

ALGORITAM ZA ANALIZU SLOŽENIH UZEMLJIVAČKIH SISTEMA

ALGORITHM FOR ANALYSIS OF COMPLEX GROUNDING SYSTEMS

Adnan Mujezinović¹, Alija Muharemović¹, Aida Muharemović²

Sažetak: Proračun otpora rasprostiranja složenih uzemljivača visokonaponskih transformatorskih stanica, te definiranje raspodjele potencijala na površini tla predstavlja jednu od najsloženijih faza izrade projektne dokumentacije. Ovi proračuni se izvode u cilju određivanja vrijednosti napona koraka i dodira na cijeloj površini lokacije transformatorske stanice. U ovom radu predstavljen je numerički algoritam za proračun parametara uzemljivača. Uz pomoć softverskog paketa Matlab izvršen je proračun otpora rasprostiranja i raspodjele potencijala uzemljivača transformatorske stanice 10(20)/0.4 kV.

Ključne riječi: uzemljivač, otpor rasprostiranja, potencijal.

Abstract: Calculation of grounding resistance of high voltage substation groundings and defining the surface potential distribution are one of the most complex phases of any project documentation. These calculations are performed in order to determine step and touch voltages on entire surface of substation locations. This paper presents a numerical algorithm for calculation of grounding parameter. Calculation of grounding resistance and grounding electrode potential distribution of substation 10(20)/0.4 kV was performed in the paper, with the help of the Matlab software package.

Keywords: grounding electrode, grounding resistance, potential.

UVOD

Posljednjih desetljeća primjećen je trend širenja urbanih zona i povećanja potražnje električne energije. U takvim situacijama dolazi do povećanja nivoa struja kratkih spojeva i uvođenja opasnih visokih napona u urbane sredine. Potrebno je osigurati da transformatorske stanice imaju vrlo niske vrijednosti otpora uzemljenja. U posljednje vrijeme konstantno se analiziraju i razvijaju metode numeričkog proračuna otpora rasprostiranja i raspodjele potencijala uzemljivača [1], [2] i [3]. Prve analize uključujući i numeričku primjenu za proračune svodile su se na korištenje jednostavnih matematskih modela koje imaju vrlo ograničenu primjenu. Zbog velikog broja različitih geometrijskih oblika uzemljivača, jednostavniji matematski modeli nisu optimalni za primjenu. Ovi modeli su primjenjivi za homogena (jednoslojna) tla u koja su ukopani uzemljivači. Utjecaj nehomogenosti tla (tlo sa više različitih slojeva zemlje) zahtijevao je primjenu odgovarajućih redukcionih faktora kojima se uvažavala navedena pojava.

Tačan proračun karakteristika uzemljivača ne dozvoljava zanemarivanje granica diskontinuiteta specifične elek-

trične vodljivosti tla, kao što je granica tlo-zrak i gornji-donji sloj tla (ako se radi o višeslojnom tlu). Greška bi se javila i u slučaju ekvivalentiranja nehomogenog tla homogenim sa ekvivalentnom vrijednošću specifičnog električnog otpora [4] i [5].

U nastavku ovog rada je dat primjer korištenja programskog paketa Matlab za projektovanja novih i analizu postojećih uzemljivača. Proračun je proveden na osnovu matematskog modela koji je također dat u radu.

1. MATEMATSKI MODEL

Strujno polje generisano od strane uzemljivača smještenog u tlu napaja se strujom kratkog spoja koja iz njega izvire. Nepoznata veličina jeste gustoća struje na površini uzemljivača, a ona se može odrediti iz ukupne struje koja iz njega istječe i njegove geometrije. Uz pretpostavku da je uzemljivač sastavljen od vodiča može se pisati relacija

$$I = \int_{l'} \lambda(\vec{r}') \cdot dl' \quad (1)$$

gdje su:

I – struja koja istječe iz uzemljivača,
 $\lambda(\vec{r}')$ – linijska gustoća struje duž uzemljivača,
 l' – geometrija uzemljivača.

Skalarni potencijal oko vodiča u tački P određuje se primjenom formule

¹ Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina

² BH Telecom, d.d. Sarajevo, Bosna i Hercegovina
 am14618@etf.unsa.ba
 Rad prihvaćen u martu 2012. godine.

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\gamma} \int \frac{\lambda(\vec{r}')}{R} dl' \quad (2)$$

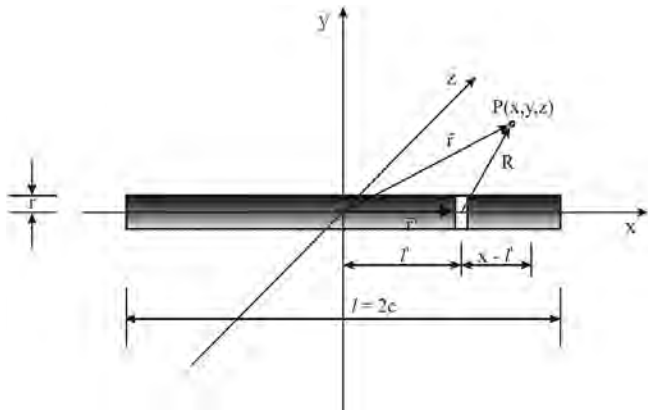
$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (3)$$

gdje su:

γ – specifični električni otpor tla u kojem se nalazi uzemljivač,

R – udaljenost između izvora i tačke promatranja,

dl' – put integracije.



Slika 1: Usamljeni vodič smješten u neograničenom prostoru

Relacija (2) bila bi upotrebljiva da je poznata linijska gustoća struje. Linijsku gustoću struje duž uzemljivača moguće je odrediti analitički, samo u slučaju jednostavnih geometrija uzemljivača. Kako je broj geometrija uzemljivača gotovo beskonačan, integral se rješava podjelom uzemljivača na N segmenata. Od broja segmenata ovisi tačnost rješenja: što je veći broj segmenata proračunato rješenje je bliže stvarnoj vrijednosti. Primjenom Leibintzovog teorema može se pisati izraz za skalarni potencijal kao:

$$\varphi_j = \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{j=1}^N \frac{\lambda(\vec{r}_j) \cdot L}{R} \quad (4)$$

gdje je L – dužina segmenata.

Nakon što je izvršena diskretizacija uzemljivača nepoznata linijska gustoća struje unutar svakog segmenata može se odrediti primjenom matrice jednačine

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdje su:

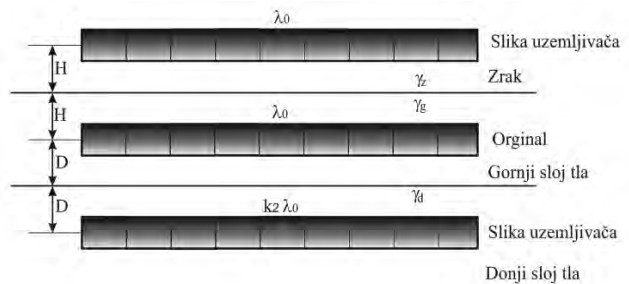
$[\lambda]$ – vektor nepoznatih linijskih gustoća struja,

$[\varphi]$ – vektor potencijala,

$[P]$ – matrica koeficijenata.

Utjecaje diskontinuiteta električne vodljivosti tla najlakše je uzeti u obzir primjenom metode odslikavanja. Zbog granice tlo-zrak, kao što je to i prikazano na slici 2, dolazi do odslikavanja uzemljivača u zraku, na udaljenosti od površine tla koja je jednaka dubini ukopavanja uzemljivača, pa se može pisati:

$$\lambda_z = \frac{\gamma_g - \gamma_z}{\gamma_g + \gamma_z} \lambda = k_1 \lambda \quad (6)$$



Slika 2: Odslikavanje vodiča na granicama diskontinuiteta specifične električne vodljivosti

Kako je specifični električni otpor zraka jako veliki odslikani uzemljivač iznad površine tla ima iste karakteristike kao i original. Slika u donjem sloju tla je uzeta u obzir prema relaciji:

$$\lambda_d = \frac{\gamma_g - \gamma_d}{\gamma_g + \gamma_d} \lambda = k_2 \lambda \quad (7)$$

Primjenom metode odslikavanja potencijalne koeficijente moguće je proračunati prema

$$P_{ij} = \frac{L}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_g} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{R_{ij}^2 + r^2}} + \frac{1}{\sqrt{R_{ij}^2 + (2H - r)^2}} + \frac{k_2}{\sqrt{R_{ij}^2 + (2D - r)^2}} \right) \quad (8)$$

gdje su:

H – dubina ukopavanja,

D – udaljenost uzemljivača od granice gornji–donji sloj,

r – radijus uzemljivača,

R_{ij} – udaljenost između i -tog i j -tog segmenata.

Na osnovu prethodno napisanih jednačina te činjenice da je uzemljivač na konstantnom potencijalu, može se zaključiti da je ukupan broj nepoznatih $N+1$, a broj jednačina N . Da bi sistem bio rješiv neophodno je dodati još jednu jednačinu. Za izvršavanje proračuna potrebno je poznavati ili zadati potencijal uzemljivača. U oba navedena slučaja dobija se ista vrijednost otpora rasprostiranja. Otpor rasprostiranja se određuje prema relaciji:

$$R = \frac{\varphi}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N L_j \cdot \lambda_j} = \frac{\varphi \cdot N}{L \cdot \sum_{j=1}^N \lambda_j} \quad (9)$$

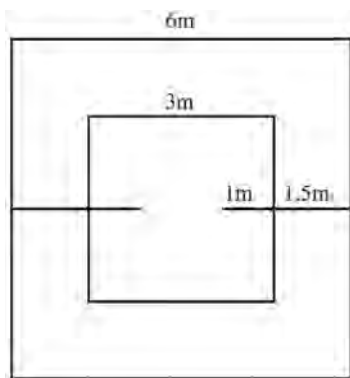
Iz tako izračunatog otpora rasprostiranja i poznate struje kratkog spoja koja protječe kroz uzemljivač određuje se stvarni potencijal uzemljivača korištenjem relacije:

$$\varphi = R \cdot I_{ks} \quad (10)$$

2. PRIMJER

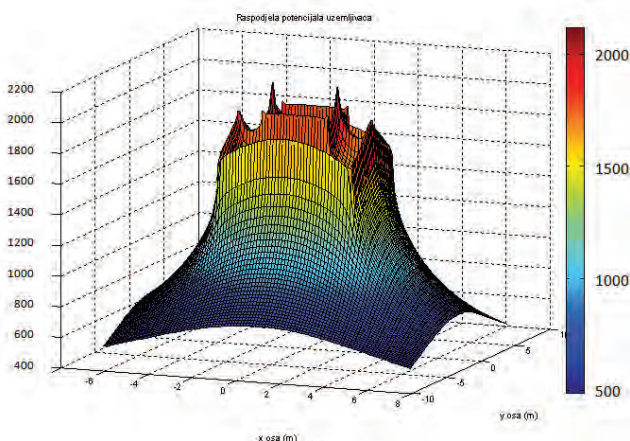
Verifikacija predstavljanog matematskog modela, koji je implementiran na programskom paketu Matlab, izvršena je na primjeru uzemljivača preuzetog iz literature [5]. Riječ je o uzemljivaču stupne transformatorske stanice sa dvostrukom konturom koji je prikazan na slici 3. Podaci o uzemljivaču:

- struja zemljospoja 300 A,
- otpor tla 100 Ω m,
- željezna pocinčana traka 25 mm x 4 mm,
- ukupna duljina trakastog uzemljivača 41 m,
- dubina ukopavanja prve konture 0.8 m, a dubina ukopavanja druge konture je 1 m,
- udaljenost vanjske konture od unutrašnje je 1.5 m.

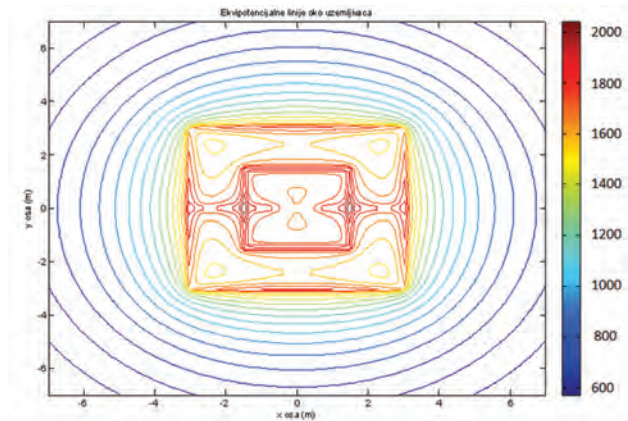


Slika 3: Geometrija modeliranog uzemljivača

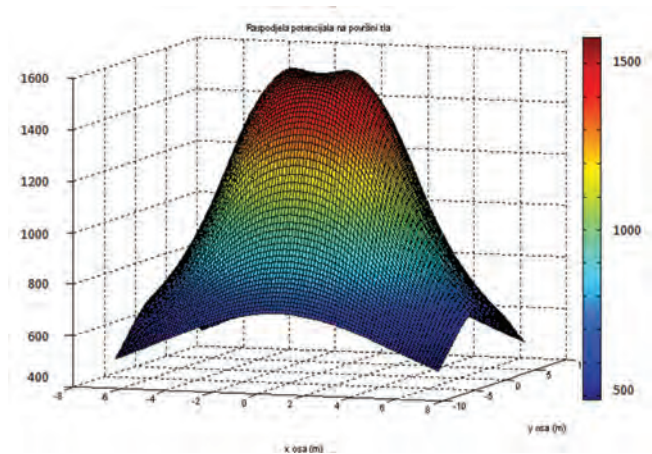
Na slikama 4 i 5 prikazani su 3D rezultati raspodjele potencijala i ekvipotencijalne linije u okolini uzemljivača (na dubini njegovog ukopavanja), respektivno. Slika 6 prikazuje raspodjelu potencijala na površini tla za slučaj kada kroz uzemljivač protječe struja 300 A.



Slika 4: Raspodjela potencijala uzemljivača stupne transformatorske stanice 10(20)/0.4 kV



Slika 5: Ekvipotencijalne linije u okolini uzemljivača



Slika 6: Raspodjela potencijala na površini tla

U tabeli I data je usporedba rezultata proračuna primjenom predloženog matematskog modela sa rezultatim preuzetim iz literature [5], koji su dobijeni korištenjem programskog paketa CYMGRN.

Tabela I: Usporedba rezultata proračuna

Model	Otpor rasprostiranja	GPR
Predloženi model	6.998 Ω	2096.4 V
CYMGRN [5]	6.8652 Ω	2068.16 V

3. ZAKLJUČAK

Proračun parametara uzemljivača se, uglavnom, provodi korištenjem analitičkih izraza koji unose sistematske greške zbog neuzimanja u obzir mnogih parametara. Ukoliko bi se uzimali u obzir svi neophodni parametri analitički izrazi bi bili toliko komplicirani, te ne bi bili primjenjivi. Pojavom računara ovaj problem je prevaziđen i moguće je vršiti proračune prijelaznog otpora uzemljivača sa svim mogućim kombinacijama komponenata vodiča koji tvore uzemljivač. Isto tako kod običnih proračuna uzemljivača ne vodi se računa o činjenici da se, uglavnom, radi o višeslojnim (nehomogenim) zemljištima, nego se uzima jedna vrijednost (prosječna ili prividna) specifičnog otpora. Znači, činjenica da se radi o diskontinuitetu specifičnog električnog otpora tla, mora se uvažiti i uzeti

u proračun. To je moguće samo korištenjem računarskih aplikacija.

U ovom radu je dat opći algoritam kod proračunavanja otpora rasprostiranja uzemljivača i raspodjele potencijala, pri uvažavanju činjenice da se radi o višeslojnom tlu, primjenom metode odslikavanja. Utjecaj nehomogenosti tla na mjestu postavljanja uzemljivača na električne prilike u tlu najlakše je uzeti u obzir korištenjem metode odslikavanja izvora polja. Ovo podrazumijeva odslikavanje vodiča uzemljivača zbog granica diskontinuiteta specifičnog električnog otpora. Primjenom prezentiranog numeričkog algoritma i programskog paketa Matlab, izvršen je proračun otpora rasprostiranja uzemljivača, potencijal uzemljivača i raspodjela potencijala na površini tla stupne transformatorske stanice.

LITERATURA

- [1] T. Barić, Z. Haznadar, S. Nikolovski: Numerički algoritam za proračun otpora rasprostiranja štapnog uzemljivača primjenom metode integralnih jednažbi, *Energija, Časopis hrvatske elektroprivrede*, Broj 4., Zagreb, 2004.
- [2] I. Colominas, F. Navarrina, M. Casteleiro: A numerical formulation for grounding analysis in stratified soils, *IEEE T. Pow. Deliv.*, 17, 2002
- [3] T. Barić, V. Boras, S. Nikolovski: Analiza uticaja diskontinuiteta električne vodljivosti tla na otpor rasprostiranja uzemljivača, *Energija, Časopis hrvatske elektroprivrede*, Broj 4., Zagreb, 2006.
- [4] Z. Haznadar, S. Berberović, D. Vujević, D. Markovinović, N. Žanić, Z. Žic: Dodirni napon i raspodjela potencijala

uzemljivača u energetske sustavima, *Energija*, Broj 7-8, Zagreb, 1981.

- [5] F. Majdančić: Uzemljivači i sustavi uzemljenja, *Graphis*, Zagreb, 2004.

BIOGRAFIJA

Adnan Mujezinović je rođen 21.02.1987. u Sarajevu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 2009., a magistrirao na istom 2011. Područja profesionalne orijentacije su mu: katodna zaštita, uzemljivački sistemi, električna mjerenja, električne instalacije i mjere sigurnosti.

Alija Muharemović rođen je 1951. u Višegradu. Profesor je Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu na predmetima „Električna mjerenja“ i „Elektroenergetski sistem i okolina“. Diplomirao je 1974. na istom fakultetu. Magistarski rad Katodna zaštita u funkciji zaštite cjevovoda odbranio je 1981., a doktorsku disertaciju Doprinos analizi uticaja polarizacionih efekata u optimizaciji i dimenzionisanju sistema katodne zaštite 1989., obje na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Autor je više knjiga i radova iz oblasti katodne zaštite, kao i različitih projekata iz ove oblasti, kako u zemlji tako i u inozemstvu. U periodu 1991.-1996. obavljao je funkciju Pomoćnika ministra za energetiku u Vladi BiH. U ratnom razdoblju, posebno težak problem bila je opskrba Sarajeva energijom, pa se njegov tadašnji angažman može istaći kao poseban doprinos u preživljavanju grada.

Aida Muharemović je rođena 29.06.1986. u Sarajevu. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 2009., a magistrirala na istom 2011. Trenutno je zaposlena u BH Telekomu. Područja profesionalne orijentacije su joj: elektromagnetska kompatibilnost, električna mjerenja, električne instalacije i mjere sigurnosti.