Doprinos racionalizaciji merenja impedanse sistema uzemljenja srednjenaponskih transformatorskih stanica

VOJIN I. KOSTIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ a.d, Beograd

Stručni rad
UDC: 621.316.99.011.21
DOI: 10.5937/tehnika1901097K

Za potrebe merenja impedanse sistema uzemljenja transformatorske stanice (TS) neophodno je pomoćno uzemljenje. U tu svhu, konvencionalni metod merenja FOP-TCRM i ekvivalentni FOP-FSM koristi uzemljivač susedne TS. U ovom radu predložen je modifikovani FOP-FSM koji koristi svrdlasti uzemljivač kao pomoćno uzemljenje. Predloženi metod je praktičan i ekonomičan. Praktičan je u manipulativnom pogledu, a ekonomičan je jer ne zahteva, da se za potrebe merenja, privremeno angažuje dalekovod koji spaja ispitivano uzemljenje i pomoćno uzemljenje u susednoj TS. Eksperimentalna provera predloženog metoda merenja izvršena je u pet distributivnih TS 35/10 kV. Merenja su vršena simultano, tj. koristeći novi i konvencionalni metod. Rezultati dobijeni na oba načina praktično su istovetni.

Ključne reči: uzemljenje, impedansa sistema uzemljenja, svrdlasti uzemljivač, FOP, TCRM, FSM

1. UVOD

Impedansa sistema uzemljenja predstavlja jednu od osnovnih sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja. Uobičajeno je da se tokom eksploatacionog veka periodično proverava stanje sistema uzemljenja. U tu svrhu, meri se impedansa sistema uzemljenja elektroenergetskog postrojenja u normalnom pogonskom stanju. U tom kontekstu postoje dve grupe problema: (a) problemi vezani za princip merenja impedanse sistema uzemljenja i (b) problemi vezani za uticaj sistemske smetnje (konduktivna smetnja na frekvenciji 50 Hz).

Tokom višedecenijskog procesa teorijskog i eksperimentalnog usavršavanja, problem naveden pod (a) apsloviran je u metodološkom pogledu. Na toj osnovi, danas se za merenje impedanse sistema uzemljenja isključivo primenjuje nekonvencionalni FOP (Fall-of-Potential) metod [1, 2]. Međutim, FOP se odnosi na šemu za merenje impedanse sistema uzemljenja neaktivnog elektroenergetskog postrojenja. Zbog toga, primena FOP u aktivnom elektroenergetskom postrojenju moguća je jedino ako se kombinuje sa metodom koji rešava problem naveden pod (b). Odgovarajuća rešenja za problem pod (b) su: TCRM (Test

Current Reversal Method), kao standardno rešenje [3, 4], i novo, naprednije, rešenje FSM (Frequency Shift Method) [5, 6, 7]. Dakle, raspoloživi metodi za merenje impedanse sistema uzemljenja su: FOP-TCRM i FOP-FSM.

Da bi se ublažio uticaj sistemske smetnje na rezultat merenja koristeći FOP-TCRM neophodan je relativno veliki intenzitet ispitne struje. Naime, intenzitet struje ispitnog signala mora biti znatno iznad nivoa kompozitne smetnje i širokopojasnog osnovnog šuma u uzemljenju koje se ispituje. U tom kontekstu, intenzitet ispitne struje treba da je reda 10 A na frekvenciji 50 Hz. Standard EN 50522:2010 [3] paušalno preporučuje intenzitet ispitne struje od 50 do 100 A! S jedne strane, imajući ovo u vidu, a sa druge strane činjenicu da je moduo impedanse sistema uzemljenja TS u opsegu 0,1 – 1 Ω , očigledno, neophodan je izvor ispitnog signala koji treba da ima vrlo veliku snagu.

Kada se koristi FOP-TCRM strujno ispitno kolo formira se između transformatorske stanice (TS), čija se impedansa sistema uzemljenja meri, i strujne sonde (pomoćnog uzemljivača), putem kratko-spojenih provodnika nadzemnog ili kablovskog voda. Dakle, u slučaju kada se merenje vrši na bazi FOP-TCRM, ulogu strujne sonde vrši uzemljenje susedne TS, a gore pomenuti dalekovod ili kablovski vod je van svoje redovne funkcije.

Očigledno, merenje impedanse sistema uzemljenja na bazi FOP-TCRM vezano je za određene manipulativne i ekonomske probleme. Naime, manipulativni

Adresa autora: Vojin Kostić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, Koste Glavinića 8a
e-mail: voj@ieent.org
Rad primljen: 27.11.2018.
Rad prihvaćen: 16.01.2019.

problemi, pa i rizici, povećavaju se proporcionalno sa eksploatacionim vekom opreme i aparata involviranih u proces. Sa druge strane, korišćenje dalekovoda za potrebe merenja dovodi do privremenog prekida snabdevanja električnom energijom krajnjih korisnika, naročito u ruralnim područjima gde je mreža radijalna. Dodatni problem, sa aspekta sigurnosti za ispitivače i za mernu opremu, predstavlja i eventualno korišćenje dvosistemskog voda. Naime, jedan sistem se koristi za potrebe merenja, dok je drugi u normalnom pogonskom stanju. Kvar na aktivnom sistemu dalekovoda može uzrokovati indukovane prenapone na vodu koji je deo merne šeme, pa može životno ugroziti osoblje koje vrši merenje.

Ako je rastojanje između susednih TS nekoliko desetina kilometara nije racionalno da se u procesu merenja, kao strujna sonda, koristi sistem uzemljenja udaljene TS. U tom slučaju, ulogu strujne sonde vrši uzemljenje jednog od stubova dalekovoda na trasi. Kako je tipična vrednost otpornosti rasprostiranja uzemljivača dalekovodnog stuba u opsegu od oko 5 do 15 Ω javlja se dodatni problem. Naime, snaga izvora ispitnog signala treba da je relativno (nepraktično) velika da bi se u datim uslovima ostvario neophodni, a relativno veliki intenzitet ispitne struje. Naravno, i ovom scenariju dalekovod je deo merne šeme.

U odnosu na TCRM, FSM je mnogo napredniji i efikasniji metod za eliminisanje sistemske smetnje. Pored ostalog, FSM, pri istom ili boljem kvalitetu merenja, zahteva znatno manji intenzitet ispitne struje u odnosu na istoimeni zahtev u slučaju TCRM. Slično kao FOP-TCRM, tako i FOP-FSM koristi strujnu sondu u susednoj TS. Dakle, dalekovod je deo merne šeme i slučaju FOP-FSM.

Gore navedene činjenice jasno ukazuju na potencijalne probleme koji su vezani za primenu standardnog metoda, tj., po osnovu primene FOP-TCRM. Stoga, u ovom radu biće elaboriran koncept merenja impedanse na bazi FOP-FSM, a odgovarajuće pomoćno uzemljenje biće lokalno realizovano primenom svrdlastog uzemljivača. Ukratko, u kontekstu modifikacije mernog metoda koji se elaborira u ovom radu, FOP-FSM koristi se radi potpune eliminacije uticaja sistemske smetnje na rezultat merenja. U tom slučaju neophodan intenzitet ispitne struje iznosi oko 1 A. Svrdlasti uzemljivač koristi se nezavisno od dalekovoda, tj., strujno ispitno kolo formira se lokalno.

Rad je organizovan na sledeći način. U sekciji 2 dat je kratak osvrt na FOP-FSM. U sekciji 3, data je analiza karakteristika svrdlastog uzemljivača i to sa aspekta primene u kontekstu FOP-FSM šeme za merenje impedanse sistema uzemljenja TS. U sekciji 4, data je analiza eksperimentalnih rezultata merenja impedanse sistema uzemljenja za 5 transformatorskih

stanica 35/10 kV. Radi dokazivanja ponovljivosti i tačnosti predloženog mernog metoda, u svakoj TS merenja su vršena simultano, tj, na bazi FOP-FSM sa svrdlastim uzemljivačem i na bazi FOP-FSM sa udaljenim uzemljenjem u susednoj TS. U sekciji 5 data su zaključna razmatranja.

2. KONCEPT MERNE ŠEME

Radi praktičnih i ekonomskih razloga, korisno je racionalizovati metod merenja impedanse sistema uzemljenja aktivne TS. U tom pogledu postoje tri specifična zahteva. Prvi se odnosi na smanjenje neophodnog intenziteta ispitne struje, što direktno utiče na smanjenje neophodne snage izvora ispitne struje. Drugi zahtev odnosi se na alternativno rešenje za udaljenju strujnu sondu. Drugim rečima, traži se alternativa za strujnu sondu i za način povezivanja strujne sonde u merni sistem. Dakle, prvi zahtev je praktične prirode, a drugi zahtev je ekonomske i praktične prirode. Treći zahtev odnosi se na tačnost merenja. Naime, modifikacija merne šeme ne sme da utiče na tačnost merenja koja je nominalno ista za FOP-TCRM i FOP-FSM. U vezi sa navedenom konstatacijom treba imati u vidu da je primena TCRM delotvorna jedino ako se tokom trajanja merne kampanje sistemska smetnja ne menja. Taj uslov je vrlo teško praktično ostvariti. Sa druge strane, pomena intenziteta sistemske smetnje (struja nesimetrije) za nekoliko decibela praktično ne utiče na rezultat FOP-FSM merenja.

Saglasno formulisanim zahtevima, definisaćemo osnovne komponente modifikovane merne šeme.

Prvo, u cilju potpunog eliminisanja uticaja sistemske smetnje na FOP metod merenja impedanse, predlaže se korišćenje FSM. FSM je detaljno elaboriran u [8]. Shodno pomenutoj elaboraciji FSM je implementiran na laptopu. Laptop je povezan sa mernim uređajima u FOP mernoj konfiguraciji. Ukratko, u kontekstu FOP šeme FSM podrazumeva sukcesivno korišćenje ispitne struje na tri frekvencije, različite od 50 Hz (na pr., 40, 60 i 75 Hz). Potom, primenom linearne regresije određuje se vrednost impedanse na 50 Hz. FSM algoritam je potpuno automatizovan i optimizovan. Naime, posle inicijalnog injektovanja, tzv. probne ispitne struje u formirani FOP merni sistem, FSM algoritam automatski definiše intenzitet ispitne struje koji je optimalan za specifične uslove koji postoje u ispitivanom elektroenergetskom postrojenju. Tipično, intenzitet ispitne struje, za elektroenergetsko postrojenje ranga 35/10 kV iznosi do oko 1 A. Opisanu mernu šemu označavamo kao FOP-FSM.

Drugo, FOP-FSM, kao i FOP-TCRM, koristi strujnu sondu u susednoj TS. Međutim, saglasno gore navedenom zahtevu, namera je da se obezbedi alternativa za strujnu sondu koja je konvencionalno locirana u

susednoj TS, a s tim u vezi i da se eliminiše korišćenje faznih provodnika dalekovoda ili kablovskog voda za povezivanje pomenute strujne sonde u merni sistem. Ta, nova, komponenta mernog sistema predmet je razmatranja u narednoj sekciji.

3. SVRDLASTI UZEMLJIVAČ

Ovde razmatramo svrdlasti uzemljivač (slika 1) kao moguću alternativu za strujnu sondu u kontekstu FOP-FSM merne šeme. U tom pogledu postoje dva pitanja koja treba prethodno razmotriti. Prvo pitanje odnosi se na numeričku vrednost i na postojanost otpornosti rasprostiranja svrdlastog uzemljivača. Drugo pitanje odnosi se na poziciju (rastojanje) svrdlastog uzemljivača u odnosu na ispitivano uzemljenje TS.

Slika 1 - Svrđlasti uzemljivač; dužina uzemljivača je 1 m, prečnik uzemljivača u bazi iznosi 7 cm

3.1 Otpornost rasprostiranja svrdlastog uzemljivača

Otpornost rasprostiranja svrdlastog uzemljivača varira zavisno od vrste, vlažnosti i temperature zemljišta u koje se pobada. U proseku, svrdlasti uzemljivač ima otpornost rasprostiranja reda 10Ω . Međutim paralelnim povezivanjem dva ili tri uzemljivača otpornost se može smanjiti. U tom slučaju, radi formiranja ekvivalentne kalote paralelno povezanih svrdlastih uzemljivača treba voditi računa o rastojanju između uzemljivača [3].

Način pobadanja i raspored paralelno povezanih uzemljivača, relevantan za kontekst primene koja se razmatra u ovom radu, prikazan je na slici 2.

Slika 2 - Merenje otpornosti rasprostiranja za konfiguraciju od tri pobodena i paralelno povezana svrdlasta uzemljivača. Dubina ukopavanja: 0.8 m; rastojanje uzemljivača: 1.6 m

Imajući u vidu da se predmetni uzemljivač ne razmatra za permanentnu nego za privremenu primenu

(u trajanju do oko 2 časa, što je uobičajeni interval neophodan za obavljanje merenja impedanse sistema uzemljenja), smanjenje otpornosti i postojanost otpornosti uzemljivača može se postići jednokratnim nalivanjem pobodenog(ih) svrdlastog(ih) uzemljivača.

Slika 3 - Otpornost rasprostiranja uzemljivača za slučaj tla „niske“ vrednosti specifične električne otpornosti (glina). Legenda: $R_{1,2,3}(t)$ – otpornost rasprostiranja jednog svrdlastog uzemljivača, $R_{112, 213, 113}(t)$ – otpornost rasprostiranja dva paralelno povezana svrdlasta uzemljivača i $R_{11213}(t)$ – otpornost rasprostiranja tri paralelno povezana svrdlasta uzemljivača

Slika 4 - Otpornost rasprostiranja uzemljivača za slučaj tla „visoke“ vrednosti specifične električne otpornosti (peskulja). Legenda: isto kao na slici 3

Merenje otpornosti rasprostiranja svrdlastih uzemljivača vršeno je nekoliko puta u toku dva sata. Prvo merenje izvršeno je 15 minuta nakon nalivanja vode (oko 7 litara po jednom svrdlastom uzemljivaču). U svim slučajevima merenje je izvršeno prenosnim merilom električne otpornosti uzemljenja (Fluke 1625, videti sliku 2). Za slučaj tla „niske“ vrednosti specifične električne otpornosti (glina) merenja su izvršena 28. aprila 2017. godine, u okolini TS 35/10 kV (Umka, Beograd), pri ambijentalnoj temperaturi od

23°C. Za slučaj tla „visoke“ vrednosti specifične električne otpornosti (peskulja) merenja su izvršena 21. aprila 2017. godine, u okolini TS 35/10 kV (Hemind, Beograd), pri ambijentalnoj temperaturi od oko 7°C. Grafička elaboracija rezultata merenja dokumentovana je na slikama 3 i 4.

Uvidom u rezultate merenja može se konstatovati da je u uslovima tla „niske“ vrednosti specifične električne otpornosti, otpornost rasprostiranja svrdlastog uzemljivača reda 1 Ω , a u uslovima tla „visoke“ vrednosti specifične električne otpornosti, otpornost rasprostiranja je oko 150 Ω . Otpornost rasprostiranja uzemljivača, pojedinačnog ili ekvivalentna otpornost paralelno povezanih uzemljivača, praktično je konstantna na vremenskom intervalu od 2h, čak pri jedno-kratnom nalivanju.

Sumarno, svrdlasti uzemljivač pogodan je za primenu u kontekstu FOP-FSM. Naime, imajući u vidu da FSM zahteva ispitnu struju do oko 1 A i da u najnepovoljnijim uslovima, za tri paralelno povezana svrdlasta uzemljivača, otpornost rasprostiranja iznosi oko 60 Ω , lako je utvrditi da je neophodna snaga izvora ispitnog signala, u svim uslovima, reda 100 W. Podsetimo, neophodna snaga izvora ispitnog signala za rad u standardnoj FOP-TCRM mernoj šemi treba da bude reda 1 kW.

3.2. Izbor optimalne pozicije svrdlastog uzemljivača

Shodno empirijski utvrđenim podacima iz odeljka 3.1 svrdlasti uzemljivač može se koristiti kao udaljena strujna sonda za potrebe FOP-FSM merne šeme.

Ostaje da se utvrdi pozicija svrdlastog uzemljivača u odnosu na ispitivani sistem uzemljenja TS. Ovo je neophodno radi izbegavanja moguće sprege ispitivanog i pomoćnog uzemljenja. Da podsetimo, ako postoji pomenuta sprega FOP metod nije primenljiv. Preciznije, u tom slučaju rezultati merenja impedanse sistema uzemljenja bili bi pogrešni. Formalno teorijski, razmatrano rastojanje treba da je takvo da se kalote uzemljivača (ispitivanog – dimenziono velikog i udaljenog-dimenziono malog) međusobno ne preklapaju. Generalno, dimezija kalote uzemljivača zavisi od više faktora koje je teško egzaktno predvideti. Sličan problem razmatra i standard IEEE 81-2012 [4].

U tom scenariju Std. IEEE 81-2012 propisuje da minimalno međusobno rastojanje pomenutih uzemljivača (sistema uzemljenja) treba da je veće od pet dijagonala (dijagonala se odnosi na geometrijski oblik radne površine veće TS). U našem slučaju nije moguće uspostaviti direktnu analogiju sa pomenutim standardom, jer su u pitanju uzemljivači bitno različitih dimezija (sistem uzemljenja TS – dimenziono veliko uzemljenje; svrdlasti uzemljivač – dimenziono ekstremno malo uzemljenje). Imajući u vidu prethodni komentar,

rastojanje između TS i pozicije svrdlastog uzemljivača odredićemo eksperimentalno. Jednostavnosti radi, a bez bitnog uticaja na tačnost, razmatraćemo poziciju za pojedinačni svrdlasti uzemljivač. Eksperiment se odnosi na odgovarajuća merenja u pet TS 35/10 kV.

U cilju određivanja optimalne pozicije svrdlastog uzemljivača, u odnosu na sistem uzemljenja TS, korišćemo princip merenja vezan za određivanje pozicije tzv. „referentne zemlje“. Inače, pomenuti princip je deo redovne procedure pri standardnom merenju impedanse sistema uzemljenja. „Referentna zemlja“ je šira lokacija koja je dovoljno udaljena od sistema uzemljenja TS, a u kojoj se, pri podužnom pomeranju (udaljavanju od TS) naponske sonde, ne konstatuje promena potencijala. Usrednjeni rezultati (za pet TS 35/10 kV) ispitivanja podužne promene potencijala prikazani su na slici 5. Shodno ponašanju krive na slici 5, referentna zemlja je u području završenog dela krive. U tom kontekstu, sa izvesnom rezervom, zaključujemo da oblast „referentne zemlje“ počinje na rastojanju oko 160 m od TS. Dakle, na tom rastojanju možemo pobosti svrdlasti uzemljivač koji je deo FOP-FSM merne šeme. Za povezivanje svrdlastog uzemljivača sa ostalim delom FOP-FSM merne šeme koristi se jednostavan finožični provodnik malog preseka, jer kroz njega teče struja do oko 1 A (napr., u našoj mernoj kampanji korišćen je finožični bakarni provodnik preseka 2.5 mm²).

Slika 5 - Podužna promena razlike potencijala na udaljenoj lokaciji u odnosu na potencijal u transformatorskoj stanici. Odgovarajuće vrednosti na ordinati koje odgovaraju tačkama A, B, C i D predstavljaju usrednjene vrednosti za pet TS 35/10 kV

4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG KONCEPTA MERENJA

Za potrebe eksperimentalne verifikacije predloženog koncepta merenja (FOP-FSM uz korišćenje

svrdlastog uzemljivača kao udaljene strujne sonde) izvršena su merenja u pet TS 35/10 kV (Velika Biljanica, Leskovac; Boždarevac, Beograd; Pečenjevaca, Leskovac; Surdulica 2, Surdulica; i Miroševce, Leskovac). Navedene transformatorske stanice u vlasništvu su Operatora distributivnog sistema „EPS Distribucija“ d.o.o. Beograd, Ogranak „Jugoistok Niš“ i Ogranak „Elektrodistribucija Beograd“.

Prilikom izbora TS rukovodili smo se zahtevom da morfološke karakteristike tla, u ambijentima gde se TS nalaze, budu vrlo različite. Merenja su izvršena u periodu avgust 2017. godine - maj 2018. godine. U toku merenja transformatorske stanice bile su u normalnom radnom režimu. Dimenzije uzemljivača ispitivanih transformatorskih stanica u rasponu su od 13 m x 17 m do 28 m x 37 m.

U svakoj TS simultano su izvršena merenja koristeći predloženi koncept FOP-FSM sa svrdlastim uzemljivačem kao strujnom sondom (u daljem tekstu – novi metod) i FOP-FSM sa strujnom sondom u susjednoj TS (u daljem tekstu - stari metod). Naravno, kada je strujna sonda u susjednoj TS ista je povezana u FOP-FSM šemu pomoću faznih provodnika odgovarajućeg dalekovoda.

Treba podsetiti da je ranije [8], dokazana generalna ekvivalencija (videti odgovarajuću napomenu u sekciji 2 ovog rada) rezultata merenja na bazi standardnog (a neekonomičnog i nepraktičnog) FOP-TCRM sa jedne strane i (praktičnog) FOP-FSM sa druge strane.

Treba napomenuti da je u merenjima na bazi novog metoda u 3 slučaja korišćen jedan svrdlasti uzemljivač, a u 2 slučaja korišćena su dva paralelno povezana svrdlasta uzemljivača. U opisanoj mernoj kampanji nije bilo potrebe da se koriste tri paralelno povezana svrdlasta uzemljivača.

Tabela 1. Rezultati merenja impedanse na 50 Hz koristeći stari metod i novi metod.

Lokacija TS	Stari metod	Novi metod	Relativna greška
Velika Biljanica, Leskovac	0.8563 Ω	0.8647 Ω	0.98%
Boždarevac, Beograd	0.2571 Ω	0.2551 Ω	0.78%
Pečenjevaca, Leskovac	0.2905 Ω	0.2824 Ω	2.79%
Surdulica 2, Surdulica	0.3464 Ω	0.3440 Ω	0.70%
Miroševce, Leskovac	0.7628 Ω	0.7885 Ω	3.37%

Radi preglednosti i konciznosti, u tabeli 1 sistematizovani su uporedni rezultati merenja impedanse sistema uzemljenja na 50 Hz dobijeni primenom starog i

novog metoda Opet, zbog preglednosti, u tabeli su navede samo krajnji rezultati. Inače, FSM algoritam obuhvata međurezultate po osnovu automatizovanog merenja na 40, 60 i 75 Hz.

Na osnovu tih merenja FOP-FSM algoritam automatski generiše krajnji rezultat za impedansu sistema uzemljenja na 50 Hz. Poslednja kolona u tabeli 1 odnosi se na moduo relativne greške između rezultata merenja na bezi starog i novog metoda.

5. ZAKLJUČAK

U radu je elaboriran novi metod za merenje impedanse sistema uzemljenja 35/10 kV transformatorskih stanica u normalnom pogonskom stanju i bez angažovanja dalekovoda za potrebe merenja. U tom pogledu i u poređenju sa aktuelnim standardnim metodom, predloženi metod je ekonomičan i praktičan.

Na osnovu rezultata merenja na uzorku od pet međusobno vrlo različitih transformatorskih stanica (u pogledu fizičkih dimenzija uzemljivača i u pogledu morfoloških karakteristika tla na kome se nalaze), sa jedne strane, a sa druge strane imajući u vidu dobro slaganje rezultata sa onim dobijenim standardnim metodom, konstatujemo da je novi metod u istom rangu merne nesigurnosti kao standardni metod.

Posmatrano u širem kontekstu, novi metod, FOP-FSM sa strujnom sondom na bazi svrdlastog uzemljivača, napredna je varijanta u odnosu na FOP-FSM koji je prvobitno oslonjen na korišćenje strujne sonde u udaljenoj transformatorskoj stanici i koji je ekvivalentan u pogledu tačnosti sa standardnim FOP-TCRM.

Naravno, postoji prostor za optimizovanje predloženog metoda. U tom pogledu treba nastaviti sa istraživanjima: (a) optimalnog (verovatno, manjeg od onog utvrđenog u ovom radu) rastojanja između ispitivanog sistema uzemljenja i svrdlastog uzemljivača i (b) razmotriti uslove u pogledu moguće primenljivosti predloženog metoda na elektroenergetske objekte višeg naponskog nivoa.

6. ZAHVALNICA

Autor je zahvalan recenzentima za detaljnu recenziju i korisne sugestije koje su doprinele značajnom poboljšanju kvaliteta ovog rada.

Autor je zahvalan kolegama Dočić B. Miroslavu, JP EPS – Odsek za tehničke usluge Leskovac i Saši S. Joviću, ODS EPS Distribucija Beograd za pružanje logističke podrške prilikom merenja.

Aktivnosti u okviru rada povezane su sa naučno-istraživačkim projektom TR33020 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] H. G. Sarmiento, J. Fortin, and D. Mukhedkar, Substation ground impedance: Comparative field measurements with high and low current injection methods, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-103, No. 7, Jul. 1984, pp. 1677-1683.
- [2] R. Southey, W. Ruan, F. Dawalibi, and M. Kizuik, Measurement and interpretation of ground impedance of substations by non-conventional fall-of-potential methods, in *Proc. 2009 International Conference on Electrical Engineering (ICEE'09)*, Shenyang, China, 5-9 Jul. 2009, pp.1-6.
- [3] *EN 50522*, Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c., Nov. 2010, CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization.
- [4] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, *IEEE Standard 81-2012*, Dec. 2012.
- [5] V. Kostić, N. Raičević, J. Mrvić, S. Rebrić, Grounding System Impedance Measurement – Case Study, *12th International Conference on Applied Electromagnetics - IIEC 2015*, Faculty of Electronic Engineering of Niš, Niš, Serbia, O5-6 (CD), pp. 1-4, 31 Aug.-2 Sep. 2015.
- [6] V. Kostić, N. Raičević, and D. Kovačević, The choice of suitable frequencies for measurements based on FSM, *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, Vol. 15, No. 1, 2016, pp. 9–16.
- [7] V. Kostić, N. Raičević, and A. Pavlović, Enhanced grounding system impedance measurements for high-voltage substations, *International Trans. Electrical Energy Systems*, Vol. 25, No. 9, Sep. 2015, pp. 1875–1883.
- [8] V. I. Kostić, Poboljšani metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja u visokonaponskim postrojenjima, *doktorska disertacija, Elektronski fakultet Univerzitet u Nišu*, Dec. 2016.

SUMMARY

A CONTRIBUTION TO THE RATIONALIZATION OF GROUNDING IMPEDANCE MEASUREMENT IN MEDIUM VOLTAGE SUBSTATIONS

In this paper, a method for grounding impedance measurement is proposed. The method is experimentally validated in five substations rated voltage 35/10 kV. Compared to a standard measuring method, the basic benefits of the proposed method are: (a) the current probe is realised in the form of a ground drill (a drill-type electrode designed to be driven into the earth) instead of being used the grounding grid of a next substation, (b) proposed method does not use an overhead line (or a cable line) for purposes to connect remote current probe, (c) the proposed method requires a test signal source whose output power may be in the order 100 W (instead of 1 kW in standard method), and (d) measuring accuracy of the proposed method is the same as in the case when standard method is used.

Key words: grounding, grounding impedance, ground drill, FOP, TCRM, FSM