

Uticaj podzemnih kablova na merenje impedanse sistema uzemljenja primenom *FSM* koncepta

Vojin Kostić¹, Dejan Savić², Miloš Likić¹

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija
vojin@ieent.org

² PD Elektroizgradnja d.o.o., Beograd, Srbija

Kratak sadržaj: Merenje impedanse sistema uzemljenja srednjenaponskih transformatorskih stanica, predviđenih za rad u dominantno kablovskoj mreži, predstavlja složen istraživački zadatak. Naime, nemogućnost sagledavanja svih faktora koji utiču na merenu veličinu, kada se u cilju formiranja *Fall-of-Potential* (FOP) merne šeme koristi jedan od neaktivnih kablovskih vodova, direktno se odražava na adekvatnu procenu bezbednosnih rizika. U ovom radu, predložen je alternativni metod merenja tzv. *Frequency Shift Method* (FSM), koji inherentno garantuje kvalitetnije merenje od bilo kog konvencionalnog metoda. Pružajući uvid u ponašanje aktivne i reaktivne komponente impedanse sistema uzemljenja, a uvažavajući topološku strukturu postojeće kablovske mreže, primena *FSM* koncepta u *FOP* mernoj šemi, ukazuje na alternativne pravce odvođenja dela ispitne struje sa uzemljivača, kao i na nelogičnost dobijenih rezultata. Eksperimentalna verifikacija sprovedena je u realnim pogonskim uslovima, i može poslužiti kao dobar primer za rešavanje problema u praksi.

Ključne reči: uzemljenje, impedansa sistema uzemljenja, *Fall-of-Potential*, *Frequency Shift Method*

1. Uvod

Osnovni sigurnosni i funkcionalni indikator sistema uzemljenja je otpornost sistema uzemljenja. Otpornost sistema uzemljenja, preciznije, otpornost osnovne uzemljivačke mreže, obavezno se meri pre nego što se elektroenergetsko postrojenje pusti u rad. Tokom eksploatacije vrši se, u intervalima od oko pet godina, povremena provera sistema uzemljenja. Pri takvim merenjima, na osnovnu uzemljivačku mrežu priključeni su zaštitni

provodnici nadzemnih vodova, kao i plaševi i armature, odnosno električne zaštite podzemnih kablova. U tim okolnostima sistem uzemljenja ima impedantne osobine. Dakle, tokom eksploatacionog veka elektroenergetskog postrojenja treba meriti impedansu sistema uzemljenja.

Zbog funkcionalnih i ekonomskih razloga, nije racionalno da se, radi ispitivanja sistema uzemljenja, vrši isključenje kompletnog elektroenergetskog postrojenja. Uobičajeno, za potrebe formiranja strujnog ispitnog kola, isključuje se samo jedan od priključenih vodova. Dakle, ispitivanja se sprovode kada je postrojenje u normalnom radnom režimu. Međutim, u tom slučaju neiniovno je prisustvo sistemskih smetnji (konduktivne i induktivne smetnje na mrežnoj frekvenciji i harmonicima), a koje mogu bitno uticati na tačnost merenja. Treba istaći da je nivo sistemskih smetnji, uglavnom, srazmeran naponskom nivou elektroenergetskog postrojenja, ali i uslovima okruženja.

Eventualni netačni rezultati merenja (zbog uticaja sistemskih smetnji u procesu merenja, ali i nesagledavanja svih faktora koji utiču na merenu veličinu) mogu dovesti do pogrešnih zaključaka pri ocenjivanju funkcionalnih i bezbednosnih zahteva. S tim u vezi, neosnovani izostanak primene odgovarajućih mera direktno ugrožava funkcionalne, pa i sigurnosne performanse postrojenja. Sa druge strane, neosnovana primena predimenzionisanih dodatnih mera zaštite implicira nepotrebne materijalne troškove.

Frequency Shift Method (FSM) je dokazno efikasan metod za eliminisanje uticaja sistemskih smetnji [1 - 2]. Osnovne pogodnosti *FSM* su:

- (a) eliminiše uticaj smetnji na mrežnoj frekvenciji i na frekvencijama njenih harmonika,
- (b) eksplicitno definiše intenzitet ispitne struje za svaki partikularni slučaj,
- (c) intenzitet ispitne struje je za oko red veličine manji nego kod standardnih metoda,
- (d) jasno je razgraničen proces merenja i proces obrade podataka (*postprocessing*),
- (e) predloženi metod omogućava detaljan uvid u ponašanje aktivne i reaktivne komponente impedanse sistema uzemljenja i
- (f) prilikom merenja, koristi se standardna (komercijalno dostupna) merna oprema.

Pogodnosti (a) – (d) detaljno su izložene u ranijim radovima [3 - 5]. Cilj ovoga rada je dalja eksperimentalna verifikacija karakteristike (e), a vezano za tačnost i izvodljivost merenja impedanse sistema uzemljenja transformatorske stanice predviđene za rad u pretežno kablovskoj mreži. Naime, uvažavajući postojeću topologiju priključenih kablova, primena *FSM* koncepta, lišenog uticaja sistemske smetnje, omogućava jasan uvid u vrednost induktivne reaktanse, koja potiče od uzemljenih delova transmisione

infrastrukture, ukazujući na alternativne pravce odvođenja struje kvara sa uzemljivača. Eksperimentalna verifikacija biće sprovedena na jednom elektroenergetskom objektu, ali će detaljna analiza ukazati na sistemski problem ispitivanja impedanse sistema uzemljenja TS, predviđene za rad u pretežno kablovskoj mreži, i poslužiti kao vodič za rešenje problema.

Pored uvodnog dela rad sadrži i četiri sekcije. U sekciji 2 detaljno je izložen opis problema, vezanih za merenje impedanse sistema uzemljenja transformatorskih stanica u urbanom području. Eksperimentalna verifikacija rezultata merenja impedanse sistema uzemljenja, saglasno dva merna scenarija, predstavljena je u sekciji 3, dok je detaljna diskusija istih izložena u sekciji koja sledi. Zaključna razmatranja nalaze se u sekciji 5.

2. Opis problema

Narastajuća potreba za električnom energijom uslovlila je distributere da se prilagode potrebama tržišta. Tako se mreža naponskog nivoa 35 kV, izvodi na način da svaka od TS 35/10 kV ima obezbeđeno dvostrano napajanje, bilo iz istog ili dva različita izvora. U ruralnim područjima može se odstupiti od principa i zadovoljiti se radijalnim napajanjem. Sa druge strane, TS 10/0,4 kV, koje se koriste za snabdevanje potrošača električnom energijom u urbanim sredinama, sa većim nivoom potrošnje i većim brojem značajnijih objekata, iziskuju rešenja sa relativno pouzdanim napajanjem električnom energijom. Zbog urbanističkih ograničenja, ali i potrebe za većom pouzdanošću, napajanje značajnijih potrošača izvodi se upotrebom kablovskih vodova. Stoga, nije neuobičajeno da dve TS 35/10 kV, koje su međusobno povezane sa jednim ili dva kablovska voda 35 kV, ostvaruju i posrednu vezu preko potrošačkih TS 10/0,4 kV. U tom slučaju i uzemljivački sistemi pomenutih transformatorskih stanica međusobno su galvanski povezani - kako glavnom, tako i posrednom vezom (preko plašteva i armatura, odnosno električnih zaštita priključenih kablova). Posredne veze, naročito u urbanim sredinama, posledice su stalnog trenda rasta opterećenja na konzumnom području i posledično, širenja 10 kV mreže. U zavisnosti od primenjenog tipa kabla: uljni kablovi sa izolacijom od impregnisanog papira i olovnim plaštevima (napr., kablovi tipa IPO 13 i IPZO 13), odnosno kablovi sa izolovanim metalnim plaštom (napr., kablovi tipa XHE 49 i XHP 48), menjaju se karakteristike osnovne uzemljivačke mreže postrojenja. Naime, uljni kablovi sa izolacijom od impregnisanog papira i olovnim plaštevima ponašaju se i kao uzemljivači i kao spone sa uzemljivačima susednih TS [6 - 7]. Sa druge strane, kablovi sa izolovanim metalnim plaštom posredno deluju kao uzemljivači, jer pomoću električnih zaštita međusobno povezuju uzemljivače susednih transformatorskih stanica između kojih su položeni. Navedeno ima za posledicu da prilikom kvara u postrojenju dolazi do smanjenja ukupnog napona uzemljivača, kao i površinskih potencijala unutar i izvan postrojenja,

jer se značajan deo stuje kvara odvodi sa uzemljivača ne kroz zemlju, već kroz uzemljene delove priključenih vodova.

U opštem slučaju, impedansa sistema uzemljenja ima sledeći oblik:

$$\underline{Z} = R + j\omega L \quad (1)$$

gde su: R – rezistivni deo impedanse sistema uzemljenja, $\omega = 2\pi f$ - kružna učestanost i L – ekvivalentna induktivnost sistema uzemljenja. Induktivna komponenta impedanse sistema uzemljenja potiče od plašteva i armatura, odnosno električnih zaštita priključenih kablovskih vodova. Dakle, veći broj priključenih elemenata transmisiona infrastrukture doprinosi većoj vrednosti reaktivnog dela impedanse sistema uzemljenja. Posledično, nameće se i pitanje udela reaktanse u vrednosti impedanse sistema uzemljenja.

Konvencionalni metodi za ublažavanje sistemske smetnje prilikom merenja impedanse sistema uzemljenja implementacijom *Fall-of-Potential Method (FOP)* merne šeme, u prvom redu *Test Current Reversal Method (TCRM)* i *Beat Frequency Method (BFM)*, ne pružaju mogućnost u uvid reaktivne komponente impedanse sistema uzemljenja [8 - 9]. Za razliku od pomenutih metoda, *FSM* pruža navedenu mogućnost. Dodatni benefit implementacije *FSM* koncepta u *FOP* mernu šemu, omogućava uvid u alternativne pravce odvođenja dela ispitne struje, ne kroz zemlju, već preko električnih zaštita i armatura priključenih kablovskih vodova i ogleda se u nelogično velikoj vrednosti reaktivnog dela impedanse sistema uzemljenja u odnosu na njen aktivni deo, a uvažavajući topološku sturkturu postojeće kablovske mreže. Posmatrajmo šemu prikazanu na slici 1.

U cilju realizacije *FOP* merne šeme strujno ispitno kolo formirano je preko kablovskog voda nazivnog napona 35 kV, koji je u svrhu ispitivanja stavljen u beznaponsko stanje, dok su svi 10 kV izvodi u normalnom pogonskom stanju (u cilju nesmetanog snabdevanja konzumnog područja el. energijom). Tako napr., TS 10/0,4 kV oznake C ne može se istovremeno napajati iz TS čiji se sistem uzemljenja ispituje i TS čiji uzemljivački sistem ima ulogu strujne sonde. Međutim, uprkos prekidu napajanja sa jedne strane, električne zaštite, odnosno plaševi i armature priključenih kablovskih vodova ostaju međusobno galvanski povezani u TS 10/0,4 kV oznake C i aktivno učestvuju u odvođenju dela ispitne struje sa uzemljivača.

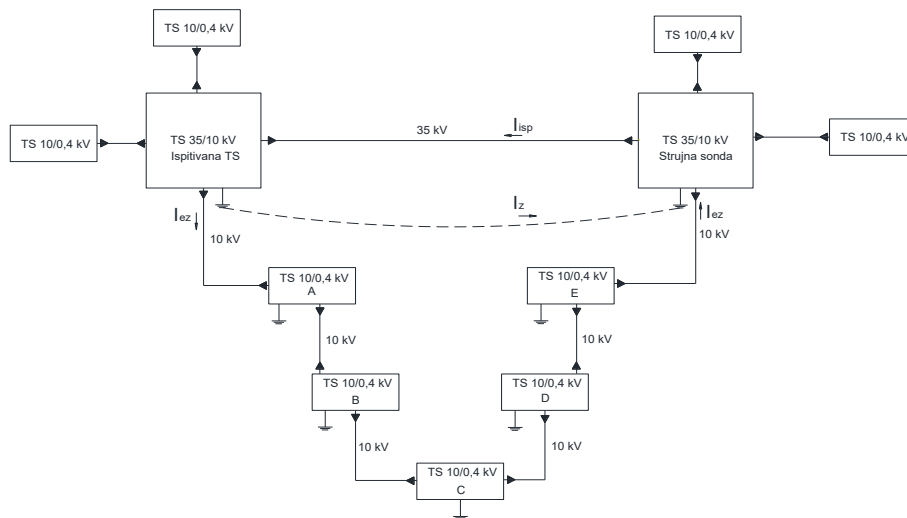
Vrednost impedanse sistema uzemljenja izračunava se saglasno formuli:

$$\underline{Z} = \frac{U}{I_{isp}} \quad (2)$$

gde su: U – napon uzemljivača i I_{isp} – vrednost ispitne struje. Iz (2) proizlazi, da se usvajanjem pune vrednosti ispitne struje može dobiti i znatno niža vrednost impedanse sistema uzemljenja. Zapravo, vrednost komponente ispitne struje, koja se sa uzemljivača odvodi u tlo i merodavna je za utvrđivanje vrednosti impedanse, saglasno slici 1, određuje se iz:

$$\underline{I}_z = \underline{I}_{isp} - \underline{I}_{ez} \quad (3)$$

Znatno niža vrednost impedanse sistema uzemljenja, koja je posledica nesagledavanja svih faktora koji utiču na merenu veličinu, može dovesti do pogrešnih zaključaka pri ocenjivanju funkcionalnih i bezbednosnih zahteva. Naime, saglasno [9, Sec. 5.4] u kojoj se navodi da ukoliko je napon uzemljivača¹ manji od dvostruke vrednosti maksimalno dozvoljenog napona dodira, smatra se da su naponi dodira u okviru propisanih granica i da nije potrebno sprovesti dalja merenja. Navedeno za posledicu može imati bezbednosne rizike za radno angažovano osoblje, ali i pripadnike opšte populacije, koji mogu ostvariti direktan kontakt sa zaštitnom ogradom transformatorske stanice u slučaju zemljospoja. Navedena situacija je posebno opasna u slučajevima kada su uzemljivači transformatorske stanice i zaštitne (spoljašnje) ograde međusobno galvanski povezani, pa se na ogradu, koja je na rubu uzemljivačke mreže, prenosi opasan potencijal. Naime, u gradskom području, zbog postojanja različitih metalnih instalacija u tlu (napr., kablovski vodovi, cevovodi), uzemljivač ograde ne može se pouzdano galvanski odvojiti od uzemljivača postrojenja.



Slika 1 - Tipična situacija u urbanom konzumnom području

Ekperimentalna verifikacija navedenih tvrdnji biće izložena u sekciji koja sledi i potkrepljena istraživanjima sprovedenim u novoizgrađenoj TS 35/10 kV _ 01.

¹ Napon uzemljivača je direktno proporcionalan impedansi sistema uzemljenja.

3. Eksperimentalna verifikacija

TS 35/10 kV _ 01 izgrađena je sa ciljem da omogući rezervno napajanje pre svega osvetljenja i ventilacije tunela, ali i lokalne potrošnje. U TS 35/10 kV _ 01, tokom sprovođenja merne kampanje, bila su uvedena dva kablovska voda i to: kablovski vod 35 kV sa izolovanim metalnim omotačem dužine 6,7 km, koji direktno povezuje TS 35/10 kV _ 01 sa TS 35/10 kV _ 02 i kablovski vod 10 kV, takođe sa izolovanim metalnim omotačem dužine 1,3 km, koji služi za napajanje tunelske TS 10/0,4 kV br. 4. Ono što je važno istaći, a reflektuje se na merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja, jeste činjenica da se tunelska TS 10/0,4 kV br. 4, napaja takođe iz TS 35/10 kV _ 02 i to posredno preko tunelskih TS 10/0,4 kV br. 1, 2 i 3, respektivno. Ukupna dužina kablovskih vodova 10 kV od TS 35/10 kV _ 01 do TS 35/10 kV _ 02 iznosi 7 km. Dakle, uzemljivači TS 35/10 kV _ 01 i TS 35/10 kV _ 02 su direktno galvanski povezani preko električnih zaštita kablovskog voda 35 kV, odnosno posredno, preko električnih zaštita kablovskih vodova 10 kV.

Navedena situacija odražava realno stanje direktno i posredno povezanih transformatorskih stanica 35/10 kV u urbanom konzumnom području. Naime, realizacija *FOP* merne šeme u urbanoj zoni, zasniva se na korišćenju jednog kablovskog voda kao provodnika strujnog ispitnog kola između ispitivane TS i TS koja ima ulogu pomoćnog uzemljivača (strujne sonde).

Za potrebe eksperimentalne verifikacije empirijski ustanovljene greške merenja impedanse sistema uzemljenja primenom *FSM* koncepta, stujno ispitno kolo u TS 35/10 kV _ 01 formirano je preko:

- (a) neaktivnog kablovskog voda i sistema uzemljenja susedne TS (u daljem tekstu *FSM^(a)*), odnosno
- (b) finožičnih bakarnih provodnika i svrdlastih uzemljivača (u daljem tekstu *FSM^(b)*).

U TS 35/10 kV _ 01, ispitivanja su sprovedena u saglasnosti sa dva merna scenarija, pri temperaturi ambijenta od oko 20°C:

scenario (a), veza između ispitivanog sistema uzemljenja i pomoćnog uzemljivača (strujne sonde) ostvarena je preko kablovskog voda nazivnog napona 35 kV sa izolovanim metalnim omotačem. Fazni provodnici kablovskog voda bili su međusobno povezani u paralelnoj vezi, dok je električna zaštita kabla bila raskaçena na sve tri faze u ispitivanoj TS. Strujna sonda nalazi se na rastojanju 6.7 km od ispitivanog sistema uzemljenja. TS 35/10 kV _ 02, ĉiji je uzemljivaĉki sistem imao ulogu strujne sonde, bila je u normalnom pogonskom stanju prilikom ispitivanja.

scenario (b), veza između ispitivanog sistema uzemljenja i pomoćnog uzemljivača (strujne sonde) ostvarena je preko finožičnog bakarnog provodnika. Strujna sonda nalazila se na rastojanju 360 m od ispitivanog sistema uzemljenja ĉije su dimenzije 24 m x 24 m., što iznosi nešto više od 10

dijagonala ispitivanog objekta. Ulogu strujne sonde, imala su dva paralelno povezana svrdlasta uzemljivača, otpornosti rasprostiranja 33 Ω .

Rekapitulacija uporednih merenja impedanse sistema uzemljenja data je u Tabeli 1. Poslednja kolona u tabeli, odnosi se na moduo relativne greške između merenja impedanse sistema uzemljenja $Z(50\text{ Hz})$ na bazi $FSM^{(a)}$ (korišćenjem sistema uzemljenja susedne transformatorske stanice) i na bazi $FSM^{(b)}$ (korišćenjem dva paralelno povezana svrdlasta uzemljivača).

Tabela 1. Relativno odstupanje rezultata merenja na 50 Hz

Frekvencija f [Hz]	$FSM^{(a)}$			$FSM^{(b)}$			Moduo relativne greške merenja impedanse $ \mathcal{E} $ [%]
	Impedansa, $Z(f)$ [Ω]	Aktivni deo, $R(f)$ [Ω]	Reaktivni deo, $X(f)$ [Ω]	Impedansa, $Z(f)$ [Ω]	Aktivni deo, $R(f)$ [Ω]	Reaktivni deo, $X(f)$ [Ω]	
40	0.1892	0.1160	0.1495	0.4629	0.3938	0.2434	56.23
50*	0.2254	0.1346	0.1810	0.5150	0.4244	0.2899	
60	0.2623	0.1518	0.2140	0.5670	0.4543	0.3393	
75	0.3140	0.1837	0.2547	0.6436	0.5044	0.3997	

*Vrednosti: impedanse, njenog aktivnog i reaktivnog dela na mrežnoj frekvenciji (50 Hz), dobijene su iz jednačina regresionih pravih, a nakon regresione analize sprovedene nad rezultatima merenja na 40, 60 i 75 Hz, respektivno [1, 4].

4. Diskusija

Rezultati merenja impedanse sistema uzemljenja na bazi $FSM^{(a)}$ afirmativno deluju sa aspekta pojave potencijalnih bezbednosnih rizika. Uzimajući u obzir da je vrednost struje kvara 640 A i da ukupno vreme trajanja kvara iznosi 1 s, maksimalno dozvoljena vrednost napona dodira u skladu sa [9] iznosi 117 V. Napon uzemljivača dobijamo prema sledećem izrazu, $U = Z \cdot I = 0,2254 \Omega \cdot 640 A = 144,25 V$, i zaključujemo da je manji od dvostruke vrednosti dozvoljenog napona dodira, u konkretnom slučaju 234 V. Opet, prema [9], može se smatrati da su naponi dodira i naponi koraka u okviru propisanih granica i da nije potrebno sprovesti dalja merenja.

Ono što se jasno uočava kod merne kampanje $FSM^{(a)}$, jeste vrednost reaktivnog dela impedanse sistema uzemljenja, koja je veća od aktivnog dela (Tabela 1, kolone 3 i 4). Podsećamo, konvencionalani metodi za merenje impedanse (50 Hz) ne pružaju uvid u ponašanje reaktivnog dela impedanse sistema uzemljenja. Uzimajući u obzir trenutne topološke strukture priključenih kablovskih vodova, kao i činjenicu da su električne zaštite kablovskog voda, preko koga je formirano strujno ispitno kolo, bile galvanski odvojene u ispitivanoj TS, rezultati ispitivanja ukazuju na potencijanu grešku merenja. Preciznije, rezultati ispitivanja ukazuju da u odvođenju ispitne struje sa uzemljivača, aktivno participira električna zaštita kablovskog voda 10 kV, koja predstavlja posrednu galvansku vezu ispitivanog i pomoćnog

uzemljivača. Vrednost faktora deljenja ispitne struje nije se mogla odrediti merenjem, zbog nemogućnosti pristupa kablovskom vodu u izvodnoj ćeliji 10 kV. Jasno je da prilikom ispitivanja transformatorske stanice u normalnom pogonskom stanju, merenje faktora deljenja ispitne struje nije realna opcija iz bezbednosnih razloga. Naime, isti je u normalnom pogonskom stanju i zbog prekida snabdevanja električnom energijom priključenih potrošača ne može se isključiti².

Topografija područja na kome je izgrađena TS 35/10 kV_01, omogućava koncipiranje merne šeme na bazi *FOP - FSM^(b)* upotrebom svrdlastih uzemljivača kao strujnih sondi. Podobnost svrdlastih uzemljivača tokom uobičajenog trajanja merne kampanje ispitivanja sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja u tipičnoj TS 35/X kV eksperimentalno je verifikovana u [10]. Jasno je da upotreba paralelno povezanih svrdlastih uzemljivača, sa ciljem formiranja strujne sonde, omogućava potpunu kontrolu „zatvaranja“ ispitne struje. Preciznije, za razliku od merne kampanje *FOP - FSM^(a)* ovde ne postoje alternativni pravci odvođenja ispitne struje, već se sva ispitna struja odvodi kroz zemlju.

Relativno odstupanje rezultata merenja na bazi *FOP - FSM^(b)* u odnosu na *FOP - FSM^(a)* iznosi 56,23% (Tabela 1, osma kolona). Ovde je značajno istaći i da se rezultati relativnog odstupanja nalaze u opsegu redukcionog faktora kablovskog voda 10 kV sa izolovanim metalnim plaštom [8], koji je u aktuelnoj situaciji predstavljao posrednu galvansku ispitivanog i pomoćnog uzemljivača. Napon uzemljivača sada iznosi $U = Z \cdot I = 0,5150 \Omega \cdot 640 A = 329,6 V$, i isti je veći od dvostruke vrednosti dozvoljenog napona dodira, u konkretnom slučaju 234 V. Saglasno [9], sada je potrebno sprovesti merenja napona dodira i napona koraka. Merenja napona dodira i napona koraka sprovedna su na 36 lokacija raspoređenih na području uzemljivača objekta, pri čemu je na jednom mestu (zaštitna ograda TS sa spoljne strane) izmerena vrednost bila iznad maksimalno dozvoljenje, konkretno 118 V, nakon čega su primenjene odgovarajuće mere za smanjivanje površinskih potencijala.

Realizacijom *FOP - FSM^(b)*, udeo reaktivnog dela impedanse sistema uzemljenja značajno je manji od njenog aktivnog dela, što odgovara trenutnoj topološkoj strukturi položenih kablovskih vodova. Podsećamo, za razliku od merne šeme *FOP - FSM^(a)*, gde su električne zaštite kablovskog voda 35 kV preko koga je formirano strujno ispitno kolo bile galvanski odvojene, u mernoj šemi *FOP - FSM^(b)* iste su bile galvanski povezane na oba kraja. Preciznije, pri dodatnoj induktivnoj reaktansi, koju unosi električna zaštita kablovskog voda 35 kV, dobijena je niža vrednost reaktivnog dela impedanse sistema uzemljenja. Stoga, na osnovu izmerene vrednosti reaktanse, ustanovljena je empirijski utvrđena greška merenja, koja je imala dalje posledice na procenu bezbednosnih rizika.

² Uobičajena situacija u transformatorskim stanicama u gradskom konzumnom području, gde se zbog ispitivanja sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja ne mogu isključivati dodatni kablovski vodovi, već samo vod koji služi za formiranje strujnog ispitnog kola.

5. Zaključak

Osnovni zaključci ovoga rada mogu se rezimirati u sledećim tačkama.

1. Primena *FSM* koncepta u *FOP* mernoj šemi, za razliku od konvencionalnih metoda, omogućava detaljan uvid u ponašanje aktivne i reaktivne komponente impedanse sistema uzemljenja.
2. Saglasno postojećoj topologiji izvedene kablovske mreže, uz implementaciju *FSM* koncepta u *FOP* mernoj šemi, može se ustanoviti da izmerena veličina nije dobro procenjena, što se ogleda u nelogično velikoj vrednosti reaktanse i ima dalje posledice na adekvatnu procenu bezbednosnih rizika.
3. Upotreba svrdlastih uzemljivača, kao strujnih sondi, otklanja dileme koje se odnose na adekvatnu procenu merene veličine. U konkretnom slučaju, ne postoje alternativni pravci odvođenja dela ispitne struje sa uzemljivača, već se sva ispitna struja zatvara u kolu ispitivani uzemljivač – svrdlasti uzemljivač(i).
4. Jasno je da je realizacija merne šeme, bazirane na upotrebi svrdlastih uzemljivača, praktična i ekonomski isplativa. Praktična je u manipulativnom pogledu, dok je sa druge strane ekonomski isplativa jer ne zahteva, da se za potrebe merenja, privremeno angažuje jedan od priključenih vodova u cilju formiranja strujnog ispitnog kola.

Pravac daljeg rada je koncipiranje merne šeme na bazi *FOP - FSM^(b)*, upotrebom svrdlastih uzemljivača kao strujnih sondi, u urbanoj (gradskoj) sredini, gde je, zbog toploške strukture razgranate kablovske mreže, realno očekivati da relativno odstupanje rezultata merenja na bazi *FOP - FSM^(b)* u odnosu na *FOP - FSM^(a)* bude i veće od navedenih 56%. Ipak, autori su svesni činjenice da pobadanje svrdlastih uzemljivača u gradskoj sredini neće biti fizički izvodljivo u ne tako malom broj slučajeva, zbog betonskih i/ili asfaltnih podloga, kao i potencijalnog oštećenja brojnih metalnih instalacija položenih u tlu.

6. Literatura

- [1] V. Kostić, N. Raičević, and A. Pavlović, "Enhanced grounding system impedance measurements for high-voltage substations", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 25, No. 9, Sep. 2015, pp. 1875–1883, ISSN: 2050-7038, <https://doi.org/10.1002/etep.1939>.
- [2] V. I. Kostić, N. B. Raičević, "An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations", *Electric Power Systems Research*, vol. 130, pp. 59–66, Jan. 2016, ISSN: 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.023>

- [3] V. I. Kostić, N. B. Raičević, D. S. 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, ISSN: 1820-6425, <http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUAutContRob/article/view/1255/1125>.
- [4] V. Kostić, N. Raičević, "Grounding system impedance measurement using shifted frequency method", *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2015)*, LF-000124 (CD), pp. 197-200, Riga, Latvia, 11-13 May 2015, ISBN: 978-1-4799-9979-8/15, <http://dx.doi.org/10.1109/PowerEng.2015.7266318>.
- [5] V. Kostić, N. Raičević, J. Mrvić, S. Rebrić, "Grounding System Impedance Measurement – Case Study", *12th International Conference on Applied Electromagnetics - ПЕC 2015*, Faculty of Electronic Engineering of Niš, Niš, Serbia, O5-6 (CD), pp. 1-4, 31 Aug.-2 Sep. 2015.
- [6] J. Nahman, *Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža*, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [7] N. Rajaković, D. Tasić, *Distributivne i industrijske mreže*, Akademski misao, Beograd, 2008.
- [8] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, *IEEE Standard 81-2012*, Dec. 2012.
- [9] *EN 50522*, Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c., Nov. 2010.
- [10] V. Kostić, "Doprinos racionalizaciji merenja impedanse sistema uzemljenja srednjenaponskih transformatorskih stanica", *Tehnika*, vol. 74, br. 1, str. 97-102, 2019, <http://dx.doi.org/10.5937/tehnika1901097K>.

Abstract: Ground impedance measurement in medium voltage substations, designed to operate in a predominantly cable network, is a complex research task. Namely, the inability to consider all the factors that can affect the measured value, in a situation where one de-energized cable line is used to form the *Fall-of-Potential* (FOP) measurement scheme, is directly reflected to an adequate assessment of safety risks. This paper proposes an alternative measurement method so called *Frequency Shift Method* (FSM), which inherently guarantees „better“ measurement than any of the conventional methods. By providing insight into the behavior of the active and reactive ground impedance components, and at the same time taking into account the topological structure of the existing cable network, the application of the *FSM* concept in the *FOP* measurement scheme points out to alternative paths of test current distribution, and in that way pointing to the illogicality of the obtained measurement results. Experimental verification was conducted under real operating conditions, and can serve as a guide for solving similar problems in practice.

Keywords: grounding, ground impedance, *Fall-of-Potential*, *Frequency Shift Method*.

Impact of Underground Cables on Ground Impedance Measurement Implementing FSM Concept in FOP Measuring Scheme

Rad primljen u uredništvo: 20.08.2020. godine.
Rad prihvaćen: 14.10.2020. godine.

