

Procedure za određivanje otpornosti rešetkaste uzemljivačke elektrode trafostanice

Dejan Jovanović
Katedra za teorijsku elektrotehniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Niš, Srbija
dejan.jovanovic@elfak.ni.ac.rs
ORCID 0000-0002-7159-7196

Nenad Cvetković
Katedra za teorijsku elektrotehniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Niš, Srbija
nenad.cvetkovic@elfak.ni.ac.rs
ORCID 0000-0003-2477-3289

Miodrag Stojanović
Katedra za energetiku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Niš, Srbija
miodrag.stojanovic@elfak.ni.ac.rs
ORCID 0000-0002-6560-0619

Vladimir Stanković
Katedra za energetske procese i zaštitu
Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu
Niš, Srbija
vladimir.stankovic@znrfak.ni.ac.rs
ORCID 0000-0003-2202-2502

Apstrakt— U radu je izvršena karakterizacija uzemljivača trafostanice realizovanog pomoću rešetkaste elektrode kao glavnog elementa uzemljivačkog sistema. To je učinjeno primenom različitih numeričkih modela, odnosno simulacije koja uključuje korišćenje programskog paketa COMSOL, kao i eksperimentalni metodi. Primenjene procedure opisane u radu uključuju korišćenje Metoda Momenata i različitih empirijskih formula za određivanje otpornosti uzemljivačkih elektroda. Navedeni metodi primenjeni su za određivanje otpornosti rešetkaste uzemljivačke elektrode postrojenja 35/10 kV trafostanice. Pri tome je izvršeno poređenje rezultata dobijenih proračunom, simulacijom i eksperimentalnim procedurama.

Ključne reči—Uzemljivač, električni potencijal otpornost, Metod Momenata.

I. UVOD

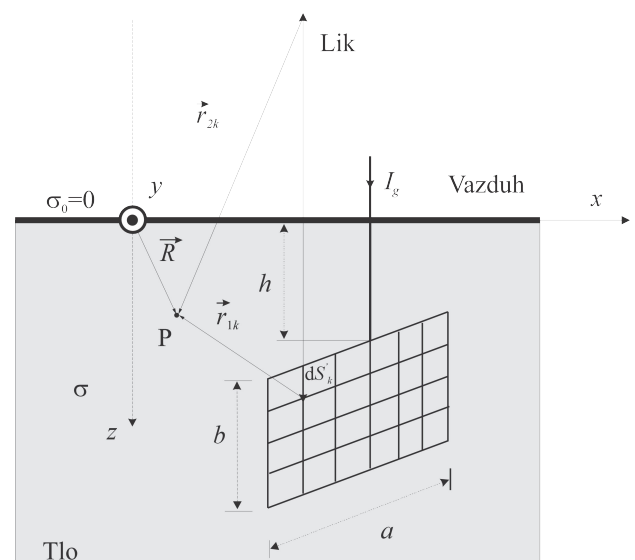
Opšte je poznato da je osnovna svrha uzemljivačkog sistema da sprovede struju kvara u okolno zemljište, bezbedno i bez posledica po radnu sredinu. Posledično, neophodno je da vrednost otpornosti uzemljivača, odnosno uzemljivačkog sistema bude što manja. Uzemljivački sistem trafostanice najčešće se realizuje uz pomoć nekoliko nekoliko međusobno povezanih štapnih elektroda povezanih jedna sa drugom, tako da formiraju elektrodni sistem kvadratne ili pravougaone geometrije. Pri tome je broj štap elektroda uključenih u sistem uslovljen projektovanom vrednošću otpora rešetkaste elektrode, kao i zadatim dimenzijama. Uzemljivač, odnosno uzemljivački sistem izuzetno je važan za rad trafostanica, s obzirom na činjenicu da treba da obezbedi pravilno funkcionisanje električnog sistema kao i zaštitu ljudi koji rade u blizini trafostanice, odnosno opreme od od strujnog udara tokom kvarova.

Postoje različiti postupci za određivanje otpornosti rešetkastog uzemljivača. Pomenuti problem je u ovom radu rešen pomoću kvazistacionarnog modela koji uključuje korišćenje Metoda Momenata [1], primenu poznatih empirijskih izraza (formula Dvajta, Loren-Nimanove, Nahmana i Švarca, [2]-[7]), kao i simulaciju korišćenjem programskog paketa

COMSOL [8], zasnovanog na FEM-u (Metod konačnih elemenata). Gore navedeni postupci primenjeni su za određivanje otpornosti uzemljivačke rešetkaste elektrode jedne realizovane trafostanice 35/10 kV i upoređeni sa eksperimentalnim.

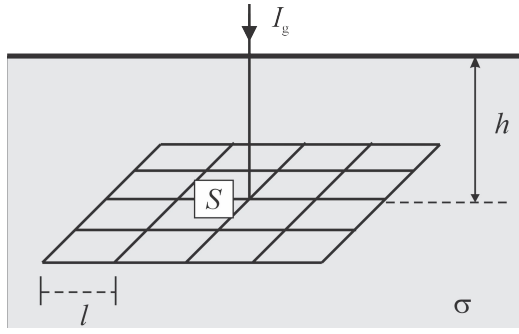
II. METOD MOMENATA

Primenom kvazistacionarne teorije ogledanja i pristupa opisanog u [9], može se formirati model za analizu rešetkaste elektrode smeštene u homogenoj zemlji specifične provodnosti σ , Sl. 1. Pri tome je specifična provodnost vazduha označena sa σ_0 ($\sigma_0 \approx 0$). Rešetkasta elektroda formirana je od N pravih provodnika dužine l_k i kružnog poprečnog preseka poluprečnika, a_k , $a_k \ll l_k$, $k = 1, 2, \dots, N$. Smeštena je u homogeno tlo specifične provodnosti σ , Sl. 1. Dimenzije proizvoljno orijentisane rešetkaste uzemljivačke elektrode koja se nalazi na dubini h u odnosu na površinu tla su $a \times b$.



Sl. 1 Rešetkasta uzemljivačka elektroda.

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva, nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije [broj ugovora: 451-03-137/2025-03/ 200102].



Sl. 2 Horizontalna rešetkasta uzemljivačka elektroda.

Kada se usvoji, za tanke provodnike opravdana pretpostavka da je gustina struje oticanja konstantna na svakom provodniku, potencijal u tački P (položaja definisanog vektorom $\vec{R}$) u okolini uzemljivačke elektrode sa Sl. 1, može se odrediti na osnovu izraza

$$\varphi(\vec{R}) = \sum_{k=1}^N \frac{I_k}{4\pi\sigma l_k} \int_{l_k} \left(\frac{1}{r_{1k}} + \frac{1}{r_{2k}} \right) ds'_k, k=1, \dots, N, \quad (1)$$

gde su I_k , $k=1, \dots, N$ ukupne struje oticanja sa površine N pravih provodnika, dok su sa l_k i s'_k , $k=1, \dots, N$ obeležene dužine i ose odgovarajućih pravih provodnika respektivno. Oznake r_{1k} i r_{2k} u (1) su rastojanja između tačke P i strujnog elementa (r_{1k}), odnosno njegovog lika u modifikovanom ravnom ogledalu (r_{2k}), $k=1, \dots, N$.

Uz pretpostavku da je površina elektrode ekvipotencijalna (koja je uobičajena kada se radi o kvazistacionarnom modelu), moguće je primeniti Metod momenata i podesiti vrednost potencijala $\varphi = U$ u tačkama na sredinama pravih provodnika koji formiraju rešetkastu elektrodu. Na ovaj način formira se sistem linearnih jednačina

$$\varphi \cong U, n=1, \dots, N. \quad (2)$$

Rešenje gornjeg sistema jednačina (2) su ukupne struje oticanja sa pojedinih elektroda, I_k , $k=1, \dots, N$. Struja napajanja dobija se kao suma svih tih struja, tj.

$$I_g = \sum_{k=1}^N I_k. \quad (3)$$

Sada se otpornost uzemljivačke elektrode može odrediti kao

$$R_g = U/I_g. \quad (4)$$

III. JEDNAČINE ZA KARAKTERIZACIJU REŠETKASTE ELEKTRODE

Za određivanje različitih parametara od interesa koji karakterišu rešetkastu elektrodu, kao što su otpornost, napon dodira/koraka, minimalne dimenzije elektrode, dužine provodnika i maksimalna struja kvara u praksi se koriste različiti empirijski izrazi.

U ovom delu teksta biće prikazane empirijske formule, koje se mogu koristiti za proveru projektovane otpornosti, odnosno dimenzionisanje rešetkaste uzemljivačke elektrode trafostanice, Sl. 2 [2-7]. Njihov značaj je posebno izražen u okviru faze

projektovanja i konstrukcije, kao i eksperimentalne verifikacije karakteristika elektrode.

A. Loren Nimanova formula

Otpornost rešetkaste uzemljivačke elektrode može se odrediti na osnovu izraza

$$R_g = \frac{1}{4\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{S}} + \frac{1}{\sigma L_T}, \quad (5)$$

gde je σ specifična provodnost tla, S je oznaka za površinu koja odgovara uzemljivačkoj elektrodi, dok L_T odgovara ukupnoj dužini provodnika koji sačinjavaju rešetkastu elektrodu. Izraz (5) takođe je poznat kao IEEE Std. 80 - 2000 formula [2].

B. Dvajtova formula

Proračun otpornosti rešetkaste uzemljivačke elektrode prema [6] može se izvršiti pomoću formule

$$R_g = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{S}}. \quad (6)$$

Sa S je, kao i u jednačini (5) označena površina koja odgovara uzemljivačkoj elektrodi. Poređenjem izraza (5) i (6) uočava se da u (6) nema drugog člana koji se dodaje da bi se odredila gornja vrednost otpornosti, što je vezano za pojedine bezbednosne aspekte.

C. Nahmanova formula

Prema Nahmanovoj formuli [5], otpornost rešetkaste elektrode moguće je izračunati kao

$$R_g = 0.13 \frac{1}{\sigma \sqrt{S}} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{l}{\sqrt{S}} \right) \log_{10} \left(\frac{2400 \sqrt{S}}{N} \right), \quad (7)$$

gde je sa S , kao i izrazima (5) i (6) obeležena površina koja odgovara uzemljivačkoj elektrodi, N je ukupan broj ćelija u okviru rešetke, dok je l dužina provodnika. Validnost Nahmanove formule u praksi potvrđena je za slučaj kvadratnih i pravougaonih elektroda.

D. Švarcova formula

Švarcova formula [7] koja se primenjuje za određivanje otpornosti rešetkaste elektrode je oblika

$$R_g = \frac{1}{\sigma \pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{h'} \right) + K_1 \left(\frac{L_T}{\sqrt{S}} \right) - K_2 \right]. \quad (8)$$

U prethodnom izrazu d_0 je oznaka za prečnik provodnika od kojeg je načinjena rešetkasta elektroda, h je dubina ukopavanja, dok su ostali parametri

$$h' = \begin{cases} \sqrt{d_0 h}, & h \neq 0 \\ 0.5, & h = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

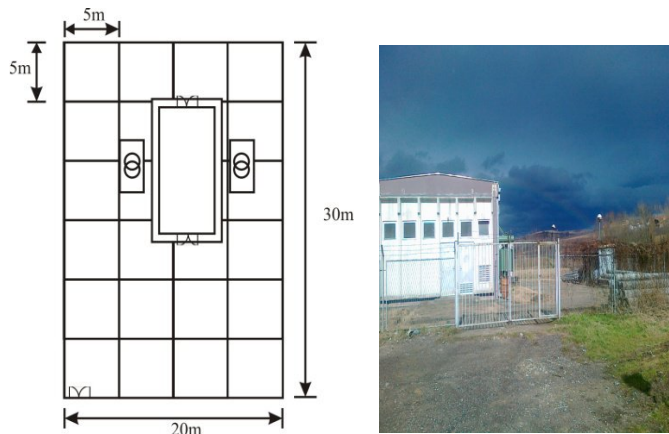
$$K_1 = \begin{cases} -0.05W + 1.2, & h = \sqrt{S}/10 \\ -0.04W + 1.41, & h = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

$$K_2 = \begin{cases} 0.1W + 4.68, & h = \sqrt{S}/10 \\ 0.15W + 1.2, & h = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$W = \frac{\text{Dužina rešetkaste elektrode}}{\text{Širina rešetkaste elektrode}} \quad (12)$$

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Merenje otpornosti rešetkaste uzemljivačke elektrode realizovano je na uzemljivačkom sistemu trafostanice od 35 kV, Sl. 3. Uzemljivački sistem realizovan je u skladu sa Pravilnikom o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, [10]. Dimenzije uzemljivačke rešetkaste elektrode prikazane su u Tabeli I.



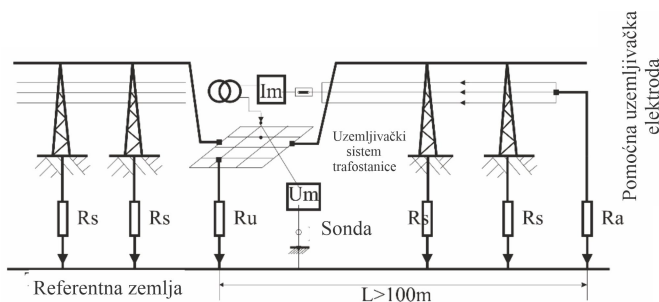
Sl. 3 Spoljašnji izgled i konfiguracija rešetkaste uzemljivačke elektrode trafostanice 35/10 kV.

TABELA I. DIMENZIJE REŠETKASTE UZEMLJIVAČKE ELEKTRODE U METRIMA

Dužina rešetke	Širina rešetke	Dužina ćelije	Širina ćelije	Dubina ukopavanja
30	20	5	5	1

Merenje je realizovano $U-I$ metodom (Sl. 4) pomoću sledećih instrumenata.

- Elektromagnetni ampermetar opsega 0-6 A, klase tačnosti 1.5;
- Strujni transformator klase tačnosti 0.2;
- Digitalni unimer MAS 345 unutrašnje otpornosti 10 M Ω ; i
- set provodnika ukupne dužine 600 m.



Sl. 4 Ilustracija $U-I$ metoda za merenje otpornosti rešetkaste uzemljivačke elektrode.

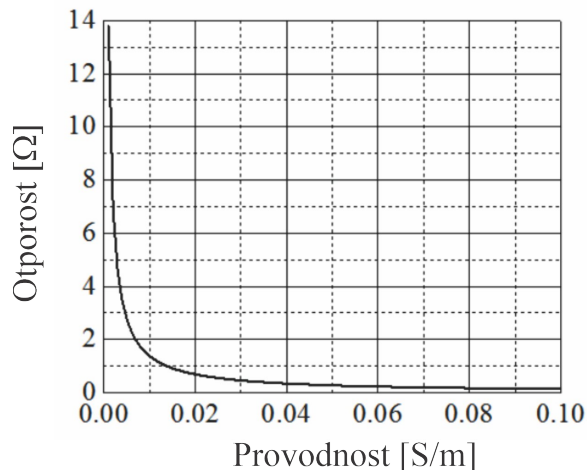
V. PRIMENA METODA KONAČNIH ELEMENATA (FEM) – PROGRAMSKI PAKET COMSOL

COMSOL je softverski alat baziran na Metodu konačnih elemenata i namenjen je za različite aplikacije u fizici i inženjerstvu, naročito kada se radi o tzv. spregnutim problemima koji kombinuju uticaj više vrsta fizičkih polja. U ovom slučaju, AC/DC modul korišćen je sa "Electric Currents" interfejsom.

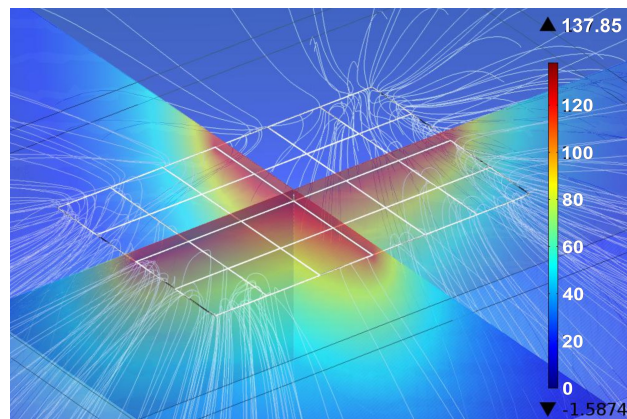
Geometrija uzemljivačkog sistema modelovana je po uzoru na realan problem čija je geometrija kvantifikovana parametrima iz Tabele I. Kako je u numeričkom pristupu pretpostavljeno da je okolno tlo praktično neograničeni domen, u okviru modela sistema ova pretpostavka realizovana je korišćenjem domena čije su dimenzije mnogo veće od uzemljivačke elektrode uz granični uslov nulnog potencijala.

Kako se u realnim uslovima specifična provodnost tla menja zavisno od sezone što utiče na bezbednost uzemljivačkog sistema, napon dodira i napon koraka, simulacija je realizovana za različite vrednosti specifične provodnosti tla $\sigma = [0.001, 0.01 \text{ i } 0.1] \text{ S/m}$. Otpornost uzemljivača u funkciji specifične provodnosti okolnog tla prikazana je na Sl. 5.

Na Sl. 6 prikazani su raspodela električnog potencijala i izgled strujnica.



Sl. 5 Otpornost rešetkaste uzemljivačke elektrode u funkciji specifične provodnosti tla.



Sl. 6 Raspodela električnog potencijala i izgled strujnica.

VI. POREĐENJE REZULTATA

Otpornosti rešetkaste uzemljivačke elektrode trafostanice dobijene primenom Metoda Momenata, korišćenjem empirijskih formula i programskog paketa COMSOL prikazane su u Tabeli II. Parametri geometrije elektrode ranije su dati u Tabeli I. Specifična provodnost tla je $\sigma = 0.03 \text{ S/m}$. Za merenje specifične provodnosti (otpornosti) tla korišćen je instrument GEOHM C (Sl. 7) u okviru Venerovog metoda. Detaljan opis merenja izložen je u [11].



Sl. 7 GEOHM C instrument.

TABELA II. POREĐENJE OTPORNOSTI REŠETKASTE UZEMLJIVAČKE ELEKTRODE

Method	$R_g [\Omega]$
MoM	0.5058
COMSOL	0.456
Loren-Niman	0.7178
Dvajt	0.602
Nahman	0.517
Švarc	0.33
Eksperimentalni metod	0.264

VII. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran problem rešetkaste elektrode, postavljene horizontalno u homogenoj zemlji. Primenjeni su različiti metodi, empirijske formule, programski paketi, kao i eksperimentalni metod.

Rezultati dobijeni merenjem upoređeni su sa onima realizovanim pomoću Metoda Momenata, programskog paketa COMSOL i empirijskih formula koje se koriste u praksi da bi se proverila njihova tačnost.

Pojedini izrazi korišćeni u radu dali su različit rezultat u odnosu na onaj dobijen primenom COMSOL-a, što je očekivano, s obzirom na efekat starenja, realne uslove isl.

Kada se uporede rezultati dobijeni uz pomoć COMCOL-a i Metoda Momenata i empirijskih formula, najbolje slaganje postoji između Metoda Momenata i Nahmanove formule.

Vrednosti otpornosti dobijene merenjem manje su od onih dobijenih drugim pristupima. To je rezultat činjenice da tokom merenja postoji uticaj kablova za napajanje trafostanice koji se ponašaju kao dodatne uzemljivačke elektrode u okviru uzemljivačkog sistema.

LITERATURA

- [1] R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods, The Macmillan Company, New York, 1969.
- [2] IEEE Std 80-2000, IEEE guide for safety in AC substation grounding, January 2000
- [3] G. Vijayaraghavan, M. Brow and M. Barnes, Practical Grounding Bonding, Shielding and Surge Protection, Elsevier, 2004.
- [4] P.G. Laurent, Guide sur le calcul l' execution et la mesure des prises de terre, Rev. Gen. Electr., vol. 53, pp. 455-467, 563-572, 1972.
- [5] J. Nahman and V. Djordjevic, "Resistance to ground of combined grid-multiple rods electrodes," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 3, 1996, pp. 1337-1342. DOI: 10.1109/61.517488
- [6] H.B. Dwight, "Calculations of resistances to ground," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 55, No. 12, 1936, pp.1319-1328. DOI: 10.1109/T-AIEE.1936.5057209
- [7] S. J. Schwartz, "Analytical expression for resistance of grounding systems," Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 73, No. 2, 1954, pp. 1011-1016. DOI: 10.1109/AIEEPAS.1954.4498923
- [8] <http://www.comsol.com>
- [9] N.N. Cvetković, Prilog modelovanju uzemljivačkih sistema u prisustvu polusferične i cilindrične nehomogenosti, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultetu Nišu, Srbija, 2009. DOI: 10.2298/NI20090212CVETKOVIC.
- [10] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000V, Službeni glasnik SRJ, 37/95, 1995.
- [11] https://www.gossenmetrawatt.com/resources/p1/geohm_c/ba_gb.pdf

ABSTRACT

The characterization of substation grounding grid electrode using various numerical models, simulation and experimental methods is carried out in the paper. The presented procedures include the application of Method of Moments (MoM), using various empirical equations for design of grounding electrodes and simulations in COMSOL software package. They are applied for the analysis of the grounding grid electrode resistance of one utility 35/10 kV substation. The obtained results are compared with experimental ones.

PROCEDURES FOR DETERMINING THE RESISTANCE OF SUBSTATION GROUNDING GRID ELECTRODES

Dejan Jovanović, Nenad Cvetković, Miodrag Stojanović, Vladimir Stanković