Poređenje mogućnosti konvencionalne metodologije i softvera CYMGRD pri projektovanju uzemljiva a tipa ne distributivne transformatorske stanice

MILOŠ M. JE MENICA, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

JOVAN V. TRIFUNOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

MIOMIR B. KOSTIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 621.311.42:621.316.99]:004.4

DOI: 10.5937/tehnika1601089J

Proces projektovanja uzemljiva a elektroenergetskih objekata u mnogome zavisi od sastava i električnih karakteristika tla, naponskog nivoa, dimenzija objekta i drugih faktora. U ovom radu su prikazani na inu projektovanja uzemljiva a tipa ne distributivnih transformatorskih stanica primenom dve razli ite metodologije prora una relevantnih parametara. Prva, koju projektanti u Srbiji naj eš e primenjuju, predstavlja primenu jednostavnih empirijskih formula i grafikona, oslanjaju i se na važe e pravilnike, nacionalne standarde i tehni ke preporuke. Drugi pristup predstavlja primena specijalizovanog softverskog alata, baziranog na savremenim matemati kim metodama, iji se rezultati verifikuju u skladu sa važe im me unarodnim standardima. Izvršena je uporedna analiza rezultata dobijenih primenom obe metodologije, kao i mogu nosti koje one pružaju projektantu. Oba predstavljena na ina projektovanja primenjiva su kako na uzemljiva e novih elektroenergetskih objekata, tako i pri rekonstrukciji ili preventivnom održavanju postoje ih uzemljiva a.

Ključne reči: softver CYMGRD, distributivna transformatorska stanica, projektovanje uzemljiva a

1. UVOD

Potreba za izvo enjem uzemljenja distributivnih transformatorskih stanica od suštinskog je zna aja za bezbednost osoblja i pouzdan rad tog dela elektroenergetskog sistema. Projektovanje efikasnog uzemljenja u elektroenergetskim objektima neophodno je zbog ograničavanja napona dodira i napona koraka na vrednosti koje se smatraju prihvatljivim sa aspekta bezbednosti, za omogućavanje funkcionalnosti zaštitnih elemenata, sprečavanje mehaničkih i termičkih oštećenja opreme, kao i za potrebe ostvarivanja elektromagnetske kompatibilnosti i obezbeđivanja kvalitetnog napajanja.

Osnovni cilj projektanta uzemljenja je da projektuje uzemljiva minimalne cene koji ispunjava sve zahtevane funkcije zaštite ljudi i opreme. Projektovanje i izvo enje uzemljenja energetskih postrojenja naizmeničnog napona iznad 1 kV vrši se u skladu sa

Pravilnikom o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V [1], a bliže je regulisano standardom SRPS EN 50522:2013 [2]. U međunarodnim propisima ova oblast je bliže definisana standardom IEEE 80-2000 [3].

S jedne strane, u Srbiji je projektovanje uzemljiva a u najvećoj meri zasnovano na primeni odgovarajućih empirijskih formula iz važećih standarda i propisa. Nadležno elektroprivredno preduzeće, kao korisnik i vlasnik distributivne mreže, donelo je odgovarajuće preporuke, sa ciljem efikasnijeg projektovanja, izgradnje i održavanja elektrodistributivne mreže. Konkretno, Tehnička preporuka broj 7 [4], izdata od nadležnog elektrodistributivnog preduzeća, onosi se na izvo enje uzemljenja u distributivnim transformatorskim stanicama, i većina projekatata pri projektovanju tipičkih sistema uzemljenja elektroenergetskih objekata oslanja se na nju.

S druge strane, detaljna analiza rezultata dobijenih primenom empirijskih formula iz odgovarajućih standarda, pravilnika i tehničkih preporuka može se sprovesti upotrebom specijalizovanog softverskog alata, CYMGRD [5], zasnovanog na korišćenju numeričke metode konačnih elemenata (Finite Element Method

Adresa autora: Miloš Je menica, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 09.10.2015.

Rad prihvaćen: 25.01.2016.

(FEM)). Suštinske prednosti primene ovakvog specijalizovanog softvera su preciznije izra unavanje otpornosti rasprostiranja uzemljiva a i vrednosti razlike potencijala dodira i razlike potencijala koraka, kao i vizuelizacija raspodele potencijala u prostoru okolnog tla (pre svega na njegovoj površini), uz mogućnost analize različitih uzemljiva ikih struktura u kratkom vremenskom periodu.

U radu su predstavljeni na ini prora una uzemljiva a tipa ne distributivne transformatorske stanice 10/0.4 kV, zasnovani kako na primeni formula iz pravilnika, nacionalnih standarda i tehničkih preporuka (Metodologija I), tako i na primeni softvera CYMGRD (Metodologija II), baziranog na FEM-u i standardu IEEE 80-2000. Predstavljeni su dobijeni rezultati, kao i prednosti i mogućnosti koje pruža upotreba softvera u utvrđivanju raspodele potencijala u prostoru oko uzemljiva a.

2. PROJEKTOVANJE UZEMLJIVA A DISTRIBUTIVNE TRANSFORMATORSKE STANICE

2.1 Definicije osnovnih električnih parametara uzemljiva a

Otpornost rasprostiranja uzemljiva a (otpornost uzemljenja) predstavlja otpornost zemlje (okolnog medijuma) između površine uzemljiva a i tačka referentne zemlje (tačka nultog potencijala).

Potencijalna razlika dodira definiše se kao najveća razlika potencijala koje se uspostavljaju između izloženih elektroprovodnih delova opreme galvaniski povezanih sa uzemljivačem i stajnih tačaka koje su od njih udaljene 1 m [6]. Napon dodira je deo potencijalne razlike dodira kome je izložen čovek pri dodiru, i on je manji od potencijalne razlike dodira za pad napona na prelaznoj otpornosti kontakta stopalo-tlo [1].

Potencijalna razlika koraka je najveća razlika potencijala koja može da se premosti korakom dužine 1 m [6]. Potencijalna razlika dodira je po pravilu veća i za čoveka je organizam opasnija od potencijalne razlike koraka, pošto pri dodiru veći deo struje "prolazi" kroz srce.

Napon koraka je deo potencijalne razlike koraka kome je izložen čovek, i on je manji od potencijalne razlike koraka za padove napona na prelaznim otpornostima kontakata stopalo-tlo [1].

Grafički prikaz raspodele potencijala na površini tla oko cevnog uzemljiva a prikazan je na slici 1. Na osnovu prethodnih definicija, slike 1 i referenci [1, 6], važe sledeće relacije:

$$\phi_0 = R_U \cdot I_k \quad (1)$$

$$E_D = \phi_0 - \phi_A \quad (2)$$

$$U_D = \frac{E_D}{1 + 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \dots_s} \quad (3)$$

$$E_K = \phi_B - \phi_C \quad (4)$$

$$U_K = \frac{E_K}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \dots_s}, \quad (5)$$

u kojima su: ϕ_0 – potencijal uzemljiva a, $\phi_{A(B,C)}$ – potencijal u tačkama A, B i C, respektivno, R_U – otpornost rasprostiranja uzemljiva a, I_k – struja zemljospoja koja se odvodi sa uzemljiva a, E_D (E_K) – potencijalna razlika dodira (koraka), U_D (U_K) – napon dodira (koraka) i s – specifična električna otpornost površinskog sloja tla.

Slika 1 - Grafički prikaz raspodele potencijala na površini tla oko cevnog uzemljiva a; 1 – zemljovod, 2 – uzemljiva [6]

2.2 Oblik i dimenzije uzemljiva a distributivne transformatorske stanice

Dimenzionisanje uzemljiva a se vrši na osnovu toplotnih opterećenja provodnika uzemljiva a i maksimalno dozvoljenih vrednosti napona dodira i koraka koji se mogu pojaviti na štitnoj površini tla. U razmatranom primeru, osnovni ulazni parametar za dimenzionisanje uzemljiva a je vrednost kapacitivne struje zemljospoja celokupne povezane srednjonaponske mreže [7, 8].

Pri projektovanju uzemljiva a distributivne transformatorske stanice 10/0.4 kV, koja je analizirana u radu, pošlo se od sledećih propisanih tehničkih uslova:

transformatorska stanica radi u izolovanoj mreži 10 kV, kablovima 3 x XHE49-A 1x70 mm², 10 kV, povezana je na postoje u nadzemnu mrežu u neposrednoj blizini, ukupna kapacitivna struja zemljospoja galvanski povezane mreže ne prelazi 20 A, trajanje zemljospoja je ograničeno na 3 sekunde (prema [9]), transformatorska stanica je slobodno stojeća i nije u sklopu drugog objekta, i specifična otpornost tla procenjuje se na 100 Ωm, što odgovara glinastoj zemlji.

Uzemljenje transformatorske stanice 10/0.4 kV koja radi u izolovanoj srednjonaponskoj mreži sa kablovskim uvođenjem u transformatorsku stanicu realizuje se kao združeno, tako što se izvodi zajednički uzemljivač za radno i zaštitno uzemljenje [1]. Združeno uzemljenje predmetne transformatorske stanice i unutrašnji i spoljašnji prsten sa četiri vertikalno ukopane cevi u uglovima spoljašnjeg prstena (slika 2) [4,10]. Za izvođenje horizontalno položenih prstenova najčešće je predviđeno bakarno užice poprečnog preseka 35 mm², a pocinkovane cevi su obično prečnika 63.5 mm (2.5") i dužine 3 m.

Slika 2 - 3D prikaz dvoprstenastog uzemljivača sa cevima; 1 – unutrašnji (gornji) prsten, 2 – spoljašnji (donji) prsten, 3 – kosa veza, 4 – vertikalna cev

Predviđeni tipski montažni objekat, tipa EBB-C [11], nema mogućnost izrade temeljnog uzemljivača u temelju objekta, jer se objekat formira od modularnih prefabrikovanih betonskih elemenata. Iz tog razloga, združeno uzemljenje se izvodi na osnovu Tehničke preporuke 1b [12]. Na rastojanju od 1 m od temelja tipskog montažnog objekta i na dubini od 0.5 m postavlja se prvi (unutrašnji) prsten (umesto temeljnog uzemljivača), a na rastojanju od najmanje 2 m od temelja objekta i na dubini od 0.8 m drugi (spoljašnji) prsten, sa vertikalno ukopanim cevima u njegovim temenima.

Na osnovu dimenzija osnove predviđenog montažnog objekta transformatorske stanice, koje su 4.3 m x 3.4 m (dužina x širina), dimenzije unutrašnjeg prstena

iznose 6.3 m x 5.4 m, a spoljašnjeg 8.3 m x 7.4 m. Unutrašnji i spoljašnji prsten, koji su na različitim dubinama, galvanski su povezani na dva dijametralno suprotna mesta kosim vezama (slika 2).

3. PRORAČUN I PROVERA UZEMLJIVAČA PO METODOLOGIJI I

Prvi korak pri projektovanju opisanog uzemljivača predstavlja računsku proveru njegovih napred navedenih (inicijalnih) dimenzija. Provera podrazumeva tri koraka, i to:

- određivanje maksimalne dozvoljene vrednosti otpornosti rasprostiranja uzemljivača,
- izračunavanje vrednosti otpornosti rasprostiranja uzemljivača za konkretan primer, i
- poređenje vrednosti otpornosti rasprostiranja uzemljivača sa maksimalnom dozvoljenom vrednošću i usvajanje rešenja uzemljivača.

3.1 Određivanje maksimalne dozvoljene vrednosti otpornosti rasprostiranja uzemljivača

Smatra se da uzemljenje transformatorske stanice zadovoljava uslove bezbednosti sa aspekta napona dodira ako je zadovoljen uslov iz izraza (6), navedenog u [1]:

$$R_U \leq \frac{k_d \cdot U_{doz}}{r \cdot I_k} \quad (2)$$

gde su: R_U – otpornost rasprostiranja uzemljivača, k_d – saizilac koji predstavlja odnos potencijala uzemljivača i napona dodira, U_{doz} – maksimalan dozvoljeni napon dodira, r – redukcionni faktor napojnog srednjonaponskog voda, i I_k – struja zemljospoja srednjonaponske mreže koja se odvodi sa uzemljivača.

Na osnovu razmatranja iz [1] i [10], u slučajevima u kojima se trajanje zemljospoja ograničava na $t \leq 3$ s i kod kojih ukupna kapacitivna struja zemljospoja ne prelazi 20 A, usvaja se vrednost saizilca $k_d=2$, bez obaveze njenog dokazivanja proračunom ili merenjem. Predmetna transformatorska stanica ne radi u razgratatoj srednjonaponskoj mreži, pa srednjonaponski napojni kablovi tipa 3 x XHE49-A 1x70 mm², 10 kV ne deluju kao uzemljivač, jer električne zaštite ostalih srednjonaponskih kablova nisu povezane. U [13] je predloženo da se izvrši povezivanje električnih zaštita srednjonaponskih kablova sa uzemljivačem najbližeg stuba 10 kV voda u cilju formiranja efikasnijeg uzemljivača kog sistema. Na taj način bi se smanjila otpornost rasprostiranja, ali bi se omogućilo iznošenje potencijala na koji dolazi uzemljivač transformatorske stanice izvan granica štene površine tla. U radu se razmatra najjednostavniji slučaj sa stanovišta projektovanja, a ujedno i najnepovoljniji slučaj sa stanovišta bezbednosti na štenej površini tla transformatorske

stanice, zbog ega efekat povezivanja elektri nih zaštita srednjonaponskih kablova sa uzemljiva em transformatorske stanice nije tretiran. Zbog toga je u daljim prora unima usvojena vrednost redukcionog faktora napojnog srednjonaponskog voda $r=1$. Na osnovu injenica sadržanih u [1], odre ena je maksimalna trajno dozvoljena vrednost napona dodira, koja iznosi 65 V. Kriterijum zaštite od opasnog napona dodira ispunjen je ako pri pojavi zemljospoja u transformatorskoj stanici vrednost napona dodira nije ve a od njegove maksimalne dozvoljene vrednosti. Grani nu, tj. Maksimalnu dozvoljenu, vrednost otpornosti rasprostiranja uzemljiva a mogu e je izra unati zamenom usvojenih numerikih vrednosti u izraz (6):

$$R_U \leq \frac{2 \cdot 65}{1 \cdot 20} = 6.5 \Omega \quad (3)$$

Ukoliko je ispunjen uslov iz izraza (7), smatra se da su za konkretan primer uslovi bezbednosti sa aspekta napona dodira ispunjeni i unutar i izvan transformatorske stanice, kao i u niskonaponskoj mreži i instalacijama potroša a, pa tada nije potrebno izra unavanje napona dodira i koraka. Dakle, prora un ili merenje napona dodira i koraka ne vrši se ako je uzemljiva dimenzionisan u skladu sa zahtevima iz [4].

3.2 Izra unavanje otpornosti rasprostiranja uzemljiva a po Metodologiji I

U [4] je dat postupak za izra unavanje otpornosti rasprostiranja tipskih uzemljiva a transformatorske stanice 10/0.4 kV, koji je zasnovan na formuli:

$$R = r \cdot \dots \quad (4)$$

u kojoj su: R – otpornost rasprostiranja uzemljiva a, r – relativna otpornost rasprostiranja, i ... – specifi na otpornost tla.

Za dve tipi ne konstrukcije uzemljiva a, vrednost parametra r može da se odredi pomo u dijagrama iz [4], prikazanog na slici 3. Kriva "a" se odnosi na dvoprstenasti uzemljiva kvadratnog oblika, a kriva "b" na uzemljiva u obliku trougla, oba sa vertikalnim cevima u temenima. Vrednosti parametra r o itavaju se sa odgovaraju ih krivih prikazanih na slici 3, na osnovu projektom definisanih rastojanja izme u vertikalnih elektroda.

Prikazani postupak se može primeniti i na izra unavanje otpornosti rasprostiranja dvoprstenastih uzemljiva a pravougaonog oblika. U tom slu aju, potrebno je dvoprstenasti uzemljiva pravougaonog oblika ekvivalentirati tipskim dvoprstenastim uzemljiva em kvadratnog oblika.

Ukoliko se sa B_U i C_U ozna e dužina i širina spoljašnjeg pravougaonog prstena, a sa A_U dužina stranice ekvivalentnog tipskog uzemljiva a kvadratnog oblika, tada važi:

$$2 \cdot B_U + 2 \cdot C_U = 4 \cdot A_U \quad (5)$$

Slika 3 - Relativna otpornost rasprostiranja tipskih uzemljiva a u zavisnosti od rastojanja izme u vertikalnih elektroda [4]

Vrednost parametra r se u tom slu aju odre uje pomo u dijagrama sa slike 3, na osnovu vrednosti A_U izra unate pomo u (9).

3.3 Pore enje maksimalno dozvoljene sa izra unatom otpornoš u rasprostiranja uzemljiva a

Primenom formule (1) i dijagrama sa slike 3, koje projektanti naj eš e koriste, izra unava se otpornost rasprostiranja predmetnog uzemljiva a. Dobijena vrednost se upore uje sa njegovom maksimalnom dozvoljenom vrednoš u, na osnovu ega se projektno rešenje usvaja ili odbacuje.

Na osnovu numerikih vrednosti koje se odnose na konkretan primer, dobija se da rastojanje izme u vertikalnih cevi koje su izvedene u temenima spoljašnjeg prstena ekvivalentnog dvoprstenastog uzemljiva a kvadratnog oblika iznosi 7.85 m. Za dvoprstenasti uzemljiva sa slike 2 i rastojanje izme u vertikalnih elektroda od 7.85 m, dobija se relativna otpornost rasprostiranja $r=0.046 \Omega/\Omega m$, a na osnovu izraza (8) otpornost rasprostiranja uzemljiva a $R_U=4.6 \Omega$. Ona ispunjava uslov (7), pa se stoga ovo projektno rešenje može usvojiti. Dakle, u pogledu bezbednosti analizirani uzemljiva ZADOVOLJAVA.

Nakon izvo enja uzemljiva a, potrebno je izmeriti njegovu otpornost rasprostiranja i uporediti je sa vrednoš u dobijenom prora unom. Dobro projektovano uzemljenje odlikuje mala otpornost rasprostiranja uzemljiva a, pa ukoliko je ona ve a od propisane potrebno je pristupiti dodatnim merama kako bi se ona smanjila ispod dozvoljene vrednosti. Neke od dodatnih mera su izolovanje stajališta krupnim, slaboprovodnim šljunkom ili asfaltiranje.

U slu aju izostavljanja vertikalnih elektroda (zbog vrste tla (kamen i sl.) ili zbog opasnosti od ošte enja

podzemnih instalacija), zahtevana otpornost uzemljenja ostvaruje se povećanjem dimenzija spoljašnjeg prostena za 25% [10].

4. PRORA UN I PROVERA UZEMLJIVA A POMO U METODOLOGIJE II

Metodologija II, korišćena pri proraunu, zasnovana je na upotrebi softvera CYMGRD [5], u kojoj je osnovi metoda konačnih elemenata [14,15,16]. Na osnovu nje se vrše prorauni otpornosti rasprostiranja uzemljiva a, jačine struje kratkog spoja i raspodele potencijala u okolnom prostoru.

Uporedo sa FEM proraunima, softver izračunava maksimalne dozvoljene vrednosti veličina od interesa po važećem međunarodnom standardu IEEE 80-2000 [3], da bi po završetku prorauna vršio poređenje vrednosti dobijenih pomoću FEM-a sa maksimalnim dozvoljenim vrednostima dobijenim na osnovu zahteva standarda.

4.1 Određivanje maksimalnih dozvoljenih vrednosti relevantnih veličina

Analiza se vrši za osobu mase 70 kg [3], a odgovarajuć i izrazi za maksimalne dozvoljene potencijalne razlike dodira i koraka u tom slučaju su:

$$E_{DMAX} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \dots_s) \cdot 0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

$$E_{KMAX} = \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \dots_s) \cdot 0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

u kojima su: E_{DMAX} (E_{KMAX}) – maksimalna dozvoljena potencijalna razlika dodira (koraka), t_s – vreme trajanja strujnog udara, C_s – faktor smanjenja kada je prisutan površinski sloj velike specifične električne otpornosti, i_s – specifična električna otpornost površinskog sloja tla.

Za simulaciju raspodele potencijala potrebno je što bolje poznavati električne karakteristike tla. Tlo se može modelovati ne samo kao uniformno (homogeno), nego i kao dvoslojno, sa različitim vrednostima specifične otpornosti slojeva i dubinom gornjeg sloja. Važno je napomenuti da tačnost softverskog algoritma zavisi od toga koliko model okolnog tla odražava stvarne uslove na terenu.

U konkretnom slučaju, u kome je pretpostavljeno uniformno tlo (bez površinskog sloja), faktor smanjenja ima vrednost 1, dok je vrednost specifične električne otpornosti tla 100 Ω m. Uvažavajući dimenzije uzemljiva a, korišćenjem formula (10) i (11) izvršen je proraun iji su rezultati:

$$E_{DMAX} = 104.24 V \quad (8)$$

$$E_{KMAX} = 145.03 V \quad (9)$$

4.2 Proraun relevantnih veličina upotrebom FEM-a

Na samom početku rada sa programom potrebno je uneti dimenzije, vrstu materijala i oblik uzemljiva a. Takođe, unose se vrednosti potencijalne struje kvara i njeno trajanje, broj srednjonaponskih vodova koji su priključeni na transformatorsku stanicu, kao i karakteristike okolnog tla (broj slojeva i njihove debljine i specifične otpornosti). Nakon toga, a pre pokretanja simulacije, potrebno je uneti granice modelovanja i interval (rezoluciju) izmeđutak za koji se vrši analiza. Program poseduje mogućnost podešavanja dužine koraka za proraun potencijalne razlike koraka, ali je na osnovu definicije iz poglavlja 2.1 usvojena vrednost od 1 m. Nakon FEM analize, vrednosti potencijala za svaku tačku definisanu prostornim koordinatama smeštaju se u odgovarajuću bazu podataka.

Na osnovu njih se potom vrše prorauni veličina od interesa. Osim navedenog, softver CYMGRD pruža mogućnost grafičkog prikaza raspodele potencijala u bilo kojoj ravni ili pravou u okviru modela, što je njegova bitna prednost u odnosu na standardne metode prorauna. Na osnovu razlike potencijala uzemljiva a (koji se ne razlikuje značajno od potencijala izloženih elektroprovodnih delova) i potencijala određene stajne tačke na površini tla, softver određuje vrednost potencijalne razlike dodira za tu stajnu tačku pomoću izraza:

$$E_{D(x,y)} = \phi_0 - \phi_{ST(x,y)}, \quad (10)$$

u kome su: $E_{D(x,y)}$ – potencijalna razlika dodira za stajnu tačku određenu koordinatama x i y , ϕ_0 – potencijal uzemljiva a, i $\phi_{ST(x,y)}$ – potencijal stajne tačke određene koordinatama x i y .

Slika 4 - Raspodela potencijalne razlike dodira u tačkama na štitenjnoj površini tla

U konkretnom primeru, ne postoji mogućnost iznošenje potencijala uzemljiva a izvan transformatorske stanice na daljinu ve u od 1 m od njenih zidova (grani ni slu aj je kada su otvorena vrata širine 1 m, koja su povezana sa uzemljiva em). To zna i da je, u konkretnom primeru, od napona dodira potrebno štititi samo površinu tla ije su granice na udaljenosti 2 m od zidova objekta. Potencijalne razlike dodira u svakoj ta ki št ene površine tla, u slu aj u pojave zemljospoja, predstavljene su na slici 4 pomo u razli itih boja i ekvipotencijalnih linija. Program ima mogućnost odre ivanja ta ke sa maksimalnim potencijalom (ili maksimalnom potencijalnom razlikom dodira ili koraka) na št enoj površini.

4.3 Pore enje maksimalnih dozvoljenih potencijalnih razlika dodira i koraka izra unatih prema [3] i njihovih vrednosti izra unatih upotrebom FEM-a

Za modelovano okolno tlo i analizirani dvoprstenasti uzemljiva sa vertikalnim cevima u temenima, ije su dimenzije date u poglavlju 2.2, vrednost otpornosti rasprostiranja dobijena pomo u softvera iznosi 4.68 .

Slika 5 - Prikaz raspodele potencijala na površini tla i potencijalnih razlika dodira i koraka za razmatrani slu aj

Na slici 5 su prikazane raspodela potencijala i potencijalne razlike dodira i koraka na površini tla, duž duži koja leži na dijagonali št ene površine tla. Ta duž je nešto duža od dijagonale št ene površine tla, a njena središnja ta ka (koja se nalazi na dužini 8.5 m, slika 5) poklapa se sa središnjom ta kom dijagonale. Može se primetiti da u ta kama ta no iznad temena unutrašnjeg prstena, potencijal stajnih ta aka ima najve u vrednost, dok je na istim mestima vrednost potencijalne razlike dodira minimalna. Nasuprot ovome, u sredini transformatorske stanice i uz krajeve spoljašnjeg prstena

vrednost potencijala stajnih ta aka je manja, a potencijalna razlika dodira ima nešto ve u vrednost.

Maksimalna vrednost potencijala uzemljiva a iznosi 93.60 V. Pri tome su dobijene slede e maksimalne vrednosti na št enoj površini tla:

- potencijala stajne ta ke: 80.78 V, i
- potencijalne razlike dodira: 23.51 V.

Maksimalnu vrednost potencijalne razlike koraka ipak treba tražiti i izvan št ene zone definisane na slici 4. Za posmatrani slu aj, izra unata je maksimalna vrednost potencijalne razlike koraka od 15.11 V, u neposrednoj blizini spoljne granice št ene zone.

Pošto su maksimalne dozvoljene vrednosti potencijalnih razlika dodira i koraka ((12) i (13)) ve e od odgovaraju ih vrednosti dobijenih prora unom, može se zaklju iti da, sa aspekta bezbednosti, analizirani uzemljiva ZADOVOLJAVA.

5. PORE ENJE REZULTATA I DISKUSIJA

Otpornost rasprostiranja uzemljiva a, odre ena koriš enjem metodologije iz važe ih propisa u Srbiji (metodologije I), iznosi 4.6 , dok njena vrednost dobijena koriš enjem softverskog alata CYMGRD (metodologija II) iznosi 4.68 . Obe vrednosti zadovoljavaju uslove sa stanovišta bezbednosti. Može se primetiti da su otpornosti rasprostiranja uzemljiva a odre ene primenom obe metodologije približno jednake, što potvr uje ta nost Metodologije I.

Me utim, prema Metodologiji I se dobija da razmatrani uzemljiva zadovoljava uslove bezbednosti koji se odnose na napon dodira (ispunjen je grani ni uslov (6)) samo za vrednosti specifi ne otpornosti tla

141.3 Ω m, dok Metodologija II, koja je bazirana na preciznijim prora unima, pokazuje da razmatrani uzemljiva zadovoljava uslove bezbednosti koji se odnose na potencijalnu razliku dodira (videti jedna ine (10) i (14)) za vrednosti specifi ne otpornosti tla 237 Ω m. Osnovni uzrok razlike dobijenih rezultata je nemogućnost dobijanja ta nih vrednosti elektri nih potencijala na površini tla pomo u Metodologije I, zbog ega njenom upotrebom nije mogu e razmatrati samo površinu tla koju je realno potrebno štititi (što je mogu e uraditi pomo u Metodologije II), ve se nepotrebno štiti daleko ve a površina tla. To zna i da se primenom Metodologije I projektantu u nekim slu ajevima nepotrebno name e pove anje dimenzija spoljašnjeg prstena i/ili primena neke od dodatnih mera (izolovanje stajališta krupnim, slaboprovodnim šljunkom ili asfaltiranje).

Prime uje se da je broj korisnih informacija za detaljniju analizu u slu aj u primene prve metodologije mali. Uz to, ona se može primeniti samo ukoliko se radi o uniformnom (jednoslojnom) tlu. Tako e, pri o i-tavanju podataka sa dijagrama prikazanog na slici 3

moгу e je napraviti grešku i na taj na in uticati na ta nost dobijenih rezultata.

Iako su dubine ukopavanja uzemljiva a preporu ene u [1, 4], one se esto ne mogu izvesti u praksi. Prora un sa drugim vrednostima dubina ukopavanja nije definisan Metodologijom I, što tako e uti e na ograni enost njene primene. Uz to, postoji i ograni e nje koje se ti e oblika uzemljiva a (trougao i kvadratni oblik) i ne postoji mogu nost analize uzemljiva a složenijih oblika. Analizom dijagrama sa slike 3 uo ava se da je rastojanje izme u vertikalnih cevi u temenima spoljašnjeg prstena kvadratnog oblika ograni eno na 10 metara. Me utim, dimenzije tipskih gravinskih objekata distributivnih transformatorskih stanica 10/0.4 kV, koje se koriste u praksi, ispunjavaju ovaj uslov, zbog ega navedeno ograni enje ne uti e na primenu dijagrama sa slike 3.

Prednost koriš enja softvera ogleđa se u modelovanju uzemljiva a proizvoljnog oblika, kao i definisanja št i ene površine tla, što prevazilazi mogu nosti Metodologije I. Softverskim modelovanjem je mogu e brzo prona i optimalan oblik uzemljiva a koji e ispuniti kriterijume bezbednosti, a ujedno biti ekonomski opravdan (uzemljiva minimalne cene). Primenom metode kona nih elemenata dobijaju se ne samo ta niji rezultati, nego i grafi ki prikazi veli ina od interesa za analizu. Softver omogu ava analizu dvoslojnog tla, koje se sre e u praksi (površinski sloj je ponekad druga ije specifi ne otpornosti od ostatka tla (asfalt, drobljeni kamen)).

6. ZAKLJU AK

Pore enjem rezultata dobijenih pomo u obe metodologije (primenom empirijskih formula i grafikona datih u pravilnicima, nacionalnim standardima i tehničkim preporukama, odnosno upotrebom softvera CYMGRD baziranog na FEM-u), zaklju eno je da, nezavisno od specifi ne otpornosti tla, postoji mala procentualna razlika izme u izra unatih vrednosti otpornosti rasprostiranja razmatranog uzemljiva a. Me utim, metodologija bazirana na nacionalnim standardima poseduje ograni enja i nedostatke koji su istaknuti u ovom radu. Upotreba softvera CYMGRD za modelovanje uzemljiva a elektroenergetskih objekata omogu ava dobijanje raspodele potencijala u okolnom tlu, uz ta an prora un veli ina od interesa. Iako ne tako rasprostranjene u inženjerskoj praksi kod nas, softverske tehnike modelovanja omogu avaju efikasan i pouzdan pristup projektovanju uzemljiva a.

LITERATURA

[1] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, Službeni list SRJ, br. 61/1995, 1995.

[2] Uzemljenje energetskih postrojenja naizmeni nog na-pona iznad 1 kV, SRPS EN 50522:2013, Službeni glasnik, br. 50/13, 2013.

[3] IEEE Std. 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, New York, USA, 2000.

[4] Tehni ka preporuka br. 7: „Izvo enje uzemljenja u distributivnim transformatorskim stanicama 35/10 kV, 35/20 kV, 10/0.4 kV, 20/0.4 kV i 35/0.4 kV”, EPS, Direkcija za distribuciju elektri ne energije, jun 1996.

[5] CYMGRD, User Guide and Reference Manual, Canada, 2006.

[6] Kostić M, Teorija i praksa projektovanja elektri nih instalacija - tre e, prošireno izdanje, Akademski misao, Beograd, 2014.

[7] Nahman J, Uzemljenje neutralne ta ke distributivnih mreža, Nau na knjiga, Beograd, 1980.

[8] Požar H, Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehni ka knjiga, Zagreb, 1973.

[9] Tehni ka preporuka br. 4a1: „Zaštita elektrodistributivnih vodova 10 kV, 20 kV i 35 kV”, EPS, Direkcija za distribuciju elektri ne energije, maj 2001.

[10] Komentar Tehni ke preporuke br. 7: Izvo enje uzemljenja u distributivnim transformatorskim stanicama 35/10 kV, 35/20 kV, 10/0.4 kV, 20/0.4 kV i 35/0.4 kV”, EPS, Direkcija za distribuciju elektri ne energije, maj 2013.

[11] Kataloški podaci: Elektroizgradnja Bajina Bašta, www.ebb.rs, 2012.

[12] Tehni ka preporuka br. 1b: „Prigradska montažna transformatorska stanica 10(20)/0.4 kV snage 400 kVA”, EPS, Direkcija za distribuciju elektri ne energije, mart 2001.

[13] Tehni ka preporuka br. 9: „Izvo enje uzemljenja stubova elektrodistributivnih nadzemnih vodova 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV i 110 kV, EPS, Direkcija za distribuciju elektri ne energije, januar 2010.

[14] Jin J, The finite element method in electromagnetics, John Wiley & Sons, New York, 2002.

[15] Zienkiewicz O. C, Taylor R. L. and Zhu J. Z, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 6th edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.

[16] Silvester P. P. and Ferrari, R. L, Finite elements for electrical engineers, 3rd edition, Cambridge University Press, New York, 1996.

SUMMARY

COMPARISON OF CONVENTIONAL METHODOLOGY AND SOFTWARE CYMGRD WHEN DESIGNING GROUNDING SYSTEMS OF TYPICAL DISTRIBUTION TRANSFORMER STATIONS

Design of the grounding system of power system facilities largely depends on the soil composition and its electrical characteristics, voltage level, dimensions of the object and other factors. This paper presents two calculation procedures intended for the design of the grounding system of a typical distribution transformer station. The first one, frequently used by the designers in Serbia, is based on the application of simple empirical formulas and diagrams, relying on the regulations, national standards and technical recommendations. The second calculation approach is represented by the use of a specialized software, based on modern mathematical methods, the results of which are verified using valid international standards. A comparative analysis of the results obtained using both methodologies, as well as the opportunities they provide to the designer, are presented. Both methodologies can be used when designing new grounding systems, as well as when reconstructing or maintaining the existing ones.

Key words: software CYMGRD, distribution transformer station, grounding system design