičkih procesa u međuelektrodnom prostoru za vreme delovanja impulsnih prenaponskih talasa. Brzina razvoja lidera u međuelektrodnom prostoru može se modelovati prema izrazu [14]:

$$v(t) = \frac{dL(t)}{dt} = K \cdot D \cdot \left[\frac{e(t)}{D - L(t)} - E_o \right] \quad (9)$$

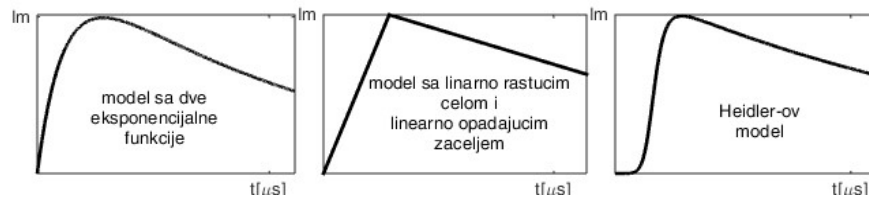
gde je:

- D – dužina izolatora
- L – dužina lidera
- e – trenutna vrednost napona na izolatoru
- E_o – kritična jačina električnog polja
- K – konstanta

Pri proračunu se na osnovu izraza (9) u svakom koraku računa brzina razvoja lidera, na osnovu čega se određuje dužina lidera $L(t)$. Do preskoka dolazi kada preostali nepremošćeni deo između elektroda, $D - L(t)$, postane jednak (ili manji) od nule.

2.5 Modelovanje atmosferskog pražnjenja

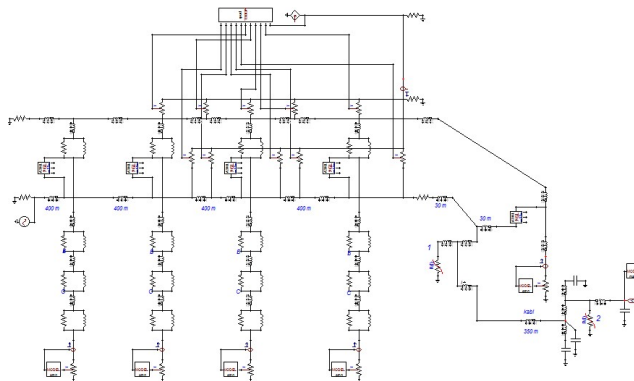
Pri proračunu prenapona, atmosfersko pražnjenje se modeluje preko strujnog talasa koji nailazi po kanalu groma koji se predstavlja vodom konstantne karakteristične impedanse. Za vrednosti karakteristične impedanse kanala groma najčešće se usvaja 100 – 500 Ω , pri velikim amplitudama struje groma, dok za manje amplitude ona može imati veću vrednost. Programski alat ATP/EMTP omogućava izbor različitih talasnih oblika struje atmosferskog pražnjenja: model predstavljen sa dve eksponencijalne funkcije, model linearnog čela i konstantnog začelja, model linearnog čela i linearnog začelja, Heidler-ov model, CIGRE model ili u krajnjem slučaju model opisan proizvoljnom funkcijom. Na slici 6 prikazani su tipični talasni oblici struja atmosferskih pražnjenja za neke od najčešće korišćenih modela strujnih talasa koji se mogu koristiti u ATP/EMTP-u. Pri proračunu atmosferskih prenapona slični rezultati se dobijaju primenom talasa linearnog ili eksponencijalno rastućeg čela. S obzirom da začelje najčešće nema bitnu ulogu na pojavu prenapona, može se izabrati strujni talas linearno rastućeg čela koji je pri statističkoj analizi najpovoljniji jer zahteva poznavanje samo strmine i amplitude struje groma, koji i imaju dominantan uticaj na rezultate proračuna rizika kvara izolacije. U radu je korišćen talasni oblik struje groma sa linearno rastućim čelom i linearno opadajućim začeljem.



Slika 6. Tipični oblici srujnih talasa za različite modele

3. Rezultati simulacije

Postupak proračuna atmosferskih prenapona ilustrovan je na 400 kV- nom razvodnom postrojenju koje je izvedeno sa dvostrukim sistemom sabirnica i obuhvata četiri transformatorska polja, dva dalekovodna polja sa kablovskim uvodima i jedno spojno polje. Sa aspekta atmosferskih prenapona najkritičnije je uklopno stanje kada je u pogonu samo jedno dalekovodno i jedno transformatorsko polje. Na slici 7 data je zamenska šema pomenute konfiguracije koja je formirana primenom programa ATP/EMTP.



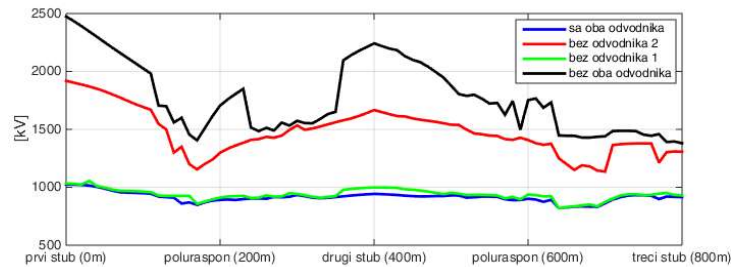
Slika 7. Simulacioni model za proračun atmosferskih prenapona

Postupak koordinacije izolacije podrazumeva izbor izolacione čvrstoće opreme u skladu sa naponima koji se mogu javiti u mreži u kojoj je oprema ugrađena, uzimajući u obzir pogonske uslove i karakteristike raspoloživih uređaja za zaštitu od prenapona. Pri proceni ugroženosti izolacije najčešće se primenjuju dva oprečna pristupa: klasični (deterministički) i statistički.

3.1 Rezultati determinističkog pristupa

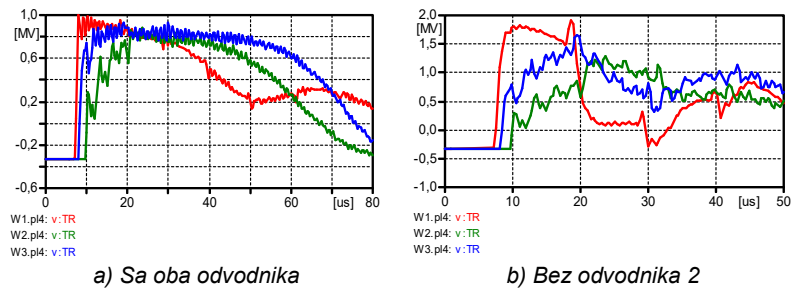
Deterministički pristup podrazumeva proračun atmosferskih prenapona pod najnepovoljnijim uslovima sa velikim amplitudama struje groma koje mogu biti prevaziđene sa malom verovatnoćom. Ovakav pristup je pogodan za analizu osetljivosti kojom se brzo i jednostavno može proceniti uticaj pojedinih

parametara i pretpostavki na dobijeni rizik. Na Slici 8 prikazane su maksimalne vrednosti napona na transformatoru koje se javljaju pri udarima groma u zaštitno uže i vrh stuba duž prva dva raspona. Proračun je urađen za atmosfersko pražnjenje čiji su amplituda i strmina struje 121 kA i 43 kA/μs (koje prema Bergerovoj raspodeli mogu biti prevaziđene sa verovatnoćom manjom od 2 %). Posmatrana su četiri slučaja, kombinacije sa i bez odvodnika prenapona (na slici 7 označeni sa 1 i 2).

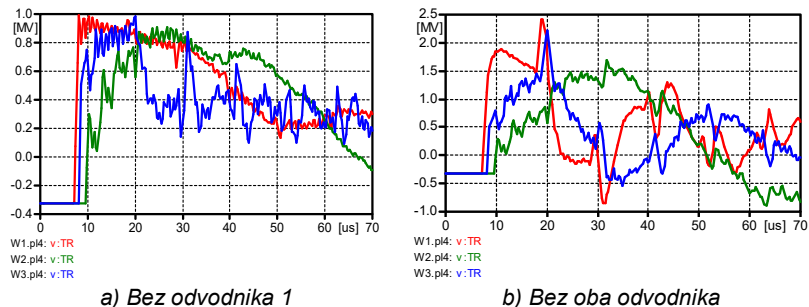


Slika 8. Maksimalne vrednosti napona na transformatoru

Kao što je očekivano, sa slike 8 može se uočiti da su prenaponi veći pri atmosferskim pražnjenjima u vrh stuba nego duž raspona. Najveće vrednosti prenapona javljaju se pri udaru u prvi stub. Na slikama 9 i 10 prikazani su talasni oblici napona na transformatoru za sve četiri kombinacije postavljanja odvodnika prenapona, pri udaru struje *groma* 121kA, 43kA/μs u prvi stub, prvi poluraspon i drugi stub.

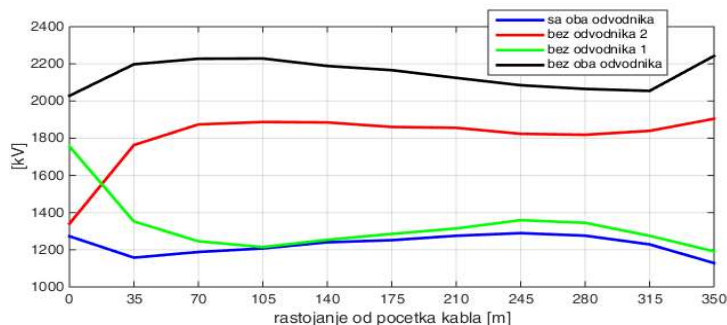


Slika 9. Talasni oblici napona na transformatoru pri udaru struje groma 121kA, 43kA/μs u: prvi stub (crvene krive), prvi poluraspon (zelene krive) i drugi stub (plave krive)



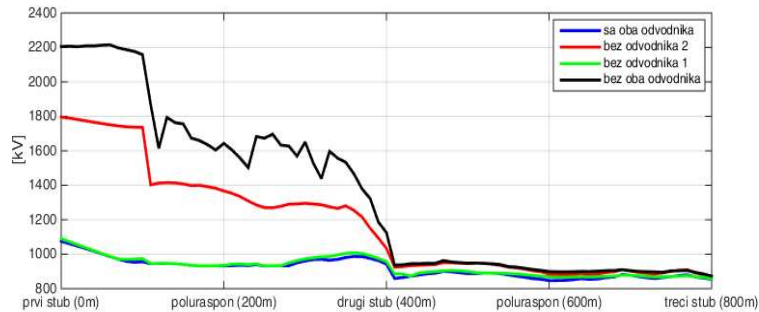
Slika 10. Talasni oblici napona na transformatoru pri udaru struje groma 121kA, 43kA/μs u: prvi stub (crvene krive), prvi poluraspon (zelene krive) i drugi stub (plave krive)

Sa slike 8 može se uočiti da je za efikasnu zaštitu transformatora dovoljan samo odvodnik prenapona 2 (odvodnik ispred transformatora). S druge strane, odvodnik prenapona 1 koji je znatno udaljen od transformatora (300 m), ima znatno manji uticaj na ograničenje prenapona na transformatoru, i ne bi bio dovoljna zaštita transformatora. Da bi se proverio uticaj odvodnika na prenaponsku zaštitu kabla izvršen je proračun maksimalnih vrednosti napona duž kabla pri atmosferskom pražnjenju u prvi stub, rezultati su prikazani na slici 11. Sa slike se može uočiti da odvodnik 2 ima dominantnu ulogu i na zaštitu kabla, s tim što je kabl potpuno zaštićen samo u prisustvu oba odvodnika.



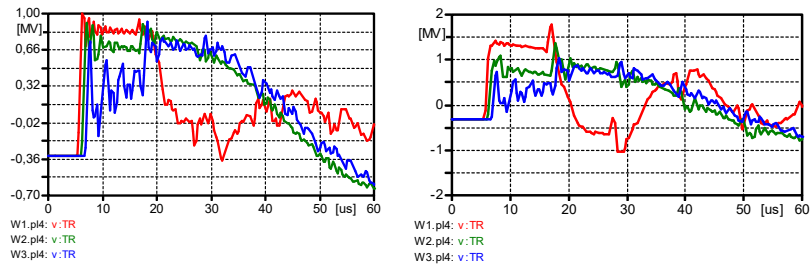
Slika 11. Maksimalne vrednosti napona duž kabla

Osim pražnjenja u stub ili zaštitno uže, moguća su i atmosferska pražnjenja mimo zaštitnog užeta direktno u fazni provodnik. Prema slici 4 atmosfersko pražnjenje sa amplitudom od 33 kA može udariti u fazni provodnik sa verovatnoćom od samo 0.1%, i u ovom slučaju je pretpostavljena strmina struje od 43 kA/μs. Na slici 9 prikazane su maksimalne vrednosti napona na transformatoru za slučaj direktnog udara groma amplitude struje 33 kA i strmine 43 kA/μs, u fazni provodnik duž prva dva raspona za sve četiri kombinacije.



Slika 12. Maksimalne vrednosti napona na transformatoru

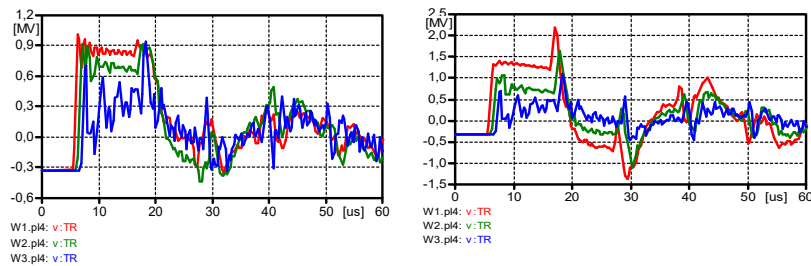
Sa slike 12 može se uočiti da udari groma dalji od drugog stuba stvaraju jako male prenapone, dok je za udare u prvi raspon transformator efikasno zaštićen samo ukoliko je prisutan odvodnik prenapona 2. Na slici 13 i 14 prikazani su talasni oblici napona na transformatoru za slučaj atmosferskih pražnjenja 33 kA, 43 kA/μs u fazni provodnik: na prvom stubu, prvom polurasponu i drugom stubu.



a) Sa oba odvodnika

b) Bez odvodnika 2

Slika 13. Talasni oblici napona na transformatoru pri udaru struje groma 33kA, 43kA/μs u fazni provodnik na pozicijama: prvog stuba (crvene krive), prvog poluraspona (zelene krive) i drugog stuba (plave krive)

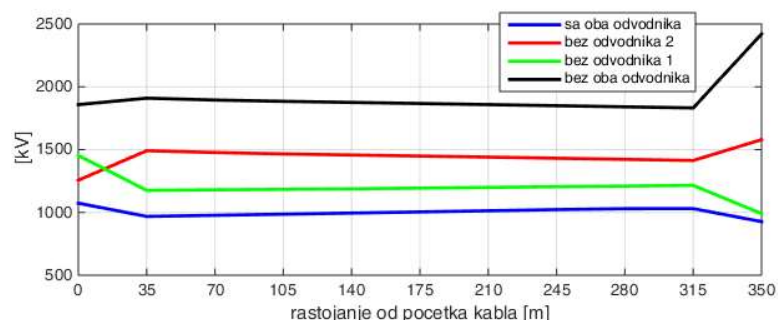


a) Bez odvodnika 1

b) Bez odvodnika

Slika 14. Talasni oblici napona na transformatoru pri udaru struje groma 33kA, 43kA/μs u fazni provodnik na pozicijama: prvog stuba (crvene krive), prvog poluraspona (zelene krive) i drugog stuba (plave krive)

U ovom slučaju odvodnik 1, takođe nema značajni uticaj na zaštitu transformatora od prenapona, ali ima uticaj na zaštitu kabla. Na slici 15 date su maksimalne vrednosti napona duž kabla pri direktnom pražnjenju u fazni provodnik na početku prvog raspona. Sa slike se može uočiti da je kabl efikasno zaštićen samo ako su prisutna oba odvodnika prenapona.



Slika 15. Maksimalne vrednosti napona duž kabla

3.2 Rezultati statističkog pristupa

Statističkim postupkom koordinacije izolacije može se proceniti srednji broj godina bez kvara izolacije MTBF (Mean Time Between Failures) i uporediti sa tehnički dozvoljenim brojem godina bez kvara. Za statističku analizu atmosferskih prenapona razvijeno je više metoda, koje uvažavaju zakone raspodele amplitude i strmine struje groma. Za praktičnu primenu pogodna je metoda krive opasnih parametara groma, kod koje se rizik kvara određuje integraljenjem funkcije gustine raspodele amplitude i strmine struje groma u oblasti iznad krive opasnih parametara groma [13, 1]. Druga često korišćena metoda za statističku analizu atmosferskih prenapona je Monte Karlo metoda, koja se primenjuje kada nisu egzaktno poznati svi ulazni parametri ali su poznate funkcije raspodela prema kojima se parametri menjaju, kao što je ovde slučaj. Na taj način može se uvažiti uticaja svih slučajnih parametara koji imaju značajnu ulogu u analizi atmosferskih prenapona na ugrožavanje izolacije, čime se simuliraju uslovi slični onima koji postoje u realnim uslovima eksploatacije. U ovom radu je predstavljena Monte Karlo metoda.

Primenom Monte Karlo simulacije uvaženi su sledeći slučajni parametri značajni za procenu rizika kvara izolacije:

- **amplituda i strmina struje groma** su parametri koji imaju najveći uticaj na pojavu prenapona i ugrožavanje izolacije. Za praktičnu primenu veoma je pogodna dvodimenzionalna gustina raspodela amplitude i strmina struja groma, koja ima sledeći oblik [6]:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (10)$$

oznake u prethodnom izrazu imaju sledeće značenje:

$$x = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_{sr}}\right)}{\sigma_{lnI}} \quad i \quad y = \frac{\ln\left(\frac{S}{S_{sr}}\right)}{\sigma_{lnS}} \quad (11)$$

gde su:

- I – slučajna amplituda struje groma
- I_{sr} – srednja vrednost amplitude struje groma
- S – strmina linearizovanog čela struje groma
- S_{sr} – srednja vrednost strmine linearizovanog čela struje groma
- σ_{lnI} – standardno odstupanje logaritma struje groma
- σ_{lnS} – standardno odstupanje logaritma strmine čela struje groma
- ρ – koeficijent korelacije izmedju amplitude i strmine struje groma

U analizi atmosferskih prenapona primenom Monte Karlo simulacije može se uvažiti i uticaj pojavljivanja pozitivnih i negativnih udara, s tim što je udeo pozitivnih udara oko 10% ukupnog broja atmosferskih pražnjenja. Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma za pozitivne i negativne udare, definisane izrazom 10, date su tabeli 1.

Tabela 1. Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma

Parametar	$I_{sr} (kA)$	$S_{sr} (kA/\mu s)$	σ_{lnI}	σ_{lnS}	ρ
Negativni udari	30	14	0.68	0.55	0.38
Pozitivni udari	35	2.4	1.24	1.54	0.49

- **trenutna vrednost radnog napona, naročito** kod elektroenergetskih objekata visokih napona kada su prenaponi atmosferskog porekla uporedivi sa radnim naponima. Kako se udar groma može dogoditi u bilo kom trenutku periode radnog napona može se smatrati da je fazni ugao ravnomerno raspodeljena slučajna veličina u opsegu $[0, 2\pi]$;

- **otpornost rasprostiranja uzemljivača dalekovodnog stuba**, kao što je već rečeno na pojavu povratnog preskoka dominantan uticaj ima otpor uzemljivača dalekovodnog stuba čija vrednost najčešće nije poznata. Za vrednost otpora se može smatrati da je ravnomerno raspoređena slučajna veličina iz pretpostavljenog opsega;

- **mesto udara groma**, takođe ima **značajnu** ulogu na vrednosti prenapona usled atmosferskih pražnjenja. U realnim uslovima mesto udara groma je slučajna veličina sa ravnomerno raspoređenom verovatnoćom duž dalekovoda. Mesto udara je najčešće dovoljno varirati duž prva dva raspona gledano od postrojenja. Pri tome je potrebno uvažiti mogućnost pražnjenja u vrh stuba, zaštitno uže ili u fazni provodnik. Postupak određivanje verovatnoće prodora groma mimo zaštitnog užeta već je objašnjen, dok se za verovatnoću pražnjenja u vrh stuba može uvažiti uvećanje u odnosu na pražnjenja u zaštitno uže.

Razorno pražnjenje izolacije zavisi od karakteristika napona kome je izolacija izložena i od fizičkih karakteristika same izolacije. Eksperimentima je utvrđeno da funkcija verovatnoće razornog pražnjenja jedinične izolacije $P_n(U)$, prvenstveno zavisi od amplitude napona i da se može predstaviti funkcijom normalne raspodele, naročito u granicama $U_{50} - 3\sigma$, $U_{50} + 3\sigma$ [2]:

$$P_n(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-U_{50})^2}{2\sigma^2}} dU \quad (12)$$

gde je:

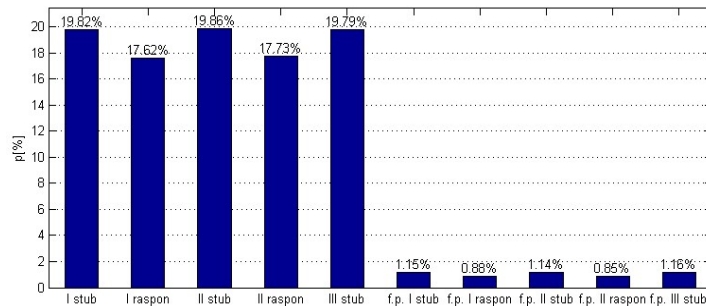
- U_{50} – 50% napon razornog pražnjenja,
- σ – srednje kvadratno odstupanje (mera rasipanja napona razornog pražnjenja) koje za atmosferske prenapone iznosi $0.05U_{50}$

Verovatnoća razornog pražnjenja računa se u svakoj simulaciji $P_n(U_i)$, dok se rizik razornog pražnjenja određuje prema relaciji [2]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N P_n(U_i)}{N} \quad (13)$$

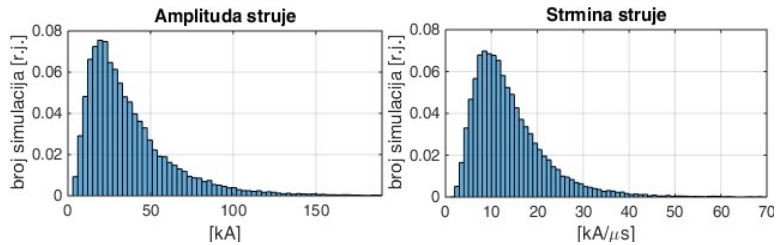
gde je sa N označen ukupan broj simulacija.

Proračun rizika izvršen je za 20000 simulacija pri čemu su analizirane sve četiri varijante sa i bez odvodnika prenapona. Na slici 16 prikazan je procentualni udeo atmosferskih pražnjenja koja su završila u prvi, drugi ili treći stub, zaštitno uže u prvom ili drugom rasponu, ili fazni provodnika duž prava dva raspona.



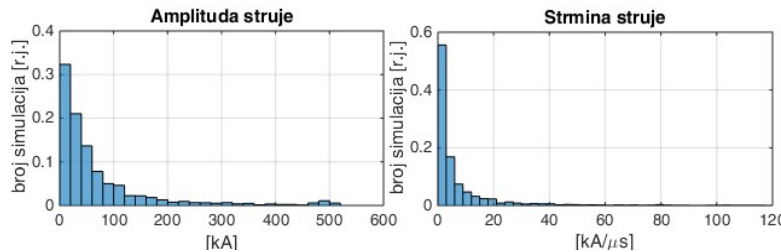
Slika 16. Raspodela udara groma u prva dva raspona

Na slici 17 prikazana je raspodela amplitude i strmina struja atmosferskih pražnjenja za negativne udare koji su se javili u simulaciji.



Slika 17. Raspodela amplituda i strmina struja za negativne udare

Na slici 18 prikazana je raspodela amplitude i strmina struja atmosferskih pražnjenja za pozitivne udare koji su se javili u simulaciji.



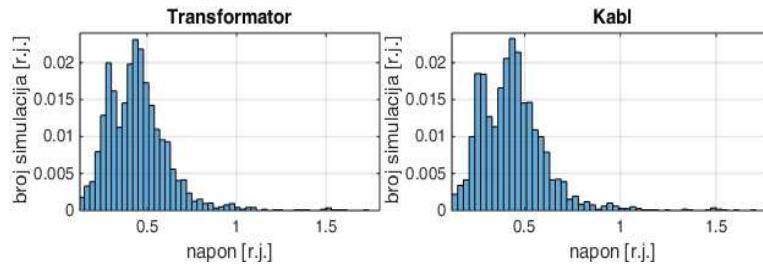
Slika 18. Raspodela amplituda i strmina struja za pozitivne udare

Proračun rizika proboja izolacije urađen je i za transformator i za kabl. U tabeli 2 date su vrednosti dobijenog rizika kao i odgovarajuće srednje vreme između kvarova (MTBF) na transformatoru i kablju za slučaj kada su uklonjena oba odvodnika prenapona.

Tabela 2. Vrednosti rizika i MTBF (slučaj bez oba odvodnika prenapona)

	Rizik	MTBF (god)
Transformator	0.1138	17.14
Kabl	0.1072	18.19

Kao što je očekivano iz tabele 2 može se uočiti da je za efikasnu zaštitu transformatora i kabla neophodna ugradnja odvodnika prenapona, dobijene su neprihvatljivo niske vrednosti MTBF-a. Na slici 19 prikazan je histogram maksimalnih vrednosti napona na transformatoru i kablju koji su se javili tokom simulacije za slučaj kada su uklonjena oba odvodnika prenapona. Kao bazna vrednost napona usvojen je podnosivi udarni napon transformatora i kabla 1425 kV.



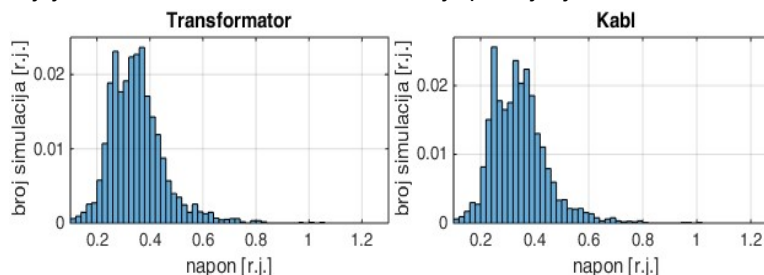
Slika 19. Histogram napona na transformatoru i kablu

Kako je ugradnja bar jednog odvodnika prenapona neophodna, posmatran je slučaj kada postoji samo odvodnik na poziciji 1. U tabeli 3 date su vrednosti dobijenog rizika kao i odgovarajuće srednje vreme između kvarova na transformatoru i kablu za slučaj kada je uklonjen odvodnik 2.

Tabela 3. Vrednosti rizika i MTBF (slučaj bez odvodnika 2)

	Rizik	MTBF (god)
Transformator	0.0362	53.85
Kabl	0.0334	58.40

I u ovom slučaju se dobija neprihvatljivo nizak srednji broj godina između kvarova. Na slici 20 prikazan je histogram maksimalnih vrednosti napona koji se javljaju na transformatoru i kablu u slučaju postojanja samo odvodnika 1.



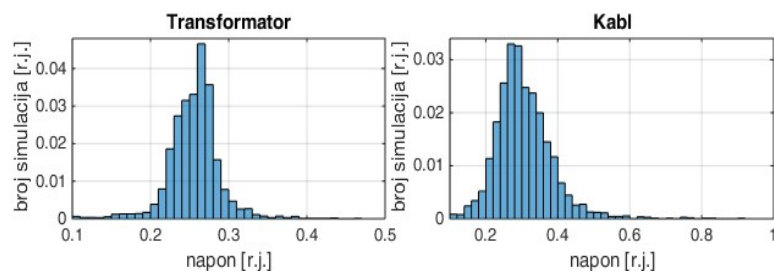
Slika 20. Histogram napona na transformatoru i kablu

Druga mogućnost je postojanje odvodnika na poziciji 2. U tabeli 4 date su vrednosti dobijenog rizika kao i odgovarajuće srednje vreme između kvarova na transformatoru i kablu za slučaj kada postoji samo odvodnik 2.

Tabela 4. Vrednosti rizika i MTBF (slučaj bez odvodnika 1)

	Rizik	MTBF (god)
Transformator	$1.69 \cdot 10^{-4}$	$1.15 \cdot 10^4$
Kabl	0.0118	165.06

Iz table 4 može se uočiti da je odvodnik na poziciji 2 dovoljan za zaštitu transformatora ali ne i kabla za koji se dobija nizak srednji broj između kvarova. Na slici 21 prikazan je histogram maksimalnih vrednosti napona na transformatoru i kablju za slučaj kada postoji samo odvodnik 2.



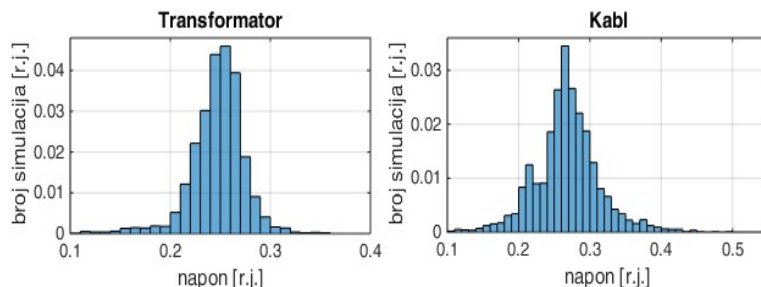
Slika 21. Histogram napona na transformatoru i kablju

Prethodna tri slučaja pokazala su da je za efikasnu zaštitu i transformatora i kabla neophodna ugradnja oba odvodnika prenapona. U tabeli 5 date su vrednosti dobijenog rizika kao i odgovarajuće srednje vreme između kvarova na transformatoru i kablju za slučaj kada su prisutna oba odvodnika prenapona.

Tabela 5. Vrednosti rizika i MTBF (slučaj sa oba odvodnika prenapona)

	Rizik	MTBF (god)
Transformator	$4.57 \cdot 10^{-9}$	$4.27 \cdot 10^8$
Kabl	$6.91 \cdot 10^{-4}$	$2.82 \cdot 10^3$

U ovom slučaju dobijene su prihvatljive vrednosti srednjeg broja godina između kvarova. Na slici 22 prikazan je histogram napona na transformatoru i kablju u slučaju postojanja oba odvodnika prenapona.



Slika 22. Histogram napona na transformatoru i kablju

4. Zaključak

U radu je prikazan model 400 kV-nog postrojenja i dalekovoda razvijen u programskom alatu ATP/EMTP za potrebe proračuna prenapona usled atmosferskih pražnjenja. Demonstriran je postupak modelovanja elemenata značajnih za formiranje modela kao i postupak proračuna rizika kvara izolacije. Model uključuje primenu Monte Karlo simulacije u statističkoj analizi koordinacije izolacije, koja omogućava uvažavanje svih slučajnih parametara koji utiču na rizik kvara izolacije. U konkretnom primeru zaštite transformatora sa kablovskim uvodom pokazalo se da je za njegovu zaštitu neophodna ugradnja dva odvodnika prenapona, na obe strane kabla.

Literatura

- [1] M. Savić, Z. Stojković, *Tehnika visokog napona – atmosferski prenaponi*, Elektrotehnički fakultet, Beograd 1996.
- [2] Z. Zdravković, P. Vukelja, J. Mrvić, *Koordinacija izolacije objekata visokih napona trofaznih mreža*, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd 2001.
- [3] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, "Implementation of leader development models in ATP-EMTP Using a type-94 circuit component," *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, 2014, pp. 979-985. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973265
- [4] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines.
- [5] Andrew R. Hileman, *Insulation coordination for power systems*, Marcel Dekker, Inc. 1999, Book 767 pages
- [6] G. W. Brown, "Joint Frequency Distributions of Stroke Current Rates of Rise and Crest Magnitude to Transmission Lines," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, no. 1, pp. 53-58, Jan. 1978. doi: 10.1109/TPAS.1978.354455
- [7] ATP - EMTP: Bonneville Power Administration (BPA) Electro Magnetic Transient Program (EMTP) –Alternative Transient Program (ATP) and ATPDraw graphical pre-processor Copyright. (e-mail: canam@empt.org), (www.eeug.org)
- [8] IEEE modeling and Analysis of system Transient Working Group, "Modeling guidelines for fast front transients," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 493-506, Jan 1996. doi: 10.1109/61.484134
- [9] Z. Zdravkovic, P. Vukelja, J. Mrvic, "Disruptive discharge risk and reliability parameters of high-voltage electrical power facilities", *Electrical Engineering*, Volume 88, Number 5, June 2006, pp. 447-452

- [10] A. Grujić, Z. Stojković, "Software tool for estimating the 3D lightning protection zone of high voltage substations"; *International Journal of Electrical Engineering Education (IJEED) – Special Issue: Technology transfer – new perspectives on delivering electrical and electronics engineering education*, Vol. 48, No. 3, July 2011, pp. 307-322.
- [11] Z. Stojković, *Computer-aided design in power engineering – Application of software tools*, Springer Berlin Heidelberg, Academic Mind, Belgrade, 2012, p. 436, DOI:10.1007/978-3-642-30206-0
- [12] P. Lertwanitrot, P. Kettranon, P. Itthisathienkul, A. Nagaopitakkul, "Characteristics and Behaviour of Transient Current during Lightning Strike on Transmission Tower", *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015 Vol II, IMECS 2015*, March 18-20, 2015, Hong Kong.
- [13] M.S. Savić, "Engineering method for high-voltage substations lightning performance estimation", *IEE Proceedings Pt. C, Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 132, No. 4, July 1989 pp. 222-229.
- [14] Insulation co-ordination-Part 4: "Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks", IEC Technical report TR 60071-4, Jun 2004.

Abstract: The goal of this paper is to introduce a procedure for risk assessment of insulation failure due to storm surges. The simulations were carried out in ATP / EMTP software, which allowed the use of the Monte Carlo method for the statistical analysis of insulation coordination. The paper gives a detailed account of modelling of all the elements relevant to the analysis. At the same time, the capabilities of the programming language MODELS (allows the creation and implementation of new complex components within the ATP software) are discussed

Keywords: lightning overvoltages, ATP/EMTP, risk of insulation failure, Monte Carlo simulation, insulation coordination, MTBF, leader developed method

Using Alternative Transient Program and Electromagnetic Transients Programs (ATP/EMTP) in lightning overvoltages analysis

Jovan Mrvić, Ranko Jasika, Petar Vukelja, Goran Lepović, Ninoslav Simić

Rad primljen u uredništvo: 06.11.2016. godine

Rad prihvaćen: 05.12.2016. godine