

Raspodjela potencijala u okolini stubnog uzemljivača pri odvođenju struje jednofaznog kvara

Milan Ivezić, Emilija Kisić

Visoka škola elektrotehnike i računarstva
Beograd, Srbija

milan.ivezic@viser.edu.rs, emilija.kisic@viser.edu.rs

Aleksandar Jovanović

Beograd, Srbija
alex.jovanovic1983@gmail.com

Sadržaj—U radu je opisan postupak dobijanja raspodjele potencijala u okolini stubnog uzemljivača sa koga se odvodi struja kvara u okolno homogeno tlo. U tu svrhu je razvijen kod u Matlab-u koji za zadate parametre, izračunava tražene vrijednosti i daje njihov grafički prikaz u okolini uzemljivača.

Ključne riječi—uzemljivač, raspodjela potencijala, struja kvara, napon dodira, napon koraka

I. UVOD

Za stabilnost funkcionisanja i pravilan i pouzdan rad elektroenergetskog sistema bitno je da visokonaponski elementi distributivne i prenosne mreže budu adekvatno dimenzionisani. Ovo se takođe odnosi na sistem uzemljenja elektroenergetskih postrojenja i opreme. Loše dimenzionisan uzemljivački sistem ne predstavlja adekvatnu zaštitu za opremu pri odvođenju kako struje atmosferskog pražnjenja tako i struje zemljospoja, a takođe može biti uzrok pojave opasnih napona dodira i koraka pri odvođenju struje sa uzemljivača koji mogu imati posljedice po život i zdravlje ljudi koji se nalaze u blizini.

U ovom radu je dat primjer dalekovoda naponskog nivoa 110 kV sa pojavom jednofaznog zemljospoja na jednom od stubova dalekovoda. Mjesto kvara je predstavljeno zamjenskom šemom sa predstavom raspodjele struja [1]. U zavisnosti od parametara fazne i zaštitne užadi, rasporeda provodnika u glavi stuba, kao i položaja mjesta kvara na trasi dalekovoda, određena je vrijednost struje jednofaznog kratkog spoja koja se odvodi sa uzemljivača. Na osnovu struje koja se odvodi sa uzemljivača i geometrije samog uzemljivača, izvršena je analiza u pogledu moguće pojave opasnih napona dodira i koraka u okolini posmatranog stuba, za slučaj zemljospoja na posmatranom stubu. Određena je i kritična vrijednost rastojanja od stuba u pogledu napona koraka.

Važno je napomenuti da se postupkom koji je korišćen u radu može tretirati bilo koji uzemljivački sistem sačinjen od cjevastijih provodnika kruznog poprečnog precjeka koji je oivičen pravougaonom konturom, bez obzira da li su mu elementi postavljeni u jednoj ili više horizontalnih, vertikalnih ili kosih ravni. Postupak se može primijeniti samo za uzemljivače položene u homogeno tlo, tj. u tlo konstantne specifične provodnosti.

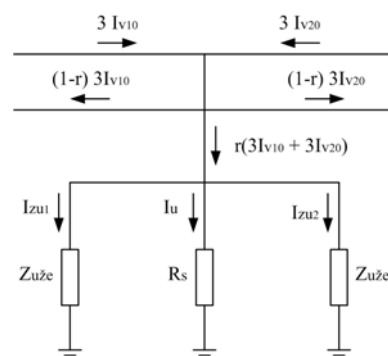
Za modelovanje posmatranog uzemljivačkog sistema, kao i za izvršavanje potrebnih proračuna je napisan kod u programu

Matlab [2]. Rezultati analize potencijala na površini tla kao i napona koraka u okolini uzemljivača sa koga se odvodi struja, dati su u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom grafičkom prikazu u radijusu od 15 metara od centra uzemljivača. Rezultati dobijeni na ovakav način su upoređeni sa dozvoljenim vrijednostima i za slučaj da nisu u skladu sa propisima, predložena je tehnička mjera zastiranja terena slojem šljunka specifične otpornosti 2500 Ωm čime se mijenja otpornost tla u okolini uzemljivača. Zatim je, uzimanjem u obzir izmijenjene uslove u okolini uzemljivača, izvršeno ponovno izračunavanje traženih veličina, kao i njihov grafički prikaz, kako bi se utvrdila uspješnost primjenjene tehničke mjere.

II. ODREĐIVANJE STRUJE ODVOĐENJA UZEMLJIVAČA

Posmatran je vod koji spaja dva postrojenja. Kada dođe do jednofaznog kratkog spoja na nekom dalekovodnom stubu, struja koja teče kroz uzemljivač toga stuba potiče od struje koja dolazi iz prvog postrojenja i struje koja dolazi iz drugog postrojenja, a može se odrediti prema zamjenskoj šemi prikazanoj na Sl. 1 [1].

Kako su podaci o strujama kratkih spojeva obično dostupni u tehničkoj dokumentaciji, u radu je smatrano da su struje jednofaznog kratkog spoja poznate, a navedene brojne vrijednosti se odnose na realan dalekovod napona 110 kV.



Slika 1. Zamjenska šema mjesta kvara

Oznake na Sl. 1 su sljedeće:

I_{v10} – nulta komponenta struje zemljospoja prvog voda

I_{v10} – nulta komponenta struje zemljospoja drugog voda

I_{zu1} , I_{zu2} – struja koja se odvodi zaštitnom užadi lijevo i desno od mjesta kvara

r – redukcionni faktor zaštitnog užeta

R_s – prosječna otpornost stubova duž trase voda

$Z_{uže}$ – impedansa koja se vidi od mjesta kvara do kraja voda i obuzvata ekvivalentnu impedansu zaštitne užeta i svih otpora uzemljenja stubova povezanih sa zaštitnom užadi, a može se predstaviti sljedećom relacijom: [1]

$$Z_{uže} = \frac{Z_{zu}}{2} + \sqrt{Z_{zu} \cdot R_s} \quad (1)$$

gdje je Z_u sopstvena impedansa jednog zaštitnog užeta koja se izračunava prema sljedećem izrazu: [1]

$$\underline{Z}_u = 0,05 + R_1 + j(0,1445 \cdot \frac{\log D}{r_e} + 0,016 \cdot \mu_r) \quad (2)$$

gdje je R_1 podužna otpornost zaštitnog užeta, D dubina povratnog puta kroz zemlju, r_e ekvivalentni poluprečnik zaštitnog užeta i μ_r magnetska permeabilnost zaštitnog užeta. Brojne vrijednosti za podužnu otpornost, stvarni prečnik i relativnu magnetsku permeabilnost zaštitnog užeta su preuzete iz tehničke dokumentacije proizvođača [3], a dubina povratnog puta kroz zemlju i ekvivalentni poluprečnik užeta su izračunati u skladu sa relacijama: [1]

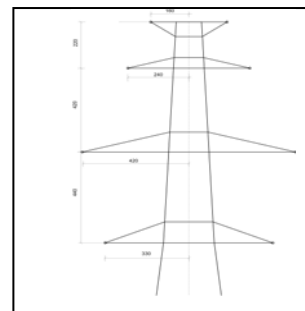
$$D = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{pros}}{f}} \quad (3)$$

$$r_e = \sqrt{r_u \cdot d} \quad (4)$$

Gdje je ρ_{pros} srednja vrijednost specifične otpornosti tla duž trase voda, f frekvencija napona, r_u stvarni poluprečnik zaštitnog užeta, a d međusobno rastojanje zaštitne užadi u glavi stuba čija je skica prikazana na Sl. 2. Udaljenost najniže konzole stuba od površine tla je 12 m, a dužina izolatorskih lanaca faznih provodnika 1 m.

Raspodjela struja na mjestu kvara je zavisi od impedansi $Z_{uže}$ i R_s i redukcionnog faktora zaštitne užadi r koji je određen relacijom: [1]

$$\underline{r} = 1 - \frac{Z_m}{Z_{uže}} \quad (5)$$



Slika 2. Raspored provodnika u glavi stuba

gdje je Z_m međusobna impedansa zaštitnog užeta i faznih provodnika, a određena je sljedećom relacijom: [1]

$$\underline{Z}_m = 0,05 + j \cdot 0,1445 \cdot \frac{\log D}{d_m} \quad (6)$$

gdje je d_m srednje geometrijsko rastojanje zaštitnog užeta od faznih provodnika u glavi stuba.

Prema zamjenskoj šemi sa Sl. 1, struja koja se odvodi sa uzemljivača se izračunava po relaciji:

$$I_u = (\underline{r} \cdot 3I_{v10} + \underline{r} \cdot 3I_{v20}) \cdot \frac{Z_{uže}}{Z_{uže} + 2R_s} \quad (7)$$

III. ODREĐIVANJE STRUJA KROZ GRANE UZEMLJIVAČA I POTENCIJALA UZEMLJIVAČA

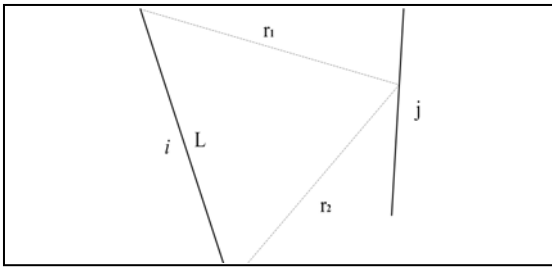
Najprije je potrebno odrediti raspodjelu struje odvođenja kroz pojedine grane uzemljivača. Raspodjela struje odvođenja kroz grane uzemljivača zavisi od njihove dimenzije i njihovog međusobnog položaja. Ovi parametri uzemljivača su predstavljeni kroz matricu sopstvenih i međusobnih otpornosti grana uzemljivača R . To je kvadratna matrica čija je dimenzija jednaka broju grana uzemljivača, a na glavnoj dijagonali joj se nalaze sopstvene otpornosti, a izvan glavne dijagonale međusobne otpornosti grana uzemljivača. Sopstvene otpornosti su određene sljedećom relacijom: [1]

$$r_s = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln \frac{2L}{d} \quad (8)$$

gdje je: L dužina, a d prečnik grane uzemljivača.

Metoda za određivanje međusobne otpornosti i -te i j -te grane uzemljivača, čiji je međusobni položaj ilustrovan na Sl. 3; je zasnovana na relaciji za međusobnu otpornost pravolinijske cijevi kružnog poprečnog presjeka proizvoljne tačke u homogenom tlu u okolini te cijevi, u skladu sa Sl. 3: [1]

$$r_m = \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + L}{r_1 + r_2 - L} \quad (9)$$



Slika 3. Ilustracija međusobnog položaja dvije grane uzemljivača

Sušтина metode je da se j -ta grana uzemljivača izdijeli na male pravolinijske segmente i da se međusobna otpornost i -te grane prema j -toj izračunava kao srednja vrijednost otpornosti i -te grane prema pojedinačnim segmentima na koje je podijeljena j -ta grana. Matricom sopstvenih i međusobnih otpornosti uzemljivača je određen i njegov otpor rasprostiranja R_u prema relaciji: [1]

$$R_u = \frac{1}{[1]^T [R]^{-1} [1]} \quad (10)$$

Napon uzemljivača U_u predstavlja razliku potencijala na koji dolazi uzemljivač prilikom odvođenja struje kvara u tlo i potencijala referentne zemlje i zavisi od struje odvođenja i otpora rasprostiranja: [1]

$$U_u = R_u \cdot I_u \quad (11)$$

Zavisnost struja odvođenja pojedinih grana uzemljivača od napona uzemljivača je predstavljena sljedećom relacijom čijim se rješavanjem po I dobija vektor struja odvođenja $[I]$: [1]

$$[r][I] = [1]U_u \quad (12)$$

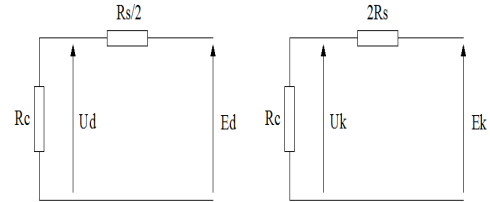
IV. ODREĐIVANJE NAPONA DODIRA I NAPONA KORAKA

Sa stanovišta bezbjednosti čovjeka, najbitnije je odrediti maksimalnu vrijednost napona dodira U_d i napona koraka U_k u okolini stuba na kome se dogodio kvar i njihove vrijednosti uporediti sa dozvoljenim. [4] Napon dodira napon koraka je izračunat prema zamjenskim šemama prikazanim na Sl. 4, gdje E_d i E_k predstavljaju razliku potencijala uzemljivača i tačke na površini tla za koju se određuju napon dodira i napon koraka, R_c otpornost čovječijeg tijela, a R_s prelaznu otpornost stopalo-tlo [1], [4]. Potencijal proizvoljne tačke A na površini tla je izračunat kao zbir potencijala u toj tački koji potiču od struje koja se odvodi sa svake grane uzemljivača i za uzemljivač sa N grana se može predstaviti relacijom:

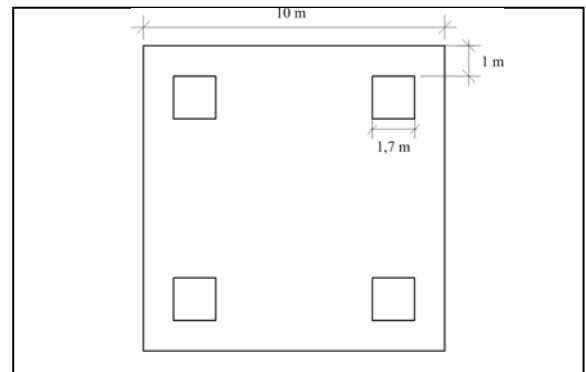
$$V_A = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho}{4\pi L_i} \cdot \ln \frac{r_{1i} + r_{2i} + L_i}{r_{1i} + r_{2i} - L_i} \cdot I_i \right) \quad (13)$$

V. REZULTATI PRORAČUNA

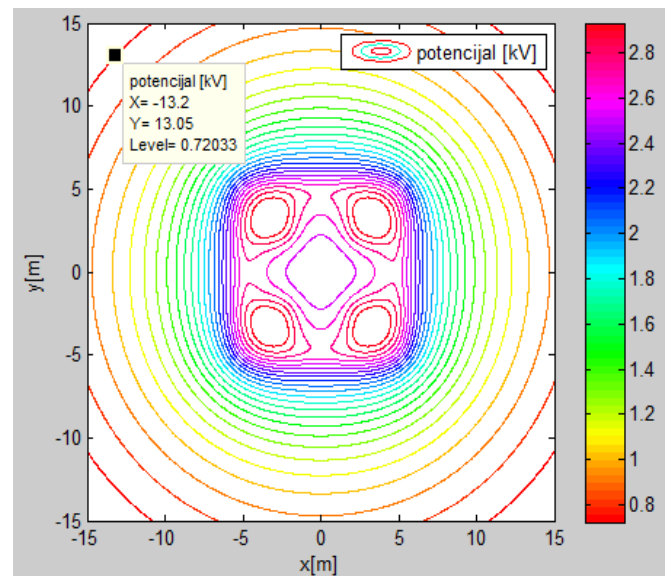
Analiziran je uzemljivač dalekovodnog stuba sa Sl. 5 koji odvodi ukupnu struju kvara od 12,5 kA. Uzemljivač je izrađen od kružnih pocinkovanih cijevi prečnika 1 cm i sastoji se od jedne veće 4 manje kvadratne konture. Konture su položene horizontalno u tlo specifične otpornosti 80 Ω m. Veća je na dubini od 1 m, a manje na dubini od 0,7 m. [5] Na Sl. 6 i Sl. 7 je prikazana raspodjela potencijala na površini tla u krugu poluprečnika 15 m od centra uzemljivača.



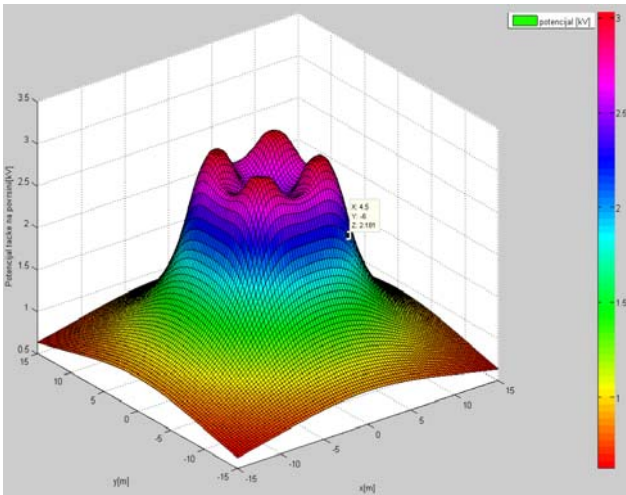
Slika 4. Zamjenske šeme za određivanje napona dodira i napona koraka



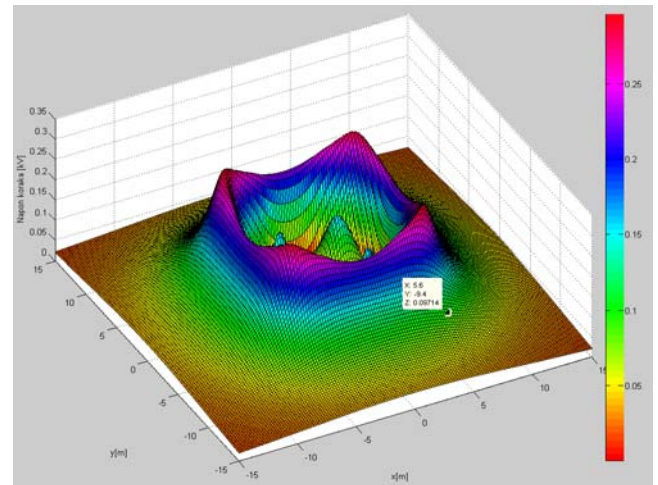
Slika 5. Skica stubnog uzemljivača dalekovoda 110 kV



Slika 6. 2D prikaz potencijala tačaka na površini tla u okolini uzemljivača



Slika 7. 3D prikaz potencijala tačaka na površini tla u okolini uzemljivača



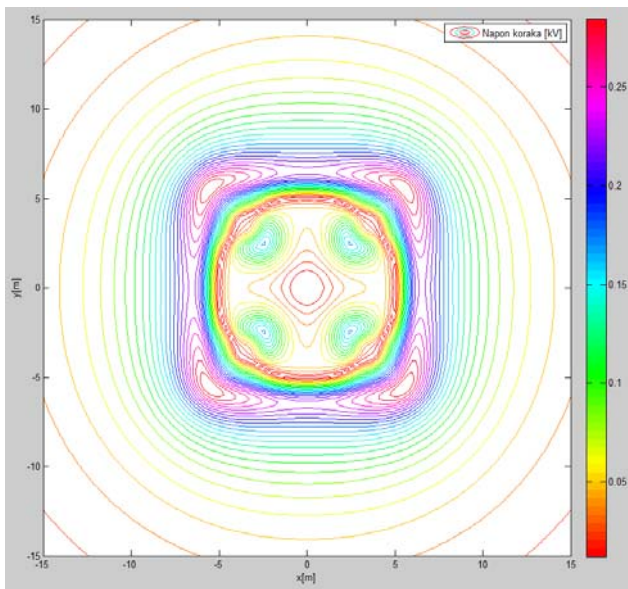
Slika 9. 3D prikaz napona koraka u okolini uzemljivača

Najveće vrijednosti napona dodira i napona koraka su dobijene za tačku na površini tla koja se nalazi u produžetku dijagonale veće konture uzemljivača na rastojanju 1 m od projekcije uzemljivača na tlo. Za standardnu vrijednost otpora ljudskog tijela od 1000Ω [6], u skladu sa zamjenskim šemama sa Sl. dobijaju se sljedeće brojne vrijednosti za napon dodira i napon koraka:

$$U_d = 4,323 \text{ kV},$$

$$U_k = 3,076 \text{ kV}$$

Napon koraka je izračunat i za sve tačke na površini tla u zoni od 15 m od centra uzemljivača, kako bi se odredilo bezbjedno rastojanje pri odvođenju struje kvara. Rezultat proračuna je prikazan na Sl. 8 i Sl. 9. Napon koraka za svaku tačku je računat kao maksimalna vrijednost napona koraka između te tačke i svih tačaka na površini tla koje su na rastojanju 1 m od nje.



Slika 8. 2D prikaz napona koraka u okolini uzemljivača

Naponi U_d i U_k treba da budu manji od maksimalne dozvoljene vrijednosti za napon kome ljudsko tijelo smije biti izloženo U_{doz} . Napon U_{doz} zavisi od vremena trajanja zemljospoja t : [4]

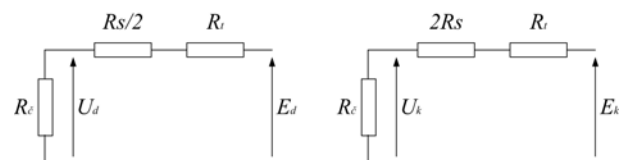
$$U_{doz} = \frac{75}{t} \quad (14)$$

Vrijeme trajanja zemljospoja je uslovljeno vremenom reagovanja relejne zaštite na vodu čija je uobičajena vrijednost 0,2 s, [7] tako da napon dodira i napon koraka ne smiju biti veći od 375 V. Pošto su napon dodira i napon koraka značajno veći od dozvoljene vrijednosti, potrebno je provesti neki postupak za njihovo smanjenje na prihvatljivu mjeru. Kao tehnička mjera suzbijanja opasnih napona dodira i koraka predloženo je zastiranje tla iznad uzemljivača slojem šljunka specifične otpornosti 2500Ω debljine 20 cm. Time se mijenja specifična otpornost tla iznad uzemljivača i povećava prelazni otpor stopalo-tlo, pa se napon dodira i napon koraka mogu izračunati preko zamjenskih šema prikazanih na Sl. 10. [1]

Otpornost R_t predstavlja otpornost sloja šljunka između čovječijih stopala i tla, i određena je sljedećom relacijom: [1]

$$R_t = \frac{\rho \cdot l}{D^2 \pi} \quad (14)$$

gdje su ρ i l specifična otpornost odnosno debljina nasutog sloja, a $D=0,16$ m prečnik kružne ploče kojom se ekvivalentiraju čovjekova stopala.



Slika 10. Zamjenske šeme za određivanje U_d i U_k nakon zastiranja

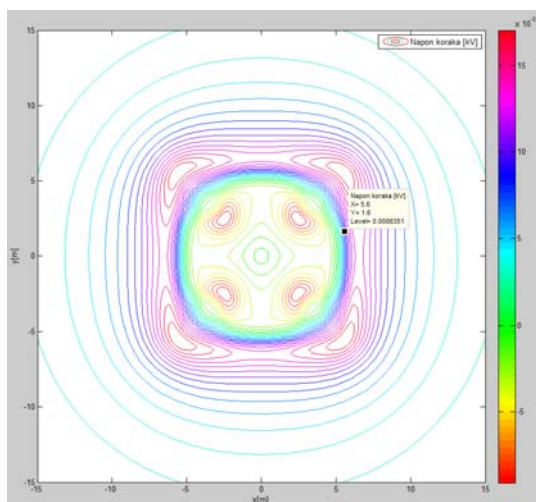
Izračunavanjem prema zamjenskim šemama sa Sl. 10, dobijaju se najveće vrijednosti za napon dodira i napon koraka nakon primjene tehničke mjere zastiranja slojem šljunka:

$$U_d = 192 \text{ V}$$

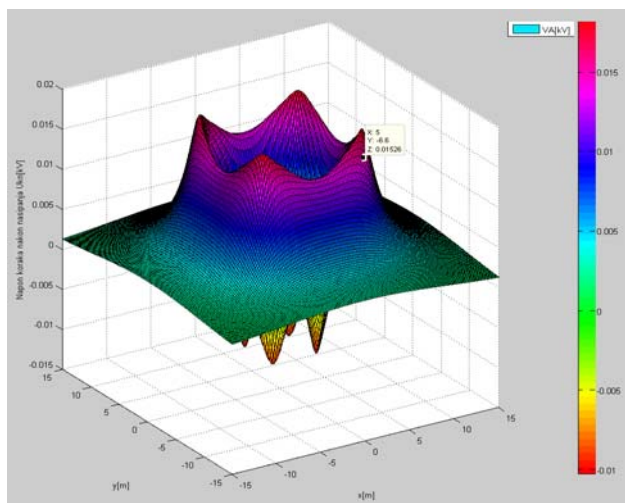
$$U_k = 189 \text{ V}$$

Najveće vrijednosti napona dodira napona koraka i u ovom slučaju su za tačku na površini tla koja se nalazi u produžetku dijagonale veće konture uzemljivača I udaljena je 1 m od njegove projekcije na tlo.

Napon koraka u okolini uzemljivača nakon zastiranja su prikazani na Sl. 11, Sl. 12.



Slika 11. 2D prikaz napona koraka nakon nasipanja



Slika 12. 3D prikaz napona koraka nakon nasipanja

VI. ZAKLJUČAK

U radu je izložen postupak izračunavanja međusobnih otpornosti grana uzemljivača njihovim dijeljenjem na male segmente kojim je omogućeno određivanje matrice sopstvenih i međusobnih otpornosti uzemljivača za bilo koji uzemljivački sistem položen u homogenom tlu. Povećavanjem broja segmenata na koje se dijele grane uzemljivača se povećava tačnost izračunavanja, ali nema potrebe insistirati na velikom broju, prvenstveno što je obično podatak o specifičnoj otpornosti tla u kome se nalazi uzemljivač dostupan sa relativno velikim odstupanjem.

Primjenom tehničke mjere zastiranja tla iznad uzemljivača slojem šljunka debljine 20 cm se dobila mnogo povoljnija raspodjela potencijala tla. Eliminirani su opasni naponi kojima bi čovjek bio izložen ako bi se našao u okolini stuba pri odvođenju struje kvara. Prikazana zaštitna mjera se pokazala efikasnom za posmatranu situaciju, a takođe je jednostavna i primjenjiva za većinu dalekovodnih stubova.

LITERATURA

- [1] J. Nahman, V. Mijailović, "Razvodna postrojenja", Akademska misao, 2005.
- [2] Z. Stojković, "Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici", Akademska misao, Beograd, 2009.
- [3] www.elka.hr
- [4] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, Službeni list SRJ, br. 61/95.
- [5] Tehnička preporuka broj 9 – Izvođenje uzemljenja i uzemljivača stubova distributivnih nadzemnih vodova 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV, III izdanje, JP EPS – Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd, 2010.
- [6] G. Biegelmeier, "Report on the electrical impedance of the human body", IEC, Technical Committee No. 23, Austria, 1978.
- [7] W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski, "Digital signal processing in power system protection and control", Springer, New York, 2011.

ABSTRACT

This paper describes the procedure for obtaining the potential distribution around the earther from which it takes the fault currents in a homogeneous surrounding ground. for this purpose we developed the code in matlab which calculates the required values and displays graphical results.

THE DISTRIBUTION OF POTENTIAL AROUND THE PILLAR GROUNDING DURING SINGLE-PHASE FAILURE

Milan Ivezic
Emilija Kisić
Aleksandar Jovanović