



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Vojin I. Kostić

**POBOLJŠANI METODI ZA MERENJE SIGURNOSNIH
KARAKTERISTIKA SISTEMA UZEMLJENJA U
VISOKONAPONSKIM POSTROJENJIMA**

doktorska disertacija

Tekst ove doktorske disertacije

stavlja se na uvid javnosti,

u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju

("Sl. glasnik RS", br. 76/2005, 100/2007 - autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010, 93/2012,
89/2013 i 99/2014)

NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:

Ovaj tekst se smatra rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i srodnim
pravima, "Sl. glasnik RS", br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

Nijedan deo ove doktorske disertacije ne sme se koristiti
ni u kakve svrhe, osim za upoznavanje sa sadržajem pre odbrane.

Niš, 2016.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Vojin I. Kostić

**IMPROVED METHODS FOR MEASURING SAFETY
PERFORMANCE METRICS OF THE GROUNDING
SYSTEM IN THE HIGH-VOLTAGE FACILITIES**

PhD thesis

Niš, 2016.



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Vojin I. Kostić

**POBOLJŠANI METODI ZA MERENJE SIGURNOSNIH
KARAKTERISTIKA SISTEMA UZEMLJENJA U
VISOKONAPONSKIM POSTROJENJIMA**

doktorska disertacija

Mentor:

dr Nebojša B. Raičević, docent

Niš, 2016.

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor:

Dr Nebojša B. Raičević, docent, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije:

1. Docent dr Nebojša B. Raičević, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
2. Redovni profesor dr Slavoljub R. Aleksić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
3. Docent dr Nenad N. Cvetković, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
4. Docent dr Aleksandar D. Janjić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
5. Naučni savetnik dr Dragan S. Kovačević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut
“Nikola Tesla”

Datum odbrane: _____

I Autor

Ime i prezime	Vojin I. Kostić
Datum i mesto rođenja	26.06.1977. godine, Beograd
Sadašnje zaposlenje	Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Univerziteta u Beogradu Centar za elektroenergetske objekte

II Doktorska disertacija

Naslov	Poboljšani metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja u visokonaponskim postrojenjima
Ustanova i mesto gde je disertacija rađena	Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet Katedra za teorijsku elektrotehniku
Mentor	Docent dr Nebojša B. Raičević

III Tok prijave doktorske disertacije

Broj odluke i datum prihvatanja teme doktorske disertacije	NNV br. 07/03-017/16-002 od 23.03.2016. godine, Elektronski fakultet NSV br. 8/20-01-003/16-018 od 18.04.2016. godine, Univerzitet u Nišu
Komisija za ocenu podobnosti teme doktorske disertacije	1. Docent dr Nebojša B. Raičević, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 2. Redovni profesor dr Slavoljub R. Aleksić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 3. Docent dr Nenad N. Cvetković, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 4. Docent dr Aleksandar D. Janjić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 5. Naučni savetnik dr Dragan S. Kovačević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”
Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije	1. Docent dr Nebojša B. Raičević, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 2. Redovni profesor dr Slavoljub R. Aleksić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 3. Docent dr Nenad N. Cvetković, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 4. Docent dr Aleksandar D. Janjić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet 5. Naučni savetnik dr Dragan S. Kovačević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”
Datum odbrane	

REZIME

Poboljšani metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja u visokonaponskim postrojenjima

Sistem uzemljenja ima ključnu ulogu u pogledu pouzdanosti rada i sigurnosti visokonaponskog (VN) postrojenja (uobičajeno transformatorskih stanica). Osnovna uloga sistema uzemljenja je da omogući disperziju maksimalno očekivane struje kvara u tlo, ograničavajući pritom vrednosti napona dodira i napona koraka u okvirima propisanih granica, pre svega unutar, a delimično i u okolini VN postrojenja.

Poželjno je da sistem uzemljenja ima što manju otpornost rasprostiranja u odnosu na tačku sa referentnim nulnim potencijalom (referentna zemlja). Mrežasta elektroda je osnovna elektroda u sistemu uzemljenja VN postrojenja. Ona se sastoji od neizolovanih provodnika, koji su povezani međusobno u horizontalnoj ravni. Horizontalna mrežasta struktura povezana je i sa vertikalno pobodenim elektrodama, najčešće postavljenim na krajevima pravougaone mrežaste strukture. Mrežasta elektroda položena je ispod čitave površine postrojenja, pa se na istu povezuju sve metalne mase unutar zaštitne ograde postrojenja, a u cilju stabilizovanja varijacije ukupnog površinskog potencijala. Na niskim frekvencijama (nominalno, mrežna frekvencija) uzemljenje ima rezistivni karakter. Međutim, sa porastom frekvencije induktivnost svake pojedinačne elektrode u složenom sistemu uzemljenja igra značajnu ulogu.

Na gore opisanoj osnovi konstituisani su nacionalni i internacionalni standardi za projektovanje i za ispitivanje sistema uzemljenja. Međutim, visokofrekvencijska analiza sistema uzemljenja u prisustvu impulsne strujne pobude zbog atmosferskih pražnjenja, sklopnih operacija i kvarova, u fazi je istraživanja.

Osnovne funkcionalne karakteristike sistema uzemljenja su: kontinuitet sistema uzemljenja, impedansa sistema uzemljenja, napon dodira i napon koraka.

Periodično ispitivanje funkcionalnih karakteristika je od suštinskog značaja za normalno funkcionisanje elektroenergetskog postrojenja. Kako bi se izbeglo neracionalno isključenje elektroenergetskog postrojenja, ispitivanja se sprovode dok je objekat u normalnom pogonskom stanju. U takvim okolnostima nivo konduktivne smetnje u sistemu uzemljenja (uobičajno iznosi nekoliko ampera, pa čak do 15 A), na frekvenciji mreže i harmonicima mrežne frekvencije, kao i prisustvo osnovnog šuma, čini ispitivanje sistema uzemljenja aktivnog VN postrojenja izuzetno zahtevnim. Dodatnu komplikaciju predstavlja i činjenica da je vrednost impedanse sistema uzemljenja prostranog VN postrojenja niska (manja je od 0.5Ω).

Esencijalni podaci za proračun bezbednosnih rizika često nisu dostupni. Zbog toga, odgovarajuća merenja su jedini način za utvrđivanje stanja karakteristika sistema uzemljenja i važan dodatak teoriji. Za razliku od teorijskih pristupa, opisi i rezultati empirijskih istraživanja u literaturi su vrlo retki. Stvarni razlozi su: merenja su dugotrajna, opasna, a zahtevaju i odgovarajuće dozvole.

U naučnoj zajednici i telima koja se bave standardizacijom postoji stalna težnja za poboljšanjem mernih tehnika za ispitivanje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja. Nedostaci aktuelnih mernih metoda ogledaju se s jedne strane u pristupu koji sadrži veću ili manju dozu implicitne subjektivnosti, a sa druge strane odgovarajući aktuelni metodi zahtevaju visok nivo ispitne struje (do 100 A AC, odnosno do 300 A DC). U ovoj disertaciji, u cilju otklanjanja navedenih nedostataka biće elaborani i eksperimentalno verifikovani novi metodi.

Naučni doprinos disertacije odnosi se na suštinsko poboljšanje aktuelnih mernih metoda predloženih aktuelnim IEEE standardima 80 i 81, respektivno.

Deo materijala, koji predstavlja jezgro disertacije, kandidat je već objavio u referentnim publikacijama.

Ova disertacija podeljena je u tri dela. Deo I obuhvata Poglavlja 2 i 3. Deo II obuhvata Poglavlja 4 do 7. Deo III sadrži Poglavlje 8.

U Delu I, Poglavlje 2, dat je pregled literature koja se odnosi na konstrukciju, analizu i simulaciju sistema uzemljenja. U Delu I, Poglavlje 3, razmatraju se postojeći metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja. Takođe, dat je i kritički osvrt na ograničenja koja su svojstvena postojećim mernim metodima.

Deo II sadrži originalne doprinose ove disertacije: novi metod za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja (Poglavlje 4); metod (tzv. FSM) kojim se uspešno eliminiše konduktivna smetnja na mrežnoj frekvenciji (Poglavlje 5); novi metod za merenje impedanse sistema uzemljenja (tzv. FOP-FSM) (Poglavlje 6); novi metod za merenje napona dodira i napona koraka (tzv. FEM-FSM) (Poglavlje 7). Eksperimentalna verifikacija predloženih mernih metoda zasnovana je na rezultatima iz ukupno 49 VN postrojenja nazivnog napona 110 kV, 220 kV i 400 kV.

U delu III rezimirani su osnovni doprinosi ove teze. Takođe, preporučeni su mogući pravci za dalji rad. Preporuke se odnose na proces standardizacije predloženih metoda i na potpunu automatizaciju merenja.

Ključne reči: uzemljenje, sistem uzemljenja, systemska smetnja, merenje na sistemu uzemljenja, kontinuitet sistema uzemljenja, impedansa sistema uzemljenja, napon dodira, napon koraka.

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Uzemljivački sistemi

UDK broj: 621.316.99:621.317

Klasifikaciona oznaka: T190

Tip odabrane licence: CC BY-NC-ND

SUMMARY

Improved methods for measuring safety performance metrics of the grounding system in the high-voltage facilities

The grounding system has an important role to maintain safe and reliable operation of high-voltage (HV) power facility (usually substation). The main task of a grounding system is to discharge maximum ground fault current expected into the soil, without exceeding safety limits for touch and step voltages within the substation and the surrounding area.

It is desirable that the substation grounding provides a near zero resistance to remote earth. The prevailing practice is to install a grounding grid of horizontal ground electrodes (buried bare copper conductors) supplemented by a number of vertical ground rods connected to the grid, and by a number of equipment grounding mats and interconnecting cables. The grounding grid provides a common ground for the electrical equipment and for all metallic structures at the substation. It also limits the surface potential gradient. Grounding is traditionally modeled as a pure resistance. This is a good approximation at low frequencies, but as the frequency gets higher, inductance starts to play an important role.

National and international standards give detailed guidelines for grounding system design, as well as for testing, under power frequency conditions, but only limited recommendations for high frequency and transient conditions are available.

The main performance metrics of the grounding system are: grounding grid integrity, grounding system impedance, and touch and step voltage.

The performance metrics should be periodically tested. The goal is to perform the test when the substation is in-service (to avoid interruption of service and costly downtime). Due to conductive interference in the grounding system (usually several amperes, up to about 15 A), caused by power frequency, its harmonics and background noise, the active HV substation is

an extremely challenging environment for the measurement on grounding system. This is further compounded by the impact of very low impedance of the grounding system (typically less than 0.5Ω).

Essential data to calculate safety risks in advance is often not available. Measurements are therefore an essential supplement to the theory. Unlike the theoretical approaches, empirical approaches are not widely available in the literature due to the arduous work involved, the difficulty to obtain permissions, and safety restrictions.

There is a continual interest in scientific community and standardization bodies to improve the measurement of performance metrics of the grounding system. The drawbacks of actual measurement methods are related to less or more *subjectivity* and requirements for *high level* of test current (up to 100 A AC and up to 300 A DC). In this thesis, in order to avoid mentioning drawbacks, we elaborated and experimentally verified the efficient methods.

The overall contribution of this thesis is the substantial enhancement of the grounding system measurement by eliminating the current restrictions found in the IEEE standards 80 and 81, respectively.

The original works, that constitute the core of this thesis, have been published in referring publications.

This thesis is divided into three parts. Part I includes Chapters 2 and 3. Part II includes Chapters 4 to 7. Part III contains Chapter 8.

Part I gives an extensive review of published literature related to the analytical and simulation investigations of earth electrode systems. Part I also analyzes the existing methods for measurement performance metrics of the grounding system. Critical review of the constraints inherent in existing methods was given.

Part II includes original contributions of the thesis: new method for measurement of grounding grid integrity (Ch.4); an effective method (so called FSM) for eliminating the effect of conductive interference at power frequency (Ch. 5); new method for grounding

system impedance measurement (so called FOP-FSM) (Ch.6); new method for measurement of touch and step voltage (so called FEM-FSM) (Ch.7). Our experiment-driven verification approach of the proposed measurement methods is based on totally 49 power facilities (voltage range: 110 kV, 220 kV and 400 kV) in Serbia.

Part III gives an extensive review of thesis results. Part III also proposes and elaborates directions for further automation of the proposed measurement methods.

Keywords: grounding, grounding system, power frequency interference, grounding system measurement, grounding grid integrity, grounding system impedance, touch voltage, step voltage.

Academic expertise: Electrical Engineering and Computer Science

Specific scientific area: Grounding systems

UDC number: 621.316.99:621.317

CERIF classification: T190

Creative commons license: CC BY-NC-ND

ZAHVALNOST

Na kraju višegodišnjeg procesa vezanog za rad na ovoj disertaciji, imam posebno zadovoljstvo da zahvalim institucijama i pojedincima koji su mi pomogli da dođem na mesto gde jesam.

Pre svega, ističem da sam imao beneficiju da radim i stasam u **Elektrotehničkom institutu “Nikola Tesla”**. Sa jedne strane, to je bila jedinstvena prilika da upoznam mnoge specifične probleme iz oblasti elektroenergetike. Sa druge strane, u okviru projekata i mernih kampanja iz delatnosti Instituta, imao sam izuzetnu priliku da upoznam specifičnosti mnogih elektroenergetskih objekata iz sistema **EPS-a** i **EMS-a**. Da nije bilo tog dragocenog i jedinstvenog iskustva ne bih bio gde jesam. Zato, moja iskrena zahvalnost: **Elektrotehničkom institutu “Nikola Tesla”**, **Javnom preduzeću “Elektroprivreda Srbije”** i **Javnom preduzeću “Elektromreža Srbije”**. Lično, veoma sam zahvalan za podršku i razumevanje **naučnom savetniku dr Draganu Kovačeviću**, generalnom direktoru Elektrotehničkog instituta “Nikola Tesla”. Takođe, zahvalan sam **dipl. inž. Aleksandru Pavloviću**, direktoru Centra za elektroenergetske objekte u Elektrotehničkom institutu “Nikola Tesla”; kolegama: **dipl. inž. Zoranu Nedeljkoviću**, **dipl. inž. Slavici Rebrić** i **dipl. inž. Nebojši Petroviću** iz Javnog preduzeća “Elektromreža Srbije”; kolegama: **dr Zoranu Simendiću**, **dipl. inž. Novici Selakoviću** i **dipl. inž. Nenadu Stojanoviću** iz Javnog preduzeća “Elektroprivreda Srbije”.

Zahvalan sam mom mentoru **doc. dr Nebojši B. Raičeviću** na izuzetno uspešnoj i konstruktivnoj saradnji. Takođe sam zahvalan na konstruktivnim predlozima i sugestijama članovima Komisije: **prof. dr Slavoljubu R. Aleksiću**, **doc. dr Nenadu N. Cvetkoviću**, **doc. dr Aleksandaru D. Janjiću**, i **dr Draganu S. Kovačeviću**.

Veoma sam zahvalan **prof. dr Aleksi Zejaku** za korisne komentare i **dipl. filologu Branki Simić**, za lektorisanja teksta časopisnih radova.

Zahvalan sam **prof. dr Goranu T. Đorđeviću** i **dr Milici Petković** za pomoć koju su mi nesebično pružali u toku izrade ove disertacije.

Zahvalnost dugujem **višem naučnom saradniku dr Vladimiru Vukiću** i **naučnom saradniku dr Žarku Jandi** iz Instituta “Nikola Tesla“ na stručnim konsultacijama ostvarenim u neposrednoj komunikaciji i saradnji.

Zahvalan sam mojim kolegama iz Instituta “Nikola Tesla“ koji su sa mnom godinama delili težak rad na terenu: **mr Jovanu Mrviću, dipl. inž. Dejanu Hrvicu, dipl. inž. Momčilu Petroviću, dipl. tehn. Branku Josifoviću** i **dipl. tehn. Predragu Kudri**.

Zahvalan sam mojoj porodici, voljenim roditeljima, a pre svega, moj supruzi **Tijani**, koja je i pored svojih profesionalnih obaveza, tokom više godina imala beskrajno strpljenje, razumevanje i bila je najjača podrška mom radu. Ovaj rad je posvećen mojim divnim ćerkama **Emi** i **Ivi**.

SADRŽAJ

Rezime, **II**

Summary, **V**

Zahvalnost, **VIII**

Spisak simbola, **XIV**

Spisak skraćenica, **XVI**

Lista slika, **XVII**

Lista tabela, **XXII**

1 UVOD, 1

- 1.1 Predmet naučnog istraživanja, **1**
- 1.2 Cilj naučnog istraživanja, **3**
- 1.3 Doprinosi naučnog istraživanja, **4**
- 1.4 Publikovani radovi, **5**
- 1.5 Organizacija teze, **7**

Deo I: PREGLED PROBLEMA, 10

2 PREGLED OSNOVNIH KARAKTERISTIKA SISTEMA UZEMLJENJA VN POSTROJENJA, 11

- 2.1 Funkcionalne karakteristike, **11**
- 2.2 Niskofrekvencijske karakteristike, **14**
- 2.3 Visokofrekvencijske karakteristike, **20**
- 2.4 Karakteristike tla, **24**
 - 2.4.1 Specifična električna otpornost tla, **24**
 - 2.4.2 Merenje specifične električne otpornosti tla, **26**
 - 2.4.3 Nehomogeno tlo, **29**
- 2.5 Smetnje u sistemu uzemljenja – merni aspekt, **31**
 - 2.5.1 Konduktivne smetnje, **32**
 - 2.5.1.1 TCRM -Metod za ublažavanje uticaja sistemske smetnje, **32**
 - 2.5.1.2 Frekvencijski metodi za ublažavanje uticaja sistemske smetnje, **34**

- 2.5.2 Induktivne smetnje, **37**
- 2.5.3 Geomagnetski indukovana smetnja - GIC, **37**
- 2.6 Zaključak, **40**

3 PREGLED METODA ZA MERENJE SIGURNOSNIH KARAKTERISTIKA SISTEMA UZEMLJENJA, 41

- 3.1 Uvodne napomene, **41**
- 3.2 Pregled metoda za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja, **42**
 - 3.2.1 Metodi zasnovani na analizi rezistivne mreže, **43**
 - 3.2.2 Metodi zasnovani na detekciji magnetskog polja, **45**
- 3.3 Pregled metoda za merenje impedanse sistema uzemljenja, **47**
 - 3.3.1 FOP (*Fall-of-Potential*) metod, **48**
 - 3.3.1.1 Savršeni FOP metod, **49**
 - 3.3.1.2 Nekonvencionalni FOP metod, **51**
- 3.4 Pregled metoda za merenje napona dodira i napona koraka, **55**
 - 3.4.1 Uticaji struje na ljudsko telo, **56**
 - 3.4.2 Sigurnosni indikatori – definicije, **57**
 - 3.4.3 Osvrt na standarde, **58**
 - 3.4.4 FEM – Metod za merenje napona dodira i napona koraka, **60**
- 3.5 Zaključak, **62**

Deo II: NOVI METODI, 64

4 NOVI METOD ZA PROVERU KONTINUITETA SISTEMA UZEMLJENJA, 65

- 4.1 Uvodne napomene, **65**
- 4.2 Osnovni problemi vezani za ispitivanja kontinuiteta na bazi HCM, **66**
- 4.3 Novi metod: A-HCM, **67**
 - 4.3.1 Opšte, **67**
 - 4.3.2 Blok šema mernog sistema, **69**
 - 4.3.3 Merna procedura i obrada rezultata merenja, **73**
- 4.4 Eksperimentalna verifikacija, **77**
 - 4.4.1 Izbor VN postrojenja, **77**

- 4.4.2 Sirovi podaci merenja, **78**
- 4.4.3 Obrada rezultata merenja, **80**

4.5 Zaključak, **89**

5 FSM (*Frequency Shift Method*)

METOD ZA ELIMINISANJE UTICAJA SISTEMSKE SMETNJE, 91

- 5.1 Uvodne napomene, **91**
- 5.2 Prikupljanje i obrada podataka o nivou i spektralnim karakteristikama konduktivnih smetnji u sistemu uzemljenja, **93**
 - 5.2.1 DFT, **93**
- 5.3 Empirijska analiza konduktivnih smetnji u sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja, **95**
- 5.4 Diskusija rezultata spektralne analize, **101**
- 5.5 Princip linearne regresije, **105**
- 5.6 Zaključak, **106**

6 NOVI METOD ZA MERENJE IMPEDANSE SISTEMA UZEMLJENJA, 107

- 6.1 Uvodne napomene, **107**
- 6.2 FOP- FSM, **108**
 - 6.2.1 Blok šema mernog sistema, **108**
 - 6.2.2 Prikupljanje i obrada rezultata merenja, **110**
 - 6.2.3 Eksperiment, **111**
 - 6.2.3.1 Izbor VN objekata, **111**
 - 6.2.3.2 Izbor optimalnog intenziteta test struje, **113**
- 6.3 FOP-TCRM, **117**
 - 6.3.1 Blok šema mernog sistema, **117**
 - 6.3.2 Postupak merenja, **118**
- 6.4 Analiza rezultata uporednog ispitivanja FOP-FSM i FOP-TCRM, **119**
- 6.5 Zaključak, **126**

7 NOVI METOD ZA MERENJE NAPONA DODIRA I NAPONA KORAKA, 127

- 7.1 Uvodne napomene, **127**
- 7.2 Elaboracija blok šeme sistema za merenje napona dodira i napona koraka, **128**

7.3 Prikupljanje i obrada rezultata merenja, **130**

7.4 Eksperiment, **132**

7.4.1 Izbor VN objekta, **132**

7.4.2 Rezultati, **134**

7.4.3 Analiza merne nesigurnosti, **135**

7.5 Zaključak, **138**

Deo III: OPŠTI ZAKLJUČCI, 139

8 DOPRINOSI, OPŠTI ZAKLJUČCI I SUGESTIJE ZA DALJI RAD, 140

8.1 Doprinosi i zaključci, **140**

8.2 Sugestije za dalji rad, **144**

LITERATURA, 146

SPISAK SIMBOLA

d_i	pravolinijsko rastojanje između ispitivanog zemljovoda i referentnog uzemljenja, [m]
e^r	relativno odstupanje merene veličine, [%]
I_{di}	izmerena vrednost struje kroz i -ti zemljovod, [A]
I_f	struja kvara, [A]
I_G	deo struje kvara koji se sa sistema uzemljenja odvodi u tlo, [A]
I_{test}	ispitna struja, [A]
R_B	ekvivalentna otpornost ljudskog tela, [Ω]
R_f	kontaktna otpornost stopala, [Ω]
R_{fs}	redna veza dve kontaktne otpornosti stopala, [Ω]
R_{ft}	paralelna veza dve kontaktne otpornosti stopala, [Ω]
R_G	otpornost sistema uzemljenja, [Ω]
R_{pi}	realni deo impedanse sistema uzemljenja pri ispitnoj frekvenciji f_i , $i=1$ do 3, [Ω]
r	redukциони faktor
S_f	faktor deljenja test struje
$s_f(t)$	signal na osnovnoj mrežnoj frekvenciji
$s_t(t)$	test signal na frekvenciji f_{ti}
U_{di}	izmerena vrednost pada napona na i -tom zemljovodu, [V]
U_{pi}	proračunata vrednost pada napona na pravolinijskom rastojanju, d_i , između i -tog zemljovoda i referentnog uzemljenja, [V]
u_e	proširena merna nesigurnost
V_{ds}	napon praznog hoda izmeren između dva stopala, [V]
V_{dt}	napon praznog hoda između stopala i tačke dodira na metalnoj strukturi, [V]
V_S	napon koraka, [V]
V_T	napon dodira, [V]
X_{pi}	imaginarni deo impedanse sistema uzemljenja pri ispitnoj frekvenciji f_i , $i=1$ do 3, [Ω]
Z_g	prividna impedansa sistema uzemljenja, [Ω]
Z_{pi}	prividna impedansa sistema uzemljenja na ispitnoj frekvenciji f_i , $i=1$ do 3, [Ω]
$Z_{s, trans}$	transimpedansa napona koraka, [Ω]

$Z_{i,trans}$	transimpedansa napona dodira, [Ω]
$z(t)$	trenutna impulsna impedansa, [Ω]
ε_0	dielektrična konstanta u vakuumu, $8.8541878 \cdot 10^{-12}$, [F/m]
ε_r	relativna dielektrična konstanta
μ_0	permeabilitet u vakuumu, $1.257 \cdot 10^{-6}$, [H/m]
ρ	specifična električna otpornost, [Ωm]
ρ_a	prividna specifična električna otpornost, [Ωm]

SPISAK SKRAĆENICA

AWG	<i>American Wire Gauge</i>
A-HCM	<i>Advanced High-Current Test Method</i>
CDEGS	<i>Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CLR	<i>Current Limiting Reactor</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EURISGIC	<i>European Risk from Geomagnetically Induced Currents</i>
FEM	<i>Footprint-Electrode Method</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FOP	<i>Fall-of-Potential</i>
FSM	<i>Frequency Shift Method</i>
GES	<i>Global Earthing System</i>
GIC	<i>Geomagnetically Induced Currents</i>
GPD	<i>Ground Potential Difference</i>
GPR	<i>Ground Potential Rise</i>
HCM	<i>High-Current Test Method</i>
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i>
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i>
RP	razvodno postrojenje
RZ	referentna zemlja
TCRM	<i>Test Current Reversal Method</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TS	transformatorska stanica
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
VN	visoki napon

LISTA SLIKA

- Slika 1** *IEEE model strujnog impulsa koji potiče od atmosferskih pražnjenja*
- Slika 2** *[5] Tranzijent i ograničenje struje kvara*
- Slika 3** *Tipični sistem uzemljenja transformatorske stanice (a) konfiguracija elektroda u sistemu uzemljenja, (b) aproksimacija sa polusfernom elektrodom i raspodela potencijala u stacionarnom stanju*
- Slika 4** *[4, Ch.8] [38] Frekvencijska zavisnost mrežaste elektrode sa četiri okca. Parametar krivih je specifična električna otpornost tla.*
- Slika 5** *[33] Impulsna otpornost horizontalne elektrode (dužina 110 m) za različite vršne vrednosti pobudne struje; 1. 450 A, 2. 3600 A, 3. DC otpornost*
- Slika 6** *[2] Uticaj soli, vode i temperature na specifičnu električnu otpornost tla (vrednosti za ρ su na ordinati)*
- Slika 7** *Uz objašnjenje principa merenja specifičnog električnog otpora tla. Koristi se jednosmerni (DC) izvor ili AC izvor na vrlo niskoj frekvenciji reda Hz. Ovako izmereni specifični električni otpor naziva se i DC specifični otpor.*
- Slika 8** *[2] (a) Weener-ov metod, (b) Schlumberger-Palmer-ov metod*
- Slika 9** *Dvoslojni model specifične električne otpornosti tla*
- Slika 10** *[1] Profil tla sa zaštitnim materijalom i sistemom uzemljenja*
- Slika 11** *Uz objašnjenje TCRM*
- Slika 12** *Skica spektra signala i njegovih harmonika.
(a) savršeni linijski spektar.
(b) realni spektar osnovnog signala i harmonika.*
- Slika 13** *Primer spektaralne karakteristike smetnje na 50 Hz i šuma u sistemu uzemljenja. Za objašnjenje porekla DC komponente videti odeljak 2.5.3. U ovom primeru intenzitet smetnje na 50 Hz iznosi 9.58 A. Nivo DC komponente iznosi 0.9 A.*
- Slika 14** *[64] Uz objašnjenje uticaja DC struje na talasni oblik AC struje*
- Slika 15** *[Harger Lightning & Grounding, www.harger.com] Spojevi u sistemu uzemljenja*

- Slika 16** [1] Mrežasta elektroda ekvivalentirana sa rezistivnom mrežom radi merenja R_k
- Slika 17** [82] Princip ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja korišćenjem struje nesimetrije kao test struje
- Slika 18** [1] Principiska šema FOP metoda. Naponska sonda može biti mala polusferna sonda.
- Slika 19** [1] Skica zavisnosti izmerene prividne otpornosti u zavisnosti od pozicije na kojoj se nalazi naponska sonda
- Slika 20** Uz objašnjenje problema vezanih za primenu FOP metoda u aktivnom VN postrojenju. S_f -faktor deljenja test struje, $S_f < 1$.
- Slika 21** [69] Principiska šema za nekonvencionalni FOP metod I -test struja, V -napon u tački P , P -naponska sonda, C -strujna sonda, Z_g -impedansa ispitivanog sistema uzemljenja.
- Slika 22** Princip merenja struje i napona. P -naponska sonda; C -strujna sonda.
- Slika 23** Način injektovanja test struje
- Slika 24** Uz objašnjenje definicije napona dodira i napona koraka
- Slika 25** [69] Principiska šema merenja (FEM: Footprint – Electrode Method) (a) napona dodira, (b) napona koraka. Oznaka F odnosi se na stopalo. Napon na otporniku R_B određuje se posredno (videti ekvivalentnu šemu, sl.26).
- Slika 26** Thevenin-ov ekvivalent [100] kola za izračunavanje (a) V_t , (b) V_s
- Slika 27** [2] Principiska šema mernog sistema (HCM) za ispitivanje kontinuiteta uzemljenja
- Slika 28** Blok šema mernog sistema (A- HCM) za ispitivanje kontinuiteta mrežastog uzemljivača VN postrojenja
- Slika 29** Naponski regulisan DC izvor (0-25 V, 0-100 A), sa mernim kablovima i strujnim šantom (100 A/100 mV)
- Slika 30** (a) Povezivanje neutrala energetskog transformatora sa sistemom uzemljenja, (b) stanje u betonskom oknu
- Slika 31** Algoritam za prikupljanje i obradu rezultata merenja
- Slika 32** Prikaz zemljovoda izrađenog od dvostrukog bakarnog užeta

- Slika 33** *Transformatorska stanica 110/10.5 kV hidroelektrane Uvac (Nova Varoš) iz tri perspektive (a), (b) i (c)*
- Slika 34** *Skica TS 110/10.5 kV HE Uvac sa upisanim rezultatima merenja (tzv. sirovi rezultati)*
- Slika 35** *Analiza neposredne okoline. Prikazane su neposredne okoline samo za zemljovode koji nisu zadovoljili **kriterijum I** (zemljovodi označeni sa **ne**).*
- Slika 36** *Otkopavanje u cilju verifikacije eksperimentalnih istraživanja (pozicije #59 i #60)*
- Slika 37** *Prikaz oštećenog zemljovoda (pozicija #59)*
- Slika 38** *Segment uzemljivačke mreže oko suda energetskog transformatora (nacrt preuzet iz odgovarajuće projektne dokumentacije)*
- Slika 39** *Otkopavanje u cilju verifikacije eksperimentalnih istraživanja (1 m od pozicije #4)*
- Slika 40** *Prikaz oštećenog provodnika mrežastog uzemljivača*
- Slika 41** *Rezultati ispitivanja nakon sanacije defekata na sistemu uzemljenja*
- Slika 42** *Talasni oblik konduktivne smetnje na neutralu VN transformatora*
- Slika 43** *Tipični talasni oblik kompozitnog signala (test signal, 40 Hz, 49 A; mrežni signal, 50 Hz, 15 A i harmonici mrežne frekvencije)*
- Slika 44** *Blok šema sistema za prikupljanje podataka relevantnih za spektralnu analizu konduktivnih smetnji. Oba sistema uzemljenja - ispitivano i pomoćno - nalaze se u aktivnom (radnom) stanju. Digitalni osciloskop prikuplja i skladišti odmerke kompozitnog signala.*
- Slika 45** *Spektri kompozitnog signala smetnje i test signala
(a) $f_1=40$ Hz, (b) $f_2=60$ Hz, (c) $f_3=75$ Hz*
- Slika 46** *Uz komentar o približnoj konstantnosti nivoa platoa šuma
(a) spektar sistemske smetnje i njenih komponenti,
(b) spektar smetnje i test signala*
- Slika 47** *Principska šema sistema za merenje impedanse uzemljenja na bazi FOP-FSM*
- Slika 48** *California Instruments, model 5001iM (tri jedinice povezane paralelno nose oznaku 15001iM)*

- Slika 49** (a) Lokacija naponske sonde u području referentne zemlje,
(b) izgled naponske sonde
- Slika 50** Transformatorska stanica 110/20 kV (Vrbas 1, Vrbas)
iz dve perspektive, (a) i (b)
- Slika 51** Lokacija 1. Spektri kompozitnog signala smetnje i probnog
ispitnog signala
(a) $f_1=40$ Hz, (b) $f_2=60$ Hz, (c) $f_3=75$ Hz.
- Slika 52** Lokacija 2. Spektri kompozitnog signala smetnje i probnog
ispitnog signala
(a) $f_1=40$ Hz, (b) $f_2=60$ Hz, (c) $f_3=75$ Hz.
- Slika 53** Principska šema sistema za merenje impedanse uzemljenja na bazi
FOP-TCRM
- Slika 54** Izolacioni transformator i komutator polariteta ispitne struje,
sa mernim kablovima i digitalnim multimetrom sa strujnim klještima
(Fluke 325)
- Slika 55** Skica lokacije 1: vrsta i pozicija priključene transmisionne
infrastrukture
- Slika 56** Skica lokacije 2: vrsta i pozicija priključene transmisionne
infrastrukture
- Slika 57** Lokacija 1: Rezultati na bazi FOP-FSM i FOP-TCRM
- Slika 58** Lokacija 2: Rezultati na bazi FOP-FSM i FOP-TCRM
- Slika 59** [4, Ch 8] Prividna impedansa sistema uzemljenja transformatorske
stanice nazivnog napona 275 kV
- Slika 60** Principska šema za merenje napona dodira i napona koraka
- Slika 61** (a) Ekvivalentna šema relevantna za merenje napona dodira
(b) Ekvivalentna šema relevantna za merenje napona koraka
- Slika 62** Skica lokacije i raspored mernih tačaka.
Na pozicijama #1 do #7 meri se napon dodira, na poziciji #8
meri se napon koraka.
- Slika 63** Vizuelizacija tačnosti i preciznosti merenja – analogija
sa modelom mete

Slika 64

Regresiona analiza za transimpedansu u mernoj tački #7.

Pravougaonici označavaju merne rezultate na ispitnim frekvencijama.

Vertikalni graničnici definišu moguće odstupanje rezultata za transimpedansu na pojedinačnoj ispitnoj frekvenciji.

LISTA TABELA

Tabela 1	<i>[98] Dozvoljene vrednosti napona dodira koje sa verovatnoćom 0.5% dovode do ventricular fibrillation; težina osobe je 50 kg; IEEE Std 80</i>
Tabela 2	<i>[98] Dozvoljene vrednosti napona koraka koje sa verovatnoćom 0.5% dovode do ventricular fibrillation; težina osobe je 50 kg; IEEE Std 80</i>
Tabela 3	<i>FOP-TCRM: rezultati merenja impedanse sistema uzemljenja</i>
Tabela 4	<i>Relativno odstupanje rezultata merenja na 50 Hz</i>
Tabela 5	<i>Rezultati merenja napona dodira i napona koraka</i>
Tabela 6	<i>Procena merne nesigurnosti</i>

1

Trust the math, but question the assumptions.
John McCorkle

UVOD

1.1 Predmet naučnog istraživanja

Predmet naučnog istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji odnosi se na unapređenje metoda vezanih za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja visokonaponskih (VN) postrojenja. Pažnja je fokusirana na odgovarajuća merenja u prostranim¹ VN postrojenjima čiji je nazivni naponski nivo 110 kV, 220 kV i 400 kV.

Sistem uzemljenja VN postrojenja relevantan je sa aspekta sigurnosti ljudi i opreme, kako u slučaju pojave struje kvara (zemljospoj u postrojenju ili na priključenim transmisionim vodovima), tako i u slučaju pojave struje koja potiče od atmosferskih pražnjenja [1, Ch.1]. Naime, sistem uzemljenja omogućava disperziju struje kvara i struje koja potiče od atmosferskih pražnjenja u tlo², a u cilju stabilizovanja površinskog potencijala, pre svega unutar, a delimično i u okolini VN postrojenja. Drugim rečima, sistem uzemljenja ograničava varijaciju ukupnog površinskog potencijala unutar VN postrojenja u odnosu na tačku sa referentnim nulnim potencijalom (referentna zemlja³).

¹ IEEE Std 81.2-1991 (*IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems*) prvi put formalno uvodi termin "dimenziono veliki" ili prostrani sistem uzemljenja kao predmet posebnog interesovanja. Prostrani sistem uzemljenja ima površinu koja je reda 1000 m².

² Korišćenje provodnih osobina tla, tj. zemlje, u elektrotehnici ima dugu istoriju. Naime, tokom nekoliko decenija XIX veka, zemlja je korišćena kao povratni (drugi) provodnik između telegrafskog predajnika i prijemnika. Međutim, zbog činjenice da provodnost zemlje bitno zavisi od klimatskih uslova, pa s tim u vezi i da slabljenje signala varira, korišćenje zemlje kao povratnog provodnika napušteno je 1883. godine i prešlo se na dvožični prenos. Iz sličnih razloga, u elektroenergetici već na samom početku odustalo se od prenosa AC energije koristeći zemlju kao drugi provodnik. Međutim, u aktuelnim HVDC (*High-Voltage Direct Current*) podmorskim transmisionim sistemima koristi se zemlja (preciznije, more koje ima stabilne električne karakteristike) kao povratni provodnik.

³ U kontekstu problema koji se razmatra u ovoj tezi, pomenuta referentna tačka naziva se referentnom zemljom. Ovde i dalje, za referentnu tačku korišćićemo skraćenicu RZ. U ovom kontekstu, RZ je deo zemlje dovoljno udaljen od uzemljivačkog sistema, tako da se pri odvođenju struje sa uzemljivačkog sistema u tlo na ovom delu zemlje ne pojavljuju potencijalne razlike.

Osnovne sigurnosne karakteristike sistema uzemljenja su **napon dodira i napon koraka**. Međutim, na osnovu odstupanja izmerenih vrednosti u odnosu na propisane granice ne može se izvesti zaključak o uzroku odstupanja, još manje može se suditi o mestu defekta u sistemu uzemljenja.

U širem smislu, sigurnosne karakteristike sistema uzemljenja su **impedansa sistema uzemljenja i kontinuitet sistema uzemljenja**. Naime, odstupanje impedanse od projektovane vrednosti dovodi u pitanje funkcionalne (odvođenje struje kvara u tlo), pa s tim u vezi i sigurnosne karakteristike. Sa druge strane, narušavanje kontinuiteta sistema uzemljenja, tj. prekid ili oštećenje u bilo kom delu sistema uzemljenja, implicira da su karakteristike sistema uzemljenja degradirane. Dakle, navedene karakteristike sistema uzemljenja su komplementarne. Rezultati merenja sve četiri karakteristike daju kompletnu sliku, tj. dijagnostiku, o stanju sistema uzemljenja.

U toku radnog veka (oko 50 godina) VN postrojenja, odgovarajuća merenja su jedini način za utvrđivanje stanja sistema uzemljenja. Naime, nakon dugogodišnje eksploatacije, zbog erozivnih i hemijskih uticaja okoline i/ili zbog havarijskih oštećenja dolazi do neminovne degradacije karakteristika sistema uzemljenja.

Zbog funkcionalnih i ekonomskih razloga, nije racionalno da se, radi ispitivanja sistema uzemljenja, vrši isključenje kompletnog VN postrojenja. Dakle, merenje sigurnosnih karakteristika najčešće se izvodi u uslovima kada je VN postrojenje u normalnom radnom režimu. Međutim, u tom slučaju neminovno je prisustvo sistemskih smetnji (konduktivne i induktivne smetnje na mrežnoj frekvenciji i na harmonicima) koje mogu bitno uticati na tačnost merenja. Treba napomenuti da je nivo sistemskih smetnji, uglavnom, srazmeran naponskom nivou VN postrojenja.

Eventualni netačni rezultati merenja (zbog uticaja sistemskih smetnji u procesu merenja) mogu dovesti do pogrešnih zaključaka pri ocenjivanju ispunjenosti 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.

Tlo nije savršeni provodnik. U cilju efikasnog odvođenja struje kvara, kao i struje koja potiče od atmosferskog pražnjenja, neophodno je veštački smanjiti otpornost tla postavljanjem odgovarajuće uzemljivačke strukture (kombinacija horizontalnih i vertikalnih elektroda) u tlu. Otpornost uzemljivačke strukture zanemarljivo je mala u odnosu na okolno tlo. Mrežasta elektroda je osnovna elektroda u sistemu uzemljenja VN postrojenja. Ona se

sastoji od neizolovanih provodnika, koji su povezani međusobno u horizontalnoj ravni. Horizontalna mrežasta struktura povezana je i sa vertikalno pobodenim elektrodama, najčešće postavljenim na krajevima pravougaone mrežaste strukture. Mrežasta elektroda položena je ispod čitave površine postrojenja na dubini od oko 0.8 do 1 m. Elektromagnetske karakteristike tla (specifična električna otpornost i relativna dielektrična konstanta) i klimatske karakteristike ambijenta bitno utiču na karakteristike sistema uzemljenja.

Uticaji sistemske smetnje i karakteristika tla na izvodljivost i tačnost merenja karakteristika sistema uzemljenja predmet su višedecenijskog razmatranja u naučnoj literaturi i u raznim nacionalnim i internacionalnim telima koja se bave standardizacijom merenja u ovoj oblasti. U tom pogledu, na globalnom nivou, dominantnu ulogu imaju: IEEE Std 81-2012 [2] i IEEE Std 80-2000 [3]. Međutim, vezano za pomenute standarde postoje mnogi principski, konceptijski i praktični problemi.

1.2 Cilj naučnog istraživanja

Osnovni cilj ove disertacije odnosi se na suštinsko poboljšanje⁴ IEEE Std 81-2012.

Prvo, u ovoj disertaciji biće predložen i dokazan efikasan metod za eliminisanje sistemskih smetnji. Taj metod imenuje se kao FSM (*Frequency Shift Method*⁵). Metod je primenljiv na merenje sve četiri karakteristike sistema uzemljenja. Zbog praktičnih razloga, u ovoj disertaciji, metod će biti primenjen u procesu merenja impedanse sistema uzemljenja, kao i u procesu merenja napona dodira i napona koraka. Očigledno, primena FSM imaće za posledicu poboljšanje tačnosti merenja (u odnosu na odgovarajuće konvencionalno merenje).

⁴ U fazi prijave ove disertacije, kao i u fazi publikovanja osnovnih radova, korišćen je termin poboljšani metod. Međutim, u toku evolucije rada na ovoj disertaciji, kao što će se videti u Delu II, nesumnjivo, napravljen je korak dalje, pa se osnovano u disertaciji alternativno koriste termini novi i poboljšani metod. Metod za ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja je nov, jer je objektivniji, za razliku od konvencionalnog metoda koji je eksplicitno subjektivan. FSM metod je nov, jer omogućava potpuno potiskivanje konduktivne smetnje i potiskivanje šuma. Metod za merenje impedanse je nov, jer omogućava merenje praktično u odsustvu konduktivnih smetnji i u odsustvu šuma pri ispitnoj struji reda 1 A. Takođe, omogućava uvid u karakter provodnosti tla (homogeno, nehomogeno). Slično, metod za merenje napona dodira i napona koraka omogućava merenje praktično u odsustvu smetnji i u odsustvu šuma pri ispitnoj struji reda 1 A, ali je, bez uticaja na tačnost merenja, znatno pojednostavljen u odnosu na konvencionalni metod.

U oblasti koja je predmet istraživanja u ovoj disertaciji, aktuelni krovni standard je IEEE Std 81-2012. Ovaj standard je tokom decenija evoluirao – neki detalji su menjani, saglasno novim teorijskim rešenjima i saglasno akumuliranom empirijskom iskustvu. Neki drugi aspekti su ostali nepromenjeni. Krovni standard se samo referencira na ranije, a nepromenjene, varijante standarda. Konsekventno tome, a radi detaljnog uvida u pojedine probleme, u ovoj disertaciji po određenim pitanjima, referenciraćemo se na: IEEE Std 81-2012, IEEE Std 80-2000, IEEE Std 81.2-1991 i IEEE Std 367-1996.

⁵ Ovde i dalje, gde bude neophodno, radi jednoznačnosti, koristićemo naziv na engleskom jeziku i pisaćemo ga kurzivom.

Drugo, ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja, za razliku od predloga u IEEE Std 81-2012, biće potpuno objektivizirano. Suštinski, radi se o kvalitativno novom metodu.

Treće, intenzitet ispitne struje, za razliku od paušalnog predloga u IEEE Std 81-2012, biće precizno definisan za sve vrste razmatranih merenja na sistemu uzemljenja. To će imati za posledicu poboljšanje tačnosti i ekonomičnosti merenja.

Četvrto, biće predložen i eksperimentalno dokazan novi metod za merenje napona dodira i napona koraka.

1.3 Doprinosi naučnog istraživanja

U cilju adekvatnog razumevanja doprinosa ove teze, a koji se odnose na suštinsko poboljšanje aktuelnih mernih metoda predloženih u IEEE Std 81-2012, korisno je imati u vidu sledeće činjenice.

1. Određeni standard⁶ u oblasti mernih procedura posledica je najboljeg akumuliranog iskustva po tom pitanju u datoj oblasti. U principu, standard ne sme biti subjektivan. Ipak, postoje privremeni izuzeci uslovljeni specifičnim ograničenjima zbog mnoštva faktora koji utiču na mernu veličinu, a istovremeno standardizaciono telo ne raspolaže sa dovoljno empirijskog iskustva o objektivnoj kontroli tih uticaja. U tom slučaju standard definiše samo okvirne smernice za mernu proceduru. Istovremeno, standard ostavlja slobodu eksperimentatoru da proceduru i/ili mernu šemu personalizuje prema svojim potrebama. Na taj način stvara se fundus novih iskustava kao osnova za generalno objektiviziranje predmetnog standarda u budućnosti. Upravo takav scenario je u slučaju IEEE Std 81-2012 u delu koji se odnosi na ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja VN objekata. S tim u vezi, u standardu IEEE Std 81-2012 eksplicitno se navodi da je subjektivan⁷. Predmetna disertacija, na verodostojnoj empirijskoj osnovi daje nedvosmislen prilog objektivizaciji pomenutog standarda.

2. U određenoj fazi evolucije, standard može sadržati rezidualnu implicitnu subjektivnost, ograničenu tačnost i određene manipulativne probleme. Takav je IEEE Std 81-2012 u delu koji se odnosi na merenje impedanse sistema uzemljenja, napona dodira i napona koraka.

⁶ Standardizacija u oblasti projektovanja i kontrole karakteristika sistema uzemljenja datira s početka 60-ih godina prošlog veka. Do tada se projektovanje i kontrola karakteristika vršila na intuitivnoj osnovi od slučaja do slučaja.

⁷ [2, p. 38, passage 3] "*Although the integrity test is the most practical and convenient test to perform, its results can be analyzed only subjectively*".

Predmetna disertacija, na verodostojnoj, teorijskoj i empirijskoj, osnovi daje nedvosmislen prilog objektivizaciji, tačnosti i izvodljivosti pomenutih merenja.

3. Generalno, bitna karakteristika određenog standarda odnosi se na racionalno korišćenje energetskog izvora neophodnog u procesu merenja. Po prirodi problema, kada je u pitanju merenje na sistemu uzemljenja dimenziono velikog VN postrojenja, zahtev u pogledu intenziteta struje iz energetskog izvora je značajan praktični i ekonomski faktor. U disertaciji, biće predloženi i empirijski potvrđeni poboljšani metodi za merenje impedanse sistema uzemljenja, napona dodira i napona koraka, a koji pokazuju očigledne prednosti (značajno manji intenzitet ispitne struje) u odnosu na paušalno preporučenu vrednost navedenu u IEEE Std 81-2012 (Sec. 9.4.2).

4. Generalno, bitna osobina određenog standarda odnosi se na sofisticiranost - jednostavno i jednoznačno merenje i softverski kontrolisani *postprocessing*⁸. Metodi koji će biti elaborirani u disertaciji su sofisticirani.

5. Predloženi novi metodi biće verifikovani na reprezentativnom uzorku od ukupno⁹ 49 visokonaponskih postrojenja (transformatorskih stanica, razvodnih postrojenja, termoelektrana i hidroelektrana) naponskog nivoa između 110 kV i 400 kV iz proizvodnog i distributivnog (JP EPS), odnosno prenosnog (JP EMS) elektroenergetskog sistema Srbije.

1.4 Publikovani radovi

Ova teza bazira na sledećim objavljenim radovima.

- [I] **Vojin I. Kostić**, Nebojša B. Raičević, "An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations", *Electric Power Systems Research Journal*, 2016, vol. 130, pp. 59–66, ISSN: 0378-7796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.023>.
- [II] **Vojin I. Kostić**, Nebojša B. Raičević, "A study on high-voltage substation ground grid integrity measurement", *Electric Power Systems Research Journal*, 2016, vol.131, pp. 31-40, ISSN: 0378-7796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.006>.

⁸ Ovde i dalje, termin *postprocessing* koristimo u smislu *post-measurement data processing*.

⁹ Navedeni broj odnosi se na VN postrojenja u kojim su izvršena odgovarajuća merenja primenom novih metoda. U ovaj broj nisu uključena merenja koja se odnose na razvoj odgovarajućih metoda.

- [III] **Vojin Kostić**, Nebojša Raičević, Aleksandar Pavlović, "Enhanced grounding system impedance measurements for high-voltage substations", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, vol. 25, no. 9, pp. 1875–1883, ISSN: 2050-7038, <http://dx.doi.org/10.1002/etep.1939>.
- [IV] **Vojin Kostić**, Nebojša Raičević, "Grounding system impedance measurement using shifted frequency method", *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives - POWERENG 2015*, Riga, Latvia, LF-000124 (CD), pp. 1-4, 11-13 May 2015, ISBN: 978-1-4799-9978-1/151.
- [V] **Vojin Kostić**, Nebojša Raičević, Jovan Mrvić, Slavica 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, ISBN: 978-86-6125-144-3.
- [VI] **Vojin Kostić**, Žarko Janda, Zoran Nedeljković, "Analiza frekvencijske zavisnosti specifične električne otpornosti tla – metoda merenja i praktična primena", 2015., *Tehnika*, br. 64, Iz. 3, pp. 481-486, ISSN: 0040-2176.
- [VII] **Vojin Kostić**, Dragutin Salamon, Aleksandar Pavlović, Saša Milić, "Poboljšanje U-I metode za merenje impedanse sistema uzemljenja", *Elektrane 2012*, Društvo termičara Srbije, E2012-027 (CD), ISBN: 978-86-7877-021-0.
- [VIII] **Vojin Kostić**, Slavica Rebrić, Dragan Kovačević, Nebojša Raičević, "Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja dimenziono velikih elektroenergetskih objekata najvišeg pogonskog napona metodom pomerene frekvencije", *Elektrane 2014*, Društvo termičara Srbije, E2014-148 (CD), ISBN: 978-86-7877-024-1.
- [IX] **Vojin Kostić**, Dragutin Salamon, Saša Milić, Aleksandar Pavlović, Jovan Mrvić, "Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja metodom pomerene frekvencije", *31. Savetovanje Cigre Srbija*, R B3 09 (CD), 2013.
- [X] **Vojin Kostić**, Srđan Mijušković, Jovan Mrvić, Nebojša Raičević, "Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja transformatorskih stanica i razvodnih postrojenja najvišeg pogonskog napona metodom pomerene frekvencije", *4. Savetovanje CG KO Cigre*, R B3-01 (CD), 2015.

- [XI] **Vojin Kostić**, Dragan Kovačević, Aleksandar Pavlović, Nebojša Raičević, "Ispitivanje kontinuiteta mrežastog uzemljivača elektroenergetskog postrojenja", *4. Savjetovanje CG KO Cigre*, R B3-02 (CD), 2015.
- [XII] **Vojin I. Kostić**, Nebojša B. Raičević, Dragan S. Kovačević, "The choice of suitable frequencies for measurements based on FSM". *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics* (rad prihvaćen za objavljivanje 30.03.2016. godine).

1.5 Organizacija teze

Pored uvodnog poglavlja ova disertacija sadrži još sedam poglavlja koja su organizovana u tri dela. Deo I (Poglavljja 2 i 3) odnosi se na pregled relevantnih problema. Deo II (Poglavljja 4, 5, 6 i 7) sadrži elaboraciju i verifikaciju novih rešenja. Deo III sadrži zaključke i predloge za dalji rad.

U Poglavlju 2 dat je pregled osnovnih funkcionalnih i frekvencijskih karakteristika sistema uzemljenja. U tom kontekstu izlaganje je fokusirano na dimenziono velika VN postrojenja (uobičajeno, transformatorske stanice). Dat je pregled karakteristika VN postrojenja u odnosu na frekvenciju mreže kao i odnosu na tranzijente (50 Hz) i impulse koji potiču od struje usled atmosferskih pražnjenja. U tom kontekstu diskutovane su odgovarajuće intervencije u strukturi sistema uzemljenja radi efikasne zaštite od prenapona koji su posledica tranzijenata (50 Hz). Elaborirano je da je ponašanje sistema uzemljenja u odnosu na mrežnu frekvenciju potpuno poznato i odgovarajuća znanja transponovana su u standarde. Međutim, ponašanje mreže u prisustvu impulsa i tranzijenata još uvek je u domenu istraživanja. Dalje, u ovom poglavlju, dat je pregled karakteristika tla koje imaju fundamentalni uticaj na sistem uzemljenja. U ovom poglavlju dat je i pregled karakteristika konduktivnih smetnji prisutnih u sistemu uzemljenja. Obrazloženo je da je karakter i nivo konduktivne smetnje u sistemu uzemljenja relevantan za tačnost merenja sigurnosnih karakteristika. Dat je kritički pregled aktuelnih metoda za potiskivanje konduktivne smetnje na mrežnoj frekvenciji. U tom kontekstu identifikovani su i elaborirani otvoreni problemi koji će biti analizirani u ovoj tezi.

U Poglavlju 3 razmatraju se postojeći metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja. Pregled se odnosi isključivo na one metode koji su primenljivi na prostorno velika VN postrojenja. U fokusu pregleda je IEEE Std 81-2012 (metod za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja, metod za merenje impedanse sistema uzemljenja i metod za

merenje napona dodira i napona koraka). Jasno su istaknuti problemi vezani za subjektivnost IEEE metoda za proveru kontinuiteta. Osnovni problem IEEE metoda za merenje impedanse sistema uzemljenja, a takođe i za merenje napona dodira i napona koraka, odnosi se na eliminisanje uticaja sistemske smetnje na odgovarajući proces merenja. Detaljno je elaboriran FOP metod za merenje impedanse i njegova praktična evolucija. Na kompromisnoj osnovi, definitivna sugestija za praktičnu primenu je tzv. nekonvencionalni FOP metod. Međutim, treba naglasiti da pomenuta analiza, vezana za razvoj nekonvencionalnog FOP metoda, ne obuhvata razmatranje uticaja konduktivne sistemske smetnje.

U Poglavlju 4 data je analiza relevantna za poboljšanje (objektiviziranje) IEEE metoda za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja. Poboljšani metod, A-HCM, razvijen je na bazi detaljne analize rezultata za osamnaest ranijih testova u vrlo različitim VN postrojenjima. Potom, poboljšani metod, zasnovan na preciznim kriterijima, primenjen je u postupku merenja na novih šesnaest transformatorskih stanica. U ovom poglavlju, na konkretnom primeru, korak po korak, objašnjena je primena novog metoda na jednoj od testiranih dimenziono velikih VN transformatorskih stanica. Merenja su izvršena na transformatorskoj stanici koja je bila u normalnom radnom režimu. Ovo poglavlje bazira na objavljenim radovima [II] i [XI], a prema numeraciji datoj u sekciji 1.4.

U Poglavlju 5 analiziran je i verifikovan novi metod za eliminisanje uticaja sistemske smetnje na proces(e) merenja na sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja. Prvo, objašnjeni su razlozi vezani za predlog korišćenja tri test frekvencije (umesto jedne ili dve frekvencije čija je primena elaborirana u literaturi, a u odeljku 2.5 dat je kritički pregled). Potom, analizirana su ograničenja vezana za izbor tri ispitne frekvencije (frekvencije su pomerene u odnosu na 50 Hz, otuda naziv *Frequency Shift Method*). Za deset VN transformatorskih stanica različitog naponskog nivoa, detaljno su elaborirana merenja kompozitne smetnje (rezidualni signal na 50 Hz, harmonijske komponente od 50 Hz, osnovni šum i intermodulacioni produkti). Detaljnom analizom merenja utvrđeno je da je nivo smetnji specifičan za svaku VN transformatorsku stanicu. U tom smislu, predložen je postupak za izbor optimalnog intenziteta ispitne struje za set od tri ispitne frekvencije. Ovo poglavlje bazira na radu [XII], a prema numeraciji datoj u sekciji 1.4.

U Poglavlju 6 elaborirana je primena FSM za merenje impedanse sistema uzemljenja aktivne VN transformatorske stanice. Naime, nekonvencionalni FOP metod primenjen je na set od tri ispitne frekvencije. Radi određivanja (preciznije, procene) vrednosti impedanse na 50 Hz primenjen je postupak linearne regresije na rezultate merenja za tri ispitne frekvencije pomerene u odnosu na 50 Hz. Odgovarajuća eksperimentalna analiza sprovedena je u

dvadeset pet VN postrojenja. Uporedo su vršena merenja sa potiskivanjem smetnji (50 Hz) koristeći tradicionalni, TCRM, metod. Pokazano je, da jedino u netipičnoj situaciji, tj. kada se intenzitet i faza sistemske smetnje ne menjaju, konvencionalni i novi metod daju praktično isti rezultat na 50 Hz. Međutim, u realnim uslovima, tj. kada sistemska smetnja fluktuiraju, dokazano je da je konvencionalni metod potiskivanja uticaja sistemske smetnje inferioran u odnosu na FSM. Dakle, dokazana je prednost FOP-FSM u odnosu na FOP-TCRM. Takođe, dokazano je da FOP-FSM zahteva za oko red veličine manji intenzitet ispitne struje u odnosu na FOP-TCRM. Dalje, dokazano je da FOP-FSM omogućava uvid u karakter izmerene prividne impedanse sistema uzemljenja. Sa druge strane, objašnjena je veza između karaktera prividne impedanse i karakteristika tla (homogeno, nehomogeno). Ovo poglavlje bazira na objavljenim radovima [III] do [X], a prema numeraciji datoj u sekciji 1.4.

U Poglavlju 7 predložen je novi metod za merenje napona dodira i napona koraka. U odsustvu smetnji metod je ekvivalentan sa FEM (*Footprint-Electrode Method*), a u prisustvu sistemske smetnje je inherentno bolji (precizniji) nego konvencionalni FEM-TCRM. Takođe, novi metod je u manipulativnom pogledu jednostavniji nego FEM-TCRM. Robustnost novog metoda u odnosu na sistemska smetnja rezultat je primene FSM. Ovo poglavlje bazira na objavljenom radu [I], a prema numeraciji datoj u sekciji 1.4.

U Poglavlju 8 rezimirani su osnovni doprinosi ove teze: poboljšani metod za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja, metod za *on-line* detektovanje i potiskivanje smetnji pri merenju impedanse sistema uzemljenja, novi metod za merenje napona dodira i napona koraka. Takođe, preporučeni su mogući pravci za dalji rad. Preporuke se odnose na proces standardizacije predloženih metoda i na potpunu automatizaciju merenja.

Deo I: PREGLED PROBLEMA

Indocti discant et ament meminisse periti

Henault

2

PREGLED OSNOVNIH KARAKTERISTIKA SISTEMA UZEMLJENJA VN POSTROJENJA

2.1 Funkcionalne karakteristike

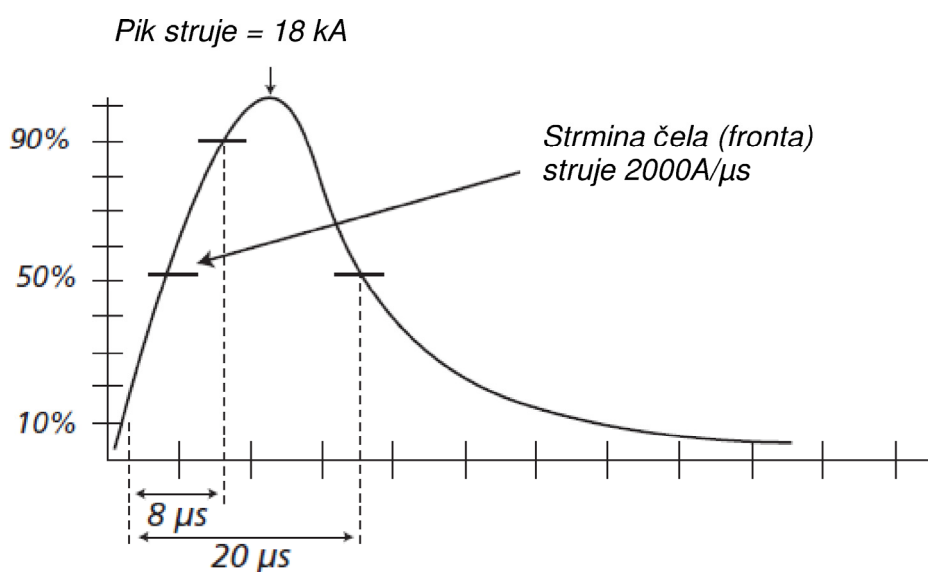
Sistem združenog uzemljenja VN postrojenja objedinjava: 1. zaštitno uzemljenje, 2. gromobransko uzemljenje i 3. radno (pogonsko) uzemljenje.

Zaštitno uzemljenje je uzemljenje metalnih delova koji ne pripadaju strujnim kolima niti su posredno u električnom kontaktu sa njima, ali u slučaju kvara mogu da dođu pod napon. Zaštitno uzemljenje smanjuje ovaj napon, kao i napone dodira i koraka kojima mogu da budu izloženi ljudi, i na taj način ih štiti.

Gromobransko uzemljenje je uzemljenje gromobranske instalacije koje služi za odvođenje struje atmosferskog pražnjenja u tlo. Gromobransko uzemljenje treba da ograniči napon na koji dolazi gromobranska instalacija, kako bi se sprečili naknadni ("povratni") preskoci na pogonska električna kola i metalne objekte.

Radno (pogonsko) uzemljenje je uzemljenje dela strujnog kola kojim se obezbeđuje željena funkcija i/ili radne karakteristike tog kola. Radno uzemljenje može da bude direktno i indirektno. Direktno uzemljenje se izvodi neposrednim vezivanjem za sistem uzemljenja. Indirektno uzemljenje se izvodi vezivanjem za sistem uzemljenja preko neke impedanse (aktivne otpornosti, induktivnosti, kapaciteta ili njihove kombinacije).

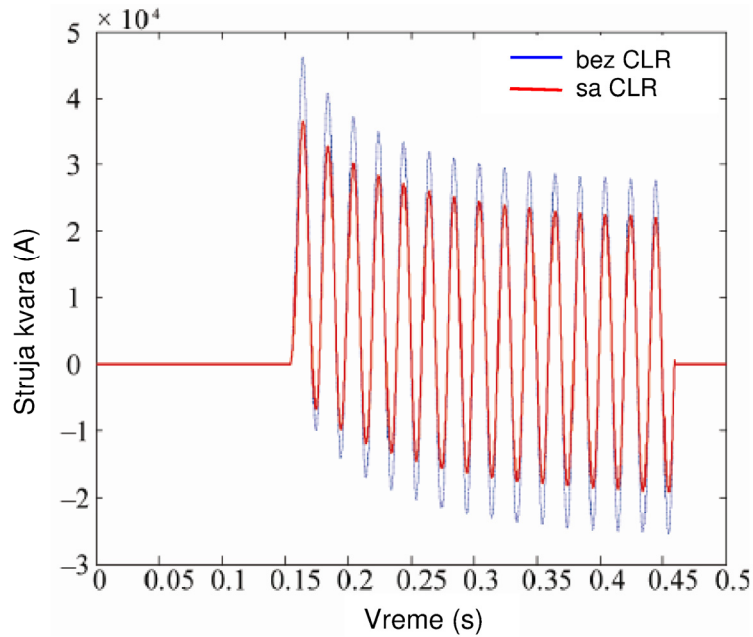
Svrha zaštite od struje koja potiče od atmosferskih pražnjenja je da tu struju najkraćim putem sprovede u sistem uzemljenja preko odgovarajućeg odvodnika [4, Chs. 3&8]. Na taj način smanjuje se prenapon koji bi inače mogao oštetiti opremu i ugroziti personal. Struja koja potiče od atmosferskih pražnjenja može biti reda 10 do 100 kA. Međutim, ovo je impulsna pojava čije je trajanje reda 10 μ s. Model impulsa poznat je kao "*The IEEE 8 / 20 Model*". Model, tj. oblik tipičnog impulsa, prikazan je na slici 1. Ovaj model koristi se za definisanje odvodnika struje koja potiče od atmosferskog pražnjenja. Ovaj model definisan je na statističkoj osnovi, tj. za 50% slučajeva. Dakle, postoje impulsi sa znatno većom magnitudom od one koju ovaj model predviđa.



Slika 1 IEEE model strujnog impulsa koji potiče od atmosferskih pražnjenja

U opštem slučaju, struja kvara cirkuliše kroz zaštitni provodnik¹⁰ nadzemnog voda, kroz sistem uzemljenja stubova dalekovoda, kroz sistem uzemljenja VN postrojenja (transformatorske stanice) i kroz fazne provodnike spojene u tački kvara. U sistemu uzemljenja VN postrojenja disipira se AC (50 Hz) struja reda nekoliko kA do oko 20-30 kA čiji protok narušava ekvipotencijalnost mrežastog uzemljivača, pa porast potencijala uzemljivača može biti nekoliko hiljada V. Struja kvara traje oko 0.5 sec (to je vremenski interval u toku kojeg se vrši detekcija i odvajanje tačke kvara od elektroenergetskog sistema). Navedeni interval u kombinaciji sa magnitudom struje i napona predstavlja opasnost za ljude i opremu. Stoga, tradicionalno i u skladu sa aktuelnim standardima, projektovanje sistema uzemljenja fokusirano je na frekvenciju 50 Hz sa ciljem da se ograniči porast potencijala, tj. da se raspodela potencijala održava u granicama koje su sigurne za ljude i za opremu. Međutim, aktuelni standardi ne odnose se na tranzijente (50 Hz). U tom pogledu, napr. u IEEE Std 80 -2000 [3] navodi se (na osnovu raspoloživih podataka) da u toku tranzijenata kao i u toku kratkotrajnih rezidualnih impulsa (koji potiču od struje atmosferskih pražnjenja) ljudi mogu podneti veće magnitudo napona i struje u poređenju sa odgovarajućim magnitudama definisanim pri mrežnoj frekvenciji. Tipični talasni oblik tranzijenta prikazan je na slici 2. Takođe, vide se i efekti ograničenja struje kvara pomoću CLR (*Current Limiting Reactor*).

¹⁰ U tehničkoj terminologiji za zaštitni provodnik se često koristi naziv zaštitno zemljovodno uže.



Slika 2 [5] *Tranzijent i ograničenje struje kvara*

Vratimo se na struju kvara (mesto kvara može biti u samom postrojenju ili na nekom od dalekovoda koji su priključeni na postrojenje). U tom slučaju velika struja kvara izaziva porast GPR (*Ground Potential Rise*¹¹) i GPD (*Ground Potential Difference*) sistema uzemljenja. Porast GPD direktno utiče na smanjenje margine sigurnosnih karakteristika (napon dodira i napon koraka) sistema uzemljenja. Ukupna struja kvara u postrojenju uobičajeno je veća od struje koja se radijalno deponuje u zemlju preko sistema uzemljenja. Naime, deo struje kvara deli se između sistema uzemljenja i zaštitnih provodnika nadzemnih vodova (ili čeličnih armatura i plaštova kablovskih vodova) priključenih na posmatrano VN postrojenje. Na GPR i GPD utiče jedino struja koja se disipira u zemlju. Struja kvara može biti potcenjena ili precenjena. Oba slučaja su neželjena. Na primer, ako se lokalna struja kvara razmatra kao cirkulacioni problem, pa se zaključuje da lokalna struja kvara ne utiče na projektovanje sistema uzemljenja deklarišu se optimističke vrednosti za napon dodira i napon koraka. Međutim, pomenuta struja teče od jedne do druge tačke unutar uzemljivačke mreže, to utiče na GPD, pa i na napon dodira i napon koraka. Druga krajnost je da se kvar u VN postrojenju tretira kao najgori slučaj relevantan za projektovanje uzemljenja. Često je to realna pretpostavka, ali postoje i izuzeci. Naime, u nekim slučajevima, kvar van postrojenja (na pripadajućem dalekovodu) može proizvesti veću struju kvara nego kvar u postrojenju.

¹¹ Potencijal u odnosu na RZ.

Stoga, različiti scenariji kvarova na priključenim dalekovodima¹² uvek moraju biti razmatrani u kontekstu najgoreg slučaja struje kvara. Očigledno, struja kvara je izuzetno bitan i vrlo složen parametar. Da bi se obezbedila sigurnost i izbeglo predimensionisanje sistema uzemljenja neophodno je korektno izračunati struju kvara i njen deo koji se sa sistema uzemljenja odvodi u tlo. Aktuelni standardi, napr. [3], odnose se na jednostavne slučajeve, a preporučeni postupci za izračunavanje kvara su aproksimativni. Naime, problem je vrlo složen, pa za detaljna razmatranja i za sagledavanje evolucije rešenja problema vezanih za struju kvara treba konsultovati [1, Chs. 5&7], [7] - [20]. Struja kvara i/ili deljenje struje kvara bitno je za definisanje graničnih vrednosti sigurnosnih karakteristika (napon dodira i napon koraka) za dato postrojenje. U kontekstu problema koji se razmatraju u ovoj tezi, struja kvara, a posebno, I_G , tj. deo struje kvara koji se sa sistema uzemljenja odvodi u tlo, relevantan je za analizu rezultata merenja sigurnosnih karakteristika.

2.2 Niskofrekvencijske karakteristike

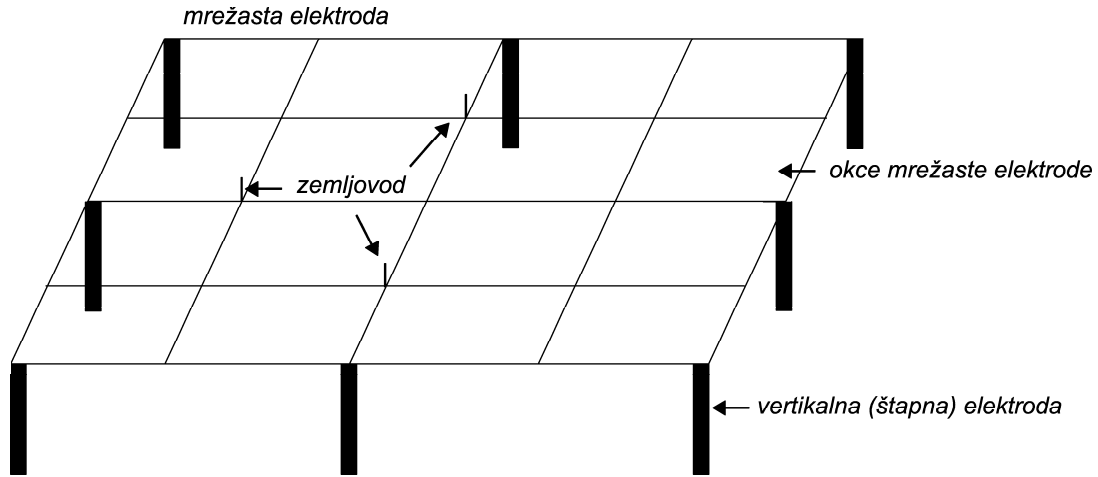
Sa povećanjem kapaciteta elektroenergetskog sistema enormno raste i broj kvarova usled kratkog spoja. To je jedan od razloga što se prilikom projektovanja VN postrojenja (transformatorskih stanica i razvodnih postrojenja), saglasno aktuelnim standardima, kao osnovni ulazni podatak razmatra struja I_G (tj. deo struje kvara koji se sa sistema uzemljenja disipira u okolno tlo). Međutim, pozadina navedene činjenice je znatno složenija. U ovom i narednom odeljku pokušaćemo da razjasnimo suštinu i ograničenja pomenutog opredeljenja.

U opštem slučaju, saglasno pomenutom opredeljenju, da bi se garantovala sigurnost, impedansa sistema uzemljenja VN postrojenja treba da ima nisku vrednost. Na mrežnoj frekvenciji otpornost rasprostiranja uzemljivača predstavljena je kao disipativna otpornost, R_G . Sa druge strane, R_G treba posmatrati kao otpornost između sistema uzemljenja VN postrojenja i RZ.

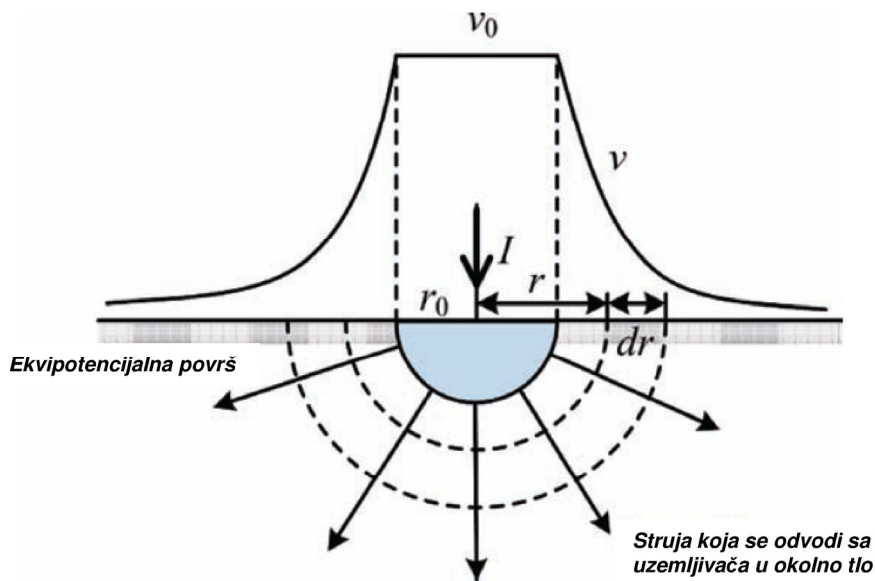
U opštem slučaju, tlo je loš provodnik. Da bi se omogućila disipacija velike struje kvara neophodna je niskoomska sprega sa tлом ispod čitave površine koju zauzima VN postrojenje. U tu svrhu ukopava se složena struktura međusobno povezanih uzemljivačkih elektroda koje zajedno čine sistem uzemljenja (videti sliku 3). Uzemljivačke elektrode su: mrežna struktura, odnosno mrežasta elektroda sastavljena od horizontalno povezanih neizolovanih provodnika

¹² Kvarovi na dalekovodima su najčešći i čine oko 60% svih kvarova, a posledica su udara munje ili klimatskih uslova kao što su vetar, magla ili led [6].

(*grounding grid*), vertikalne (štapne) elektrode (*vertical ground rod*) i zemljovodi¹³ (*ground risers* ili *pig tails*).



(a)



(b)

Slika 3 Tipični sistem uzemljenja transformatorske stanice
 (a) konfiguracija elektroda u sistemu uzemljenja, (b) aproksimacija sa polusfernom elektrodom i raspodela potencijala u stacionarnom stanju

¹³ Zemljovod je provodnik koji spaja uređaj koji treba uzemljiti sa uzemljivačem ili sa sabirnim zemljovodom. Ako je na vezi sa uzemljivačem ili sabirnim zemljovodom ugrađena spojnica, rastavljač i dr., zemljovod je samo deo provodnika od mesta ugradnje tog elementa do uzemljivača ili sabirnog zemljovoda.

Uzemljivačke elektrode prave se uglavnom od bakarnih provodnika, dimenzionisanih prema punoj struji kvara (radi zadovoljenja odgovarajućeg strujnog kapaciteta bez pregrevavanja provodnika). Uzemljivačka mreža postavlja se na dubinu od oko 0.8 do oko 1 m ispod površine tla, kako bi se izbegao uticaj ekstremnih sezoničkih klimatskih promena (dubinsko isušivanje i zamrzavanje tla). Pojedinačno okce (*mesh*) ima ivice čije su dužine obično u odnosu 1:1 ili 1:3. Dužina vertikalne (štapne) elektrode je reda metra, a može biti i do 20 metara¹⁴. Alternativno, uzemljivačke elektrode mogu biti izrađene od čelika. Integralni deo sistema uzemljenja su i razne čelične armature koje postoje u betonskim temeljima unutar zaštitne ograde VN postrojenja. Generalno, bakarne elektrode imaju bolje električne karakteristike i dugotrajnije su od čeličnih. Bakar ima malu vrednost specifične električne otpornosti¹⁵. Čelik ima za oko red veličine veću vrednost specifične električne otpornosti¹⁶. Za razliku od bakra čelični provodnik ima i odgovarajuću permeabilitet.

U cilju razumevanja faktora koji utiču na otpornost uzemljivačke elektrode razmotrićemo otpornost, R_G , polusferne elektrode postavljene u homogeno tlo čija je specifična električna otpornost ρ [Ωm]. Neka je poluprečnik elektrode r , pa je

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (1)$$

Za vertikalnu (štapnu) elektrodu čija je dužina l , a poluprečnik a , shodno [44] je:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad [\Omega] \quad (2)$$

Na osnovu (1) i (2), kao i sličnih izraza za druge elektrode, može se uočiti opšta osobina, a to je da je otpornost uzemljivačke elektrode srazmerna sa specifičnim električnim otporom tla, a obrnuto srazmerna sa dimenzijom elektrode. Sistem uzemljenja je složena struktura sastavljena od pojedinačnih elektroda. U prvoj aproksimaciji, sistem uzemljenja može se razmatrati kao polusferni uzemljivač čiji je prečnik jednak dijagonali pravougaonika koji odgovara tlocrtu postrojenja.

¹⁴ Udvostručenje dužine vertikalne elektrode smanjuje otpornost te elektrode za oko 40%, dok udvostručenje prečnika smanjuje otpornost za samo 10% [24]. Vertikalne (štapne) elektrode se postavljaju u uglovima i po obodu mreže i unutar mreže (najčešće u betonskom oknu za uzemljenje neutralne tačke energetskog transformatora). Najpovoljniji materijal za vertikalnu elektrodu je bakrom presvučen čelični provodnik.

¹⁵ Tipični bakarni provodnik za ovu namenu (meko vučeni bakar) ima specifičnu elektr. otpornost $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

¹⁶ Tipični čelični provodnik za ovu namenu (*steel-1020*) ima specifičnu električnu otpornost $15.9 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Imajući u vidu raspon realnih vrednosti specifične električne otpornosti tla, otpornost sistema uzemljenja prostorno velikih VN postrojenja može biti u opsegu 0.01 Ω , ako je vrlo mala specifična električna otpornost tla, do oko 1 Ω , ako je specifična električna otpornost tla relativno velika. Ciljna vrednost za otpornost rasprostiranja uzemljivača VN dalekovodnog stuba je 10 Ω , a distributivnih transformatorskih stanica 1 do 5 Ω .

Za sistem uzemljenja koji je kombinacija mrežaste i vertikalnih elektroda (tipično za sistem uzemljenja VN postrojenja), pogodno je, u fazi preliminarnih razmatranja za otpornost rasprostiranja uzemljivača, R_G , koristiti aproksimativni izraz¹⁷ [31, (2.4)]:

$$R_G = \rho \left[\frac{1 + r/(r + 2.5h)}{8rK_R} + \frac{1}{L} \right] \quad (3)$$

gde je

$$K_R \triangleq 1 + \frac{n_R l_R^2}{10r^2} \quad (4)$$

ρ [Ωm] je specifična električna otpornost homogenog tla, r [m] je poluprečnik kruga čija je površina jednaka površini mreže, h [m] je dubina na koju je položena mrežasta elektroda, L [m] je ukupna dužina horizontalnih i vertikalnih elemenata, l_R [m] je dužina pojedinačnog vertikalnog elementa (štapna elektroda) i n_R je suma broja vertikalnih elektroda raspoređenih po obodu mreže i polovine broja elektroda raspoređenim u ostalim delovima mreže.

Ako je sistem uzemljenja dimenziono velikog VN postrojenja situiran u tlo čija je specifična električna otpornost manja od 100 Ωm (tipičan slučaj), saglasno aktuelnim standardima, na mrežnoj frekvenciji, u stacionarnom stanju, smatra se da su sve pristupne tačke sistemu uzemljenja ekvipotencijalne, a sistem uzemljenja je isključivo rezistivan. U tom okviru, a na bazi podataka o delu struje kvara (magnituda i trajanje) koja teče kroz sistem uzemljenja i podataka o karakteristikama tla, aktuelni standardi daju detaljne preporuke za projektovanje sistema uzemljenja, a u vrlo ograničenom obimu i opšte preporuke za prigušenje prenapona koji potiču od tranzijenata.

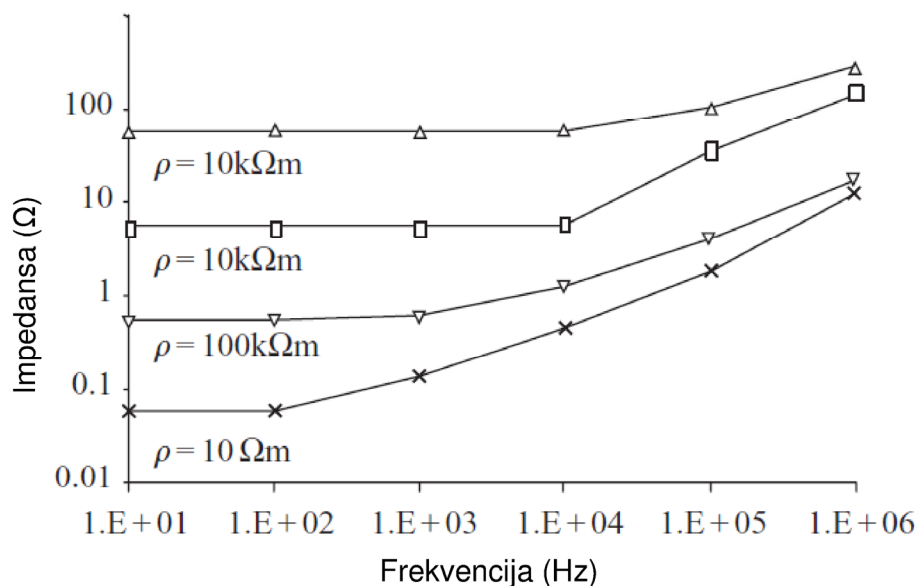
Striktno posmatrano, pojedinačne uzemljivačke elektrode, pa i sistem uzemljenja u celini, ima impedantne osobine, tj. pored rezistivne komponente postoji induktivna i kapacitivna komponenta. Na primer, induktivnost i kapacitivnost vertikalne elektrode je [44]

¹⁷ Detaljan uporedni pregled aproksimativnih izraza za R_G mrežastih elektroda može se naći u [47].

$$L_G = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad [\Omega] \quad (5)$$

$$C_G = \frac{2\pi d \varepsilon}{\left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right)} \quad [\text{F}] \quad (6)$$

gde je μ permeabilitet provodnika od kojeg je izrađena vertikalna elektroda, ε je dielektrična konstanta tla gde je pobodena vertikalna elektroda, a ostale oznake su kao uz izraz (1). Impedansa vertikalne (štapne) elektrode ima induktivni karakter. Relativni odnos između R_G , ωL_G i $1/\omega C_G$ zavisi od frekvencije. Slični rezultati postoje i za druge pojedinačne elektrode. Posebno je interesantno ponašanje impedanse uzemljivačke elektrode u obliku mreže. Grafička ilustracija zavisnosti impedanse od frekvencije za mrežu sa četiri okca prikazana je na slici 4.



Slika 4 [4, Ch.8] [38] *Frekvencijska zavisnost mrežaste elektrode sa četiri okca. Parametar krivih je specifična električna otpornost tla.*

Sličan trend ponašanja impedanse sistema uzemljenja utvrđen je u [38] na osnovu detaljnih softverskih analiza. Naime, utvrđeno je da se impedansa sistema uzemljenja primetno povećava u području frekvencija reda 100 kHz zbog induktivnih uticaja, posebno, pri maloj specifičnoj električnoj otpornosti tla. Dalje, utvrđeno je da su primetni kapacitivni uticaji ako je specifična električna otpornost tla veća od 1000 Ωm i ako je relativna dielektrična konstanta reda 10. Međutim, ovi poslednji uslovi su netipični za velika VN

postrojenja. Dakle, za impedansu sistema uzemljenja VN postrojenja može se smatrati da je rezistivna u području niskih frekvencija, a u području visokih frekvencija primetno induktivna¹⁸.

Standardna uputstva za projektovanje sistema uzemljenja, u ograničenoj meri, bave se i zaštitom od velikih struja koje potiču od atmosferskih pražnjenja i od tranzijenata. Naime, odgovarajuća rešenja podrazumevaju da se dalekovodi štite zaštitnim zemljovodnim užadima i sa sistemom uzemljenja pojedinačnih stubova, a VN postrojenje gromobranima spojenim sa sistemom uzemljenja i vertikalno pobodenim štapnim elektrodama u sistemu uzemljenja. Preko sistema uzemljenja vrši se disperzija struje pražnjenja u okolno tlo. Istovremeno, sistem uzemljenja ograničava gradijent potencijala na čitavoj površini VN postrojenja. U tom pogledu pogodno je da sistem uzemljenja ima što je moguće manju otpornost rasprostiranja, kako bi pad napona prilikom pražnjenja bio što manji. Drugim rečima, pogodno je, pri datoj površini mrežaste elektrode, da dužina vertikalnih (štapnih) elektroda bude što veća. To je tradicionalni pristup za rešavanje pomenutog problema. Međutim, stvarno smanjenje impedanse sistema uzemljenja po osnovu povećanja dimenzija vertikalnih (štapnih) elektroda ima jasnu granicu (videti odeljak 2.3).

Alternativno, postoje alati za projektovanje sistema uzemljenja koji prave suštinski otklon od empirijskih formula, a koje se inače navode u aktuelnim standardima. Takvi alati omogućavaju analizu i/ili simulaciju, u opštem slučaju impedantnih karakteristika sistema uzemljenja i analizu raspodele potencijala na sistemu uzemljenja VN postrojenja. Postoje različiti numerički [1, Ch.4], analitički [21] - [28] i simulacioni prilazi [29] - [30]. Citiran je vrlo sužen izbor referenci. Međutim, uvidom u citirane reference može se konstatovati da postoje vrlo različiti putevi za moguće egzaktno rešavanje problema vezanih za ponašanje impedanse sistema uzemljenja u slučaju kvara. Vrlo je koristan i praktičan softverski paket [29]. Ilustrativni simulacioni primer primene tog softverskog paketa može se naći, napr. u [31]. Ispitivanje impedantnih karakteristika pojedinačnih uzemljivačkih elektroda i ispitivanje raspodele potencijala u slučaju kvara može se jednostavno i jeftino simulirati na umanjenom (skaliranom)¹⁹ modelu u kadi ispunjenoj odgovarajućim elektrolitom (za detalje konsultovati [32] i [30]).

Korisno je napomenuti da sofisticirani alati precizno potvrđuju neka ranija iskustvena saznanja. Naime, tranzijenti od udara groma i od sklopnih operacija u postrojenju mogu biti

¹⁸ **Napomena:** Navedeni zaključak odnosi se na sistem uzemljenja bez uticaja spoljnih nadzemnih i/ili podzemnih priključaka!

¹⁹ Sve geometrijske dimenzije elektrode i vremenska osa pobudnog talasnog oblika smanjuju se za isti faktor.

prigušeni modifikovanjem dimenzija okaca mrežaste elektrode i dodavanjem vertikalnih elektroda. Generalno, vertikalni (štapni) uzemljivači odgovorni su za procesuiranje visokofrekvencijskih komponenti, a rešetkasta elektroda za procesuiranje niskofrekvencijskih komponenti tranzijenta.

Otpornost rasprostiranja uzemljivača na mrežnoj frekvenciji je jedna od karakteristika koja, saglasno aktuelnim standardima, služi za ocenu stanja sistema uzemljenja.

2.3 Visokofrekvencijske karakteristike

Kao što je utvrđeno u pregledu elaboriranom u sekciji 2.2, ponašanje sistema uzemljenja na mrežnoj frekvenciji, u stacionarnom stanju, detaljno je izučeno u literaturi. Na toj osnovi konstituisani su standardi za projektovanje i za ispitivanje sistema uzemljenja. Međutim, visokofrekvencijska analiza sistema uzemljenja u prisustvu impulsne strujne pobude zbog atmosferskih pražnjenja, sklopnih operacija i kvarova, u fazi je istraživanja. Prema dosadašnjim saznanjima, izučavanje ponašanja uzemljivačkih elektroda u uslovima impulsne pobude otvara nove perspektive u domenu funkcionalne i ekonomske efikasnosti sistema uzemljenja. U tom kontekstu treba posmatrati pregled koji sledi.

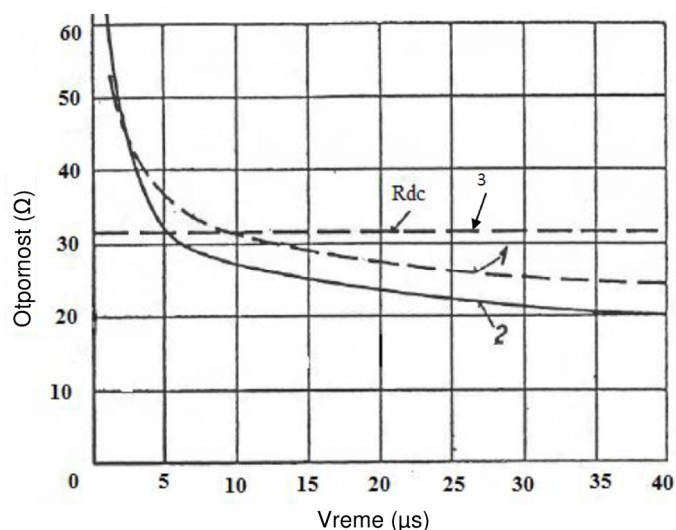
U opštem slučaju, ponašanje sistema uzemljenja u velikoj meri zavisi od geometrije elektroda, od talasnog oblika i magnitude pobudne struje, od elektromagnetskih karakteristika provodnika (provodnost i permeabilitet) i od elektromagnetskih karakteristika tla (specifična električna provodnost i dielektrična konstanta).

Na niskim frekvencijama (tipično, mrežna frekvencija) uzemljenje ima rezistivni karakter. Međutim, sa porastom frekvencije induktivnost i kapacitivnost svake pojedinačne elektrode u složenom sistemu uzemljenja igra značajnu ulogu. Tranzijent sadrži visokofrekvencijske komponente. U vezi s tim, induktivnost elektrode ima ključnu ulogu vezano za odziv na tranzijentnu pobudu. Naime, procenjuje se da podužna induktivnost provodnika u sistemu uzemljenja iznosi oko $1 \mu\text{H/m}$ [53, Ch. 10]. Na niskim frekvencijama uticaj pomenute induktivnosti provodnika iz sistema uzemljenja je zanemarljiv. Međutim, pri impulsnoj pobudi, strmina fronta impulsa može biti veća čak od $20 \text{ kA}/\mu\text{s}$. U tom slučaju induktivni pad napona, $v_L = L \frac{di}{dt}$, ogroman je, pa je veliki i gradijent porasta potencijala na površini sistema uzemljenja.

Reprezentativna karakteristika sistema uzemljenja u prisustvu impulsne pobude je trenutna impulsna impedansa²⁰, $z(t)$, tj.,

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (6)$$

gde su $u(t)$ i $i(t)$ impulsni napon i struja, respektivno. Na slici 5, radi ilustracije, prikazana je trenutna otpornost (otpornost u funkciji vremena) za horizontalnu elektrodu (dužina 110 m) pri dve magnitude impulsne struje (450 A i 3600 A). Uporedo je prikazana i otpornost za jednosmernu struju (u stvari, to je niskofrekvencijska otpornost posmatrane elektrode u stacionarnom stanju). Bitno je uočiti da je trenutna impedansa u toku trajanja fronta impulsa znatno veća od odgovarajuće otpornosti sa kojom bi se računalo pri klasičnom razmatranju. U repnom delu (začelju) impulsa, gde je koncentrisan najveći deo energije impulsa, trenutna otpornost manja je od niskofrekvencijske otpornosti. Opisano ponašanje horizontalne elektrode pri impulsnoj pobudi posledica je dominantnog uticaja sopstvene induktivnosti. Impulsna otpornost je izrazito nelinearna.



Slika 5 [33] *Impulsna otpornost horizontalne elektrode (dužina 110 m) za različite vršne vrednosti pobudne struje; 1. 450 A, 2. 3600 A, 3. DC otpornost*

²⁰ Treba razlikovati trenutnu impedansu $z(t)$ od tzv. *surge impedance* $Z_p = V_p / I_p$, gde su V_p i I_p vršne vrednosti struje i napona, respektivno. Naime, Z_p ne sadrži vremensku komponentu koja je vrlo bitna u pogledu uticaja na napon dodira i napon koraka. Pored toga, V_p i I_p ne odnose se na isti trenutak u vremenu, tj. V_p i I_p pomereni su na vremenskoj osi. Dakle, impedansa Z_p je manje informativna od $z(t)$.

Osnovna smernica za ostvarenje vrlo male otpornosti rasprostiranja uzemljivača na niskim frekvencijama odnosi se na ekstremno povećanje dimenzija sistema uzemljenja, pa i pojedinačnih elektroda. Na primer, iskustveno, a potom i teorijski, utvrđena je korist od dodavanja vertikalnih elektroda (štapnih uzemljivača) radi smanjenja otpornosti sistema uzemljenja, pa i smanjenja uticaja tranzijenata. Međutim, precizna analiza odziva vertikalne elektrode na tranzijent pokazuje da postoji tzv. efektivna dužina elektrode koja je jedino relevantna za efikasno smanjenje uticaja tranzijenta [34]. Efektivna dužina elektrode je granična dužina posle koje nije primetno dalje smanjenje impedanse sistema uzemljenja. Efektivna dužina elektrode, l_{eff} , zavisi od trajanja fronta impulsa, T [μ s] i od specifične električne otpornosti tla, ρ [Ω m], tj. saglasno [34] je

$$\left. \begin{aligned} l_{eff} &= \frac{1-\beta}{\alpha} \\ \alpha &\hat{=} 0.025 + \exp[-0.82(\rho T)^{0.257}] \\ \beta &\hat{=} 0.17 + \exp[-0.22(\rho T)^{0.555}] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Koeficijenti α i β nemaju fizičko značenje, određeni su na osnovu softverske simulacije. Mala i umerena rezistivnost zemljišta (do oko 100 Ω m) i vreme fronta impulsa značajno utiču na l_{eff} . Međutim, ako je ρ reda 100 Ω m efektivna dužina ima fiksnu vrednost koja teži stvarnoj geometrijskoj dužini elektrode. Dakle, u realnim uslovima ($\rho < 100$ Ω m i $T < 10$ μ s) ekstremno povećanje dimenzija uzemljivačke elektrode ima mali uticaj ili je bez uticaja na impedansu pri visokim frekvencijama. U tom smislu, podatak o efektivnoj dužini relevantan je za ekonomično i efikasno projektovanje i izvođenje sistema uzemljenja (ušteda u materijalu i niži troškovi instaliranja). Ovo se posebno odnosi na vertikalne (štapne) elektrode. Sličan zaključak odnosi se na dužinu radijalnog uzemljivača (protivteg) za dalekovodni stub [35].

Postoje različiti alati za analizu impulsnih karakteristika uzemljenja (videti napr. izvorne reference [36] - [40] i [46]). Međutim, odgovarajuće analize pretežno se odnose na pojedinačne uzemljivačke elektrode. Radovi [41] i [42] izučavaju performanse uzemljivačke mreže u prisustvu impulsne pobude sa fokusom na optimizovanje dimenzija mreže.

Efektivna dužina elektrode definisana u (7) ne uzima u obzir uticaj jonizacije tla oko elektrode. Jonizacija se događa pri velikoj magnitudi struje. Intenzitet jonizacije je posebno izražen u slučaju ako je tlo suvo i ρ ima relativno veliku vrednost [43] i [44]. U slučaju

atmosferskih pražnjenja i u nekim slučajevima kvara, velika gustina struje u tlu povećava intenzitet električnog polja do nivoa koji izaziva pražnjenje u tlu oko elektrode. Plazma koja je nastala usled pražnjenja ima manju otpornost nego okolno tlo, pa se javlja prividno smanjenje otpornosti rasprostiranja uzemljivača u oblasti gde je došlo do jonizacije. Pošto se jonizacija događa oko elektrode gde je gustina struje najveća, ona izaziva prividno povećanje dimenzija elektrode i prividno smanjenje otpornosti elektrode. Posle neke vrednosti, čak i ako se intenzitet struje drastično poveća, impulsna otpornost uzemljenja opada vrlo sporo. Intenzitet struje pri kom dolazi do zasićenja utoliko je manji ukoliko je ρ manje. Dakle, krajnji efekat jonizacije sličan je onom koji impulsni talasni oblik ima (zbog induktiviteta elektrode) na efektivnu dužinu elektrode. U principu, u uslovima atmosferskih pražnjenja oba efekta deluju simultano i relevantna su za dinamičko ponašanje sistema uzemljenja. Poznato je da je jonizacija verovatna za elektrode čija je površina mala, a nalaze se u visoko rezistivnom tlu. U sistemu uzemljenja velikih VN postrojenja, gde ρ uobičajeno ima malu vrednost, prema nekim istraživanjima (videti napr. [48] i [49]), ipak dominantnu ulogu ima induktivna komponenta vertikalnih (štapnih) elektroda, tj. jonizacija je praktično zanemarljiva.

Jedna od tradicionalnih mera koja se preduzima u cilju smanjenja gradijenta potencijala usled impulsnog pražnjenja je i smanjenje otpornosti rasprostiranja uzemljivača putem povećanja površine sistema uzemljenja. Međutim, u tom pogledu postoji jasna granica. Naime, u [49] je utvrđeno da je efektivna površina, a_{eff} , mrežaste elektrode

$$a_{eff} \hat{=} K \exp(0.84(\rho T)^{0.22}) \quad (8)$$

gde je $K=1$ ako je impulsna struja injektovana u centru mreže, $K=0.5$ ako je impulsna struja injektovana u uglu mreže, ρ je specifični električni otpor tla i T je trajanje fronta impulsa.

Uprkos obimnoj literaturi iz ove oblasti, još uvek ne postoji konsenzus u pogledu primene raspoloživih znanja, a u cilju standardizacije i kvantitativnih preporuka za projektovanje sistema uzemljenja. Međutim, korisni su sledeći zaključci.

1. Visokofrekvencijske komponente (potiču od fronta impulsa) relevantne su za pojavu prenapona.
2. Niskofrekvencijske komponente (potiču od repa impulsa) relevantne su za disipiranu energiju u sistemu uzemljenja.
3. U prisustvu impulsne pobude GPR zavisi ne samo od površine uzemljivačke mreže nego i od međusobnog rastojanja provodnika u mreži, tj. od lokalne dimenzije ili

gustine okaca²¹. Naime, povećanje gustine okaca ima smisla samo oko tačke gde se injektuje impulsna pobuda.

4. Efektivna površina mrežastog uzemljivača bitno zavisi od lokacije (tačke) gde se uvodi impulsna pobuda.

Poznavanje ponašanja impulsne impedanse korisno je za adekvatnu analizu zaštita od impulsnog pražnjenja i za analizu napona dodira i napona koraka. Direktno merenje impulsne impedanse uzemljenja je komplikovano i vrlo zahtevno u pogledu izbora odgovarajućeg strujnog i naponskog transdjusera. Međutim, može se indirektno doći do podatka o impulsnoj impedansi. Naime, treba izmeriti otpornost na mrežnoj frekvenciji, a potom rezultat pomnožiti sa tzv. impulsnim koeficijentom [45]. Impulsni koeficijent zavisi od strukture sistema uzemljenja, od karakteristika tla (ρ), i od vršne vrednosti impulsne struje.

2.4 Karakteristike tla

Sistem uzemljenja, pored metalnih elektroda, obahvata i tlo u koje su elektrode ukopane. Tlo je vrlo komplikovan sistem sastavljen od čvrstih, tečnih i gasovitih komponenti. Karakteristike tla zavise od veličine čestica, promenljive su u horizontalnom i vertikalnom pravcu, veoma su zavisne i od klimatskih faktora, a i frekvencijski su zavisne. Dostupnost podacima o stvarnim električnim karakteristikama tla predstavlja najveći problem u fazi projektovanja sistema uzemljenja. Inače, verodostojan podatak o električnim karakteristikama tla, pre svega o specifičnom električnom otporu, neophodan je jer je otpornost sistema uzemljenja srazmerna sa specifičnim električnim otporom tla. Pomenuti podaci bitni su i za adekvatno interpretiranje rezultata merenja sigurnosnih karakteristika.

2.4.1 Specifična električna otpornost tla

U opštem slučaju, specifični električni otpor, ρ , u literaturi poznat kao *resistivity* ili *volume resistivity*, ima dimenziju Ωm (om-metar) i ne treba ga mešati sa električnim otporom čija je dimenzija Ω (om). Specifični električni otpor materijala je:

²¹ Svi aparati i oprema u krugu VN postrojenja treba da imaju najkraću vezu sa sistemom uzemljenja. Dakle, fizička površina sistema uzemljenja za dato VN postrojenje ne može se smanjivati. Lokalna gustina provodnika u mreži, tj. dimenzije okaca mogu se menjati, pa se mogu poboljšati i sigurnosne karakteristike.

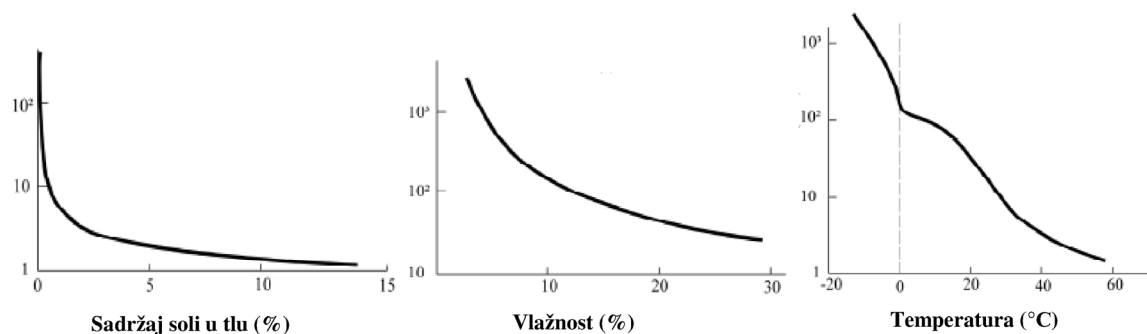
$$\rho \hat{=} \frac{R \cdot A}{L} \quad (9)$$

gde je R električni otpor materijala, A je površina poprečnog preseka kroz koji teče struja i L je dužina materijala. U slučaju tla, fizička interpretacija za ρ odnosi se na otpornost između naspramnih strana kocke tla čija je ivica duga 1 m.

Uobičajene vrednosti za specifični električni otpor tla su u opsegu reda $10 \Omega\text{m}$ do oko $10^4 \Omega\text{m}$. Postoji tlo za koje je $\rho=1.5 \Omega\text{m}$ (rečni mulj), kao i tlo za koje je $\rho=10^9 \Omega\text{m}$ (peščar) [2]. Za glinu, ilovaču i humus ρ je u opsegu 20 do $200 \Omega\text{m}$. Poređenja radi, za čisti bakar specifična električna otpornost iznosi $1.6 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$. Specifična električna otpornost leda iznosi u proseku oko $50000 \Omega\text{m}$.

Tlo sadrži silicijum- i aluminijum- oksid koji deluju kao izolator. Specifični električni otpor tla varira zavisno od granulacije tla, od prisustva soli u tlu, od vlažnosti i od temperature (videti sliku 6). Dakle, tlo je podložno sezonskoj varijaciji specifičnog otpora. Uticaj ove pojave na sistem uzemljenja može se bitno ublažiti ukopavanjem mrežaste elektrode na odgovarajuću dubinu ispod površine. Na taj način smanjuje se mogućnost da dođe do zamrzavanja tla oko elektroda. Inače, niska temperatura tla oko elektroda povećava otpornost rasprostiranja uzemljivača, pa i gradijent potencijala na tlu iznad sistema uzemljenja. Sumarno, shodno podacima sa slike 6, značajan uticaj na specifičnu električnu otpornost tla ima mali procenat soli u tlu (<5%). Sa druge strane, vlažnost veća od 20% i temperatura veća od 30°C ima mali uticaj na specifičnu električnu otpornost tla.

Ako tlo ima veliki specifični električni otpor i/ili je zatrpavanje elektroda izvršeno sa materijalom koji ima loš kontakt sa provodnicima mrežaste elektrode i vertikalnih elektroda, pogodno je, a često i neophodno, koristiti aditive, napr. bentonit.



Slika 6 [2] *Uticaj soli, vode i temperature na specifičnu električnu otpornost tla (vrednosti za ρ su na ordinati)*

Sa aspekta analize uticaja karakteristika tla na ponašanje sistema uzemljenja, ili pak pojedinačne elektrode, prilikom pobude sa tranzijentom neophodno je poznavati ponašanje električnih karakteristika tla (ρ i ε_r ; ε_r – relativna dielektrična konstanta²²) u frekvencijskom opsegu reda MHz. Odgovarajuća analiza može se naći u [50] i [51].

2.4.2 Merenje specifične električne otpornosti tla

Da bi se došlo do podatka o specifičnom električnom otporu tla na određenoj lokaciji nisu dovoljne informacije o geološkoj strukturi tla i o sezonskim klimatskim promenama. U svakom slučaju, neophodno je odgovarajuće merenje na konkretnoj lokaciji. Specifična električna otpornost tla varira od jedne do druge tačke na istom lokalitetu. Stoga, jedno merenje specifičnog električnog otpora tla nije dovoljno. Za potrebe sistema uzemljenja velikog VN postrojenja merenja se vrše na minimum četiri paralelna pravca i najmanje na dva njima ortogonalna pravca. Na svakom pravcu treba izvršiti merenje u više tačaka. Rastojanja mernih tačaka su u rasponu ≥ 1 m do dužine koja je jednaka ili veća od dijagonale geometrijskog oblika planiranog sistema uzemljenja.

U principu, merenje specifičnog električnog otpora vrši se injektovanjem struje u tlo između dve sonde (slika 7). Na istom pravcu, a između strujnih sondi (tzv. spoljašne sonde), postavljaju se dve sonde (tzv. unutrašnje sonde) koje služe za merenje razlike potencijala. Pod pretpostavkom da je tlo homogeno, pri struji I , razlika potencijala između tačaka P1 i P2 je

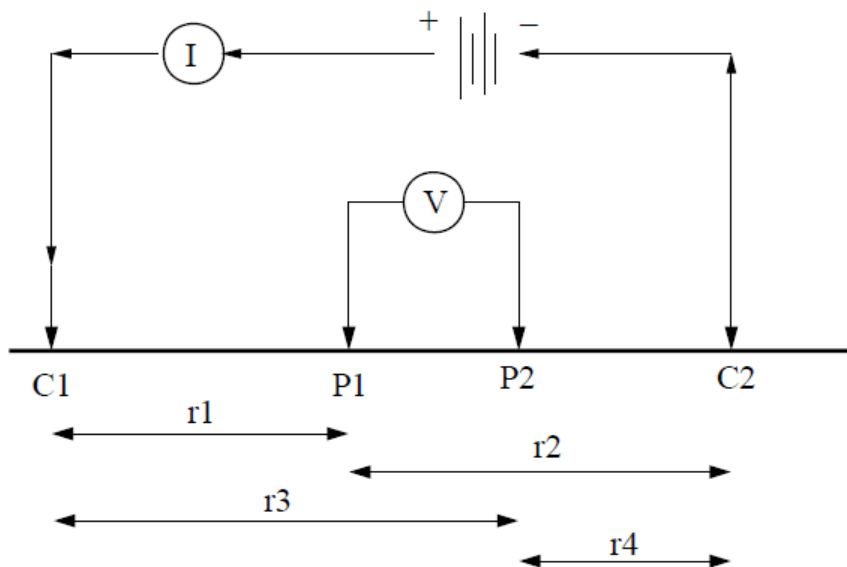
$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad (10)$$

gde su r_i rastojanja naznačena na slici 7. Iz (9) može se izračunati ρ za homogeno tlo.

Polazeći od principa diskutovanog uz sliku 7, uzimajući u obzir dubinu na koju se postavljaju sonde i formalizujući pravilo o rastojanju između sondi (radi jednostavnije primene i/ili ekonomisanja sa dužinom mernih kablova), razvijena su tri praktična metoda za merenje specifičnog električnog otpora tla [2]. U praksi, za merenja koja prethode projektovanju velikih VN postrojenja, potvrđen je kao najbolji, tzv. metod 4 elektrode i to u

²² Tipične vrednosti za ε_r u opsegu su od 1 do 10, maksimalno do 100 [44].

dve varijante poznate kao *Weener-ov* metod i *Schlumberger-Palmer-ov* metod (videti sliku 8). Oba metoda imaju neke specifične pogodnosti, ali su delom i komplementarni. Obezbeđenje dobrog kontakta (minimalna kontaktna otpornost) između tla i sonde, posebno strujnih, preduslov je za adekvatno merenje. U obe varijante rezultat merenja odnosi se na tačku koja je na sredini rastojanja između naponskih sonde.



Slika 7 Uz objašnjenje principa merenja specifičnog električnog otpora tla. Koristi se jednosmerni (DC) izvor ili AC izvor na vrlo niskoj frekvenciji reda Hz. Ovako izmereni specifični električni otpor naziva se i DC specifični otpor²³.

U stvarnosti, tlo najčešće nije homogeno, a rastojanje između sonde tokom merenja se menja. U tim uslovima, očitane vrednosti specifičnog električnog otpora razlikuju se od merenja do merenja i razlikuju se od stvarnog specifičnog električnog otpora tla ispod površine. U svakom slučaju, izmereni specifični električni otpor je prosečna vrednost specifičnog električnog otpora za posmatrano nehomogeno tlo i naziva se prividni specifični električni otpor, ρ_a , (*apparent resistivity*).

Weener-ov metod. Razmatrajući strujne sonde aproksimativno kao polusfere i vodeći računa o oznakama sa slike 8(a), saglasno *Weener-ovom* metodu je

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad [\Omega\text{m}] \quad (11)$$

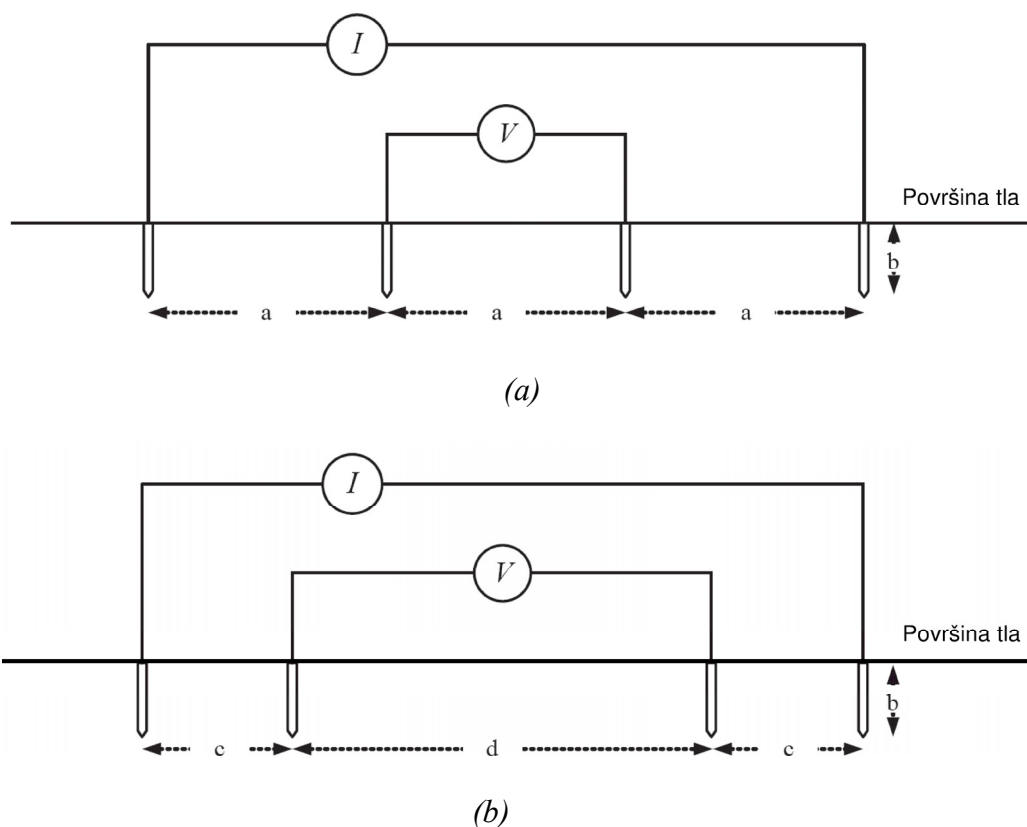
²³ Za merenje specifičnog električnog otpora tla u širem frekvencijskom opsegu (reda MHz) predložen je i elaboriran modifikovani metod sa četiri elektrode [52]. U tom slučaju, pobudna stuja ima talasni oblik step-funkcije.

gde je $R=V/I$ izmerena električna otpornost u omima, a sve dužine su u metrima. Sve sonde su locirane na istom pravcu i na dubini $b \leq 0.1a$. U tom slučaju izraz (10) svodi se na

$$\rho_a \approx 2\pi a R \quad [\Omega\text{m}] \quad (12)$$

Za svako novo merenje, sve četiri elektrode treba pomeriti.

Pri malom rastojanju između sonde, struja teče uz površinu tla. Pri velikom rastojanju između sonde struja prodire dublje u tlo. Dakle, pri rastojanju a između sonde, u stvari, meri se ρ_a na dubini a .



Slika 8 [2] (a) Weener-ov metod, (b) Schlumberger-Palmer-ov metod

Schlumberger-Palmer-ov metod. Uz pretpostavku o sondi kao i slučaju Weener-ovog metoda, saglasno oznakama sa slike 8(b), ρ_a prema Schlumberger-Palmer-ovom metodu je

$$\rho_a = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad [\Omega\text{m}] \quad (13)$$

gde je $R=V/I$ izmerena električna otpornost u omima, a sve dužine su u metrima. Za svaku poziciju unutrašnjih elektroda, ρ_a se određuje na osnovu četiri ili pet pozicija spoljašnjih elektroda. Minimalno rastojanje spoljašnjih elektroda je reda 10 m pri rastojanju 0.5 m između unutrašnjih elektroda. Očigledno, *Schlumberger-Palmer*-ov metod je fleksibilniji od *Weener*-ovog metoda. Naime, *Weener*-ov metod je nepogodan kada je rastojanje između sonde veliko. Tada je napon, V , između unutrašnjih elektroda mali (nemerljiv) pri struji, I , koju daju komercijalni instrumenti.

2.4.3 Nehomogeno tlo

Ako ρ_a ima konstantnu vrednost u različitim tačkama na lokalitetu merenja, znači da je u pitanju homogeno tlo, ako nije tako, tlo je nehomogeno.

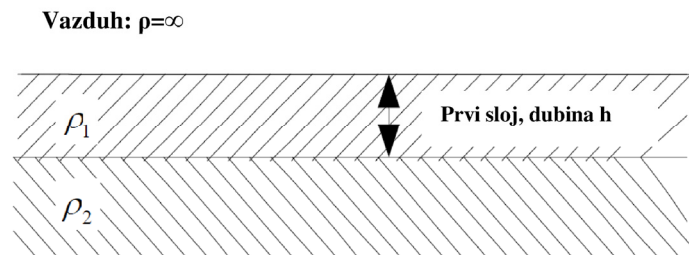
U različitim tačkama, po dužini i širini, lokaliteta na kom se vrši merenje, izmerene vrednosti prividne specifične električne otpornosti najčešće su različite. Pogodno je naći jednu reprezentativnu vrednost prividne specifične električne otpornosti, jer, kao što je poznato, raspoloživi analitički rezultati, napr., za otpornost uzemljenja, kao i neke procedure u aktuelnim standardima, važe za homogeno tlo. Dakle, pogodno je naći srednju vrednost

$$\rho \hat{=} \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{a,i}}{n} \quad (14)$$

gde je $\rho_{a,i}$ prividna specifična električna otpornost izmerena u i -toj tački na lokalitetu merenja, a n je ukupni broj tačaka.

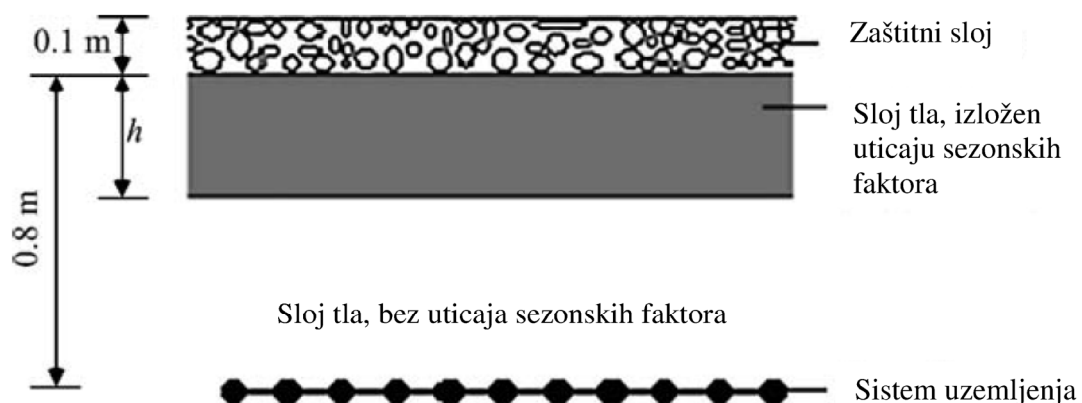
Aktuelni softverski i analitički alati razvijeni su i za nehomogeno tlo. Za potrebe takvih alata neophodan je odgovarajući model specifične električne otpornosti koji sadrži barem dva sloja. Takva situacija konstatuje se crtanjem rezultata za ρ_a u funkciji rastojanja između sonde. Ako je varijacija ρ_a veća od oko 30% to je indikator da je tlo nehomogeno i da treba koristiti model sa najmanje dva sloja (slika 9). U gornjem sloju, čija je dubina h , specifična električna otpornost je ρ_1 , a u donjem sloju, čija je dubina teorijski beskonačno velika (praktično, mnogo veća od h), specifična električna otpornost je ρ_2 , $\rho_2 < \rho_1$. Ovde je osnovni problem da se, na bazi rezultata merenja, adekvatno proceni dubina h . Danas se to uglavnom rešava

primenom odgovarajućeg softverskog alata. U [2] je opisan grafički metod za aproksimativno rešenje pomenutog problema (“*Sunde curves*”).



Slika 9 Dvoslojni model specifične električne otpornosti tla

Promene karakteristika gornjeg sloja prate klimatske promene ambijenta. Tako, u toku kišnog perioda, ρ_1 ima malu vrednost. To utiče da je napon koraka manji u odnosu na drugi ekstrem koji korespondira sa sušnim periodom. Mada je mali napon koraka pogodan sa aspekta sigurnosti ljudi, istovremeno, u kišnom periodu, napon dodira može biti iznad dozvoljene granice. Da bi se opisane promene ograničile i sigurnost obezbedila u svim klimatskim uslovima uvodi se zaštitni sloj. Naime, da bi se povećala kontaktna otpornost između tla i stopala ljudi u VN postrojenju, na čitavoj površini tla postrojenja, pa i oko 1 m izvan ograde postrojenja, nanosi se tanki zaštitni sloj materijala koji ima vrlo veliki specifični otpor. Debljina ovog sloja je desetak santimetara (slika 10). Kao zaštitni materijal koristi se krupno tucani kamen ili šljunak, a na kolovoznom delu asfalt.



Slika 10 [1] Profil tla sa zaštitnim materijalom i sistemom uzemljenja

Bitno je da u donjem sloju kontakt između tla i elektroda u sistemu uzemljenja bude potpun. Sa druge strane, s obzirom da se u toku izgradnje sistem uzemljenja zatrpava, moguće je da pojedine čestice materijala, zbog granulacije ili vrste materijala, imaju slab kontakt sa provodnicima sistema uzemljenja. Uočeni problem rešava se u fazi zatrpavanja tako što se primenom natrijum hlorida, magnezijuma, bakarnih sulfata ili kalcijum hlorida povećava provodnost tla neposredno oko provodnika, a oko vertikalne elektrode stavlja se bentonit.

Sumarno, ako je specifična električna otpornost tla u opsegu 10 – 400 Ωm moguće je realizovati zadovoljavajući niskoomski sistem uzemljenja. Međutim, ako je specifična električna otpornost tla veća od 400 Ωm neophodne su dodatne intervencije u samom tlu da bi se uopšte ostvario niskoomski sistem uzemljenja.

2.5 Smetnje u sistemu uzemljenja – merni aspekt

Osnovni predmet istraživanja u ovoj tezi su merenja koja se direktno odnose na sistem uzemljenja. Pored toga, postoji dodatni zahtev da se merenja vrše u uslovima kada je VN postrojenje u normalnom radnom režimu. Ovaj zahtev implicira mnoga ograničenja koja, inače, ne postoje ako se odgovarajuća merenja vrše u uslovima kada je VN postrojenje van pogona, napr. pre puštanja u rad. Zbog toga, neophodno je da se identifikuju izvori sistemskih smetnji koje bitno utiču na merenja, te da se ukaže na domete aktuelnih rešenja za umanjene pomenutih problema i napravi platforma za razumevanje odgovarajućeg predloga koji na nov način rešava pomenuti problem (odgovarajuće rešenje biće predloženo i elaborirano u Poglavlju 5). Treba napomenuti da smetnje o kojima se ovde govori ne utiču na funkcionalne karakteristike sistema uzemljenja VN postrojenja.

Pored već navedenog, a vezano za merenja na sistemu uzemljenja VN postrojenja koje je u normalnom radnom režimu, treba imati u vidu da su u tom slučaju na sistem uzemljenja spojeni zaštitni provodnici priključenih dalekovoda i armature, odnosno plaševi priključenih podzemnih transmisionih kablova. Spoljni priključci na sistem uzemljenja utiču na karakteristike koje se mere (u odnosu na slučaj kada je VN postrojenje odvojeno od prenosnog sistema), ali i na dodatne smetnje u procesu merenja. Obe manifestacije zahtevaju odgovarajući komentar. U ovom odeljku, komentarišaćemo samo smetnje na kvalitativnom nivou. Takođe, komentarišaćemo konvencionalne (standardne) načine za ublažavanje uticaja smetnji na proces merenja i na rezultate merenja.

2.5.1 Konduktivne smetnje

Osnovna konduktivna smetnja u sistemu uzemljenja VN postrojenja je na mrežnoj frekvenciji, a potiče od nesimetričnog opterećenja faza. Zavisno od naponskog nivoa VN postrojenja, magnituda struje nesimetrije koja cirkuliše kroz sistem uzemljenja iznosi nekoliko ampera, pa čak do 15 A. Odgovarajući napon iznosi 5 do 10 V [1, Ch. 11]. Sa tačke gledišta merenja to je značajna smetnja. Posebno, jer se impedansa sistema uzemljenja, napon dodira i napon koraka nominalno mere na 50 Hz. Dakle, postoji očigledni razlog da se, za potrebe merenja, uticaj smetnje na mrežnoj frekvenciji eliminiše ili da se praktično dovoljno potisne. U principu, u opticaju su pet mogućnosti: **1.** metod inverzije faze test struje na 50 Hz (TCRM - *Test Current Reversal Method*) [2], [54], **2.** metod izbivanja sa test signalom na frekvenciji oko 50 Hz (*Beat Frequency Method*)²⁴ [2], **3.** merenje na frekvenciji test signala koja je pomerenjena do oko 10 Hz u odnosu na 50 Hz [2], **4.** merenje na dve frekvencije test signala - obe iznad 50 Hz [55], i **5.** merenje na frekvenciji test signala iznad (52 Hz) i ispod (48 Hz) 50 Hz [56]. Prvi metod svodi se na jednostavnu komutaciju polariteta struje. Metodi 2 do 5, generalno, mogu se označiti kao frekvencijski. Pored navedenih, više ili manje sofisticiranih metoda, postoji i vrlo jednostavan, ali neracionalan način za ublažavanje uticaja smetnje na mrežnoj frekvenciji. Naime, postoji mogućnost da se, za potrebe merenja, neophodni odnos ispitni signal-smetnja obezbedi odgovarajućom – velikom – strujom ispitnog signala [55]. No, to nije praktično pogodno, pa se sa tom mogućnošću nećemo posebno baviti.

2.5.1.1 TCRM - Metod za ublažavanje uticaja systemske smetnje

Za objašnjenje principa koristićemo sliku 11. Neka je U_0 napon smetnje na mrežnoj frekvenciji. Neka se test struja, I na 50 Hz, injektuje u sistem uzemljenja radi potrebe merenja, a preko komutatora sa dva položaja, napr. položaji 1 i 2. Struja u položaju 2 ima suprotan polaritet od onog kada je komutator bio u položaju 1. Kada je komutator u položaju

²⁴ Izbijanje (*beat*) je termin preuzet iz akustike. Ako posmatramo superpoziciju dva tona f_1 i f_2 , gde je $\Delta f = f_1 - f_2$ i $\Delta f \ll f_1, f_2$. Δf se naziva frekvencija izbivanja. Ako tonovi imaju iste magnitute rezultantna obvojnica fluktuiraju sa srednjom frekvencijom koja je jednaka $\Delta f/2$.

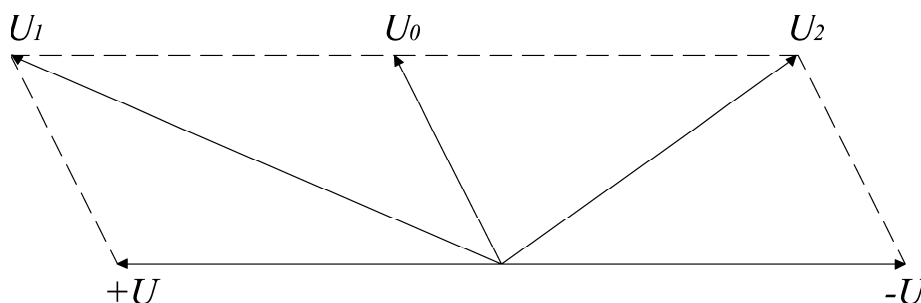
1, protok struje izaziva napon U_1 , a kada je komutator u položaju 2, protok struje izaziva napon U_2 . Napon na otporu uzemljenja, R_G , je $U=I \cdot R_G$. Saglasno slici 11 imamo

$$U = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_0^2}{2}} \quad (15)$$

pa je

$$R_G = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_0^2}{2I^2}} \quad (16)$$

Na ovom principu zasnovan je TCRM (*Test Current Reversal Method*). TCRM je opšte prihvaćeni konvencionalni metod za potiskivanje sistemske smetnje. Na prvi pogled, na ovaj način može se potpuno otkloniti uticaj rezidualnog napona U_0 koji potiče od smetnje na mrežnoj frekvenciji. Nažalost, stvarno potiskivanje smetnje na opisani način samo je delimično. Zbog toga, u merenjima koja koriste opisani način za eliminisanje smetnje, postoji značajna greška u pogledu vrednosti izmerene veličine.



Slika 11 Uz objašnjenje TCRM

Postoje barem dva razloga za slabu efikasnost opisanog principa za eliminisanje smetnje na mrežnoj frekvenciji. Prvo, u opštem slučaju napon smetnje U_0 nije konstantan u vremenu. Dakle, zbog promenljivosti smetnje u vremenu, u različitim trenucima fazorski dijagram (slika 12) biće više ili manje deformisan. Ta činjenica je jasno prepoznata u literaturi. Drugo, nijedan od fazora nije savršeni jednofrekvencijski signal. Koliko je ovom autoru poznato, do sada ta činjenica uopšte nije razmatrana u literaturi. Ovaj aspekt biće objašnjen u narednoj sekciji.

2.5.1.2 Frekvencijski metodi za ublažavanje uticaja sistemske smetnje

Smetnja na frekvenciji mreže sadrži i harmonike. Magnituda smetnje na harmonicima srazmerna je magnitudi komponente na 50 Hz. Međutim, niti je 50 Hz - komponenta niti su komponente na harmonicima savršeni jednofrekvencijski signali. Naime, mrežna frekvencija nije savršeno stabilna, pa umesto spektralne linije na 50 Hz postoji spektar konačne širine koji direktno zavisi od frekvencijske nestabilnosti. Isto važi i za spektre oko harmonijskih komponenti (slika 12). Signal smetnje i test signal su fizički i statistički nezavisni. Dalje, test signal nije savršeni jednofrekvencijski signal, tj. ima konačnu širinu spektra slično kao i smetnja. Navedene činjenice bitne su za razumevanje izbora frekvencijske pozicije test signala u odnosu na frekvenciju smetnje koja je na 50 Hz. Pored toga, navedene činjenice bitne su i za razumevanje problema vezanih za izdvajanje test signala kada je isti na frekvenciji koja se razlikuje od mrežne frekvencije.

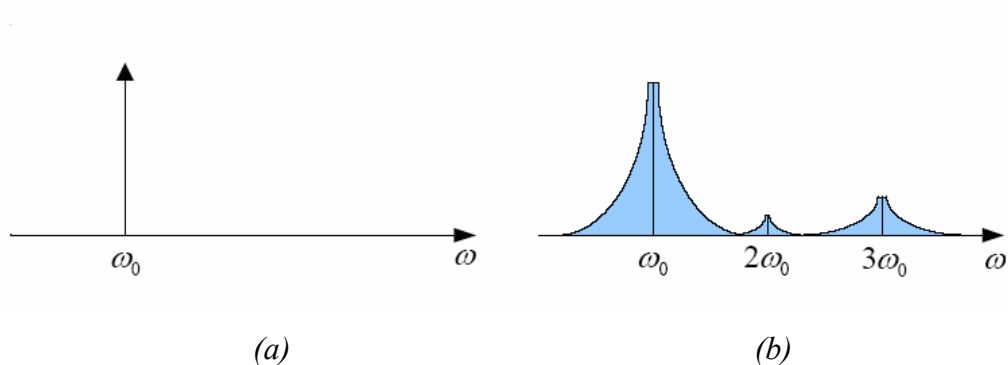
U normalnim radnim uslovima, srednja vrednost mrežne frekvencije varira²⁵ na intervalu od 10 sekundi, u granicama [53, Ch.1]:

$$\begin{aligned} &50 \text{ Hz} \pm 1\%, \text{ tj. } 49.5\text{--}50.5 \text{ Hz u toku } 99.5\% \text{ godine} \\ &50 \text{ Hz} + 4\% / -6\%, \text{ tj. } 47\text{--}52 \text{ Hz u toku } 100\% \text{ vremena} \end{aligned}$$

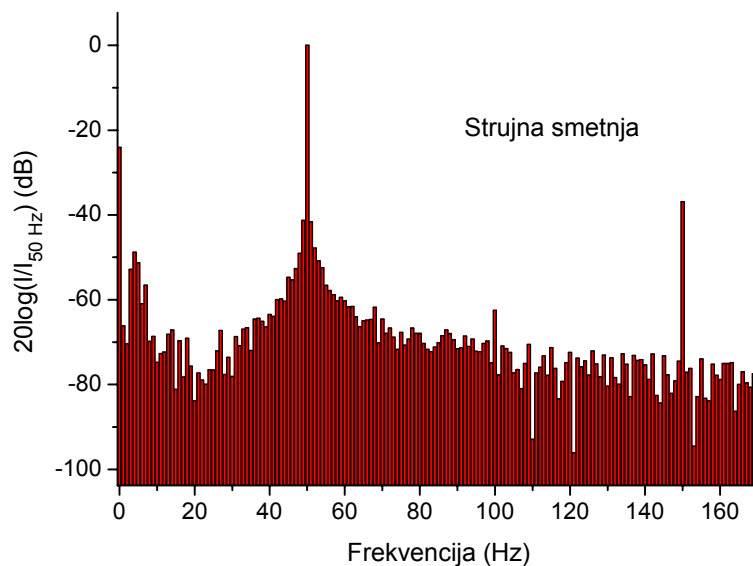
Dakle, relativna nestabilnost mrežne frekvencije, $\Delta f/f$, veća je od 10^{-2} što implicira vrlo širok spektar (videti sliku 12b). Zbog preklapanja repova spektra osnovne frekvencije i repova spektra njenih harmonika, kao i odgovarajućih spektralnih komponenti test signala, u sistemu uzemljenja postoji i visoki spektralni plato koji se manifestuje kao spektar šuma (videti sliku 13). Taj plato bitno utiče na odnos signal-šum na izlazu filtra za izdvajanje test signala. Treba uočiti da je taj parametar vrlo različit od onog koji je često u optičaju i odnosi se na odnos ispitni signal-smetnja. Na primer, odnos ispitni signal-smetnja može biti -10 dB (što je na prvi pogled loše), ali odnos signal-šum, koji je inače relevantan za dalje procesuiranje ispitnog signala, istovremeno može biti 30 dB (što je sasvim prihvatljivo), ali nije ∞ dB, kako bi bilo da je spektar linijski. Ovaj hipotetički primer jasno pokazuje da je praktično neprihvatljivo tretirati, bilo korisni signal ili harmonijsku smetnju, na bazi linijskog spektra.

²⁵ Promenu mrežne frekvencije izaziva neuravnoteženost generisane i aktivne snage. Frekvencija je <50 Hz ako su opterećenje i gubici veći od generisane snage. Frekvencija je >50 Hz ako su opterećenje i gubici manji od generisane snage.

Uprkos navedenim činjenicama, aktuelni metodi za potiskivanje smetnji (metodi označeni 1 do 5 u odeljku 2.5.1) podrazumevaju da su oba signala, signal smetnje (50 Hz) i ispitni signal, savršeni jednofrekvencijski signali. Pri toj pretpostavci, kao i pretpostavci o vremenskoj nepromenljivosti nivoa smetnje, svi metodi (1 do 5), teorijski posmatrano, savršeno potiskuju signal smetnje na mrežnoj frekvenciji. Međutim, sama činjenica da postoji više metoda za rešenje istog problema jasno ukazuje da u praktičnoj primeni svakog od njih postoje određeni nedostaci.



Slika 12 Skica spektra signala i njegovih harmonika.
 (a) savršeni linijski spektar (b) realni spektar osnovnog signala i harmonika.



Slika 13 Primer spektralne karakteristike smetnje na 50 Hz i šuma u sistemu uzemljenja.
 Za objašnjenje porekla DC komponente videti odeljak 2.5.3. U ovom primeru intenzitet smetnje na 50 Hz iznosi 9.58 A. Nivo DC komponente iznosi 0.9 A.

Problemi vezani za praktičnu primenu metoda 1 već su diskutovani. Metod 2, u principu, razvijen je za merenje fluktuacije obvojnice koja je rezultat superpozicije smetnje i test signala. Pošto je pomenuta fluktuacija spora, analogni voltmetar može (u principu) izmeriti

minimalnu i maksimalnu vrednost obvojnice, a na osnovu tih vrednosti može se izračunati napon na test frekvenciji. Međutim, ovaj metod ima frekvencijska i amplitudska ograničenja; razlika između mrežne frekvencije i frekvencije test signala, Δf , u zoni je frekvencijske nestabilnosti mrežne frekvencije, a obezbeđenje jednake magnitude test signala sa magnitudom smetnje je vrlo problematičan zahtev. Metod 3 polazi od činjenice da je otpornost sistema uzemljenja u području niskih frekvencija praktično konstantna, pa je otpornost izmerena na frekvenciji pomerenoj u odnosu na 50 Hz praktično ista kao na 50 Hz. To je realna pretpostavka ako je sistem uzemljenja odvojen od transmisionog sistema. Međutim, za VN postrojenje koje je u normalnom radnom režimu, sistem uzemljenja nije isključivo rezistivan, pa očigledno postoji ograničenje u pogledu izbora frekvencije test signala u odnosu na 50 Hz. Dakle, ovaj metod imaće utoliko manju grešku ukoliko je frekvencija test signala bliža 50 Hz. No, tada se pojavljuje problem adekvatnog izdvajanja (filtriranja) test signala od signala smetnje. Metod 4 sugeriše dopunu koja ima za cilj da se prevaziđe problem uočen kod metoda 3. Dopuna se sastoji u tome što se merenja vrše na dve ispitne frekvencije iznad 50 Hz, a odgovarajući rezultat na 50 Hz procenjuje se ekstrapolacijom pomenuta dva merenja. U tom slučaju, očigledno je da pomerene frekvencije ne smeju biti bitno različite međusobno i bitno veće od 50 Hz. Dakle, radi smanjenja greške u proceni rezultata na 50 Hz usložnjavaju se filtracioni zahtevi. Metod 5 sugeriše korišćenje dve test frekvencije, jednu ispod, a drugu iznad 50 Hz. Obe frekvencije pomerene su reda Hz u odnosu 50 Hz, a sa ciljem da procenjeni rezultat na 50 Hz, primenom interpolacije ima što manju grešku. Očigledno, ovde postoje dva povezana problema. Prvi je vezan za uticaj nestabilnosti mrežne frekvencije i frekvencije ispitnog signala. Drugi se odnosi na mogućnost/praktičnost adekvatnog filtriranja signala na ispitnim frekvencijama.

Sumarno, postoji prostor za poboljšanje aktuelne prakse u pogledu potiskivanja uticaja mrežne frekvencije prilikom procene odgovarajućeg rezultata merenja na 50 Hz. Pored toga, postoji i otvoreno pitanje egzaktne vrednosti magnitude struje ispitnog signala. Naime, aktuelni standardi okvirno (neprecizno, paušalno) sugerišu magnitudu test struje do oko 100 A. Međutim, paušalan izbor test struje implicira i paušalnu/nekontrolisanu vrednost odnosa signal-šum pri kom se merenje vrši. Konsekventno tome proizvodi se nasumična i nekontrolisana greška pri merenju odgovarajuće karakteristike sistema uzemljenja.

Sasvim suprotno, u Poglavlju 5, predlaže se metod za adekvatno eliminisanje smetnje na mrežnoj frekvenciji, kao i način za precizno određivanje (u svakom konkretnom slučaju) magnitude test struje koja garantuje unapred specificiranu vrednost odnosa signal-šum. Primene metoda razvijenog u Poglavlju 5 elaborirane su u Poglavljljima 6 i 7.

2.5.2 Induktivne smetnje

U ovom kontekstu treba razlikovati kvazistacionarne induktivne smetnje na mrežnoj frekvenciji i induktivne smetnje koje potiču od tranzijenata.

Kvazistacionarne smetnje potiču od struja u faznim provodnicima priključenih dalekovoda. Nivo odgovarajućih elektromagnetskih polja srazmeran je naponskom nivou dalekovoda i intenzitetu struje kroz fazne provodnike. Smetnje se indukuju u merne kablove. Po prirodi namene, merni kablovi su dugi (reda desetak ili sto metara). Jedini praktični način da se pomenuti uticaj bitno ublaži je da se merni kablovi postavljaju ortogonalno na pravac dalekovoda (ako je to praktično moguće!). Detaljan uvid u problem induktivnih smetnji u transformatorskoj stanici može se naći, napr. u [57]. Izvor intenzivnih induktivnih smetnji može biti i van postrojenja – napr. iz sistema napajanja elektrovuče.

Rastavljačke i prekidačke aktivnosti u VN postrojenju izazivaju vrlo intenzivne tranzijentne smetnje koje induktivno deluju na kompletnu mernu opremu. S obzirom da je vreme događanja ovih operacija poznato, u tim trenucima ne treba vršiti merenja.

Induktivna sprega postoji i između mernih kablova. Uobičajena mera koja se preduzima radi minimizovanja takve sprege je da se odgovarajući merni kablovi (strujni i naponski) postavljaju međusobno ortogonalno (ako je to praktično moguće!).

Sumarno, induktivni uticaji na merne kablove predstavljaju veliki i otvoreni problem po nekoliko osnova. Praksa je da se taj tip problema rešava empirijski. U predlogu za dalji rad, na kraju ove teze, biće elaboriran mogući put za potpuno rešenje i tog problema.

2.5.3 Geomagnetski indukovana smetnja – GIC

GIC (*Geomagnetically Induced Currents*) je geomagnetski indukovana kvazi-DC (frekvencija ispod 1 Hz) smetnja. GIC je vrlo specifična po poreklu, a u sistemskom pogledu izuzetno opasna smetnja. U kratkom pregledu koji sledi biće data kompilacija relevantnih podataka o GIC [58] - [66], pre svega, radi razumevanja problema i ograničenja vezanih za korišćenje DC test struje pri merenjima u sistemu uzemljenja VN postrojenja.

Sunčeve oluje manifestuju se kao erupcija plazme. Čestice plazme su naelektrisane, pa u interakciji sa magnetskim poljem Zemlje indukuju geoelektrično polje na površini Zemlje, a u tlu odgovarajuću geomagnetsku struju, tj. GIC, čija magnituda zavisi od lokalne provodnosti tla. GIC uvek bira put sa najmanjim električnim otporom.

Sunčeve aktivnosti (oluje) imaju 11-godišnji ciklus²⁶. Tokom ciklusa, brzina promene intenziteta geomagnetskog polja menja se – najmanji je na početku i kraju ciklusa (do oko 500 nT/min), a najveći sredinom ciklusa (više od 5000 nT/min) i korespondira sa skalom intenziteta koja ima nivoe označene sa 1 do 9. U proseku, tokom ciklusa dogodi se oko 2600 oluja sa nivoom 5, a 4 ili 5 oluja sa nivoom 9. Tipična vremenska karakteristika GIC odnosi se na niski nivo tokom intervala od oko desetak minuta, ili reda sata, koji su prekidani sa impulsima vrlo velike magnitude, a traju 1 do 3 minuta.

Kao što je poznato, sistem uzemljenja enormno povećava lokalnu prividnu provodnost tla i to utoliko više što je veći naponski nivo VN postrojenja. Naime, zbog sigurnosnih razloga, u VN postrojenjima na visokim naponskim nivoima otpornost uzemljenja manja je od 0.5Ω . Dakle, sistem uzemljenja VN postrojenja je najpovoljnije mesto (u smislu najmanjeg otpora u odnosu na tlo u kome GIC cirkulišu) za ulazak GIC u elektroenergetski sistem. GIC preko neutrala²⁷ transformatora, koje su na VN strani direktno spojene sa sistemom uzemljenja, ulazi u transformator i širi se po mreži izazivajući neuobičajene tokove realne i reaktivne snage, naponske fluktuacije, pojavu trećeg harmonika, pomak mrežne frekvencije i pogrešno delovanje relejne zaštite. U najgorem slučaju, navedeni poremećaji imaju za posledicu termičko razaranje transformatora i teško oštećenje dela ili čak čitavog nacionalnog elektroenergetskog sistema²⁸.

Slika 14 vrlo jasno ilustruje šta se događa u VN transformatoru u prisustvu DC struje. U tom slučaju, AC talasni oblik je pomeren u odnosu na apscisnu osu (na gore, ako je DC struja pozitivna ili na dole, ako je DC struja negativna). U jezgru transformatora postoji DC fluks koji zavisi od magnitude DC struje. DC fluks sabira se sa AC fluksom u toku jedne poluperiode, a oduzima se u toku druge poluperiode. To ima za posledicu da u toku jedne poluperiode vršni fluks ulazi u zasićenje, izobličava se AC talasni oblik, tj. raste magnituda 3-ćeg harmonika, a relejna zaštita pogrešno funkcioniše što dovodi do nestabilnosti i potpunog pada sistema. Istovremeno transformator se greje i u krajnjem slučaju, ako je DC

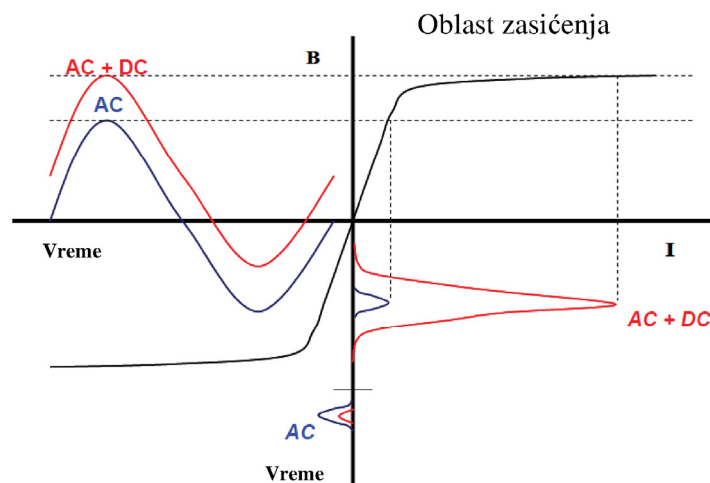
²⁶ U februaru 2013. godine bio je poslednji maksimum u 24. ciklusu sunčeve aktivnosti; 24. ciklus počeo je u januaru 2008. godine, a završava 2019. - 2020. godine [66].

²⁷ U disertaciji se alternativno koriste termini neutral i neutralna tačka.

²⁸ U literaturi je opisano i analizirano više takvih havarija širom sveta, napr., u Kanadi, SAD, Švedskoj, Finskoj i Južnoj Africi. Za sada, nema sistematskog i generalnog rešenja za ovaj problem. Najbolja odbrana od neželjenih posledica prisustva GIC bazira na geomagnetskim prognozama i shodno tome na preventivnom upravljanju mrežom. U mesecu martu 2011. godine pokrenut je EU-projekat, *European Risk from Geomagnetically Induced Currents* (EURISGIC). Cilj projekta je da generiše verodostojne aktuelne prognoze (mape) statističke pojave GIC za područje cele Evrope. Na toj osnovi, nacionalne energetske kompanije mogle bi da naprave blagovremenu procenu rizika od GIC.

struja velika, termički se razara. Orijentacije radi, treba reći da struja do oko 20 A, što odgovara niskom nivou geomagnetske struje, izaziva porast temperature transformatora za samo 1°C [64]. Sa druge strane, tipični impuls GIC iznosi 400 A i traje nekoliko minuta.

Ako se za potrebe određenog merenja u sistem uzemljenja VN postrojenja ubrizgava DC struja, to je praktično isto kao da postoji odgovarajuća GIC. Preciznije, uvek se DC test struja superponira sa GIC. Imajući u vidu kakve posledice izaziva GIC izuzetan oprez treba da postoji u pogledu prethodne provere trenutnog stanja GIC, magnitude DC test struje, a posebno u pogledu njenog trajanja u sistemu uzemljenja VN postrojenja. S obzirom na opisane fizičke procese koji prate prisustvo DC struje u sistemu uzemljenja, njeno trajanje u test svrhe mora biti **strogo** ograničeno na desetak sekundi. Inače, neuobičajena buka iz transformatora je prvo jasno upozorenje da **odmah** treba isključiti DC izvor.



Slika 14 [64] *Uz objašnjenje uticaja DC struje na talasni oblik AC struje*

Posledice uticaja GIC zavise i od tipa energetskog transformatora. Za određeni transformator maksimalna dozvoljena DC struja kroz neutral zavisi od više faktora, napr. temperaturnih ograničenja transformatora, temperature ambijenta, vibracionih ograničenja, namotaja, itd.

Na osnovu modela [67], za period 1996.-2008. godina, najveći GIC za pojedinačnu transformatorsku stanicu na području Evrope je: 400 A za nordijsko područje, oko 100 A za područje Velike Britanije, oko 80 A za baltičke zemlje i manje od 50 A za zemlje centralne i južne Evrope. Složena interkonekcija i intenzivan transport energije između evropskih zemalja čini da je evropska VN mreža generalno sklona problemima vezanim za GIC.

2.6 Zaključak

Osnovni zaključci ovog poglavlja mogu se rezimirati u sledećim tačkama.

1. Aktuelni standardi detaljno (u pogledu preporuka za projektovanja i u pogledu merenja performansi) razmatraju sistem uzemljenja VN postrojenja na niskim frekvencijama i u odnosu na magnitudu struje kvara. U tom kontekstu sistem uzemljenja je isključivo rezistivan.
2. Sistem uzemljenja VN postrojenja u normalnom radnom režimu ima impedantne osobine.
3. Za analizu ponašanja sistema uzemljenja u uslovima tranzijenta (50 Hz), prilikom kvara, kao i impulsne pobude, koja potiče od struje usled atmosferskih pražnjenja, sistem uzemljenja treba razmatrati u frekvencijskom opsegu reda MHz.
4. Visokofrekvencijska analiza, ne samo što je relevantna za optimiziranje performansi sistema uzemljenja nego ima i značajne ekonomske implikacije (racionalno korišćenje provodnika u sistemu uzemljenja, a što je prilično različito od tradicionalnog prilaza).
5. Karakteristike tla imaju ključnu ulogu na karakteristike sistema uzemljenja. Zbog različitih karakteristika tla odnos cena sistema uzemljenja može da varira u opsegu i do nekoliko redova veličine.
6. Smetnje koje potiču usled nesimetrije, a cirkulišu u sistemu uzemljenja predstavljaju fundamentalni problem kada se merenja vrše u VN postrojenju koje je u normalnom radnom režimu.
7. Aktuelni metodi za potiskivanje smetnje na mrežnoj frekvenciji imaju značajna ograničenja koja impliciraju pojavu greške prilikom merenja odgovarajuće karakteristike sistema uzemljenja. Poboljšanje u tom domenu je potrebno i predstavlja otvoreni istraživački problem.
8. Induktivne sprege mernih kablova, međusobno i sa okolinom, predstavljaju otvoreni problem.
9. Mala otpornost sistema uzemljenja neophodna je sa stanovišta sigurnosti, ali je istovremeno razlog za mnoge potencijalne probleme koji potiču od GIC.
10. Primena DC struje za potrebe merenja u sistemu uzemljenja VN postrojenja veoma je ograničena u pogledu magnitude i u pogledu trajanja.

3

PREGLED METODA ZA MERENJE SIGURNOSNIH KARAKTERISTIKA SISTEMA UZEMLJENJA

3.1 Uvodne napomene

Osnovni sigurnosni i funkcionalni indikator sistema uzemljenja je otpornost sistema uzemljenja. Otpornost sistema uzemljenja obavezno se meri pre nego što se VN postrojenje pusti u rad. Tokom radnog veka postrojenja vrši se, u intervalima od oko 5 godina, povremena provera sistema uzemljenja. Pri takvim merenjima postrojenje je u normalnom radnom režimu, a na sistem uzemljenja priključeni su zaštitni provodnici nadzemnih vodova, kao i armature i plaševi podzemnih transmisionih kablova. U tim okolnostima sistem uzemljenja ima impedantne osobine. Dakle, tokom eksploatacionog veka VN postrojenja treba meriti impedansu sistema uzemljenja.

Neposredni indikatori sigurnosnih karakteristika su napon dodira i napon koraka. Isti se mere u uslovima kada je VN postrojenje u normalnom radnom režimu (tj. postrojenje je aktivno). Uobičajeno je da se oba merenja vrše jedino u karakterističnim tačkama postrojenja. Međutim, na osnovu niti jednog od pomenutih merenja ne može se dijagnostikovati zbog čega je došlo do odstupanja izmerene vrednosti za datu karakteristiku. Dakle, pored navedenih merenja, bitno je utvrditi način za dijagnostikovanje problema u sistemu uzemljenja. U vezi s tim, mogući problem odnosi se na prekid u nekom delu sistema uzemljenja. To praktično znači da treba proveriti kontinuitet (ili integritet) u svim segmentima sistema uzemljenja i to u uslovima normalnog radnog režima u VN postrojenju. Naravno, takva provera neophodna je i pre puštanja postrojenja u rad. No, provera u tim uslovima je relativno jednostavna, pa je nećemo posebno razmatrati.

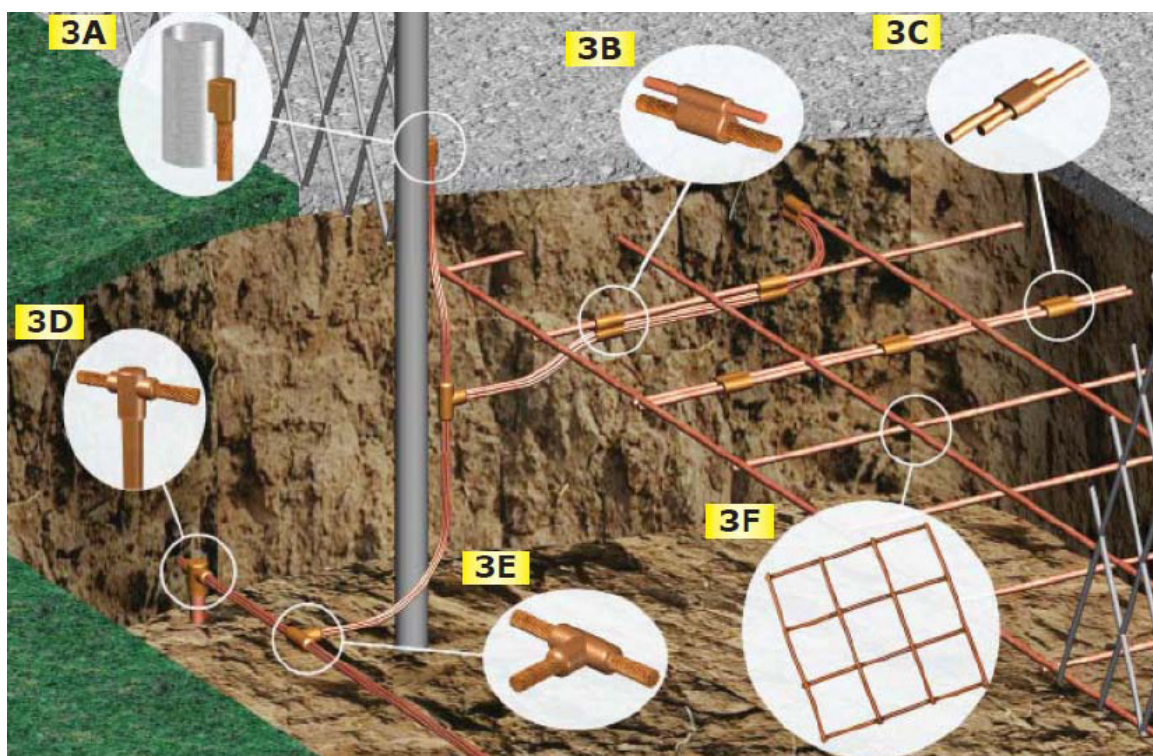
Sumarno, osnovno ograničenje pri izboru pogodnog metoda za proveru kontinuteta sistema uzemljenja kao i metoda za merenje impedanse sistema uzemljenja, napona dodira i napona koraka, odnosi se na činjenicu da merenje treba izvršiti u uslovima kada je VN postrojenje aktivno. Istovremeno, merenje treba da ima zanemarljiv uticaj na rad postrojenja.

Ovo su rigorozna ograničenja, pa će u tom okviru, u ovom poglavlju, biti izvršena kritička analiza mernih metoda koji se, sa više ili manje uspeha, koriste pri navedenim okolnostima.

3.2 Pregled metoda za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja

Performanse sistema uzemljenja zavise od njegove strukturne celovitosti. Postoji više faktora koji mogu biti uzrok za narušavanje celovitosti sistema uzemljenja: loš spoj elemenata (najčešće) horizontalne strukture, korozija, oštećenja ili prekid provodnika zbog velike struje kvara i/ili velike struje pri atmosferskim pražnjenjima. Naravno, oštećenje nije vidljivo, jer je sistem uzemljenja ukopan.

Razne vrste spojeva u sistemu uzemljenja mogu se videti na slici 15. Oznake na slici 15 imaju sledeće značenje: **3A.** kompresiona spojnica stuba zaštitne ograde i pripadajućeg zemljovoda, **3B.** kompresiona spojnica bakarnih užadi različitog poprečnog preseka,



Slika 15 [Harger Lightning & Grounding, www.harger.com] Spojevi u sistemu uzemljenja

3C. kompresiona spojnica bakarnih užadi istog poprečnog preseka, **3D.** kompresiona spojnica horizontalnih i vertikalnih elektroda, **3E.** kompresiona spojnica zemljovoda sa mrežastom elektrodom, **3F.** mrežasta elektroda.

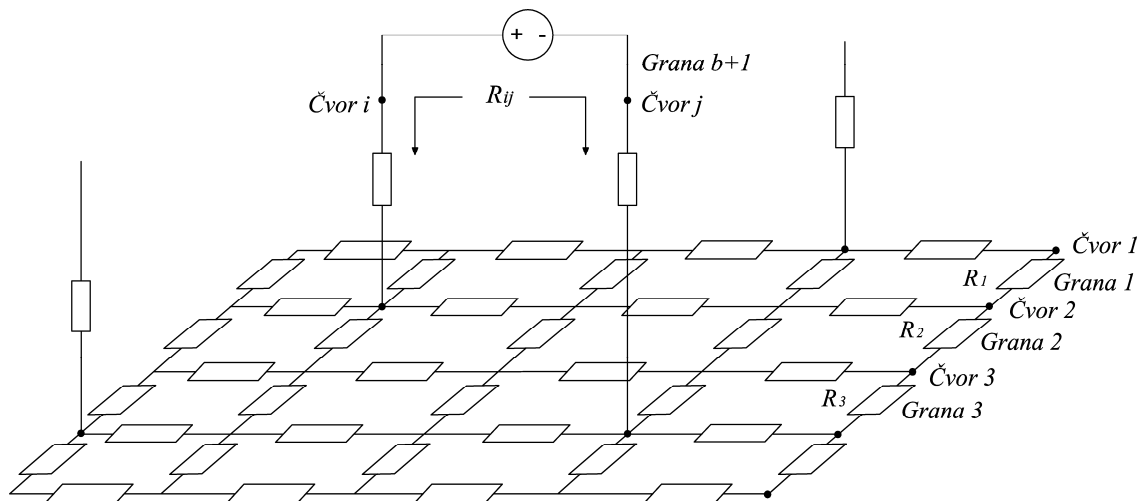
U većem delu sveta, pa i kod nas, bakar je materijal od kojeg su napravljeni horizontalni elementi sistema uzemljenja. U prvoj aproksimaciji, problemi vezani za koroziju bakra mogu se zanemariti (ali ne i potpuno isključiti [68]). Vertikalni elementi (elektrode) koriste materijal koji je kombinacija čelika i bakra (*cooper bonded steel core*), pa su podložni uticaju korozije. U sistemima uzemljenja koji koriste čelik, napr. u Kini, uticaj korozije predstavlja najveći problem (brzina korozije je do 1.5 mm/godini; ekstremno, do 8 mm/godini [1]). Interesantno je napomenuti da što je manja vrednost specifične električne otpornosti tla prisutnija je korozija i obratno.

Dijagnostikovanje defekta u sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja predstavlja složen teorijski, a posebno praktični, problem [2], [3], [69]. Teorijski, postoje dva osnovna pristupa za rešenje pomenutog problema: **1.** Pristup zasnovan na analizi rezistivne mreže i **2.** Pristup zasnovan na detekciji magnetskog polja. Oba pristupa imaju po nekoliko varijanti (ili, kako ih autori nazivaju, metoda) i svaki od njih, u idealnim uslovima, detektuje i locira defekt. U procesu dijagnostikovanja uobičajena pretpostavka je da su za ispitivani sistem uzemljenja raspoloživi precizni geometrijski i konstrukcijski podaci. Međutim, u praktičnoj primeni, često ne postoje potpuni konstrukcijski podaci o sistemu uzemljenja, a u aktivnom VN postrojenju, postoje smetnje koje najčešće dovode do pogrešne lokacije defekta. Otklanjanje defekta zahteva otkopavanje, pa je sasvim jasno kakve kolateralne probleme stvara neadekvatno dijagnostikovanje. Radi detaljnijeg uvida u pomenuti problem, a posebno radi odabira metoda koji bi se mogao poboljšati za potrebe praktične primene, u naredna dva odeljka daćemo pregled pristupa gore označenih pod **1** i **2**.

3.2.1 Metodi zasnovani na analizi rezistivne mreže

Polazeći od činjenice da 80 - 90% sistema uzemljenja čini horizontalna mrežasta elektroda i da nas interesuje njena strukturna celovitost, ista se može ekvivalentirati sa odgovarajućom rezistivnom mrežom koju možemo testirati pobuđujući je sa jednosmernim izvorom, slika 16. Rezistivna mreža ima n čvorova i b grana. Na svakoj stranici okca je otpornik, R_k ($k=1,n$), čija je vrednost jednaka otporu odgovarajućeg provodnika na dužini stranice okca. Sa površine tla, mrežastoj elektrodi može se prići preko ograničenog broja tačaka, tj. preko

zemljivoda. Problem se svodi na merenje R_{ij} (videti sliku 16) za razne kombinacije pristupnih tačaka (formira se odgovarajuća matrica), a potom treba izračunati pojedinačne R_k . Na osnovu poznatih R_k jednostavno je izračunati R_{ij} . Međutim, izračunavanje određenog R_k na osnovu R_{ij} je vrlo komplikovano, jer je odgovarajuća relacija nelinearna. Opisani princip i aproksimativno rešavanje problema vezanog za izračunavanje R_k na bazi izmerenih R_{ij} ima dugu istoriju [70] - [74], [1, Ch.11]. Ukratko, da bi se dobila linearna relacija između R_k i R_{ij}



Slika 16 [1] Mrežasta elektroda ekvivalentirana sa rezistivnom mrežom radi merenja R_k ²⁹

treba primeniti *Tellegen*-ovu teoremu. Potom, putem aproksimativnog i vrlo komplikovanog iterativnog rešavanja seta linearnih jednačina (videti [1, Sec. 11.7.1.2]), dolazi se do vrednosti za pojedinačne R_k . Dakle, u principu, ovim putem moguće je ispitati kontinuitet mrežaste elektrode. Međutim, pored analitičkih problema ovde postoji puno praktičnih problema. Naime, ako je u pitanju mrežasta elektroda koja je napravljena od bakarnih provodnika tada je R_{ij} reda 1 mΩ. Ta otpornost je manja od otpornosti mernih kablova. U sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja postoje intenzivne DC konduktivne smetnje, u mernim kablovima postoje induktivne smetnje, pa magnituda test struje treba da je velika kako bi odgovarajući naponi mogli biti praktično merljivi.

Zbog opisanih problema razmatrani princip direktno nije praktično pogodan za potrebe ispitivanja kontinuiteta u aktivnom VN postrojenju. Međutim, uz određene aproksimacije i

²⁹ Vrednosti za svako R_k treba da su poznate na osnovu projektne dokumentacije za sistem uzemljenja. Ako je izmerena vrednost za odgovarajući R_k veća od vrednosti iz projektne dokumentacije u pitanju je korozija, a ako na osnovu rezultata merenja izračunata vrednost za $R_k \rightarrow \infty$ u pitanju je prekid provodnika na delu koji je ekvivalentiran sa R_k .

izmene u postupku merenja, opisani princip adaptiran je i predložen u formi metoda za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja u aktivnom VN postrojenju [2, Sec. 10.2]. Metod ne zahteva *a priori* poznavanje strukture sistema uzemljenja koje je predmet ispitivanja, praktično je izvodljiv i robustan je u odnosu na smetnje. Međutim, metod je inherentno subjektivan. To otvara nove probleme. Taj aspekt biće analiziran i originalno rešen u Poglavlju 4 ove teze.

3.2.2 Metodi zasnovani na detekciji magnetskog polja

U referenci [75] *Dawalibi* je predložio elektromagnetsku teorijsku osnovu za prosuđivanje o topologiji i o stanju (korozija i/ili prekid) u sistemu uzemljenja. Naime, predložio je da se kroz sistem uzemljenja propusti test struja, da se meri elektromagnetsko polje na površini iznad sistema uzemljenja, a potom da se nađu inverzne jednačine magnetskog polja radi utvrđivanja topologije i stanja sistema uzemljenja koji je predmet analize. Princip je teorijski elaborirao pretpostavljajući DC test struju. Međutim, u vezi sa implementacijom ovog principa postoje teorijski i praktični problemi.

Teorijski problem odnosi se na uspostavljanje inverznih jednačina magnetskog polja. Naime, rešenje nije uvek jedinstveno i stabilno. Elaboracija problema i predlog za odgovarajuće teorijsko rešenje može naći u [76].

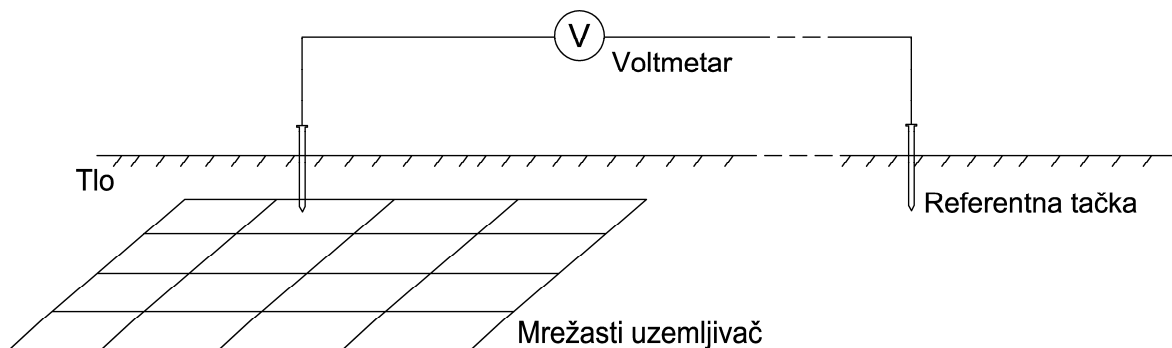
Dawalibi-jev teorijski okvir odnosi se na generalno principsko rešenje. Raspoložive praktične varijante opisanog principa, u stvari su partikularna pojednostavljena. U svim varijantama, na tlu iznad sistema uzemljenja, meri se elektromagnetsko polje koje je posledica injektovane test struje. Varijante se međusobno razlikuju: po talasnom obliku (sinusni; pravougaoni; UWB³⁰) i/ili po frekvenciji test signala (reda 100 Hz; 1 MHz; širokopojasni signal 1 kHz do 1 GHz).

Bitno je istaći da, koliko je ovom autoru poznato, jedino su u referenci [77] elaborirani problemi vezani za primenu elektromagnetskog principa prilikom ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja u aktivnoj transformatorskoj stanici i to za slučaj kada je frekvencija test signala 200 Hz (mrežna frekvencija je 60 Hz), injektovana test struja 200 do 300 A, a dubina na koju je postavljena mrežasta elektroda u razmatranoj transformatorskoj stanici bila je

³⁰ UWB (*Ultra Wide Band*) je specijalna vrsta impulsnog širokopojasnog signala. U kontekstu ove primene UWB je potencijalno interesantan, jer omogućava visoku rezoluciju po vremenu. Naime, kašnjenje signala je srazmerno pređenom putu, pa je pomenuta osobina relevantna za precizno lociranje defekta duž provodnika.

40 cm. Navedeni podaci su dragoceni za realno sagledavanje praktičnih mogućnosti koje se mogu ostvariti primenom razmatranog principa. Ostale varijante verifikovane su jedino na principskom nivou, softverski i/ili na laboratorijskom modelu, bez prisustva smetnji [78] - [81]. Pored toga, vidljivo je, ali autori to ne komentarišu, da je rastojanje između elektromagnetskog senzora i analizirane strukture nekoliko santimetra³¹. Imajući u vidu da nas isključivo interesuje metod koji je primjenljiv u aktivnom VN postrojenju, dalje nećemo razmatrati gore pomenute pojedinačne varijante.

U [82] predložen je metod koji kao test signal koristi struju nesimetrije koja inače, sa većom ili manjom magnitudom, uvek postoji u sistemu uzemljenja, slika 17. Potencijal se meri u više tačaka na površini postrojenja. Izmereni rezultati se upoređuju sa mapom raspodele potencijala dobijene analitičkim putem. Na mestu u postrojenju gde se utvrdi razlika između izmerenog potencijala i odgovarajuće vrednosti potencijala sa mape smatra se da je detektovan defekt u sistemu uzemljenja. Očigledno, metod je izuzetno jednostavan ako je raspoloživa verodostojna i precizna mapa potencijala za ispravni sistem uzemljenja aktivnog postrojenja koji se testira. U praksi, najčešće to nije slučaj. Pored toga, autori ne komentarišu uticaj induktivnih smetnji na merne kablove.



Slika 17 [82] *Princip ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja korišćenjem struje nesimetrije kao test struje*

Sumarno, metodi koji su zasnovani na detekciji elektromagnetskog polja pate od mnogih problema, pa u ovoj fazi tehnološkog razvoja, nisu pogodni za praktičnu primenu u aktivnim VN postrojenjima. Preciznije rečeno, ključni problem je ekstremno veliki intenzitet test struje potrebne za lociranje defekta na uobičajenoj dubini, 0.8 do 1 m, na kojoj se inače nalazi mrežasta elektroda.

³¹ Izuzetak je referenca [79] koja eksplicitno razmatra rastojanje između sonde i ispitivane uzemljivačke strukture, ali ne i uticaj karakteristika tla na nivo magnetskog polja.

3.3 Pregled metoda za merenje impedanse sistema uzemljenja

U poglavlju 2, objašnjeno je da se sistem uzemljenja VN postrojenja na niskim frekvencijama, pa i na mrežnoj frekvenciji, ponaša isključivo rezistivno. U uslovima kada je VN postrojenje u normalnom radnom režimu, na njega su priključeni zaštitna zemljovodna užad nadzemnih vodova i armature, odnosno plaševi transmisionih podzemnih kablova. U tim uslovima sistem uzemljenja ima impedantne osobine. U fazi izgradnje objekta, putem analize zasnovane na softverskim alatima i putem merenja, proveravaju se rezistivne karakteristike sistema uzemljenja (otpornost sistema uzemljenja). U fazi eksploatacije VN postrojenja, putem merenja proveravaju se impedantne osobine (prividna impedansa sistema uzemljenja). Na bazi izmerene prividne impedanse i vodeći računa o deobi struje između sistema uzemljenja i priključenih transmisionih vodova može se proveriti i postojanost projektovanih rezistivnih osobina sistema uzemljenja.

Aktuelni softverski alati, napr. CDEGS, takođe omogućavaju kompletnu analizu impedantnih osobina sistema uzemljenja aktivnog VN postrojenja. Međutim, za takvu analizu potrebni su detaljni i precizni podaci o modelu i karakteristikama tla, o geometriji sistema uzemljenja, o karakteristikama materijala korišćenih provodnika, a neophodne su i detaljne karakteristike relevantne za modeliranje priključenih nadzemnih vodova (uključujući i karakteristike uzemljenja dalekovodnih stubova). U praksi, pomenuti podaci najčešće su delimično raspoloživi, posebno ako su u pitanju stari objekti. Ipak, najčešći i najveći problem odnosi se na nedostatak verodostojnog modela specifične električne otpornosti tla.

Striktno posmarano, model specifične električne otpornosti tla neophodan je i u fazi koncipiranja merenja, kao i u procesu analize rezultata merenja prividne impedanse. Kada je u pitanju aktivno VN postrojenje ograničene su mogućnosti merenja specifične električne otpornosti. Naime, na dostupnom delu površine postrojenja moguće je meriti specifičnu električnu otpornost jedino u sloju tla do dubine koja je 0.3 do najviše 0.5 m (radi izbegavanja interferencije sa mrežastom elektrodom). Van ograde postrojenja, za ovu namenu, neophodno je meriti specifičnu električnu otpornost barem na pravcu na kome će se vršiti merenje potencijala u okviru merenja prividne impedanse. Kao što ćemo diskutovati kasnije, izbor pomenutog pravca zavisi od više faktora. Ovde treba napomenuti da na izabranom pravcu, u zemljištu ne sme biti metalnih struktura (napr. metalne cevi, kablovi i slično).

Vezano za proces merenja prividne impedanse postoje tri osnovna problema. Prvi se odnosi na izbor metoda merenja i na koncipiranje odgovarajuće principalske merne šeme.

Drugi se odnosi na potiskivanje uticaja sistemske konduktivne smetnje. Treći se odnosi na izbegavanje induktivnih smetnji u mernim kablovima.

Prvi i treći problem razmatraćemo u narednom odeljku. Klasično rešenje za potiskivanje smetnje koja potiče od struje nesimetrije u sistemu uzemljenja već je razmotreno u odeljku 2.5.1.1. Novo rešenje za prevazilaženje tog problema biće predloženo u Poglavlju 5, a implementirano u šemu za merenje impedanse u Poglavlju 6.

U literaturi postoje opisi mnogih merenja otpornosti rasprostiranja uzemljivača za pojedinačne elektrode. Sa druge strane, mnogo manje opisa ili podataka postoji o merenjima impedanse na sistemima uzemljenja prostorno velikih i aktivnih VN postrojenja [83] -[93].

3.3.1 FOP (*Fall-of-Potential*) metod

U principu, otpornost odnosno impedansa uzemljenja može se izmeriti na razne načine. Izbor pogodnog metoda zavisi od dimenzija uzemljenja i od prisutnih smetnji. Aktivno VN postrojenje, tipično, VN transformatorska stanica, zbog velikih fizičkih dimenzija sistema uzemljenja i zbog veza sa zaštitnim provodnicima transmisionog sistema, predstavlja vrlo specifičan objekat za merenje impedanse. U ovom slučaju, konvencionalni merači otpornosti uzemljenja nisu primenljivi. Postoje barem dva razloga u prilog ove konstatacije:

- (a) Realni deo impedanse je mali, uglavnom manji od 0.5Ω , a relativni udeo induktivne komponente u impedansi je značajan. Konvencionalni merači otpornosti uzemljenja baziraju na potpuno drugačijoj pretpostavci – rezistivna komponenta je dominantna, a reaktivna je zanemarljiva.
- (b) U sistemu uzemljenja postoje vrlo intenzivne smetnje, na frekvenciji mreže i na harmonicima (struja usled nesimetrije reda ampera). Takođe, postoji i visok plato šuma.

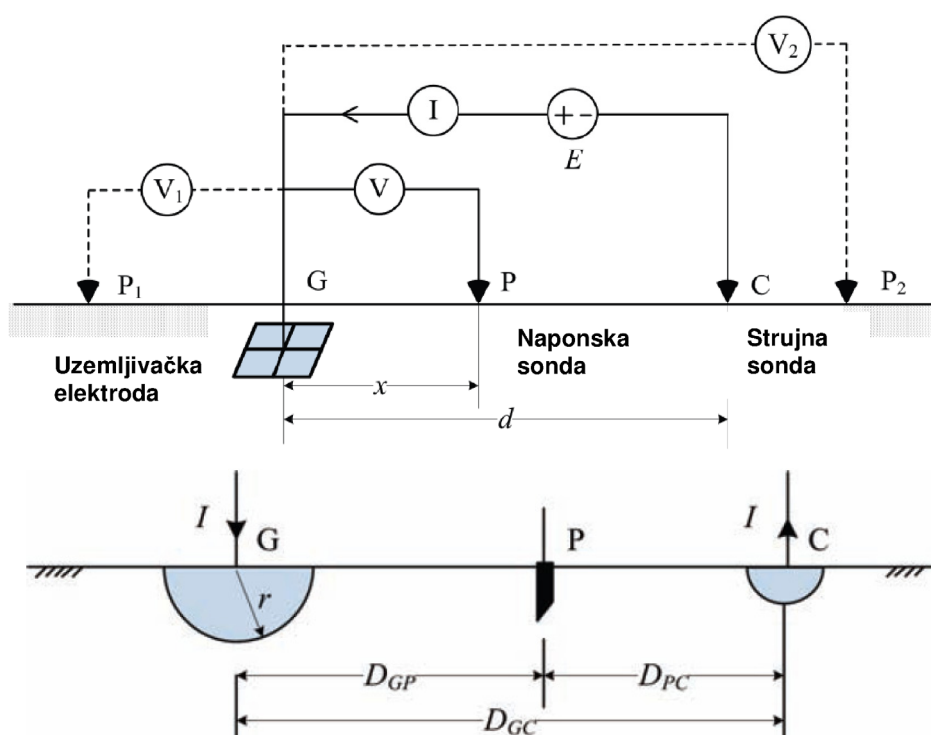
Za merenje impedanse aktivnog VN postrojenja, saglasno CENELEC i ANSI/IEEE standardima preporučeno je korišćenje strujno-naponskog metoda poznatog kao FOP (*Fall-of-Potential*) metod ili "3-pin" metod. Ovaj metod ima nekoliko varijanti. Naime, iz praktičnih razloga, osnovni metod je tokom decenija evoluirao do aktuelnog, tzv. nekonvencionalnog FOP metoda. Korisno je sagledati evoluciju FOP metoda, jer u svakom evolutivnom koraku napravljen je određeni doprinos u prevladavanju problema vezanih za praktičnu primenu metoda. Naravno, ne znači da je nekonvencionalni FOP savršeni metod.

3.3.1.1 Savršeni FOP metod

Savršeni FOP metod odnosi se na merenje prividne otpornosti uzemljenja u odsustvu smetnji. Uzemljivačka elektroda (G), naponska sonda (P) i strujna sonda (C) nalaze se na pravoj liniji (slika 18). Elektroda E ekvivalentirana je kao polusferna elektroda čiji je prečnik jednak dijagonali mrežaste elektrode koja je predmet merenja. Slično, strujna sonda je takođe ekvivalentirana kao odgovarajuća polusferna elektroda. Prividna otpornost R dobija se kao odnos napona V i struje I . Osnovni problem ovog merenja odnosi se na utvrđivanje adekvatne pozicije naponske sonde. Naime, u slučaju da je malo rastojanje između G i C, dolazi do preklapanja uticaja tih elektroda u zoni gde se nalazi naponska sonda P. Dakle, detaljnija analiza treba da utvrdi optimalni relativni položaj P u odnosu na G i C.

Potencijal u tački P je

$$V_P = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right) \quad (17)$$



Slika 18 [1] *Principialna šema FOP metoda. Naponska sonda može biti mala polusferna sonda.*

Ako je $D_{GP}=D_{PC}$ tada je $V_P=0$, tj. na sredini rastojanja D_{GC} potencijal je jednak nuli. Na prvi pogled, upravo je tako utvrđena optimalna pozicija za sondu P. Međutim, treba imati u vidu da su G i C polusferne sonde i da je njihov potencijal definisan u odnosu beskonačno udaljenu referentnu tačku. Zbog toga, neophodna je preciznija analiza. Naime, ako je struja I injektovana u polusfernu elektrodu tada je

$$V_G = \frac{\rho I}{2\pi r} = IR_G \quad (18)$$

gde je R_G otpornost uzemljenja posmatrane polusferne elektrode. Dalje, razlika potencijala između G i P je

$$\begin{aligned} V'_G &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D_{GC}} - \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} \right) \\ &= V_G - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{D_{GC}} + \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Ako se sonda za merenje potencijala nalazi u tački P, tada je izmerena prividna otpornost, R_M , jednaka

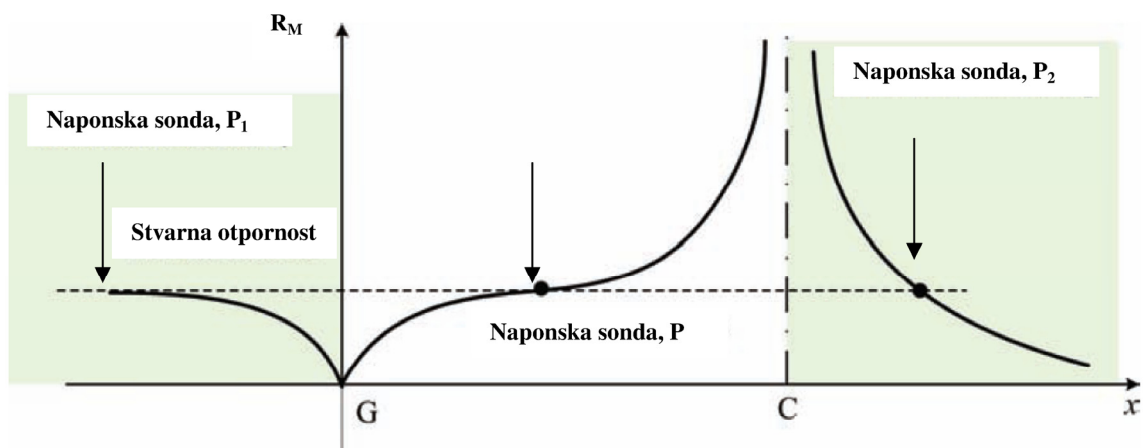
$$\begin{aligned} R_M &\triangleq \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D_{GC}} - \frac{1}{D_{GP}} + \frac{1}{D_{PC}} \right) \\ &= R_G - \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{D_{GC}} + \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Dakle, izmerena otpornost R_M manja je od stvarne otpornosti R_G . Očigledno, greška pri merenju biće anulirana ako je

$$\frac{1}{D_{GC}} + \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} \equiv \frac{1}{d} + \frac{1}{x} - \frac{1}{d-x} = 0 \quad (21)$$

Pozitivno rešenje jednačine (21) po x odnosi se na optimalan položaj sonde P. Taj položaj je u tački $0.618d \equiv 0.618D_{GC}$ i u literaturi je poznat kao "pravilo 62%"[85]. U stvari, opisani metod odnosi se na savršeni FOP metod koji je primenljiv (podrazumeva) homogeno tlo i vrlo veliko rastojanje između G i C (prečnik polusfere G i polusfere C treba da je mnogo

manji od rastojanja između njih). Pored toga, merni kablovi, strujni i naponski su međusobno paralelni. Skica zavisnosti izmerene prividne otpornosti u funkciji pozicije naponske sonde prikazana je na slici 19. Skica jasno pokazuje da postoje mogućnosti da se R_G odredi mereći napone V_1 i V_2 (slika 18) kada je naponska sonda na poziciji P_1 odnosno P_2 . Zbog očiglednih praktičnih razloga, pozicija P_2 nije interesantna. Pozicija P_1 može biti interesantna sa stanovišta eliminisanja induktivne sprege između mernih kablova. Međutim, na toj poziciji postoji uticaj G elektrode na naponsku sondu (ovaj tip problema diskutovan je u komentaru uslova koji proizilazi iz izraza (17)). Dakle, jedina praktično relevantna pozicija nalazi se u tački P.



Slika 19 [1] Skica zavisnosti izmerene prividne otpornosti u zavisnosti od pozicije na kojoj se nalazi naponska sonda

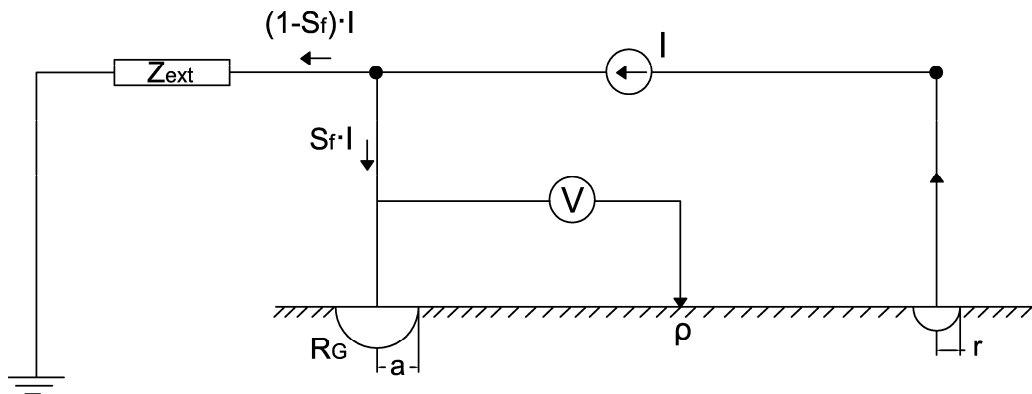
3.3.1.2 Nekonvencionalni FOP metod

Striktna primena savršenog FOP metoda, saglasno pravilu 62%, najčešće nije izvodljiva u aktivnom VN postrojenju. Osnovni razlozi za navedenu konstataciju su:

- (a) Tlo nije homogeno.
- (b) Postoji induktivna sprega između mernih kablova³².
- (c) Realne topološke i geografske karakteristike ne omogućavaju da G elektroda i merne sonde (P i C) budu na pravoj liniji.
- (d) Zbog veze G elektrode sa zaštitnim provodnicima transmisionih vodova, sistem uzemljenja ima impedantne osobine (videti sliku 20).

³² Na frekvenciji od oko 60 Hz, induktivna sprega dva paralelna merna kabla iznosi oko 0.1 Ω /100 m.

- (e) Samo deo test struje teče u sistem uzemljenja. Ostali deo test struje prostire se kroz priključene delove transmisionne strukture čija je ekvivalentna impedansa Z_{ext} (videti sliku³³ 20).



Slika 20 Uz objašnjenje problema vezanih za primenu FOP metoda u aktivnom VN postrojenju. S_f - faktor deljenja test struje, $S_f < 1$.

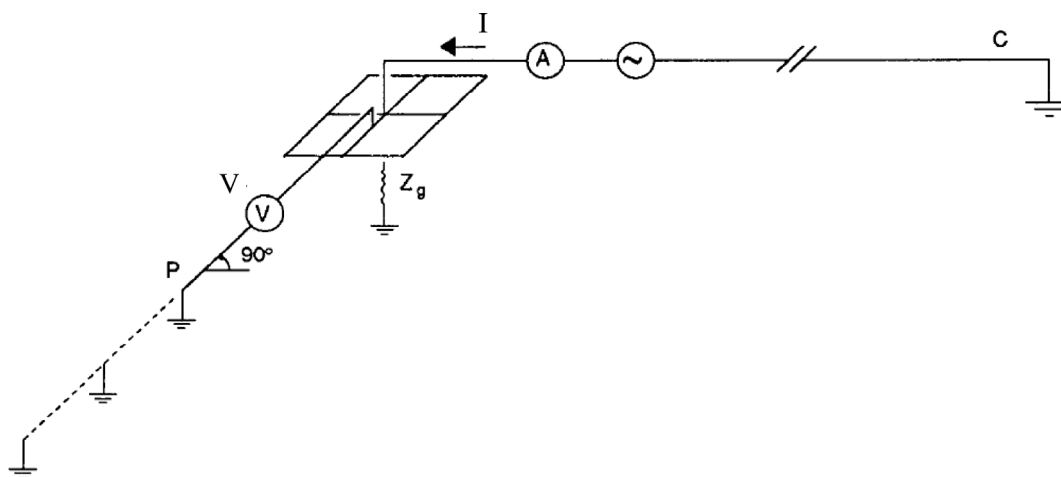
U uslovima kada je tlo nehomogeno ne vredi pravilo 62%. Naime, softverska analiza ovog problema [85], za dvoslojni model tla, ukazuje da se optimalna pozicija naponske sonde bitno razlikuje (10 do 90%, zavisno od karakteristika tla) od pozicije koju sugerise pravilo 62%.

Praktični razlozi, (b) i (c), nalažu da naponska sonda nije i ne treba da bude na liniji G – C. U [69] predloženo je da se merenje napona vrši na pravcu koji je normalan na pravac na kome su G i C, a rastojanje između G i C treba da je barem tri do četiri puta veće od dijagonale sistema uzemljenja koji je predmet ispitivanja (videti sliku 21). U takvim okolnostima, sugerisano je da se optimalna pozicija naponske sonde utvrđuje empirijski. Naime, sonda se u koracima pomera po liniji koja je (približno) ortogonalna na liniju G-C, a u smeru od ograde VN postrojenja prema okolini u dužini do nekoliko stotina metara. U svakoj mernoj tački, na bazi izmerenog napona i struje, izračunava se odgovarajuća vrednost prividne impedanse. Vrednosti modula prividne impedanse crtaju se na dijagramu koji je sličan onom sa slike 19. Horizontalni, ili prevojni, deo pomenute krive ima približno

³³ U cilju eliminisanja moguće konfuzije, vezano za deljenje struje između sistema uzemljenja i uzemljenih delova priključene transmisionne infrastrukture treba imati u vidu sledeći komentar. Saglasno IEEE Std, faktor $S_f = I_G / I_f$ (I_G - struja koja se disipira sa uzemljivača u tlo, I_f - struja kvara) naziva se faktor deljenja (*split factor*), a $1 - S_f = r$ predstavlja redukcionni faktor. Sa druge strane, saglasno EN Std 50522, umesto S_f koristi se oznaka r i naziva se redukcionni faktor (*reduction factor*). Na toj osnovi, Interni standard EMS 123:2014, takođe koristi oznaku r . U ovoj tezi, predlažu se poboljšanja vezana za IEEE Std, pa s tim u vezi, radi konzistentnosti, ovde i dalje koristimo oznaku S_f u smislu i značenju koje je definisano u IEEE Std.

konstantnu vrednost na ordinati. Upravo ta vrednost odgovara približno tačnoj vrednosti modula prividne impedanse.

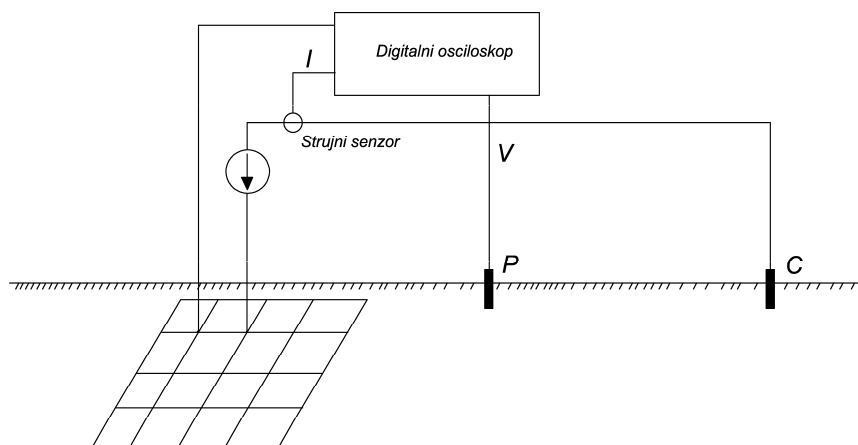
Ovako modifikovani FOP metod u literaturi je poznat pod nazivom nekonvencionalni FOP metod. Ovaj metod, zbog niza izvršenih aproksimacija ima inherentnu grešku reda nekoliko



Slika 21 [69] *Principialna šema za nekonvencionalni FOP metod*
I - test struja, V - napon u tački P, P - naponska sonda, C - strujna sonda,
Z_g - impedansa ispitivanog sistema uzemljenja

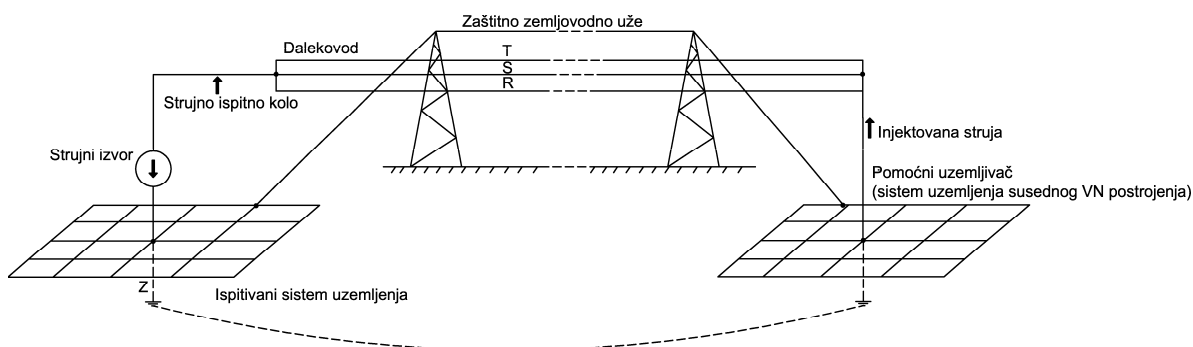
procenata. U nekim slučajevima, ovako izmerena prividna impedansa (paralelna veza prividne otpornosti sistema uzemljenja, R_G , i ekvivalentne impedanse priključenih delova transmisionog sistema, Z_{ext} ; videti sliku 20) predstavlja krajnji rezultat. Moduo tako izmerene impedanse manji je od stvarne prividne otpornosti sistema uzemljenja, R_G . Međutim, ako se želi utvrditi vrednost prividne otpornosti, R_G , sistema uzemljenja neophodno je prethodno izračunati faktor deljenja struje, $S_f = I_G/I$, gde je I_G struja kroz sistem uzemljenja i I je test struja ($I=I_G+I_{TR}$, I_{TR} struja kroz priključene delove transmisionog sistema). U opštem slučaju to je vrlo složen analitički i/ili simulacioni problem ([1, Chs. 5&7], [7] - [20], [90] i [94]). Alternativno, odgovarajuće merenje komponenta struje I_{TR} je složeno i zahteva posebnu opremu za sinhrono prikupljanje podataka u realnom vremenu.

Princip simultanog merenja ispitne struje, I , i napona, V , prikazan je na slici 22. Detaljnije objašnjenje o prikupljanju i procesuiranju izmerenih vrednosti, kao i o izračunavanju odgovarajuće prividne impedanse sistema uzemljenja, biće dato u Poglavlju 6. Takođe, u Poglavlju 6 biće objašnjena i implementacija novog (FSM) načina za eliminisanje uticaja smetnji koje potiču iz sistema uzemljenja.



Slika 22 Princip merenja struje i napona
P - naponska sonda; C - strujna sonda

Ispitna struja, I , injektuje se između elektrode G i sistema uzemljenja susednog VN postrojenja preko privremeno isključenog dalekovoda³⁴ (slika 23).



Slika 23 Način injektovanja test struje

Magnituda i frekvencija ispitne struje I su kritični parametri. Tradicionalno, magnituda je relevantna, za ostvarenje odgovarajućeg odnosa signal-šum (parametar relevantan za tačnost merenja). U tom pogledu, uobičajeno se (neprecizno) zahteva velika, do 100 A [2], magnituda test struje. Sa druge strane, treba imati u vidu da velika magnituda test struje može da deluje invazivno na transformator, opasna je i za osoblje koje vrši merenje i vrlo je zahtevna u pogledu osobina izvora ispitne struje. Što se tiče transformatora, deo ispitne struje

³⁴ Ukoliko je isključeni dalekovod paralelan sa aktivnim dalekovodom tada postoji sprega između njih, pa i potencijalno visok nivo smetnji na mrežnoj frekvenciji. U slučaju kvara na aktivnom dalekovodu, postoji i sigurnosni problem na dalekovodu koji služi za injektovanje test struje.

se superponira sa strujom koja je prisutna u normalnom radnom režimu. Dakle, rezultantna obvojnica kompozitnog signala fluktuirala. Simetrične vršne amplitude fluktuirajućeg talasnog oblika mogu da uđu u područje zasićenja $B-H(I)$ karakteristike transformatora (videti sliku 14). U tom slučaju generišu se harmonici, koji mogu aktivirati relejnu zaštitu i izazvati niz neželjenih posledica vezanih za funkcionisanje sistema. Naravno, bitno drugačija situacija je kada se testira neaktivno VN postrojenje.

Uticao gore opisanog problema može se bitno smanjiti ako se izabere frekvencija test signala koja je pomenjena u odnosu na 50 Hz. Međutim, izbor test frekvencije utiče na tačnost merenja (videti odeljak 2.5.1.2). U tom slučaju, nije precizirano kolika treba da bude magnituda test struje. U ovoj tezi, u Poglavlju 5 biće predložen nov način za izbor tri test frekvencije. Takođe, biće pokazano kako se za određeni VN objekat utvrđuje optimalna magnituda test struje. Ovde napominjemo, da je ta amplituda ispitne struje, u proseku, reda ampera, a detaljnija elaboracija biće data u Poglavlju 5.

3.4 Pregled metoda za merenje napona dodira i napona koraka

Obezbeđenje sigurnosti u i oko VN postrojenja je glavni razlog za postojanje sistema uzemljenja. S tim u vezi, osnovno pitanje odnosi se na opasnost od napona dodira i napona koraka. Oba se bitno povećavaju u toku trajanja struje kvara. Slično, udar groma prouzrokuje struju koja bitno povećava napon dodira i napon koraka. U svakom slučaju, injektovana struja u sistemu uzemljenja povećava razliku potencijala i izaziva tok struje kroz telo čoveka (između dva stopala ili između ruke i stopala) koji je u kontaktu sa tlom i uzemljenim metalnim strukturama. Ako je struja veća od određene kritične vrednosti ishod može biti fatalan. Sa rastućim nivoom struje kvara, u savremenim interkonektovanim energetskim sistemima, opisani problem postaje još komplikovaniji.

Električni udar deluje na dve vitalne funkcije: na disanje i na cirkulaciju krvi. Struja odgovarajućeg intenziteta koja protiče kroz srce izaziva *ventricular fibrillation*³⁵. Struja koja protiče kroz nervni centar utiče na respiratorni centar i na iscrpljivanje kardiovaskularnog centra. Respiratorni grč može da izazove gušenje. Zbog mišićne kontrakcije, koja je izazvana

³⁵ Komorsko treperenje (*Fibrilatio ventricularum*) označava potpuno dezorganizovanu, haotičnu električnu aktivnost miokarda komora, koja nema nikakvu koordinaciju kontrakcije miofibrila. Dalje, komorsko treperenje izaziva hemodinamski zastoj (cirkulatorni arest), gubitak svesti i zahteva neodložnu električnu defibrilaciju srca DC-šokom, jer nakon 3-5 min. nastaju trajne promene u centralnom nervnom sistemu.

električnim udarom, čovek čija je ruka u kontaktu sa provodnikom sam se ne može odvojiti od provodnika.

3.4.1 Uticaji struje na ljudsko telo

Postoje različiti i međusobno zavisni faktori koji se odnose na uticaj električnog udara na vitalne funkcije čoveka. Pomenuti faktori predmet su višedecenijskih empirijskih istraživanja (videti [3], [69], [95] i [96]). Ti faktori odnose se na kritičnu količinu električne energije u telu pri određenom tipu struje (DC ili AC).

Prostiranje struje kroz telo. Strujno kolo, preko čovekovog tela, može se zatvoriti na različite načine. Najkritičnija situacija nastaje kada se tok struje (u prisustvu kvara) zatvara preko srca. U praksi to je slučaj kada čovek dodirne metalnu strukturu. U tom slučaju struja cirkuliše od metalne strukture preko ruke do stopala koje je na tlu.

Opasne frekvencije struje koja prolazi kroz telo. Struja na različitim frekvencijama ima različite efekte. Električni udar pri jednosmernoj struji izaziva kontrakciju mišića, pa se čovek sam ne može odvojiti od provodnika pod naponom. Naizmjenična struja menja polaritet u regularnim intervalima, pa nema isti uticaj na kontrakciju mišića kao DC struja, tj. pri relativno malom intenzitetu struje, čovek sam može odvojiti ruku od provodnika. Struja na mrežnoj frekvenciji je vrlo opasna, čak pri magnitudi <0.1 A. Struje na frekvenciji reda kHz nisu opasne. Dalje razmatramo samo struje na mrežnoj frekvenciji.

Intenzitet struje koji je opasan po ljude. Generalno, ako kroz telo teče struja koja je manja od 5 mA, ista ne utiče na sigurnost čoveka. Sa druge strane, protok struje veće od 5 mA, zavisno od težine čoveka i trajanja izlaganju struji, može imati ozbiljne posledice po sigurnost. Na primer, struja od 200 mA u trajanju dužem od 1 sekund može izazvati *ventricular fibrillation*.

Intenzitet struje koji je bezbedan za ljude. U standardizacijskim dokumentima profilisani su kriterijumi za bezbedni intenzitet struje kroz telo, I_B . Preciznije, struju I_B preživeće 99.5% ljudi, pa je

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{za težinu 50 kg} \quad (22)$$

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{za težinu 70 kg} \quad (23)$$

gde je t_s dužina trajanja prisustva struje. U kontekstu koji ovde razmatramo, t_s je interval u kome delovanjem odgovarajuće zaštite dolazi do isključenja kvara. Obično je $t_s \leq 0.5$ sec.

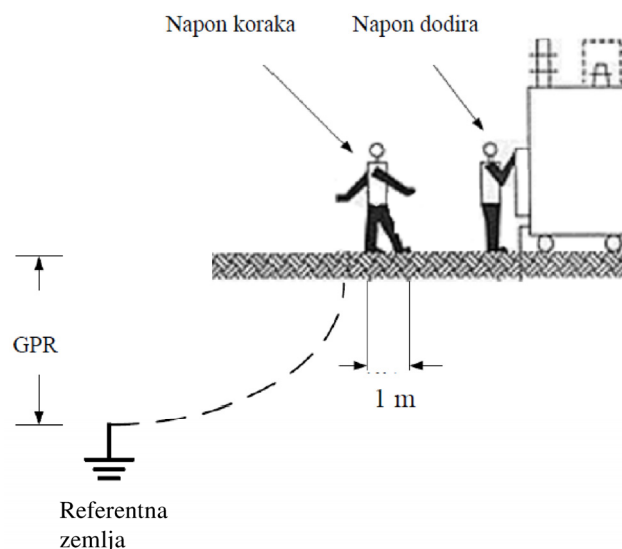
Električna otpornost tela. Magnituda struje koja teče kroz telo direktno zavisi od električne otpornosti tela. Unutrašnja otpornost tela je oko 300Ω . Otpornost tela varira od vlažnosti kože – suva koža do oko $100 \text{ k}\Omega$, vlažna ili oštećena koža ispod $1 \text{ k}\Omega$. Kontaktna otpornost između ruku iznosi 2330Ω , a otpornost između ruke i stopala iznosi 1130Ω . Postoji konsenzus da je prosečna ekvivalentna otpornost tela $R_B = 1000 \Omega$ [3].

3.4.2 Sigurnosni indikatori - definicije

Kada zbog kvara ili udara munje, struja teče kroz sistem uzemljenja, dolazi do porasta potencijala i do razlike potencijala na površini i neposrednoj okolini VN postrojenja. Razlika potencijala može proizvesti opasne vrednosti napona dodira i napona koraka.

Napon dodira (V_T) definiše se kao razlika između GPR i površinskog potencijala u tački gde se osoba nalazi i u isto vreme drži ruku na uzemljenu metalnu strukturu (slika 24).

Napon koraka (V_S) definiše se kao razlika potencijala kojoj je izložena osoba kada je rastojanje između stopala 1 m , a osoba ne dodiruje metalnu strukturu (slika 24).



Slika 24 Uz objašnjenje definicije napona dodira i napona koraka

Preneseni napon (*transferred voltage*) je specijalni slučaj napona dodira i odnosi se na slučaj kada je GPR prenesen van VN postrojenja. Tipični slučaj prenesenog napona imamo

kada osoba koja stoji unutar VN postrojenja dodirne metalni objekat koji je uzemljen u udaljenoj tački, ili kada osoba stoji u udaljenoj tački i dodirne metalni objekat koji je vezan na sistem uzemljenja VN postrojenja.

Napon dodira opasniji je od napona koraka. Oba su potencijalno opasna za personal i za populaciju koja može biti u prilici da dodirne zaštitnu ogradu VN postrojenja. Preneseni napon je izuzetno opasan za osoblje koje vrši merenje na sistemu uzemljenja.

3.4.3 Osvrt na standarde

Postoji više internacionalnih i nacionalnih standarda koji preporučuju metodologiju za određivanje maksimalno prihvatljivog napona dodira i napona koraka. Svi oni baziraju na minimalnoj struji koja prouzrokuje *ventricular fibrillation*. Pored toga, postoji puno nacionalnih standarda koji definišu sopstvene granice za sigurnosne indikatore sa različitim marginama. Generalno, ne postoji globalni konsenzus o maksimalno dopustivom naponu dodira.

Ipak, postoje dva standarda sa najvećim uticajem: IEEE Std 80 [3] i IEC 479-1 [97]. Sigurnosni kriterijumi definisani u IEC 479-1 su vrlo kompleksni, za razliku od odgovarajućih u IEEE Std 80 koji su definisani na vrlo jednostavan način. Pored toga, IEEE Std 80 eksplicitno definiše električnu otpornost tela, $R_B = 1000 \Omega$. Bitno je istaći, da je, na osnovu detaljne uporedne analize pomenuta dva standarda u referenci [98], utvrđeno da i IEC 479-1 implicitno podrazumeva približno istu vrednost za R_B , tj. 1000Ω . Saglasno IEEE Std 80 svako stopalo definiše se kao ploča površine 200 cm^2 (disk prečnika 16 cm) i težine 20 kg.

Kao što je već rečeno, postoje različite definicije granica sigurnosnih indikatora. Često, to izaziva konfuziju i otežava pravilno interpretiranje odgovarajućih mernih rezultata. S tim u vezi, još bitnije je da postoji mogućnost da se pogrešno dijagnostikuje sigurnosno stanje u VN postrojenju. Naime, koriste se različite margine, napr. za 50% i 99.5% populacije za koju su određeni V_T i V_S sigurni po život. Pored toga, znamo da je površinski potencijal srazmeran otpornosti sistema uzemljenja. Sa druge strane, otpornost sistema uzemljenja srazmerna je sa specifičnom električnom otpornošću tla. Tlo nije homogeno, pa je, za egzaktno definisanje V_T i V_S neophodno poznavati barem srednju prividnu specifičnu električnu otpornost tla. Vrlo često ni taj podatak nije raspoloživ. Na sreću, jedino se na osnovu vrste površinskog materijala (krupno tucani kamen, šljunak ili asfalt) može približno proceniti specifični otpor površinskog sloja, a koji je inače relevantan za V_T i V_S . Da podsetimo, oba materijala, zavisno

od klimatskih uslova (vlažno, suvo), imaju specifičnu električnu otpornost između 3000 i 5000 Ωm .

Tabele 1 i 2 odnose se na dozvoljene vrednosti V_T , odnosno V_S , koje sa verovatnoćom³⁶ od 0.5%, dovode do *ventricular fibrillation*. Tabele su preuzete iz [98] (odgovarajuća grafička interpretacija data je u [99]), a inicijalno su generisane radi poređenja rezultata na bazi IEEE Std 80 sa odgovarajućim na bazi IEC 479-1. Ovde su date samo tabele koje se odnose na IEEE Std 80. Tabele se mogu koristiti za razrešenje dilema diskutovanih u prethodnom stavu.

Tabela 1 [98] *Dozvoljene vrednosti napona dodira koje sa verovatnoćom 0.5% dovode do ventricular fibrillation; težina osobe je 50 kg; IEEE Std 80*

Trajanje električnog udara	Specifična električna otpornost						
	10 Ωm	50 Ωm	100 Ωm	200 Ωm	500 Ωm	1000 Ωm	3000 Ωm
0.05 s	529.9 V	559.2 V	599.7 V	680.6 V	923.4 V	1328.0 V	2946.6 V
0.10 s	372.5 V	395.4 V	424.0 V	481.3 V	652.9 V	939.1 V	2083.6 V
0.15 s	304.2 V	322.9 V	346.2 V	393.0 V	533.1 V	766.7 V	1701.2 V
0.20 s	263.4 V	279.6 V	299.8 V	340.3 V	461.7 V	664.0 V	1473.3 V
0.25 s	235.6 V	250.1 V	268.2 V	304.4 V	413.0 V	593.9 V	1317.8 V
0.30 s	215.1 V	228.3 V	244.8 V	277.9 V	377.0 V	542.2 V	1202.9 V
0.35 s	199.1 V	211.4 V	226.7 V	257.3 V	349.0 V	502.0 V	1113.7 V
0.40 s	186.3 V	197.7 V	212.0 V	240.6 V	326.5 V	469.5 V	1041.8 V
0.45 s	175.5 V	186.4 V	199.9 V	226.9 V	307.8 V	442.7 V	982.2 V
0.5 s	166.6 V	176.8 V	189.6 V	215.2 V	292.0 V	420.0 V	931.8 V

Tabela 2 [98] *Dozvoljene vrednosti napona koraka koje sa verovatnoćom 0.5% dovode do ventricular fibrillation; težina osobe je 50 kg; IEEE Std 80*

Trajanje električnog udara	Specifična električna otpornost						
	10 Ωm	50 Ωm	100 Ωm	200 Ωm	500 Ωm	1000 Ωm	3000 Ωm
0.05 s	551.1 V	680.6 V	842.5 V	1166.2 V	2137.3 V	3755.9 V	10230.1 V
0.10 s	389.7 V	481.3 V	595.7 V	824.6 V	1511.3 V	2655.8 V	7233.8 V
0.15 s	318.2 V	393.0 V	486.4 V	673.3 V	1234.0 V	2168.5 V	5906.4 V
0.20 s	275.6 V	340.3 V	421.2 V	583.1 V	1068.7 V	1877.9 V	5115.0 V
0.25 s	246.5 V	304.4 V	376.8 V	521.5 V	955.8 V	1679.7 V	4575.0 V
0.30 s	255.0 V	277.9 V	343.9 V	476.1 V	872.6 V	1533.3 V	4176.4 V
0.35 s	280.3 V	257.3 V	318.4 V	440.8 V	807.8 V	1419.6 V	3866.6 V
0.40 s	194.9 V	240.6 V	297.9 V	412.3 V	755.7 V	1327.9 V	3616.9 V
0.45 s	183.7 V	226.9 V	280.8 V	388.7 V	712.4 V	1252.0 V	3410.0 V
0.5 s	174.3 V	215.2 V	266.4 V	368.8 V	675.9 V	1187.7 V	3235.0 V

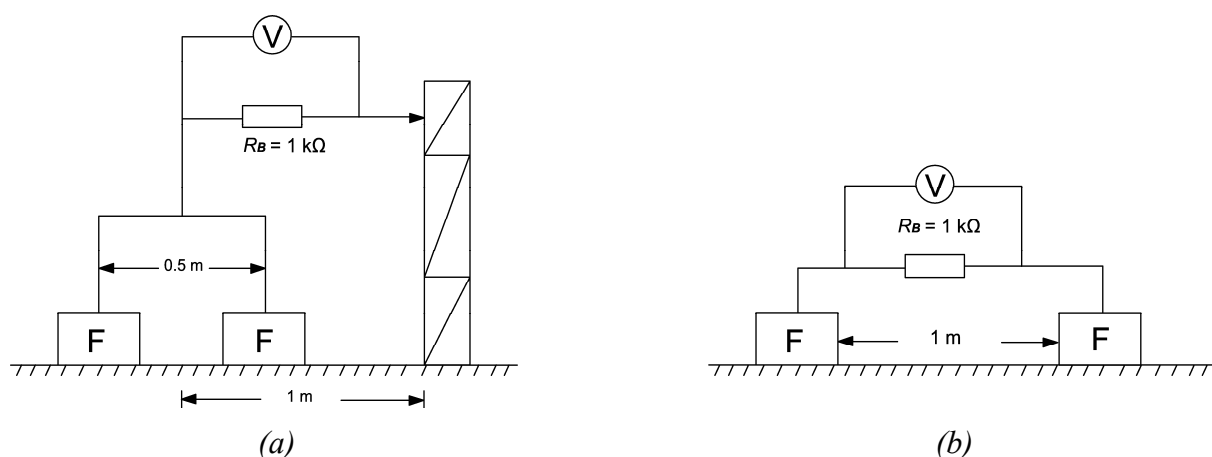
³⁶ Drugim rečima, predmetne tabele sadrže podatke koji garantuju sigurnost za 99.5% populacije.

Tabele jasno pokazuju sigurnosnu ulogu površinskog sloja. Na primer, neka površinski sloj ima specifični električni otpor $3000 \Omega\text{m}$, neka je $t_s = 0.5 \text{ sec}$, tada je $V_T = 931.8 \text{ V}$. Ako nema površinskog sloja, specifična električna otpornost bila bi, napr. $100 \Omega\text{m}$, pa bi imali $V_T = 189.6 \text{ V}$. Takođe, konstatujemo da je najčešće $V_T < V_S$. Međutim, navedena konstatacija bitno zavisi od strukture i specifične otpornosti slojeva tla (videti komentar uz referencu [103]). Ipak, u većini slučajeva, ako V_T zadovoljava sigurnosni kriterijum tada i V_S zadovoljava sigurnosni kriterijum. Takođe, ako je zadovoljen sigurnosni kriterijum za čoveka čija je težina 50 kg , zadovoljen je i sigurnosni kriterijum i za osobu sa 70 kg ili više (videti (22) i (23) koje daju intenzitet dozvoljene struje pri datoj težini).

Korisno je uočiti da ekstremno mala (blizu nula Ωm), kao i ekstremno velika ($>10000 \Omega\text{m}$), specifična električna otpornost tla ne predstavlja najgori slučaj u pogledu sigurnosti za ljude u VN postrojenju. Uglavnom, najgori slučaj biće kada je specifična električna otpornost tla nekoliko stotina Ωm .

3.4.4 FEM – Metod za merenje napona dodira i napona koraka

Za potrebe merenja napona dodira i napona koraka injektuje se test struja između sistema uzemljenja i udaljene strujne sonde. Ta struja izaziva porast potencijala, te se stvaraju uslovi za merenje napona dodira i napona koraka. Principske šeme za merenje napona dodira i napona koraka prikazane su, shodno [69], na slici 25(a) i (b).



Slika 25 [69] *Principska šema merenja (FEM: Footprint–Electrode Method)*
 (a) napona dodira, (b) napona koraka. Oznaka *F* odnosi se na stopalo.
 Napon na otporniku R_B određuje se posredno (videti ekvivalentnu šemu, sl.26).

Merenje napona dodira i napona koraka vrši se u nekoliko karakterističnih (rizičnih) tačaka u VN postrojenju, napr. u uglovima postrojenja i na zaštitnoj ogradi postrojenja.

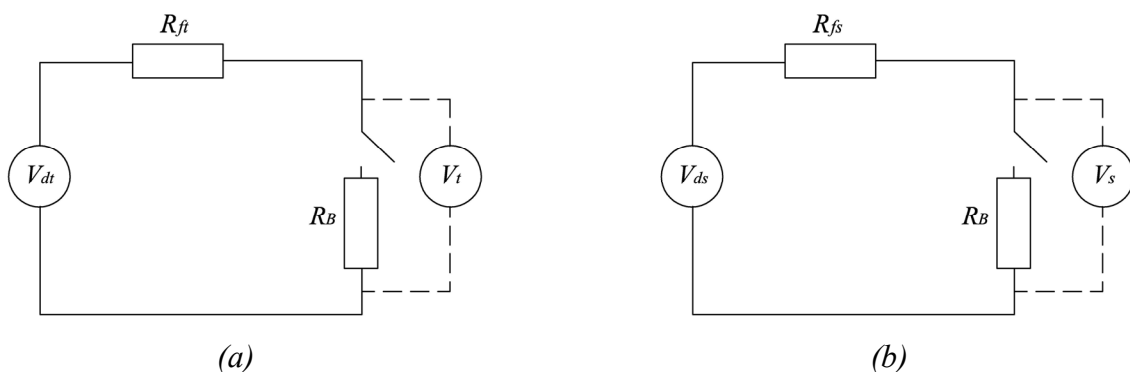
Za potrebe eventualne revizije sistema uzemljenja, a u cilju ostvarenja ravnomernije raspodele potencijala na površini tla, meri se napon dodira u geometrijskoj sredini okca. Tako izmereni napon dodira naziva se *mesh* napon. Za sistem uzemljenja sa ravnomernim rastojanjem provodnika u mrežastoj elektrodi, *mesh* napon je, u stvari, najveća vrednost napona dodira.

Šeme prikazane na slici 25(a) i (b) uzimaju u obzir težinu i geometrijske karakteristike tela u kontaktu sa tlom i/ili metalnim objektom. Međutim, pomenute šeme direktno ne omogućavaju merenje napona dodira i napona koraka koji korespondiraju sa sigurnosnim kriterijumima u IEEE Std 80, a koji su definisani u odnosu na struju koja prolazi kroz ekvivalentnu otpornost tela, $R_B = 1000 \Omega$. Dakle, napon dodira, V_t , i napon koraka, V_s , koje prepoznaje IEEE Std 80, možemo izračunati na osnovu ekvivalentnog kola (slika 26), pa je:

$$V_t = \frac{V_{dt}}{R_B + R_{ft}} R_B \quad (24)$$

$$V_s = \frac{V_{ds}}{R_B + R_{fs}} R_B \quad (25)$$

gde je V_{dt} izmereni napon praznog hoda između stopala i tačke dodira na metalnoj strukturi, slika 25(a), R_{ft} je otpornost dva stopala (F) u paraleli (4500Ω , ako je površinski sloj od ovlaženog krupno tucanog kamena), $R_B = 1000 \Omega$ je otpornost tela, V_{ds} je napon praznog hoda izmeren između dva stopala, slika 26(b), R_{fs} je redna veza dve otpornosti stopala (18000Ω , ako je površinski sloj od ovlaženog krupno tucanog kamena).



Slika 26 Thevenin-ov ekvivalent [100] kola za izračunavanje (a) V_t , (b) V_s

Kada se izračunavaju V_t (na osnovu ems V_{dt} čija je unutrašnja otpornost R_{ft}) i V_s (na osnovu ems V_{ds} čija je unutrašnja otpornost R_{fs}), prema (24) i (25), prekidači u ekvivalentnim šemama su zatvoreni.

Injektovana test struja mnogo je manja od struje kvara, I_f . Proporcionalno manji su i napon dodira, V_t , i napon koraka, V_s . Stvarne vrednosti napona dodira, V_T , i napona koraka, V_S , su

$$V_T = V_t \frac{I_f}{I_{test}} \quad (26)$$

$$V_S = V_s \frac{I_f}{I_{test}} \quad (27)$$

Naponi V_T i V_S proveravaju se u odnosu na odgovarajuće vrednosti koje propisuje IEEE Std 80 (videti Tabele 1 i 2). Kada se merenje vrši u aktivnom VN postrojenju postoji dodatni problem vezan za deljenje struje kvara između sistema uzemljenja i priključenih uzemljenih delova transmisionog sistema. Taj problem je diskutovan u odeljku 3.3.1.2.

Ako nije raspoloživ faktor deljenja struje, tada se, na aproksimativnoj osnovi, može koristiti podatak za I_f koji je uvek raspoloživ. Dalje, a u vezi sa deljenjem struje kvara, a zbog globalnog sistema uzemljenja³⁷ [101], postoji mogućnost da u VN postrojenju u kome je nastao kvar, odgovarajući naponi V_T i V_S budu manji nego u susednom, VN postrojenju!

U referencama [102] do [104] mogu se naći relevantni podaci i iskustva vezana za merenje napona dodira i napona koraka.

3.5 Zaključak

Osnovni zaključci ovog poglavlja mogu se rezimirati u sledećim tačkama.

1. Smetnje u sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja predstavljaju osnovni problem u pogledu mogućnosti izvođenja odgovarajućih merenja i u pogledu korektne interpretacije rezultata merenja.

³⁷ GES- *Global Earthing System*. Ovaj termin prepoznat je u internacionalnim standardima: *CENELEC HD 637 S1*, *EN 50522* i *IEC EN 61936-1*.

2. Primena DC test struje za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja u aktivnom VN postrojenju može proizvesti ozbiljne sistemske probleme. Neophodna je naročita pažnja pri izvođenju merenja.
3. Velika AC test struja, 100 A i više, invazivno deluje na aktivno VN postrojenje.
4. Aktuelni IEEE metod za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja je eksplicitno subjektivan.
5. Za merenje impedanse sistema uzemljenja aktivnog VN postrojenja moguće je koristiti jedino nekonvencionalni FOP metod.
6. Interpretiranje rezultata merenja napona dodira i napona koraka mora biti precizno i kompletno, tj. neophodno je eksplicitno definisati uslove pod kojima rezultati vrede. Uslovi su: specifična električna otpornost površinskog sloja tla, interval vremena prisustva struje kvara i verovatnoća da izmereni napon nije opasan za definisani procenat populacije. Čak i u specijalizovanoj literaturi predmetni podaci vrlo često nisu jednoznačni i kompletni.
7. Napon dodira je najrigorozniji indikator za sigurnost ljudi u VN postrojenju.

Deo II: NOVI METODI

*It is important to prove,
but it is more important to improve.*
Anonymous

The triumph of science has been mainly due to its practical utility.
Bertrand Russell

4

NOVI METOD ZA PROVERU KONTINUITETA SISTEMA UZEMLJENJA

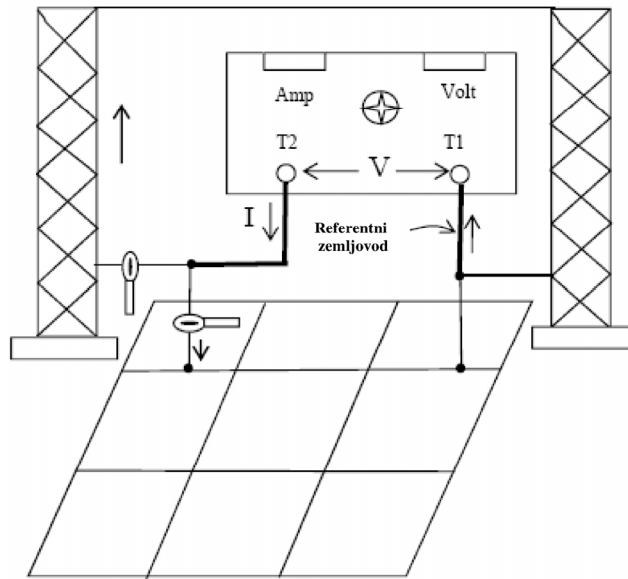
4.1 Uvodne napomene

Zbog funkcionalnih i ekonomskih razloga, nije racionalno da se radi ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja vrši isključenje kompletnog elektroenergetskog postrojenja. Dakle, ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja najčešće se izvodi u uslovima kada je elektroenergetsko postrojenje u normalnom radnom režimu. Međutim, u tom slučaju neminovno je prisustvo elektomagnetskih smetnji (konduktivnih i induktivnih) koje mogu bitno uticati na tačnost merenja. U cilju prevazilaženja tog problema, standard IEEE Std 81-2012 (sec. 10.2) za ispitivanje kontinuiteta preporučuje ubrizgavanje ispitne struje³⁸ do 300 A, između unapred odabranog referentnog uzemljenja i ispitivanog zemljovoda visokonaponske opreme (slika 27). Navedeni metodološki pristup u literaturi je poznat kao *High-Current Test Method* (HCM). U literaturi ne postoje jasni i jednoznačni kriterijumi vezano za primenu ovog metoda.

U ovom poglavlju, ostajući u okvirima osnovne ideje standarda IEEE Std 81-2012 (sec. 10.2), biće predložen i verifikovan poboljšani HCM za ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja aktivnog VN postrojenja. Ovde i dalje, imenujemo ga *Advanced HCM*³⁹, a skraćeno ćemo ga označavati A-HCM. Primena predloženog metoda, biće ilustrovana, korak po korak, za jedno visokonaponsko postrojenje. Slični rezultati za druga VN postrojenja biće ukratko komentarisani. Do sada je poboljšani metod ispitivanja uspešno primenjen u postupku ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja za šesnaest VN postrojenja.

³⁸ U principu, IEEE Std je neutralan u pogledu izbora vrste ispitne struje - DC ili AC. Imajući u vidu činjenice vezane za sistemski rizik u pogledu magnitude DC ispitne struje (videti odeljak 2.5.3), predlog za raspon moguće magnitude DC ispitne struje je problematičan. Takođe, iz sistemskih razloga, za aktivno VN postrojenje, problematičan je i predlog za raspon AC ispitne struje.

³⁹ Koristimo naziv i odgovarajuću skraćenicu na engleskom jeziku radi radi jasne distinkcije u odnosu na HCM.



Slika 27 [2] *Principalska šema mernog sistema (HCM) za ispitivanje kontinuiteta uzemljenja*

4.2 Osnovni problemi vezani za ispitivanja kontinuiteta na bazi HCM

HCM predstavlja praktično pojednostavljeno (aproksimaciju) metoda opisanog u odeljku 3.2.1. U tom pogledu, bitne su dve osobine konvencionalnog HCM:

- (a) naponi i struje na zemljovodima su praktično merljivi (zahvaljujući velikoj ispitnoj struji) i
- (b) vrlo složeni analitički postupak vezan za utvrđivanje kontinuiteta ekvivalentne rezistivne mreže zamenjen je sa subjektivnom inženjerskom ekspertizom.

Komentar osobine (a). Propuštanjem ispitne struje između referentnog uzemljenja i ispitivanog zemljovoda, generiše se određeni pad napona između posmatranih tačaka. Taj napon treba meriti. Stoga, u praktičnim uslovima, pomenuti napon mora biti barem reda 100 mV. To se može ostvariti jedino sa velikom magnitudom ispitne struje. Dalje, izmerene vrednosti padova napona između referentne tačke i različitih zemljovoda međusobno se upoređuju i po osnovu takvog poređenja zaključuje se o mogućem defektu u sistemu uzemljenja. Naravno, pad napona zavisi od fizičkog rastojanja između tačaka na koje se merenje odnosi. U prostorno velikim VN postrojenjima rastojanja mogu biti reda 100 m, pa je pomenuto poređenje problematično.

Komentar osobine (b). Osnovna ideja na kojoj bazira konvencionalni HCM odnosi se na činjenicu da se električna otpornost, R_l , između dve tačke mrežastog uzemljivača, može

aproksimirati sa otporom R_2 , gde je R_2 električna otpornost provodnika koji na pravolinijskom rastojanju povezuje razmatrane tačke. Dakle, ako je $R_1 \leq R_2$ tada je $U_{R1} \leq U_{R2}$, gde je U_{Ri} pad napona na otporniku R_i ($i=1,2$).

U skladu sa opisanom osnovnom idejom, HCM definiše dva parametra: najveći prihvatljivi pad napona i tzv. neposredno okruženje. Tako, za ispitnu struju od 300 A i uzemljivačke provodnike izrađene od bakarnih užadi (1/0 AWG⁴⁰) najveći prihvatljivi pad napona na pravolinijskom referentnom rastojanju od 50 ft (15.24 m) između referentnog uzemljenja i ispitivanog zemljovoda iznosi⁴¹ 1.5 V. Neposredno okruženje definiše se kao pravolinijsko rastojanje između grupe zemljovoda i referentnog uzemljenja. U svakom slučaju, neposredno okruženje definiše se na subjektivnoj osnovi, tj. prema intuiciji ispitivača.

Logično je što HCM predviđa i merenje dela ispitne struje koja sa ispitivanog zemljovoda teče u mrežasti uzemljivač. Međutim, HCM ne definiše jasan kriterijum u pogledu korišćenja rezultata takvog merenja.

4.3 Novi metod: A-HCM

4.3.1 Opšte

Očigledno, zbog praktičnih i ekonomskih⁴² razloga, potrebno je objektivizovati konvencionalni HCM. Drugim rečima, treba precizno definisati odgovarajuće objektivne kriterijume za ocenu stanja kontinuiteta sistema uzemljenja. U vezi sa tim treba voditi računa o specifičnostima VN postrojenja različitog naponskog nivoa. Za rešavanje takvog istraživačkog zadatka, pre svega, neophodan je reprezentativni skup rezultata koji su dobijeni primenom HCM. U tom pogledu, izvršena je sistematska analiza uspešnih i neuspešnih ispitivanja realizovanih primenom HCM, a koje je ranije sproveo Elektrotehnički institut

⁴⁰ AWG predstavlja skačenicu od *American Wire Gauge*. AWG definiše dimenzije provodnika prema normama koje se primenjuju u SAD. Oznaka 1/0 označava dimenziju provodnika, pri čemu važi pravilo da što veći broj uz AWG, manja je dimenzija provodnika. AWG 1/0 ima površinu poprečnog preseka 53.4 mm².

⁴¹ Ovde je $U = R \cdot I$, gde je I intenzitet ispitne struje, $R = \rho \cdot l / S$, ρ je vrednost specifične električne otpornosti provodnika, l je dužina provodnika i S je površina poprečnog preseka provodnika.

⁴² Krajnji ishod ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja svodi se na sumnju da je određeni provodnik u sistemu uzemljenja oštećen. Radi eventualne popravke neophodno je otkopavanje na sumnjivoj poziciji. To je vezano za odgovarajuće troškove i vreme. Ako je sumnjiva pozicija(e) pogrešno označena(e) troškovi i vreme za opravku oštećenja rastu. S druge strane, produženo trajanje kvara povećava sigurnosni rizik.

“Nikola Tesla”, Beograd. Analiza je obuhvatila rezultate ispitivanja u tri transformatorske stanice 400/X kV, tri transformatorske stanice 220/X kV i dvanaest transformatorskih stanica 110/X kV. Opažanja proistekla iz pomenute analize predstavljaju osnovu za formiranje konzistentnog skupa predloga u cilju poboljšanja HCM.

Poboljšanje HCM ima tri aspekta:

- definisanje vrste i praktično prihvatljivog intenziteta ispitne struje,
- promenu i dopunu vezanu za prikupljanje rezultata u procesu merenja i
- definisanje kriterijuma za obradu rezultata dobijenih u procesu merenja.

Na ovom mestu, objasnićemo prvi aspekt. Drugi i treći aspekt biće razmotreni u odgovarajućem kontekstu u odeljku 4.2.2.

Sa jedne strane, polazeći od uslova da ispitna struja ne sme biti invazivna za ispitivano aktivno VN postrojenje, a sa druge strane da verodostojnost merenja bitno zavisi od potiskivanja uticaja konduktivnih i induktivnih smetnji, a što podrazumeva relativno veliku magnitudu ispitne struje, razmotrićemo posebno primenu DC i AC ispitne struje.

Eventualna odluka za primenu DC ispitne struje, saglasno razmatranjima u odeljku 2.5.3, podrazumeva da intenzitet struje treba da bude ograničen na vrednost ne veću od 100 A, a da trajanje prisustva struje u ispitnom kolu treba da bude ne duže od reda desetak sekundi. Pošto se očitavanje rezultata merenja može obaviti u navedenom vremenskom intervalu, bitno je da se utvrdi da li je ograničenje po osnovu intenziteta na oko 100 A realno. Drugim rečima, postavlja se pitanje: da li struja od 100 A, u različitim sistemima uzemljenja može obezbediti merljive napone (reda 100 mV) između susednih zemljovoda? U vezi s tim, na osnovu velikog broja probnih merenja koje smo obavili na mrežastim uzemljivačima izrađenim od različitih varijanti bakarnih provodnika, konstatovan je pozitivan odgovor na postavljeno pitanje. Pored toga, primenom DC ispitne struje eliminišu se induktivne, a u značajnoj meri i konduktivne smetnje koje nepovoljno utiču na tačnost merenja. Dakle, DC ispitna struja, čiji je intenzitet 100 A, pogodna je za ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja. Pre početka ispitivanja kontinuiteta i primene DC ispitne struje obavezno treba proveriti nivo GIC.

Ako je VN postrojenje neaktivno ispitivanje kontinuiteta primenom AC struje pri frekvenciji reda 10 Hz, uključujući i ispitnu struju na 50 Hz, moguće je. Intenzitet AC ispitne struje treba da je oko 100 A (argumentacija je slična onoj koja je navedena u kontekstu razmatranja intenziteta DC ispitne struje). Sa druge strane, razmatranje mogućnosti eventualne primene AC ispitne struje za potrebe ispitivanja kontinuiteta aktivnog VN postrojenja je složen zadatak. Suština problema odnosi se na činjenicu da, u opštem slučaju kada je ispitna frekvencija 50 Hz ili je jednostavno veća od nekoliko herca, sistem uzemljenja

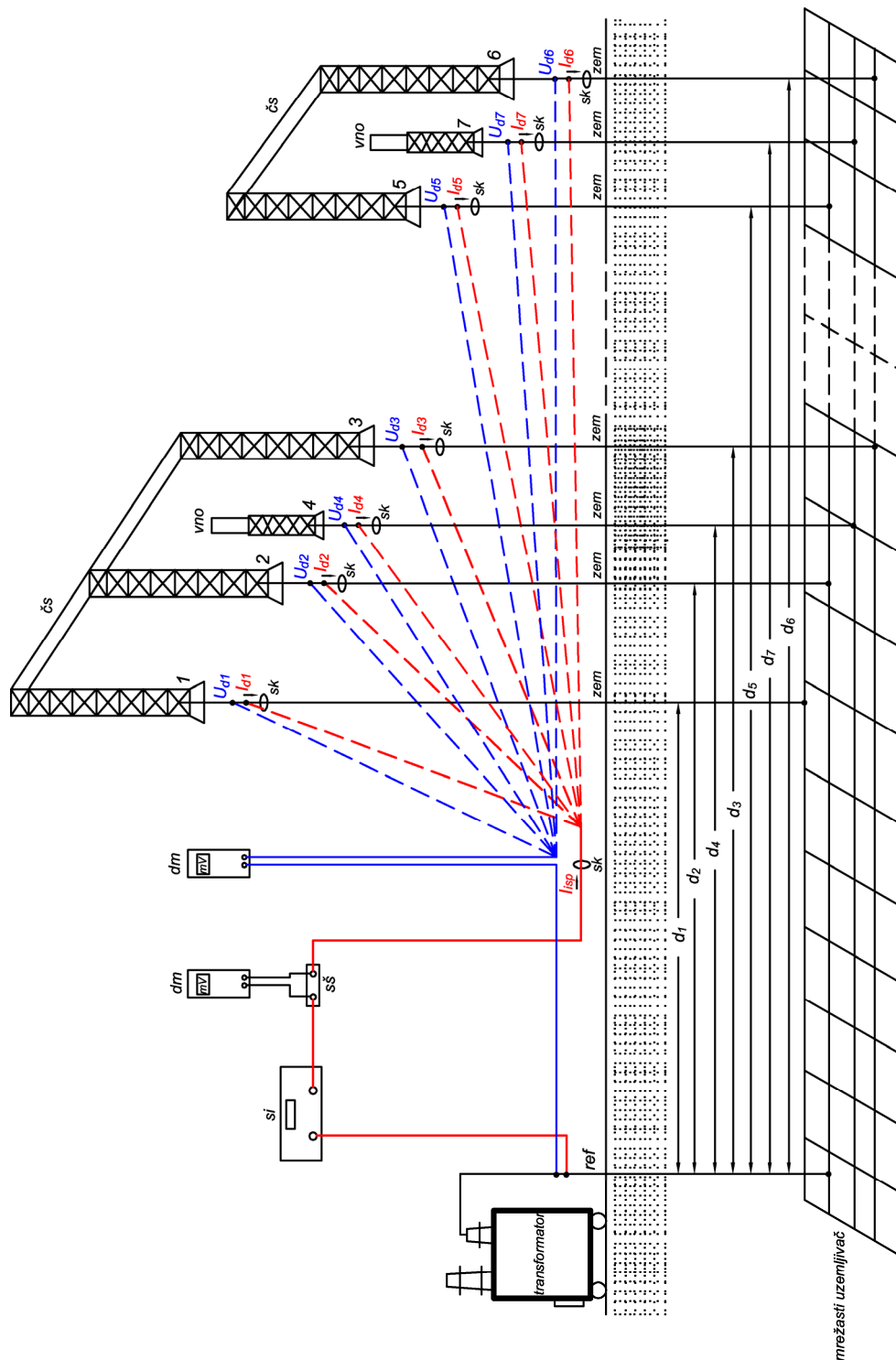
aktivnog VN postrojenja ima impedantne osobine. Sa druge strane, princip ispitivanja kontinuiteta opisan u odeljku 3.2.1, kao i pojednostavljena verzija predložena u [2], podrazumeva da se mrežasti uzemljivač razmatra kao otpornička mreža. Mogući put za rešenje uočenog problema odnosi se na ispitivanje kontinuiteta korišćenjem FSM (videti Poglavlje 5) uključujući i procenu vrednosti otpornosti ispitivanog segmenta mrežastog uzemljivača na 0 Hz. Za takvu namenu treba izabrati odgovarajući skup od tri pomerene frekvencije. Taj skup različit je od onog predloženog i elaboriranog u Poglavlju 5. Pogodno je što bi, u ovom kontekstu, zahtevani intenzitet test struje bio reda 1 A. Dalje, u tom slučaju, svako ispitivanje kontinuiteta treba obaviti na tri frekvencije. U VN postrojenjima broj zemljovoda je reda deset ili je čak veći od 100. Dakle, broj merenja relevantnih za ispitivanje kontinuiteta je vrlo veliki. Dodatno, u razmatroju primeni AC ispitne struje, broj merenja koje treba obaviti tri puta je veći nego u slučaju primene DC ispitne struje. Ovo je očigledno dodatni problem ako je merenje manuelno. Međutim, ako je proces merenja automatizovan, ispitivanje kontinuiteta aktivnog VN postrojenja primenom FSM može biti praktično, pouzdano i ekonomično.

U ovoj disertaciji, primarni zadatak odnosi se na poboljšanje konvencionalnog HCM. Dakle, imajući u vidu primarni zadatak s jedne strane, a sa druge strane složenost primene AC ispitne struje, opredeljujemo se, da za potrebe ove disertacije, ispitivanja izvršimo primenom DC ispitne struje čiji je intenzitet 100 A. Primenom DC ispitne struje, biće praktično dokazano predloženo poboljšanje konvencionalnog HCM. Poboljšani HCM može biti direktno primenljiv i za neku buduću implementaciju automatizovanog FSM ispitivanja kontinuiteta sistema uzemljenja.

Analogno definiciji uvedenoj u odeljku 4.2, najveći prihvatljivi pad napona za DC ispitnu struju od 100 A, na pravolinijskom rastojanju 15.24 m, iznosi 525 mV, pa pad napona po dužnom metru iznosi 34.4 mV. Podaci se odnose na tipični slučaj kada je mrežasti uzemljivač izrađen na bazi provodnika od meko valjanog bakarnog užeta čija je površina poprečnog preseka 50 mm^2 . Na pravolinijskom rastojanju d [m], između referentnog uzemljenja i ispitivanog zemljovoda, pad napona označićemo sa $U_{pd} = d \cdot 34.5 \text{ mV}$. U daljem tekstu navedeni pad napona nosiće naziv proračunata (referentna) vrednost pada napona.

4.3.2 Blok šema mernog sistema

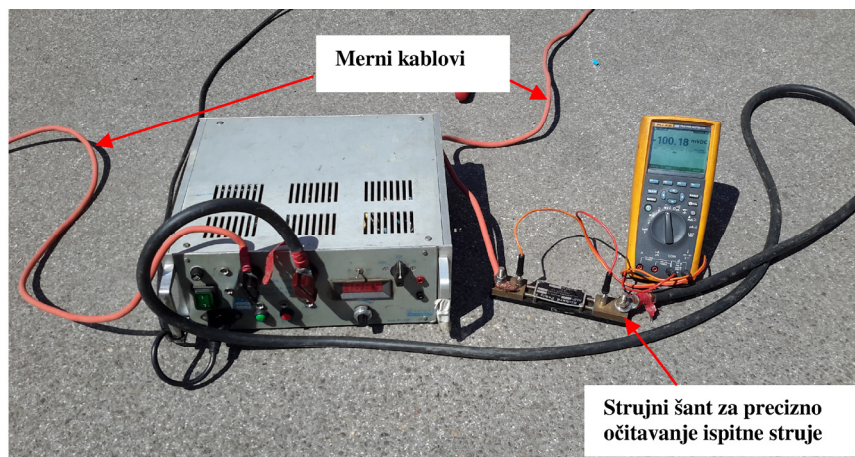
Na slici 28 prikazana je blok šema mernog sistema (A-HCM) za ispitivanje kontinuiteta



Slika 28 Blok šema mernog sistema (A-HCM) za ispitivanje kontinuiteta mrežastog uzemljivača VN postrojenja

mrežastog uzemljivača VN postrojenja. Oznake na slici 28 imaju sledeće značenje: *ref* - referentno uzemljenje (zemljovod neutralne tačke energetskog transformatora), I_{isp} - ispitna struja (100 A DC), U_{di} - izmerena vrednost pada napona, I_{di} - izmerena vrednost struje koja se

sa ispitivanog zemljovoda spušta na mrežasti uzemljivač, d_i -pravolinijsko rastojanje između ispitivanog zemljovoda i referentnog uzemljenja, i -brojna vrednost koja se odnosi na poziciju zemljovoda, $s\check{s}$ -strujni šant (100 A/100 mV), si -naponski regulisan izvor jednosmerne struje (0-25 V, 0-100 A; slika⁴³ 29), dm -digitalni multimeter (Fluke 289), crvena linija-strujno ispitno kolo (dužina provodnika 120 m, presek provodnika 16 mm²), plava linija-naponsko ispitno kolo (dužina provodnika 120 m, presek provodnika 2.5 mm²), zem -zemljovod, sk -digitalni multimeter sa strujnim klješćima (Fluke 325), $\check{c}s$ -višestruko uzemljena čelična struktura, vno -visokonaponska oprema.



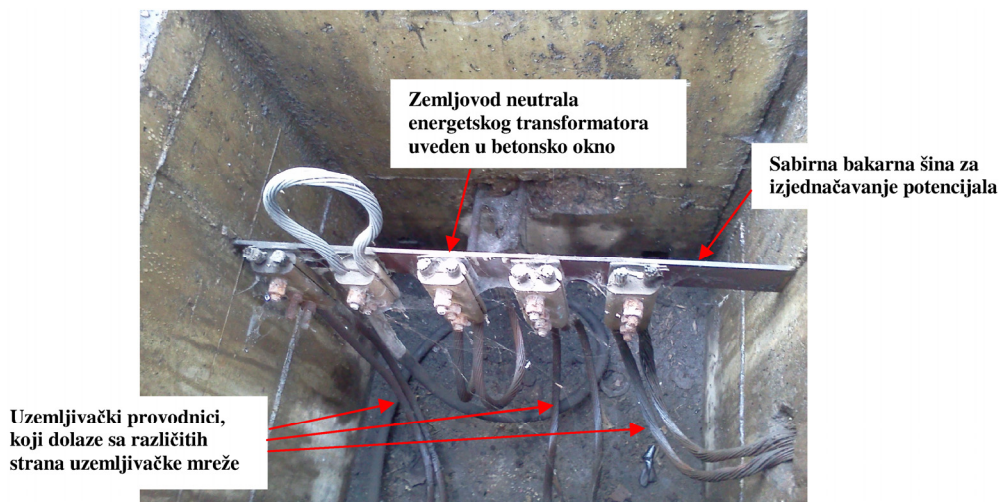
Slika 29 *Naponski regulisan DC izvor (0-25 V, 0-100 A), sa mernim kablovima i strujnim šantom (100 A/100 mV)*

Prilikom ispitivanja kontinuiteta mrežastog uzemljivača u transformatorskim stanicama ili drugim VN postrojenjima, kada je to izvodljivo, zemljovod neutralne tačke energetskog transformatora preporučljivo je iskoristiti kao referentno uzemljenje (videti sliku 30). U slučaju prostranih transformatorskih stanica javlja se potreba za većim brojem referentnih tačaka, jer je neizvodljivo, zbog dužine provodnika ispitnog kola, ispitati sve zemljovode visokonaponske opreme i uzemljenih metalnih masa u odnosu na jednu referentnu tačku. Svaka nova referentna tačka mora biti prethodno ispitana, tj. treba proveriti da li ima galvansku vezu sa mrežastim uzemljivačem. Svaki zemljovod koji zadovolji pomenuto ispitivanje može biti iskorišćen kao nova referentna tačka. Za predmetnu namenu najpovoljniji su zemljovodi višestruko uzemljenog elementa u sredini teritorije mrežastog uzemljivača, napr. višestruko uzemljeni portali međusobno povezani poprečnim portalnim vezama, trolni prekidač na zajedničkom nosaču, sabirnički i izlazni rastavljači.

⁴³ Ovu i sve naredne fotografije u disertaciji snimio je autor.



(a)



(b)

Slika 30 (a) Povezivanje neutrala energetskog transformatora sa sistemom uzemljenja, (b) stanje u betonskom oknu

Strujno i naponsko ispitno kolo uspostavljaju se posebno (videti provodnike označene crvenom i plavom bojom na slici 28). Na ovaj način, izmerena vrednost napona ne sadrži pad napona na provodnicima strujnog ispitnog kola. Takođe, ni promene električne otpornosti provodnika strujnog ispitnog kola koje su posledica zagrevanja provodnika usled proticanja ispitne struje, nemaju uticaj na izmerene vrednosti napona.

Pošto se koristi DC ispitna struja, eventualna DC smetnja (tipično GIC) može da predstavlja problem. U našoj mernoj kampanji DC smetnja nije predstavljala ozbiljan problem, ali se uticaj iste mora imati u vidu zbog univerzalnosti primene A-HCM.

4.3.3 Merna procedura i obrada rezultata merenja

Prvi korak (formalno označen kao **Korak I**) odnosi se na precizno definisanje neposrednog okruženja ispitivanog zemljovoda. Ovde se predlaže da neposredno okruženje ispitivanog zemljovoda bude oblast oivičena kružnicom čiji je radijus direktno proporcionalan pravolinijskom rastojanju između ispitivanog zemljovoda i referentnog uzemljenja. Radi boljeg uvida u osnovanost predloga posmatrajmo zemljovod - slika 28, pozicija 4. Neka je $d_1 \approx d_2 \approx d_3 \approx d_4$ (d_i je pravolinijsko rastojanje između ispitivanog zemljovoda i referentnog uzemljenja), pa je $U_{d1} \approx U_{d2} \approx U_{d3} \approx U_{d4}$. Očigledno je da sličan odnos važi i za proračunatu vrednost pada napona U_{pi} , tj. $U_{p1} \approx U_{p2} \approx U_{p3} \approx U_{p4}$. Dakle, za zemljovod na poziciji 4 susedni zemljovodi su na pozicijama 1, 2 i 3.

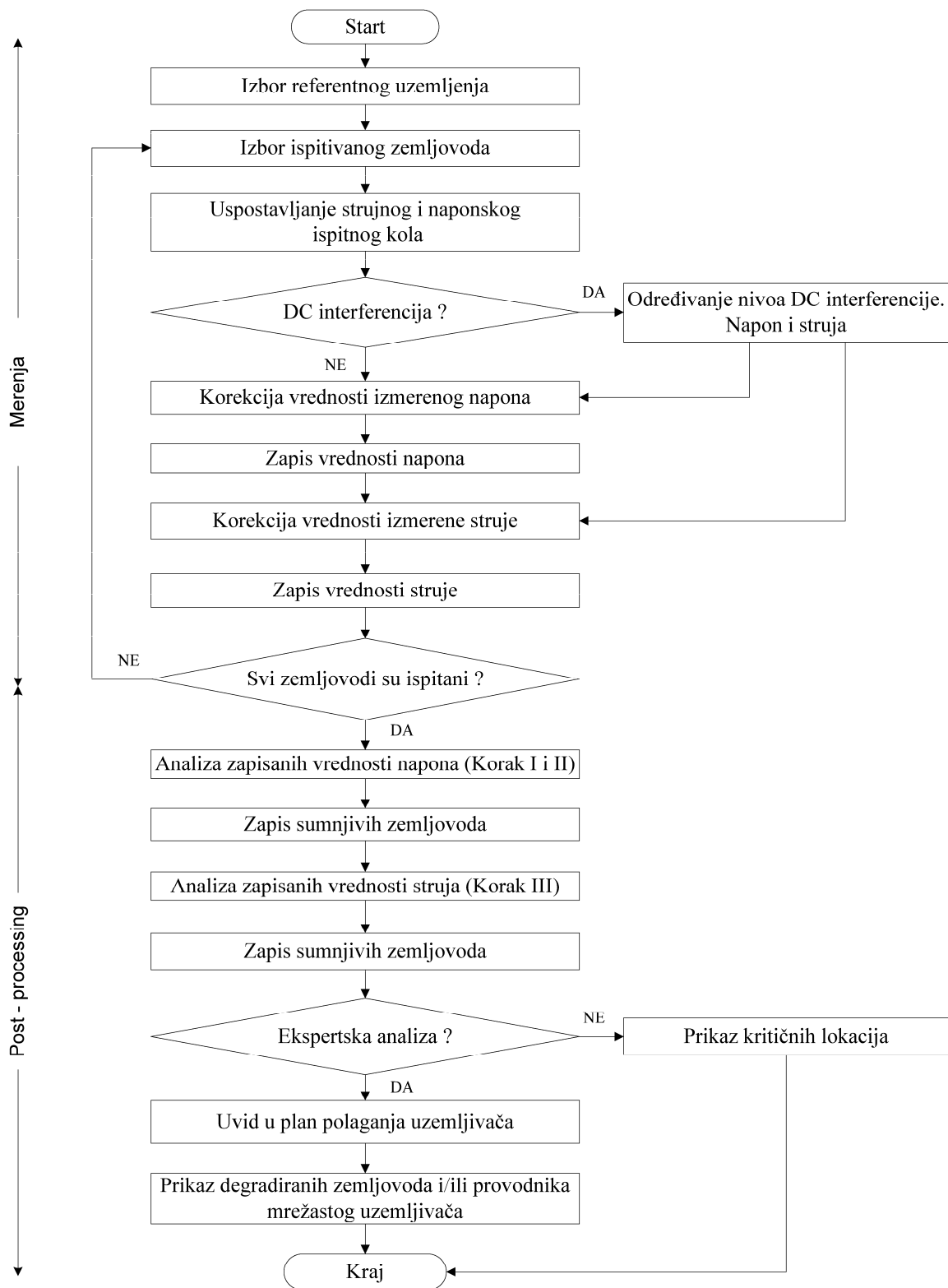
U drugom koraku (**Korak II**) vršimo poređenje U_{di} sa U_{pi} .

U trećem koraku (**Korak III**) merimo deo ispitne struje koja sa zemljovoda teče u uzemljivač.

Korak I i **Korak II** odnose se na naponska ispitivanja, dok se **Korak III** odnosi na ispitivanje struje. Dalje, za svaki od navedenih koraka definisani su odgovarajući kriterijumi. Kriterijumi zavise od naponskog nivoa VN postrojenja čije je uzemljenje predmet ispitivanja. Detaljan algoritam procesnih aktivnosti u toku ispitivanja primenom A-HCM prikazan je na slici 31.

Ishod nakon svakog koraka označava se sa **da** (kriterijum ispitivanja je zadovoljen) ili **ne** (kriterijum ispitivanja nije zadovoljen). Zemljovodi označeni sa **ne** u koracima **I** i **II** definitivno se mogu smatrati sumnjivim (defektnim). Ukoliko zemljovod i nakon trećeg koraka ima oznaku **ne**, može se smatrati da isti definitivno nije u funkciji. Konačna odluka uključuje sledeća tri scenarija.

- (a) ukoliko se ispostavi da su svi ispitani zemljovodi u VN postrojenju, u svim koracima ispitivanja bili označeni sa **da** (kriterijum ispitivanja je zadovoljen), može se zaključiti da postoji kontinuitet mrežastog uzemljivača;
- (b) ukoliko nakon **Koraka III** postoji zemljovod koji je označen sa **ne**, znači da je zemljovod oštećen;



Slika 31 Algoritam za prikupljanje i obradu rezultata merenja

(c) u slučaju da i posle **Koraka III** postoji grupa od nekoliko zemljovoda označenih sa **ne**, potrebna je ekspertna analiza. U tom slučaju, treba ostvariti uvid u plan polaganja uzemljivača, (plan je sastavni deo odgovarajuće projektne dokumentacije) radi preciznog lociranja defekta u sistemu uzemljenja.

Koraci i pripadajući kriterijumi definisani su na sledeći način.

Korak I: *Poređenje izmerene vrednosti pada napona na ispitivanom zemljovodu sa izmerenim vrednostima padova napona na zemljovodima u neposrednom okruženju.*

Da bi bio zadovoljen **Korak I**, izmerene vrednosti padova napona na ispitivanom i zemljovodima u neposrednom okruženju moraju biti ujednačene. Praktična primena ovog koraka zavisi od uslova sredine (rasporeda zemljovoda). Preciznije, razlikujemo tri slučaja.

Slučaj⁴⁴ **1:** Zemljovod u neposrednom okruženju *i*-tog zemljovoda nalazi se unutar kruga poluprečnika $0.2d_i$. Shodno tome, pad napona na bilo kom zemljovodu u neposrednom okruženju nalazi se u opsegu $(1\pm 0.15)U_{di}$.

Slučaj⁴⁵ **2:** Zemljovod u neposrednom okruženju *i*-tog zemljovoda nalazi se unutar kruga poluprečnika $0.1d_i$. Shodno tome, pad napona na bilo kom zemljovodu u neposrednom okruženju nalazi se u opsegu $(1\pm 0.1)U_{di}$.

Slučaj⁴⁶ **3:** Ukoliko je $d_i < 10$ m zemljovod u neposrednom okruženju *i*-tog zemljovoda nalazi se unutar kruga poluprečnika $0.4d_i$. Shodno tome, pad napona na bilo kom zemljovodu u neposrednom okruženju nalazi se u opsegu $(1\pm 0.15)U_{di}$.

Korak II: *Poređenje izmerene i proračunske vrednosti pada napona.*

Da bi bio zadovoljen **Korak II**, izmerene vrednosti padova napona U_{di} moraju biti manje od proračunatih vrednosti U_{pi} . Na teritoriji mrežastog uzemljivača razmatra se najgori mogući scenario, tj. smatra se da su referentno uzemljenje i ispitivani zemljovod povezani jednim jednostrukim uzemljivačkim provodnikom.

⁴⁴ Ovaj slučaj se odnosi na mrežaste uzemljivače koji su tipični za transformatorske stanice 110/X kV.

⁴⁵ Ovaj slučaj odnosi se na mrežaste uzemljivače interkonektivnih transformatorskih stanica (površina transformatorske stanice >20000 m²) nazivnog napona 220 kV i 400 kV. Pošto u postupku formiranja nije bio raspoloživ reprezentativan broj odgovarajućih VN objekata, navedeni kriterijum treba uzeti sa dozom rezerve.

⁴⁶ Ovaj slučaj je univerzalan.

Korak III: *Merenje struje kroz ispitivani zemljovod.*

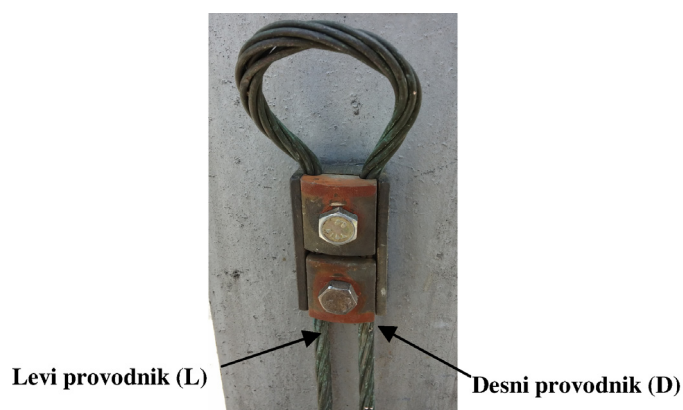
Slučaj 1: Izmerena vrednost struje I_{di} kroz i -ti zemljovod treba da zadovolji sledeći kriterijum

$$I_{di} \geq \frac{I_{isp}}{n} \quad (28)$$

gde je I_{isp} ispitna struja (100 A DC), a n je ukupan broj zemljovoda koji su međusobno paralelno povezani preko odgovarajuće nadzemne čelične strukture.

Slučaj 2: Ukoliko je ispitivani zemljovod izveden po sistemu ulaz-izlaz, napr., sa dvostrukim bakarnim užetom⁴⁷, potrebno je izmeriti struju posebno kroz levi (L) i posebno kroz desni (D) provodnik (slika 32).

Da bi se ispunio kriterijum ispitivanja u **Koraku III** odnos I_{diL}/I_{di} (ili I_{diD}/I_{di}) treba da bude u opsegu 0.4 do 0.6.



Slika 32 *Prikaz zemljovoda izrađenog od dvostrukog bakarnog užeta*

Napomena 1: U **Koraku I** zemljovodi se grupišu unutar kruga čiji poluprečnik zavisi od pravolinijskog rastojanja između ispitivanog zemljovoda i referentnog uzemljenja. Po pravilu, grupa mora sadržati najmanje dva zemljovoda. Empirijski su ustanovljeni poluprečnici kružnica r_i ($0.2d_i$, $0.1d_i$ i $0.4d_i$ za slučajeve 1, 2 i 3, respektivno). Takođe, empirijski su ustanovljeni i opsezi izmerenih vrednosti padova napona na zemljovodima unutar kruga.

Napomena 2: U cilju praktične implementacije A-HCM, prilikom periodičnih ispitivanja kontinuiteta mrežastog uzemljivača, potrebno je uporediti izmerene vrednosti (napone i

⁴⁷ Tipični zemljovod u VN postrojenjima sa velikim vrednostima struje kvara (reda 10 kA)

struje) sa vrednostima zabeleženim u prethodnom ispitivanju (ukoliko su iste dostupne). Iz iskustva autora, ukoliko nema defekata u mrežastom uzemljivaču, razlika između vrednosti zabeleženih u prethodnom periodičnom ispitivanju i aktuelnih vrednosti ne sme biti veća od 10% (naravno, pri približno istim meteo-uslovima).

4.4 Eksperimentalna verifikacija

4.4.1 Izbor VN postrojenja

U cilju eksperimentalne verifikacije A-HCM, u tekstu koji sledi, biće detaljno elaborirano ispitivanje kontinuiteta mrežastog uzemljivača u transformatorskoj stanici 110/10.5 kV hidroelektrane Uvac (slika 33).

Pomenuto ispitivanje je jedno od ukupno šesnaest ispitivanja izvršenih primenom A-HCM u različitim VN objektima. Rezultati preostalih petnaest nalaza, po osnovu primene A-HCM, biće samo ukratko komentarisani.

Mrežasti uzemljivač i zemljovodi VN opreme izrađeni su od meko valjanih bakarnih užadi poprečnog preseka 50 mm^2 . Mrežasti uzemljivač navedenog objekta nije bio predmet ranijih ispitivanja kontinuiteta uzemljenja primenom A-HCM.



(a)



(b)

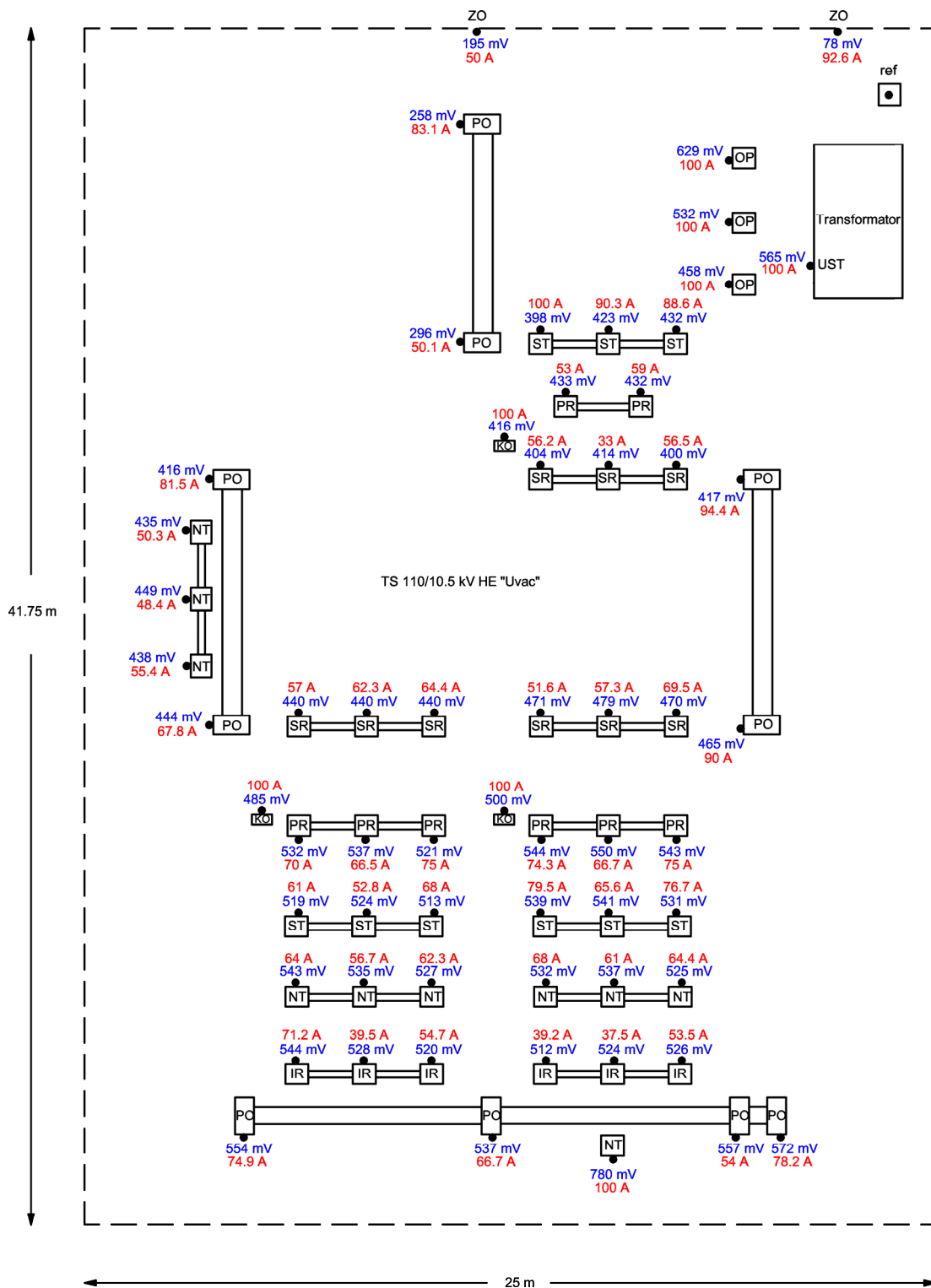


(c)

Slika 33 Transformatorska stanica 110/10.5 kV hidroelektrane Uvac (Nova Varoš) iz tri perspektive (a), (b) i (c)

4.4.2 Sirovi podaci merenja

Na slici 34 prikazan je raspored VN opreme i uzemljenih metalnih masa u transformatorskoj stanici 110/10.5 kV hidroelektrane Uvac. Na slici su upisani rezultati



Slika 34 Skica TS 110/10.5 kV HE Uvac sa upisanim rezultatima merenja (tzv. sirovi rezultati)

merenja napona i struje za ispitane zemljovode. Za te rezultate kažemo da su sirovi, jer zahtevaju dodatnu obradu. U procesu merenja samo ih memorišemo i tako formiramo bazu

podataka. Sirove rezultate analiziramo u fazi *postprocessinga*. Oznake na slici 34 imaju sledeće značenje: IR – izlazni rastavljač, KO - komandni orman, NT - naponski merni transformator, OP - odvodnik prenapona, PR - trofazni prekidač, PO - portal, ref - referentno uzemljenje, SR - sabirnički rastavljač, ST - strujni merni transformator, UST - uzemljenje suda transformatora, ZO - zaštitna ograda transformatorske stanice.

4.4.3 Obrada rezultata merenja

U principu, analiza rezultata merenja, radi utvrđivanja mesta kvara u sistemu uzemljenja, može se obaviti manuelno. Međutim, zbog velikog broja mernih pozicija to je zamoran posao koji iziskuje mnogo vremena. Radi toga, razvili smo softverski alat za obradu (*postprocessing*) sirovih rezultata ispitivanja. U slučaju prostranih VN postrojenja, softverski zasnovana analiza predstavlja jedino praktično i pouzdano rešenje.

Na ovom mestu, radi detaljnog uvida u način obrade rezultata merenja (slika 34), prikazaćemo analizu korak po korak.

Na slici 35 prikazane su pozicije mernih mesta, a označene su kao # i (gde je, $i=1$ do 61).

Korak I. Saglasno Koraku I, *slučaj 1*, opisujemo kružnicu oko svakog zemljovoda koji je predmet ispitivanja i proveravamo napone na zemljovodima u tako definisanom neposrednom okruženju, a po kriterijumu: Korak I, *slučaj 1* (jer je u pitanju transformatorska stanica 110/X kV). Poluprečnik kruga r_i , direktno je srazmeran pravolinijskom rastojanju, d_i , između ispitivanog zemljovoda i referentnog uzemljenja. Sa ovako uspostavljenom grafičkom podlogom i koristeći rezultate merenja sa slike 34 analiziramo pojedinačno sve raspoložive zemljovode. Tim putem dolazimo do tzv. sumnjivih pozicija u Koraku I.

Radi preglednosti, ovde ćemo napraviti izvod iz pomenute kompletne izvršene analize. Naime, dalje se fokusiramo samo na pronađene sumnjive pozicije u ovom Koraku. U ovom slučaju to su: pozicije: #4, #5, #6, #7 i #59 (videti sliku 35).

Vodeći računa o stanju na slikama 35 i 34, sada treba uporediti izmerene vrednosti padova napona na sledećim pozicijama:

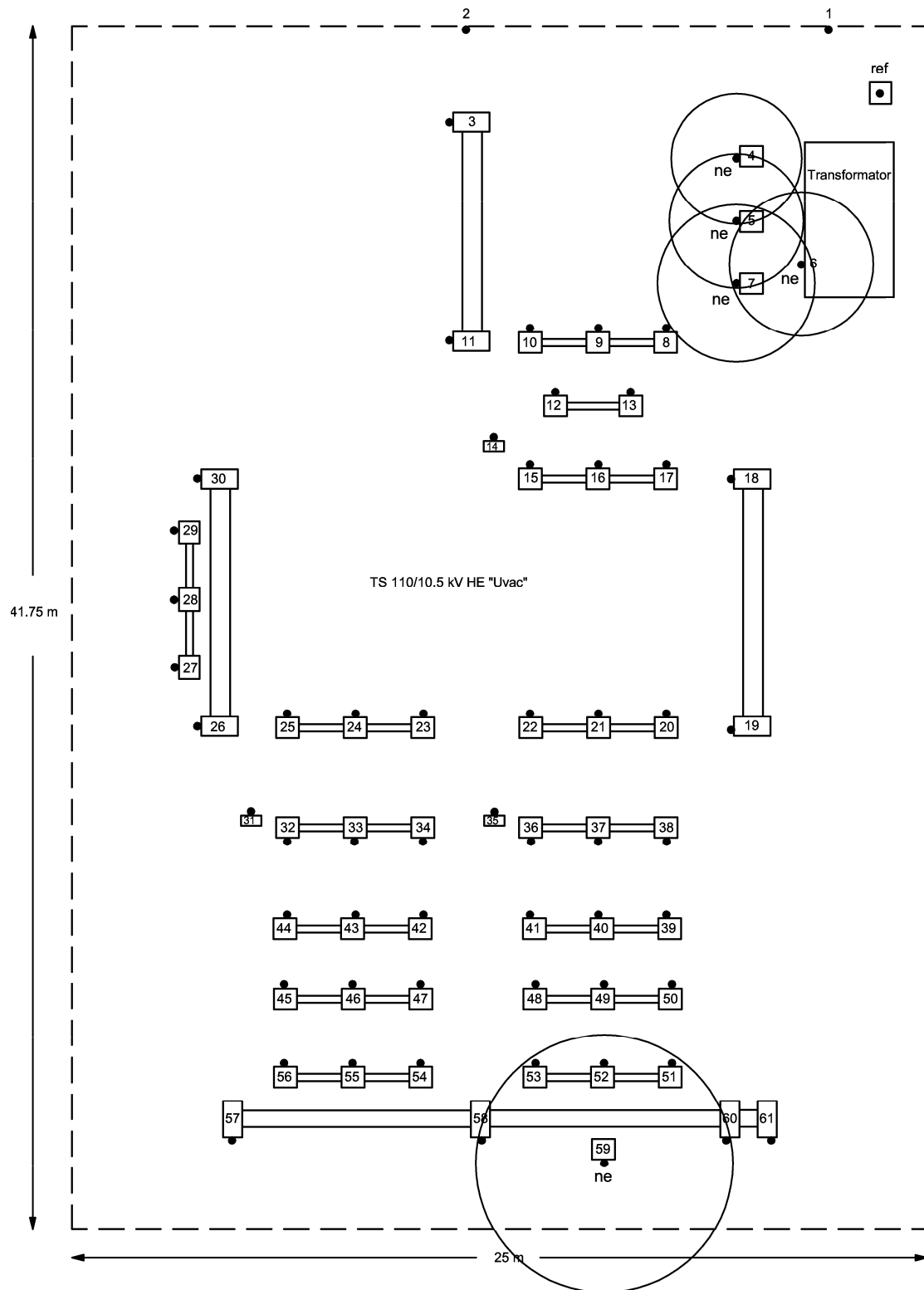
#4 (629 mV) sa #5 (532 mV)

#5 (532 mV) sa #4 (629 mV) i #7 (458 mV)

#6 (565 mV) sa #7 (458 mV)

#7 (458 mV) sa #5 (532 mV) i #6 (565 mV)

#59 (780 mV) sa #51 (526 mV), #52 (524 mV), #53 (512 mV), #58 (537 mV) i #60 (557 mV)



Slika 35 Analiza neposredne okoline. Prikazane su neposredne okoline samo za zemljovode koji nisu zadovoljili **kriterijum I** (zemljovodi označeni sa **ne**).

Pozicija #4 : Saglasno kriterijumu za naponska ispitivanja za poziciju #4 imamo:

$$629 \text{ mV} \cdot (1-0.15) = 534.65 \text{ mV} \text{ i } 629 \text{ mV} \cdot (1+0.15) = 723.35 \text{ mV}$$

Dakle, prihvatljivi opseg izmerenih vrednosti padova napona na zemljovodima u neposrednom okruženju je: 534.65 mV do 723.35 mV. Da li je izmerena vrednost pada napona na poziciji #5 (532 mV) unutar navedenog opsega? Ne. Dakle, poziciju #4 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #5: prihvatljivi opseg izmerenih vrednosti padova napona je: 452.2 mV do 611.8 mV. Da li su izmerene vrednosti padova napona na pozicijama #4 (629 mV) i #7 (458 mV) unutar navedenog opsega? Da, pozicija #7. Ne, pozicija #4. Definitivno, poziciju #5 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #6: prihvatljivi opseg izmerenih vrednosti padova napona je: 480.25 mV do 649.75 mV. Da li je izmerena vrednost pada napona na poziciji #7 (458 mV) unutar navedenog opsega? Ne. Dakle, poziciju #6 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #7: prihvatljivi opseg izmerenih vrednosti padova napona je: 389.3 mV do 526.7 mV. Da li su izmerene vrednosti padova napona na pozicijama #5 (532 mV) i #6 (565 mV) unutar navedenog opsega? Ne. Dakle, poziciju #7 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #59: prihvatljivi opseg izmerenih vrednosti padova napona je: 663 mV do 897 mV. Da li su izmerene vrednosti padova napona na pozicijama #51 (526 mV), #52 (524 mV), #53 (512 mV), #58 (537 mV) i #60 (557 mV) unutar navedenog opsega? Ne. Dakle, poziciju #59 treba označiti sa **ne**.

Korak II. Nakon ispitivanja sprovedenih na svim pozicijama prema kriterijumu koraka II, detektovane su tzv. sumnjive pozicije: #4, #5, #6, #7, #8, #9 i #13. Navedene pozicije dalje procesuiramo.

Pozicija #4: izmerena vrednost pada napona iznosi $U_{d4} = 629 \text{ mV}$. Pravolinijsko rastojanje između pozicije #4 i referentnog uzemljenja iznosi 5 m. Dakle, $U_{p4} = d_i [\text{m}] \cdot 34.4 [\text{mV/m}] = d_4 \cdot 34.4 = 5 \cdot 34.4 = 172 \text{ mV}$. Kako je $U_{d4} > U_{p4}$, poziciju #4 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #5: $U_{d5} = 532 \text{ mV}$, $d_5 = 6.5 \text{ m}$, $U_{p5} = 6.5 \cdot 34.4 = 223.6 \text{ mV}$. Kako je $U_{d5} > U_{p5}$, poziciju #5 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #6: $U_{d6} = 565 \text{ mV}$, $d_6 = 6.3 \text{ m}$, $U_{p6} = 6.3 \cdot 34.4 = 216.7 \text{ mV}$. Kako je $U_{d6} > U_{p6}$, poziciju #6 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #7: $U_{d7} = 458 \text{ mV}$, $d_7 = 8 \text{ m}$, $U_{p7} = 8 \cdot 34.4 = 275.2 \text{ mV}$. Kako je $U_{d7} > U_{p7}$, poziciju #7 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #8: $U_{d8} = 432 \text{ mV}$, $d_8 = 10 \text{ m}$, $U_{p8} = 10 \cdot 34.4 = 344 \text{ mV}$. Kako je $U_{d8} > U_{p8}$, poziciju #8 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #9: $U_{d9} = 423 \text{ mV}$, $d_9 = 11.5 \text{ m}$, $U_{p9} = 11.5 \cdot 34.4 = 395.6 \text{ mV}$. Kako je $U_{d9} > U_{p9}$, poziciju #9 treba označiti sa **ne**.

Pozicija #13: $U_{d13} = 432 \text{ mV}$, $d_{13} = 12.5 \text{ m}$, $U_{p13} = 12.5 \cdot 34.4 = 430 \text{ mV}$. Kako je $U_{d13} > U_{p13}$, poziciju #13 treba označiti sa **ne**.

Sumarno, pozicije #4, #5, #6, i #7 nisu zadovoljile kriterijume naponskih ispitivanja (Korak I i Korak II).

Korak III. Propuštanjem ispitne struje (DC, 100 A), između referentnog uzemljenja i ispitivanog zemljovoda, može se očitati vrednost struje, koja sa zemljovoda na *#i-toj* poziciji, I_{di} , teče na mrežasti uzemljivač. Ovde koristimo kriterijum: Korak III, *slučaj 1*.

Ako je zemljovod izveden sa dvostrukim bakarnim užetom, za levi (L) i desni (D) provodnik (slika 32), treba posebno izmeriti vrednost struje, koja sa levog (I_{diL}) odnosno desnog (I_{diD}) provodnika teče na mrežastu elektrodu. U tom slučaju koristi se kriterijum: Korak III, *slučaj 2*.

Zbog razloga preglednosti, na slici 34 nisu navedene posebno vrednosti struja I_{diL} i I_{diD} za svaku poziciju, već samo ukupna vrednost struje kroz ispitivani zemljovod I_{di} . Vrednosti struja kroz levi i desni provodnik I_{diL} i I_{diD} , bez uticaja na opštost, biće ramatrane samo za pojedine pozicije.

Ispitujući svaku poziciju prema kriterijumu koraka III, detektovane su tzv. sumnjive pozicije: **#59** ($I_{d59} = 100$ A, $I_{d59L} = 0$ A, $I_{d59D} = 100$ A) i **#60** ($I_{d60} = 54$ A, $I_{d60L} = 54$ A, $I_{d60D} = 0$ A). Pojašnjenje izbora sumnjivih pozicija biće prikazano u tekstu koji sledi.

Pozicija #59. Ukupna vrednost struje kroz zemljovod iznosi $I_{d59} = 100$ A. Pozicija zadovoljava *slučaj 1*, Koraka III. Naime, kriterijum glasi $I_{di} \geq I_{isp}/n$. Pošto je reč o jednostruko uzemljenom elementu, usvajamo $n = 1$. Sledi, $I_{isp}/n = 100/1 = 100$, tj. $I_{d59} = I_{isp}$. Međutim, vrednost struje kroz levi provodnik zemljovoda iznosi $I_{d59L} = 0$ A. Vrednost struje kroz desni provodnik zemljovoda je $I_{d59D} = 100$ A. Očigledno, došlo je do degradacije levog provodnika zemljovoda na poziciji **#59**. Naravno, navedena činjenica je u saglasnosti sa kriterijumom koji se odnosi na *slučaja 2*. Naime, $I_{d59L}/I_{di} = 0/100 = 0$, $I_{d59D}/I_{di} = 1$. Kako je $0 < 0.4$ i $1 > 0.6$ nije zadovoljen uslov kriterijuma definisan za *slučaja 2*. Dakle, zemljovod na poziciji **#59** je oštećen.

Kao što je i prikazano na slici 35, zemljovodi na pozicijama: **#57**, **#58**, **#60** and **#61** međusobno su povezani nadzemnom čeličnom konstrukcijom portalnih stubova, te se isti može tretirati kao višestruko uzemljeni element. Dakle, u konkretnom slučaju usvajamo $n = 4$. Lako je zaključiti da zemljovodi na pozicijama **#57** ($I_{d57} = 74.9$ A, $I_{d57L} = 35.2$ A, $I_{d57D} = 39.7$ A), **#58** ($I_{d58} = 66.7$ A, $I_{d58L} = 36.7$ A, $I_{d58D} = 30$ A) i **#61** ($I_{d61} = 78.2$ A, $I_{d61L} = 37.1$ A, $I_{d61D} = 41.1$ A) zadovoljavaju uslove koraka III, *slučaj 1* i *slučaj 2*.

Pozicija #60. Ukupna struja koja sa zemljovoda teče na mrežasti uzemljivač je $I_{d60} = 54$ A. Primenjujući izraz $I_{isp}/n = 100/4 = 25$, dobija se $25 < 54$. Dakle, zemljovod na poziciji **#60** zadovoljava uslov Koraka III, *slučaj 1*. Međutim, kako je $I_{d60L} = 54$ A i $I_{d60D} = 0$ A, može se zaključiti da desni provodnik zemljovoda na poziciji **#60** nije u funkciji.

Zemljovodi na pozicijama **#59** i **#60** nisu zadovoljili kriterijume strujnih ispitivanja. Zapravo, oba zemljovoda su oštećena. Otkopavanjem (slika 36) i vizuelnom kontrolom utvrđeno je da je došlo do prekida zemljovoda. Na slici 37 prikazan je oštećeni zemljovod na poziciji **#59**.

Kako su zemljovodi na pozicijama **#4**, **#5**, **#6** i **#7** zadovoljili kriterijume strujnih ispitivanja, ali ne i naponskih, neophodna je odgovarajuća ekspertska analiza sumnjivih rezultata.

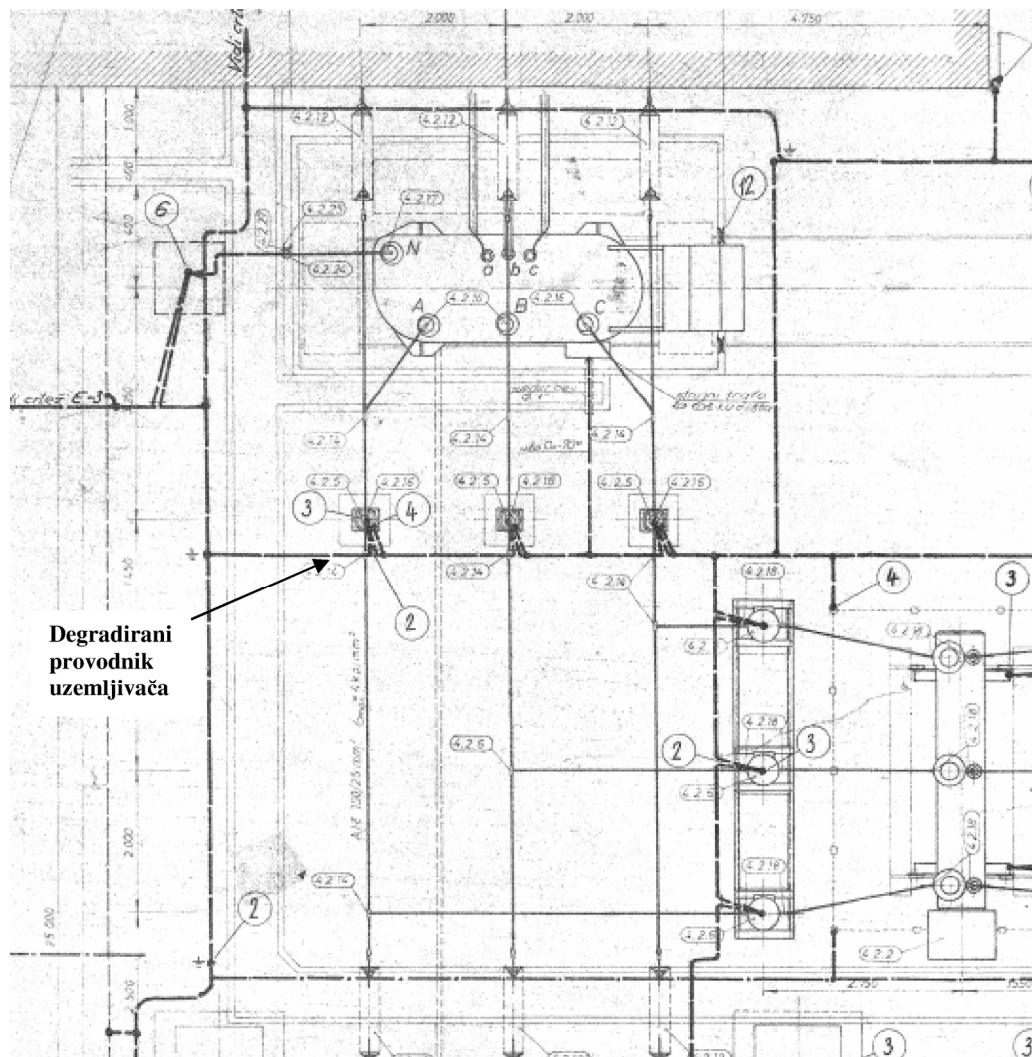
Ekspertska analiza. S obzirom na to da su zemljovodi na pozicijama #4, #5, #6 i #7 zadovoljili kriterijume Koraka III, realno je pretpostaviti da nije došlo do oštećenja (prekida) zemljovoda već do degradacije provodnika mrežastog uzemljivača. Uvidom u odgovarajuću projektnu dokumentaciju, tačnije plan polaganja uzemljivača utvrdili smo lokaciju degradiranog provodnika (1 m od pozicije #4 prema zaštitnoj ogradi transformatorske stanice, slika 38).



Slika 36 Otkopavanje u cilju verifikacije eksperimentalnih istraživanja (pozicije #59 i #60)



Slika 37 Prikaz oštećenog zemljovoda (pozicija #59)



Slika 38 Segment uzemljivačke mreže oko suda energetskog transformatora
(nacrt preuzet iz odgovarajuće projektne dokumentacije)

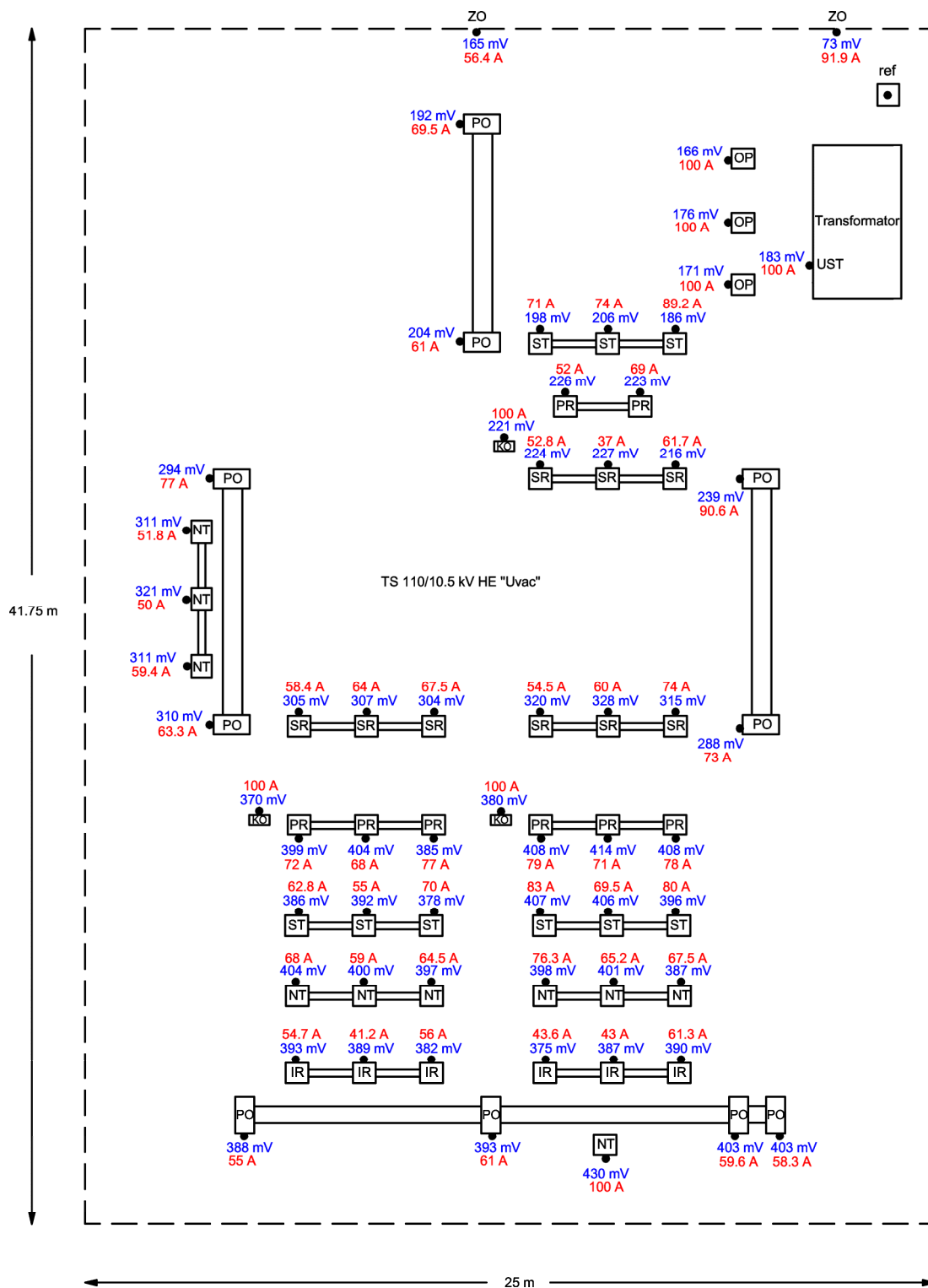
Otkopavanjem na naznačenoj lokaciji (slika 39) i vizuelnim pregledom potvrđena je degradacija provodnika mrežastog uzemljivača (slika 40). Utvrđeno je da je provodnik degradirao usled proticanja struje kvara (havarije). Nakon saniranja provodnika mrežastog uzemljivača, kao i zemljovoda na pozicijama (#59 i #60), ponovili smo ispitivanja (videti sliku 41). Ponovno ispitivanje se pokazalo uspešnim.



Slika 39 *Otkopavanje u cilju verifikacije eksperimentalnih istraživanja
(1 m od pozicije #4)*



Slika 40 *Prikaz oštećenog provodnika mrežastog uzemljivača*



Slika 41 Rezultati ispitivanja nakon sanacije defekata na sistemu uzemljenja

Interesantno je u ovom slučaju uporediti obrazloženi verifikovani nalaz na osnovu A-HCM, sa nalazom na bazi HCM. Koristeći raspoložive merne rezultate (podaci sa slike 34) sproveli smo paralelno HCM analizu. Na taj način utvrđeno je da se sumnjiva lokacija

degradiranog provodnika nalazi između pozicija #5 i #7. Ista je 4 m udaljena od lokacije ustanovljene primenom A-HCM. Opisano poređenje nalaza jasno pokazuje tačnost A-HCM.

Kratki komentar po osnovu dosadašnje primene A-HCM. U preostalim petnaest VN postrojenja čiji je mrežasti uzemljivač bio predmet ispitivanja primenom A-HCM registrovani su sledeći neodostaci:

- u dva objekta degradacija provodnika mrežastog uzemljivača kao posledica havarijskog stanja (tj. zbog proticanja struje kvara);
- u jednom objektu degradacija provodnika mrežastog uzemljivača usled korozije;
- u devet slučajeva oštećenje levog (L) ili desnog (D) provodnika dvostrukog zemljovoda na tri ili četiri pozicije;
- u dva slučaja nisu registrovani defekti na sistemu uzemljenja.

Nedvosmisleno je pokazano da se primenom predloženih kriterijuma, otkrivanje degradiranih mesta unutar mrežastog uzemljivača, postiže sa prihvatljivom preciznošću. Naravno, navedeni rezultati ne predstavljaju definitivni dokaz svih aspekata A-HCM, ali snažno ukazuju da su osnovna svojstva metoda adekvatno predstavljena.

4.5 Zaključak

Osnovni zaključci ovog poglavlja mogu se rezimirati u sledećim tačkama.

1. Zadržavajući se u okvirima osnovne ideje navedene u IEEE Std 81-2012 (sec. 10.2), u ovom poglavlju detaljno je elaboriran A-HCM za ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja VN postrojenja.
2. Za razliku od konvencionalnog HCM, A-HCM zasnovan je na objektivnim i jasno definisanim kriterijumima koji se mogu softverski implementirati.
3. Proces merenja i proces obrade mernih rezultata jasno su razdvojeni. Proces merenja nije opterećen analizom i/ili interpretacijom rezultata.
4. Proces obrade mernih rezultata je potpuno automatizovan.
5. A-HCM je uspešno eksperimentalno verifikovan u šesnaest VN postrojenja različitog naponskog nivoa.
6. A-HCM koristi merni sistem sastavljen od standardne, komercijalno dostupne, merne opreme.

7. Korisno je nastaviti sa sistematskom analizom rezultata po osnovu primene A-HCM, a radi usavršavanja metoda i prezentiranja istog odgovarajućem standardizacionom telu.

5

FSM (*Frequency Shift Method*)

METOD ZA ELIMINISANJE UTICAJA SISTEMSKE SMETNJE

5.1 Uvodne napomene

U sekciji 2.5.1 objašnjeno je poreklo konduktivnih smetnji u sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja. Te smetnje su na mrežnoj frekvenciji, na harmonicima i subharmonicima mrežne frekvencije. Takođe, postoji i plato šuma. Nivo konduktivnih smetnji je promenljiv u vremenu. Naime, nivo smetnji zavisi od trenutnog stanja struje nesimetrije u neutralu VN transformatora, koji je na visokonaponskoj strani transformatora direktno povezan sa sistemom uzemljenja (slika 30). U principu, na vrlo kratkom i kontrolisanom vremenskom intervalu, moguće je primenom TCRM (videti odeljak 2.5.1.1) izvršiti kompenzaciju smetnje na mrežnoj frekvenciji. Međutim, shodno slici 23 treba imati u vidu da se test struja ubrizgava između sistema uzemljenja koji je predmet merenja i sistema uzemljenja susednog VN postrojenja. Dakle, primena TCRM podrazumeva da je susedno VN postrojenje neaktivno. Sa druge strane, zbog tehničkih i ekonomskih razloga neophodno je da i pomenuto susedno VN postrojenje, takođe, bude aktivno. U tom slučaju, u kolu ispitne struje superponirale bi se smetnje na mrežnoj frekvenciji iz oba postrojenja⁴⁸ – ispitivanog i susednog. TCRM zahteva vremensku nepromenljivost smetnje na vremenskom intervalu potrebnom za obavljanje merenja. Takav uslov nije moguće simultano obezbediti u oba VN postrojenja koja su involvirana u proces merenja. S tim u vezi nije moguće obezbediti ni kompenzacioni scenario opisan u odeljku 2.5.1.1. Međutim, u principu, visoki nivo kompozitne smetnje u strujnom ispitnom kolu moguće je nadvisiti enormnom magnitudom ispitne struje, te tako postići odgovarajući (zahtevani) odnos signal-smetnja. Naravno, takav pristup niti je ekonomičan niti je praktičan.

⁴⁸ Harmonijske smetnje u sistemu uzemljenja dva susedna VN postrojenja imaju: nominalno iste frekvencije, međusobno različite faze i međusobno različite magnitude.

Imajući u vidu gore navedeni komentar, moguće racionalno rešenje podrazumeva korišćenje ispitne struje na frekvenciji koja je pomerena u odnosu na mrežnu frekvenciju. U tom pogledu, shodno pregledu datom u odeljku 2.5.1.2, postoje različita rešenja (sa jednom i dve pomerene ispitne frekvencije). Međutim, u kontekstu primene u aktivnoj VN transformatorskoj stanici (ili generalno u aktivnom VN postrojenju) pomenuta rešenja unose inherentnu grešku. Naime, pomenuta rešenja baziraju na procesuiranju rezultata (za jednofrekvencijsku i za dvofrekvencijsku ispitnu struju) pod pretpostavkom da je ispitivani sistem uzemljenja, na odabranim ispitnim frekvencijama, čisto rezistivan. U aktivnom VN postrojenju, na sistem uzemljenja priključeni su zaštitni provodnici dalekovoda i plaštevci podzemnih transmisionih kablova. U tom slučaju, sistem uzemljenja ima impedantne osobine, tj. na različitim test frekvencijama impedansa sistema uzemljenja ima različite vrednosti. Niti jedan od pomenutih metoda o tom aspektu ne vodi računa.

U cilju prevazilaženja opisanih problema pri merenjima na sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja, a gde se za zatvaranje kola ispitne struje koristi aktivno susedno VN postrojenje, u ovom poglavlju biće elaboriran izbor za tri pomerene (u odnosu na 50 Hz) ispitne frekvencije. Takođe, biće predstavljen i nov način za procesuiranje rezultata merenja na tim frekvencijama (na bazi linearne regresije umesto, ranije korišćene, interpolacije i ekstrapolacije), a radi procene rezultata na mrežnoj frekvenciji (50 Hz). Pored toga, biće utvrđen postupak za određivanje optimalne magnitude ispitne struje shodno stvarnim uslovima u konkretnom VN postrojenju. Niti jedan od do sada raspoloživih metoda nema takvu mogućnost. Drugim rečima, ovde se predlaže optimalni nivo test struje – ekonomičan i praktičan sa stanovišta merenja, a neinvazivan u odnosu na energetske sistem.

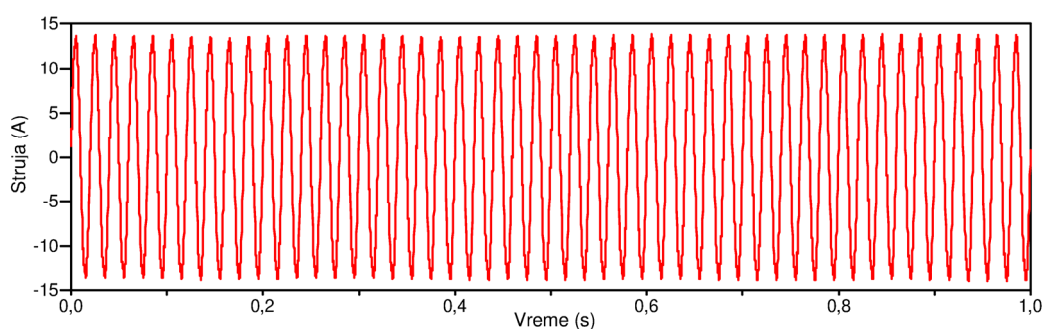
Sumarno, u ovom poglavlju biće analiziran i predložen generalizovani metod za potiskivanje konduktivnih smetnji prilikom merenja na sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja. Metod obuhvata:

- skup fiksnih test frekvencija,
- način obrade rezultata na test frekvencijama i
- način procene mernog rezultata na 50 Hz.

Metod je zasnovan na spektralnoj analizi i DSP-u (*Digital Signal Processing*). Predloženi metod za eliminisanje konduktivnih smetnji skraćeno ćemo označavati kao FSM (*Frequency Shift Method*). Primena i eksperimentalna verifikacija FSM biće ilustrovana u Poglavljima 6 i 7 ove disertacije.

5.2 Prikupljanje i obrada podataka o nivou i spektralnim karakteristikama konduktivnih smetnji u sistemu uzemljenja

Primeru radi, na slici 42 prikazan je tipični talasni oblik konduktivne smetnje, 50 Hz, snimljen na spoju neutrala sa sistemom uzemljenja⁴⁹. Na osnovu ovog ili sličnog talasnog oblika neposredno nije moguće izvesti bilo kakav zaključak o karakteru i o parametrima smetnje. Posebno, ne o harmonijskim komponentama i o platu šuma. Pošto nas interesuju frekvencijske karakteristike smetnje i plato šuma, neophodno je da dalju analizu sprovedemo u f -domenu, tj. treba da izvršimo spektralnu analizu smetnje. U tu svrhu koristićemo DFT (*Discrete Fourier Transform*).



Slika 42 Talasni oblik konduktivne smetnje na neutralu VN transformatora

5.2.1 DFT

Kada je talasni oblik periodičan, za izračunavanje magnitude i faze na osnovnoj frekvenciji i na njenim harmonicima koristiti se *Fourier*-ov red.

U opštem slučaju, *Fourier*-ova transformacija i njen inverzni par služe da bilo koju kontinualnu funkciju na intervalu $-\infty$ do $+\infty$, bilo u t - ili f -domenu, transformišu u inverzni domen.

U aktuelnoj praksi, koristeći odgovarajući A/D konvertor, raspoloživi su diskretni odmerci kontinualnog signala u t -domenu⁵⁰. Odmerci predstavljaju niz amplituda sa ograničenim trajanjem i sa fiksnim rastojanjima između njih. Za procesuiranje

⁴⁹ Zbog očiglednih razloga, za ovu smetnju, alternativno koristimo i naziv sistemska smetnja.

⁵⁰ A/D konverzija obuhvata tri operacije: odmeravanje, kvantovanje i kodovanje.

odgovarajućeg diskretnog signala koristi se DFT (*Discrete Fourier Transform*) [105]. Dakle, DFT je diskretna forma klasične *Fourier*-ove transformacije, pa je

$$S(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} s(n)e^{-j\omega_k n} \quad (29)$$

gde je $S(k)$ DFT izračunata na frekvenciji ω_k , M je širina prozora, $\omega_k = \{2k\pi / M\}$ je set fiksnih i podjednako razmaknutih frekvencija, $0 \leq k \leq M - 1$. Dakle, u praktičnoj primeni signal se obrađuje na ograničenom intervalu. Taj interval (prozor) označićemo sa T_w . Prozor sadrži ograničeni broj, M , odmeraka signala. DFT rezultat zavisi od izbora T_w i M . Recipročna vrednost od T_w naziva se osnovna *Fourier*-ova frekvencija, f_F , ili DFT rezolucija. Deo signala van prozora nije procesuiran, ali se aproksimativno smatra da je isti kao onaj unutar prozora. Drugim rečima, realni signal je zamenjen virtuelnim signalom čiji je period jednak širini prozora. Očigledno, da bi se obezbedilo da DFT rezultat bude isti kao onaj dobijen na bazi *Fourier*-ove transformacije beskonačno dugog signala, širina prozora T_w treba da bude celobrojni multipl osnovnog perioda, T_1 , tj.

$$T_w = NT_1 \quad (30)$$

Drugim rečima, brzina odmeravanja, f_s , treba da bude celobrojni multipl od osnovne DFT frekvencije, tj.

$$f_s = Mf_F = \frac{M}{NT_1} \quad (31)$$

FFT (*Fast Fourier Transform*) je specijalni algoritam koji omogućava značajno skraćenje vremena potrebnog za izračunavanja DFT. FFT se primenjuje za analizu i merenje stacionarnih i tranzijentnih signala u energetske sistemima.

Pre digitalizacije signala, a u cilju prevencije neželjenih efekata zbog preklapanja spektara prilikom odmeravanja (*aliasing*) neophodno je frekvencijski ograničiti (filtrirati) mereni signal. *Antialiasing* filter je niskopropusni filter. Granična frekvencija *antialiasing* filtra treba da bude jednaka polovini frekvencije odmeravanja. Komponente signala koje su iznad granične frekvencije, filter treba da slabi barem 80 dB.

Kao što znamo (videti odeljak 2.5.1.2), mrežna frekvencija podložna je malim i vrlo sporim slučajnim fluktuacijama. Kada se mrežni signal procesuiru sa DFT (u stvari sa FFT) to ima za posledicu tzv. frekvencijsko curenje (*leakage*), pa je potrebno preduzeti mere za

umanjenje posledica ove pojave. Pored toga, na rubovima uzorka signala ograničenog prozorskom funkcijom postoji određeni diskontinuitet (najčešće zbog toga što prozorska funkcija obuhvata necelobrojni broj perioda osnovnog signala), a što takođe prouzrokuje *leakage*. Moguće rešenje svodi se na korišćenje odgovarajuće (nepravougaone) prozorske funkcije na M odmeraka, a pre DFT analize. Naime, M odmeraka treba pomnožiti sa prozorskom funkcijom. U opticaju je nekoliko prozorskih funkcija, napr. *Hamming*, *Hanning*, *Blackman* i *Kaiser*-ova prozorska funkcija. Međutim, ne postoji strogo pravilo u pogledu primene navedenih prozorskih funkcija, niti se posebno preferira neka od njih. Naime, za odgovarajuću namenu prozorska funkcija bira se na empirijskoj osnovi.

5.3 Empirijska analiza konduktivnih smetnji u sistemu uzemljenja aktivnog VN

postrojenja

Sistem uzemljenja u aktivnom VN postrojenju ima impedantne osobine. Te osobine bitno zavise od zaštitnih zemljovodnih užadi priključenih dalekovoda i plašteva podzemnih transmisionih kablova. U tim okolnostima, tradicionalna rešenja, koja koriste pomerene ispitne frekvencije, a sa ciljem da se na bazi interpolacije ili ekstrapolacije proceni odgovarajući rezultat merenja na 50 Hz, unose neizvesne greške.

U odeljku 2.5.1 diskutovani su faktori koji bitno utiču na sužavaje opsega unutar kojeg je pogodno smestiti pomerenu(e) ispitnu(e) frekvenciju(e). Pored toga, na impedansu sistema uzemljenja, pri dovoljno visokim frekvencijama, bitno utiče i specifična električna otpornost tla (videti sliku 4). Zbog navedenih razloga, u uslovima kada je VN postrojenje aktivno, jedna ili dve pomerene merne frekvencije nisu dovoljne za adekvatnu procenu rezultata merenja na 50 Hz. Dakle, ovde i dalje, razmatraćemo skup od najmanje tri pomerene merne frekvencije. U pogledu izbora pomenutih frekvencija imaćemo u vidu ograničenja diskutovana u odeljku 2.5.1. Ipak, prilikom razmatranja ograničenja sa gornje strane primarno se fokusiramo na induktivnu spregu mernih kablova. Dakle, u cilju minimizovanja uticaja sprege mernih kablova, predlažemo da najviša test frekvencija bude oko 75 Hz. Naime, pri $f \leq 80$ Hz pomenuti induktivni uticaji su relativno mali (naravno, ova konstatacija je osnovana ako merni kablovi nisu međusobno paralelni!). Dakle, ako je test frekvencija na 75 Hz i niže, na ovaj način praktično isključujemo promenljivi i nekontrolisani udeo induktivne smetnje na merenu veličinu. Dalje, na osnovu preliminarnih empirijskih istraživanja, zaključujemo da je sa donje strane potencijalna pogodna vrednost pomerene

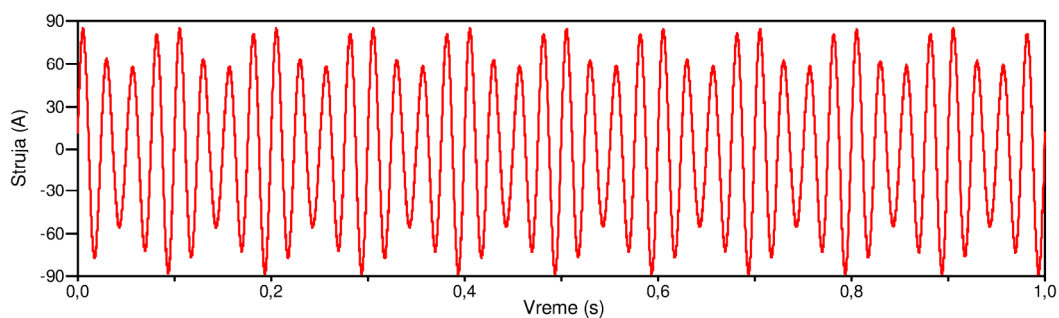
ispitne frekvencije oko 40 Hz. Konačno, treća pomenjena merna frekvencija potencijalno je oko 60 Hz.

Dakle, potencijalni predlog skupa pomenjenih test frekvencija je: 40, 60 i 75 Hz. Neophodno je da empirijski potvrdimo osnovanost navedenog predloga u celini. U tom pogledu, empirijsku proveru treba izvršiti na reprezentativnom uzorku VN postrojenja, preciznije, transformatorskih stanica (110/X kV, 220/X kV i 400/X kV).

U ovom kontekstu, spektralna analiza odnosi se na kompozitni signal:

$$z(t) = s_f(t) + s_i(t) + i(t) \quad (32)$$

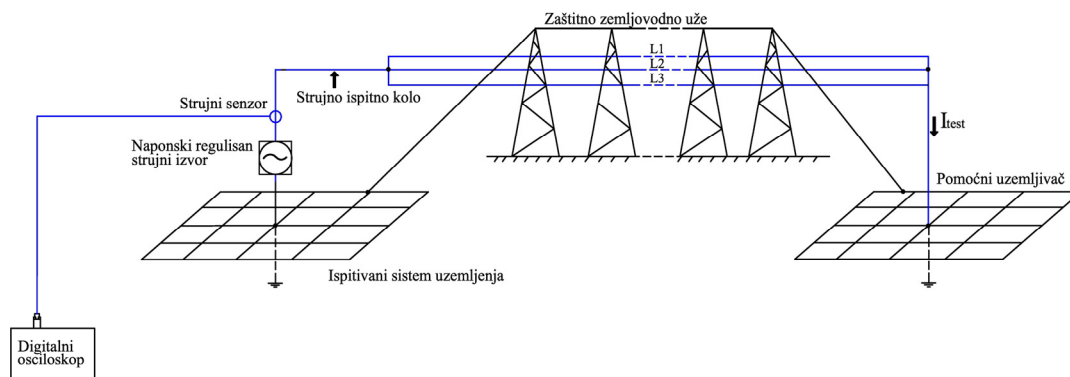
gde je $s_f(t)$ signal na osnovnoj mrežnoj frekvenciji, $s_i(t)$ je test signal na frekvenciji f_{ti} , i $i(t)$ je rezultantni talasni oblik koji se odnosi na harmonike i subharmonike mrežne frekvencije. Tipični talasni oblik za signal $z(t)$ prikazan je na slici 43.



Slika 43 Tipični talasni oblik kompozitnog signala
(test signal, 40 Hz, 49 A; mrežni signal, 50 Hz, 15 A i harmonici mrežne frekvencije)

Zbog interakcije između signala smetnje na frekvenciji f_f i signala na ispitnoj frekvenciji, f_i , uočavamo da, za razliku od konstantne obvojnice na slici 42, obvojnica na slici 43 fluktuiraju u ritmu frekvencije izbijanja $|f_f - f_i|$. U razmatranom primeru je $f_f = 50$ Hz i $f_i = 40$ Hz. Varijacija obvojnice talasnog oblika (tj. dubina amplitudske modulacije) zavisi od odnosa magnitude signala na 50 Hz (manja magnituda) i signala na 40 Hz (veća magnituda) i iznosi oko 16%. Očigledno, navedeni podaci očitani sa slike 43 nisu dovoljni da na utemeljen način sudimo o pogodnosti 40-hercne ispitne frekvencije. Relevantni podaci mogu se dobiti jedino na bazi spektralne analize.

Na slici 44 prikazana je blok šema za prikupljanje podataka za potrebe spektralne analize konduktivnih smetnji u sistemu uzemljenja. Cilj pomenute analize odnosi se na adekvatan izbor seta ispitnih frekvencija.



Slika 44 Blok šema sistema za prikupljanje podataka relevantnih za spektralnu analizu konduktivnih smetnji. Oba sistema uzemljenja - ispitivano i pomoćno - nalaze se u aktivnom (radnom) stanju. Digitalni osciloskop prikuplja i skladišti odmerke kompozitnog signala.

Koristeći principsku šemu sa slike 44 izvršena su merenja u različitim aktivnim VN postrojenjima (šest postrojenja 110/X kV, dva 220/X kV i dva 400/X kV). Takođe, aktivna je i susedna transformatorska stanica preko koje se zatvara kolo ispitne struje. Ispitne frekvencije, $f_{i1} \hat{=} f_1 = 40$ Hz, $f_{i2} \hat{=} f_2 = 60$ Hz i $f_{i3} \hat{=} f_3 = 75$ Hz, generisane su sukcesivno pomoću frekvencijski promenljivog izvora (*California Instruments, type 15001iM*). Trajanje intervala na kome je izvršeno odmeravanje i sakupljanje podataka iznosi 1 s. Dakle, frekvencijska rezolucija pri spektralnoj analizi jednaka je 1 Hz. Potom, prikupljeni podaci obrađeni su pomoću FFT. Prilikom obrade korišćena je *Hamming*-ova prozorska funkcija.

Rezultati spektralne analize predstavljeni su na slici 45. Rezultati su organizovani u tri celine: (a) rezultati na bazi ispitne frekvencije $f_1 = 40$ Hz, (b) rezultati na bazi ispitne frekvencije $f_2 = 60$ Hz, i (c) rezultati na bazi ispitne frekvencije $f_3 = 75$ Hz. Svaki pojedinačni spektralni dijagram ima decibelsku skalu⁵¹ na ordinati. Decibelska (logaritamska) skala

⁵¹ Po definiciji, relativna mera za poređenje snaga, napona i struja je decibel (dB):

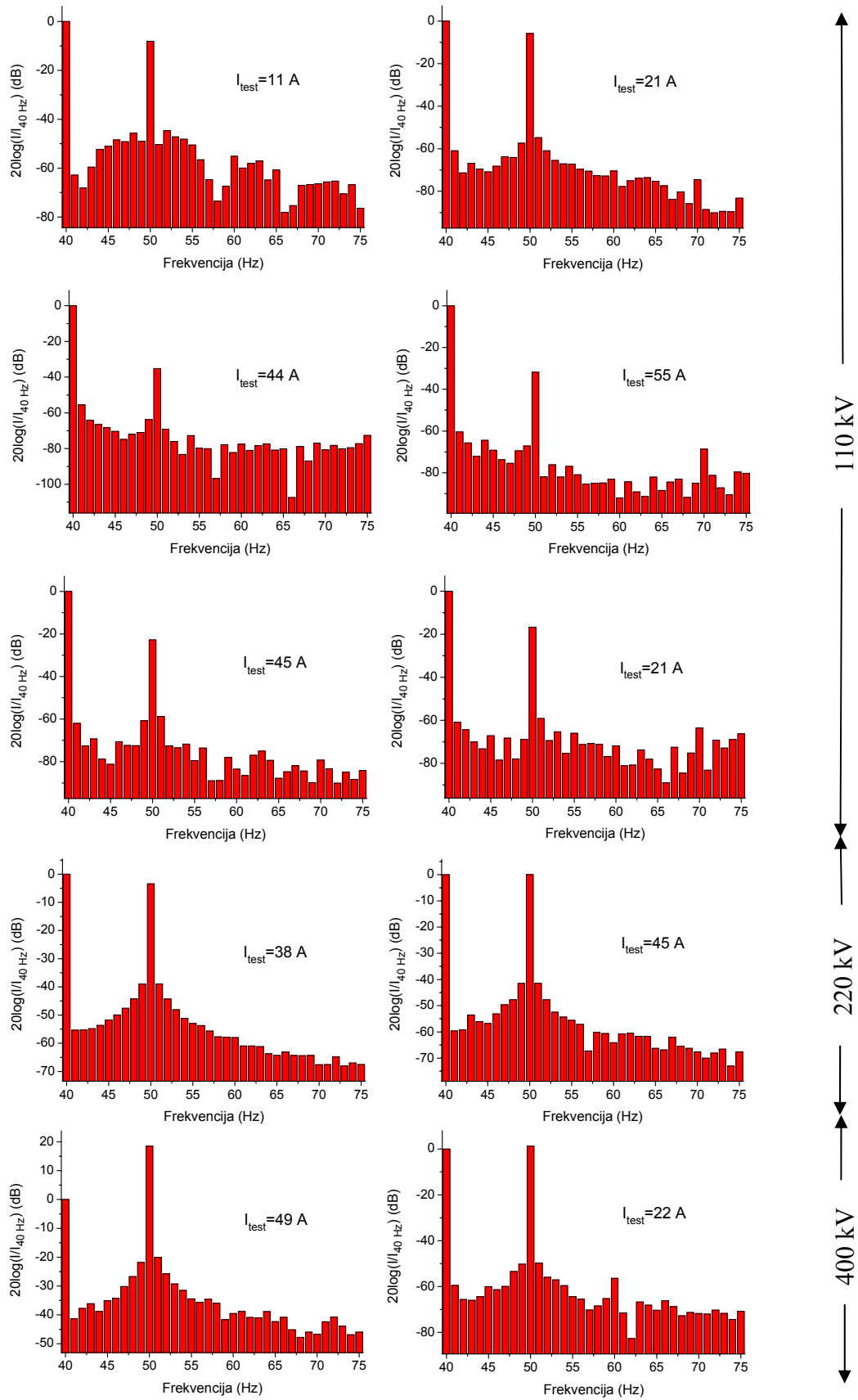
$$10 \log \frac{P_1}{P_2} \equiv 10 \log \frac{V_1 I_1}{V_2 I_2} \equiv 10 \log \frac{V_1^2 / R}{V_2^2 / R} \equiv 20 \log \frac{V_1}{V_2} \equiv 20 \log \frac{I_1}{I_2} \text{ dB}$$

gde je P_1 snaga na otporniku R kada kroz njega teče struja I_1 , a napon na otporniku je V_1 . Snaga je P_2 kada kroz R teče struja I_2 , a napon na otporniku je V_2 .

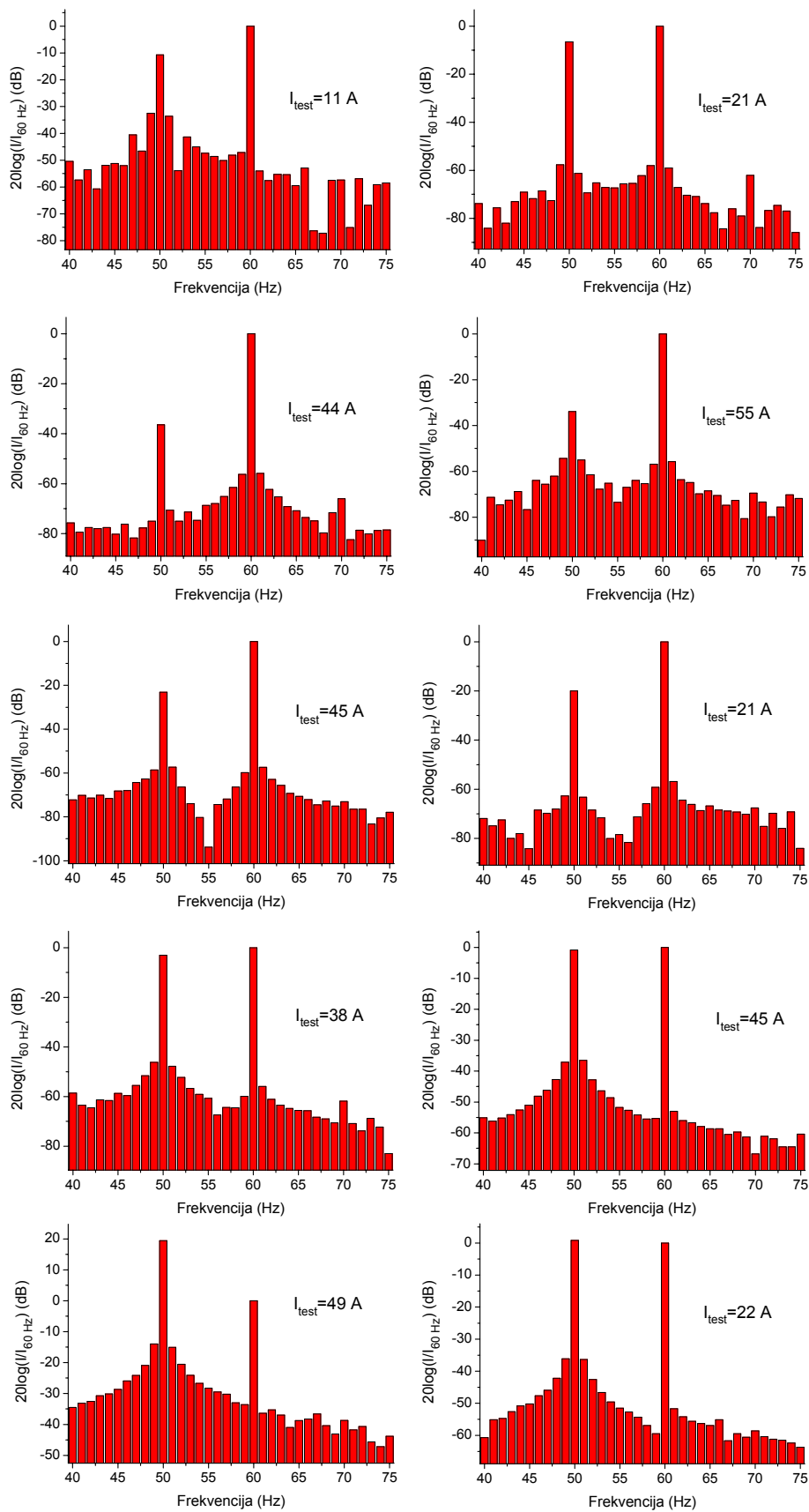
Napr., struja čiji je intenzitet 10 A veća je za 20 dB od struje čiji je intenzitet 1 A. Obrnuto, odnos struje 1 A prema struji od 10 A iznosi -20 dB.

Napr., neka treba povećati struju čiji je intenzitet $I_1 = 0.5$ A za 10 dB. Nalazimo da je tražena struja I_2 jednaka

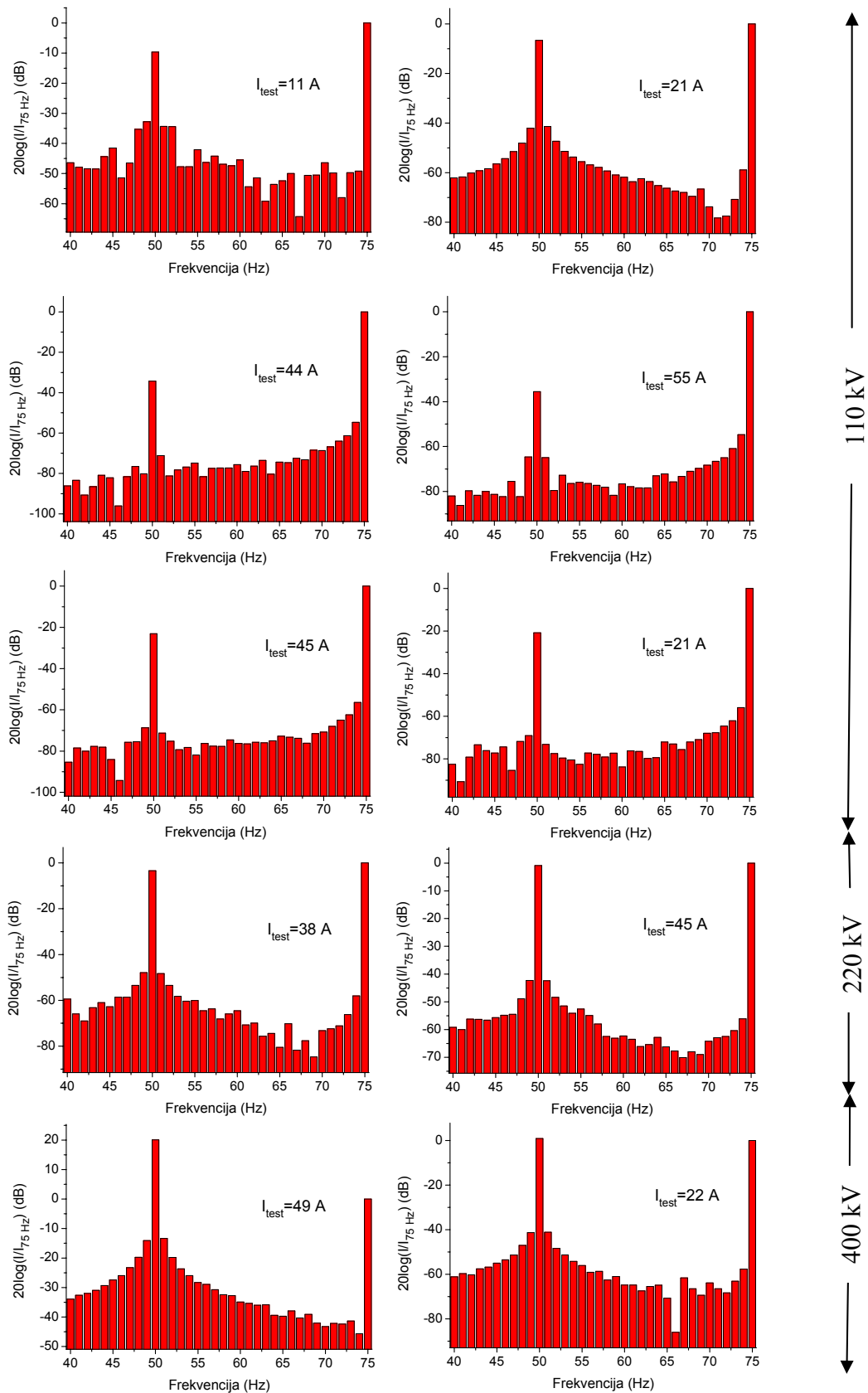
$$I_2 = 0.5 \cdot 10^{10/20} \approx 1.65 \text{ A}$$



(a)



(b)



(c)

Slika 45 Spektri kompozitnog signala smetnje i test signala
 (a) $f_1=40$ Hz, (b) $f_2=60$ Hz, (c) $f_3=75$ Hz

koristi se radi boljeg isticanja malih razlika, a koje su inače na linearnoj skali neuočljive. Magnitude svih spektralnih komponenti normirane su na magnitudu struje ispitnog signala. Na apscisi, dat je opseg frekvencija koji obuhvata okolinu odgovarajuće ispitne frekvencije i okolinu 50 Hz smetnje. Tokom daljeg razmatranja, videćemo da korišćenje dB-skale predstavlja osnovni preduslov za jednostavno korišćenje spektralnih dijagrama.

Očigledno, u VN postrojenjima različitog naponskog nivoa prisutne su vrlo različite struje nesimetrije, pa i različiti nivo smetnji.

U ovom kontekstu interesantno pitanje je: kolika treba da bude magnituda ispitne struje pri određenoj ispitnoj frekvenciji? Konsultujući sliku 45 vidimo da je uz svaki spektralni dijagram naveden intenzitet test struje, I_{test} . Očigledno, korišćene vrednosti za I_{test} su vrlo različite. Namerno, a bez uticaja na opštost, korišćene su ispitne struje različitog, ali umerenog, intenziteta (reda 10 A; preciznije u rasponu od 11 do 55 A). Struje takvog intenziteta nisu invazivne za transformator (pa ni sistem). Drugim rečima, u ovoj fazi analize izbor intenziteta ispitne struje nije kritičan. Naime, definitivno nas zanimaju samo relativni odnosi magnituda odgovarajućih spektralnih komponenti u odnosu na plato šuma (videti naredni odeljak). Međutim, ako bi magnituda test struje bila, napr. 100 A, postoji verovatnoća da ukupna struja transformatora (radna+deo ispitne struje) u nekom trenutku zađe u područje zasićenja B-H(I) karakteristike transformatora. U tom slučaju nastaju intermodulacioni produkti – menja se spektralna slika i stvara se opasan scenario za rad transformatora. Naravno, opisana ekstremna situacija je neželjena, a sa aspekta eksperimenta koji je predmet ove analize potpuno nepotrebna. Dakle, ograničenje magnituda I_{test} sa gornje strane je jasno. Međutim, za potrebe ekonomičnog merenja treba utvrditi minimalnu vrednost magnituda I_{test} za primenu u određenom VN postrojenju. Odgovor na ovo važno pitanje daćemo u narednom odeljku.

5.4 Diskusija rezultata spektralne analize

Konsultujući spektre predstavljene na slici 45 jasno su vidljive diskretne⁵² komponente - smetnja na 50 Hz i odgovarajuće komponente na test frekvencijama. Pored toga, postoji plato šuma čiji je nivo u relaciji sa nivoom smetnje i nivoom njenih harmonijskih i subharmonijskih komponenti. Spektralne komponente ispitnih frekvencija uvek su dovoljno

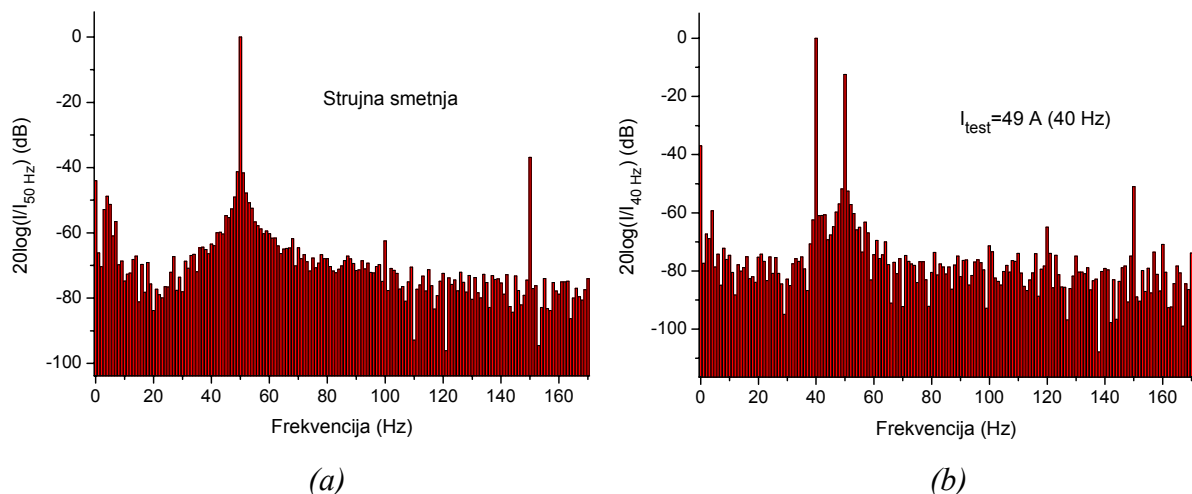
⁵² Pomenute komponente imaju konačnu širinu spektra. Dakle, striktno posmatrano, radi se o kvazidiskretnim komponentama.

udaljene od spektralne komponente smetnje (50 Hz). Dakle, sada se problem svodi na izdvajanje test frekvencija pomoću odgovarajućih filtara. Naravno, korišćićemo digitalni filter i vodićemo računa da se u svakom slučaju obezbedi adekvatno potiskivanje spektralne komponente smetnje (50 Hz).

Odgovarajući uskopojasni filtri, za predložene test frekvencije, f_1 , f_2 i f_3 , mogu se relativno jednostavno softverski implementirati. Vodeći računa o nestabilnosti mrežne frekvencije i o nestabilnosti frekvencije izvora test signala, širina propusnog opsega uskopojasnog filtra za ovu namenu treba da bude oko 3 Hz. Dalje, predlažemo *Butterworth-ov* tip prenosnog faktora filtra. U svakom slučaju, u cilju adekvatnog potiskivanja spektralne komponente smetnje (50 Hz), treba izabrati odgovarajući red filtra. Koristeći priručnik za projektovanje digitalnih filtara [106], predlažemo da za filter čija je srednja frekvencija 40 Hz red filtra treba da bude 12-ti, za filter na 60 Hz red filtra treba da bude 10-ti, a za filter na 75 Hz red filtra treba da bude 8-mi.

Ostaje da podesimo vrednost odnosa signal-šum za svaki filter pojedinačno. Naime, tačnost i uopšte izvodljivost merenja sada zavisi od odnosa signal-šum, a ne od odnosa signal-smetnja. Na osnovu empirijskog iskustva tvrdimo da je potrebno i dovoljno da odnos signal-šum⁵³ bude 30 dB, tj. da spektralna amplituda signala na ispitnoj frekvenciji treba da bude barem 30 dB iznad platoa šuma u njenoj neposrednoj okolini (tj. unutar propusnog opsega uskopojasnog filtra), a koja obuhvata širinu od nekoliko herca. Imajući u vidu navedeni kriterijum neophodno je da razmotrimo konstituente odnosa signal-šum. Prvo, nivo platoa šuma unutar propusnog opsega filtra praktično je konstantan i gotovo isključivo zavisi od spektralnog repa struje signala smetnje i struja spektralnih repova njegovih harmonijskih komponenti. Slika 46 dobra je ilustracija za navedenu konstataciju. Naime, čak ni velika magnituda test struje (u datom primeru 49 A) primetno ne utiče na promenu platoa šuma. Drugo, nivo spektralne komponente na test frekvenciji, tj. na srednjoj frekvenciji posmatranog filtra, zavisi isključivo od intenziteta ispitne struje.

⁵³ Termin odnos signal-šum (SNR: *signal-to-noise ratio*) preuzet je iz telekomunikacija, gde predstavlja osnovnu metriku vezano za kvalitet prenosa u prisustvu šuma. Kvalitet prenosa u prisustvu šuma utoliko je bolji ukoliko je SNR veći. U tom kontekstu, SNR=30 dB odnosi se na praktično savršeni prenos, tj. dalje povećanje SNR nema vidljiv praktični uticaj. Slično, ako je u procesu merenja obezbeđen SNR=30 dB, u praktičnom pogledu, može se smatrati da šum ne utiče na tačnost merenja. Drugim rečima, pri navedenim uslovima, tačnost merenja isključivo zavisi od tačnosti instrumenata koji su involvirani u proces merenja. Dakle, tačnost za sva merenja na bazi FSM, pri SNR=30 dB, može se smatrati da zavisi samo od tačnosti instrumenta. Uz ovu napomenu, u Poglavlju 7, biće razmatrana merna nesigurnost za jedno merenje bazirano na FSM-u.



Slika 46 Uz komentar o približnoj konstantnosti nivoa platoa šuma
 (a) spektar sistemske smetnje i njenih komponenti, (b) spektar smetnje i ispitnog signala

Radi lakšeg uvida u problem koji nas ovde interesuje pogledajmo, na primer, spektralne dijagrame na slici 45 (a), (b) i (c), prvi red, levo. Tako, konstatujemo da na 40 Hz odnos signal-šum iznosi ≈ 60 dB, na 60 Hz iznosi ≈ 45 dB, a na 75 Hz iznosi ≈ 50 dB. Navedeni odnosi ostvareni su pri magnitudi ispitne struje koja iznosi 11 A. Dakle, formalno posmatrano navedeni intenzitet ispitne struje, sa velikom rezervom, omogućava da je vrednost odnosa signal-šum veća od 30 dB, tj. zadovoljava postavljeni kriterijum. Međutim, magnitudu test struje možemo da smanjimo, a da ostanemo u granicama postavljenog kriterijuma za odnos signal-šum (30 dB). U principu, optimizovanje intenziteta ispitne struje može se izvršiti na svakoj ispitnoj frekvenciji pojedinačno. No, dovoljno je za razumevanje, a u ovom slučaju i vrlo praktično, da intenzitet ispitne struje optimizujemo u odnosu na ispitnu struju pri frekvenciji 60 Hz gde je, pri $I_{test} = 11$ A konstatovan najmanji odnos signal-šum, tj., 45 dB. Dakle, interesuje nas intenzitet ispitne struje, I_{test1} , koji će na 60 Hz omogućiti da se odnos signal-šum smanji sa 45 dB na 30 dB. U prvoj aproksimaciji, kao što znamo, promena test struje praktično ne utiče na nivo platoa šuma (koji inače potiče od kompozitne struje, označimo je sa I_n). Pomenuti zahtev matematički formulišemo na sledeći način:

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_n} - 20 \log \frac{I_{test1}}{I_n} = 45 - 30$$

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_{test1}} = 15 \Rightarrow \frac{I_{test}}{I_{test1}} = 10^{15/20} \Rightarrow I_{test1} = \frac{I_{test}}{10^{3/4}} = 1.95 A$$

Dakle, umesto da vršimo merenje sa test strujom od 11 A, merenje možemo izvršiti, sa praktično istim kvalitetom, koristeći test struju čiji je intenzitet ≈ 2 A. Slično razmatranje možemo ponoviti za ostala VN postrojenja čiji su spektralni dijagrami prikazani na slici 45.

Opisana procedura omogućava nam da formalizujemo preporuku vezano za izbor optimalne (male) magnitude ispitne struje.

- Formirati mernu šemu kao na slici 44.
- Podesiti probnu ispitnu struju na 10 A (navedena vrednost je pogodna, ali nije striktna).
- Generisati spektralne dijagrame za frekvencije: 40, 60 i 75 Hz.
- Proveriti da li je vrednost za signal-šum na svakoj ispitnoj frekvenciji veća od 30 dB.
- Izvršiti optimizaciju intenziteta ispitne struje sledeći gore navedeni numerički primer.

Napomena: U nekim VN postrojenjima, u ekstremno nepogodnim uslovima, može se desiti da probna ispitna struja od 10 A, na nekoj ili na sve tri test frekvencije, daje signal-šum manji od 30 dB. U tom slučaju treba povećati intenzitet ispitne struje. U osnovi, zahvaljujući logaritamskom računu, postupak za povećanje intenziteta ispitne struje sličan je onom koji smo sledili u numeričkom primeru iniciranom radi smanjenja ispitne struje. Da je takva analiza ponekad neophodna jasno ilustruje primer (videti sliku 45 (c), red 5, levo), gde je pri relativno velikoj ispitnoj struji od 49 A ostvaren odnos signal-šum od ≈ 35 dB. U principu, neophodni intenzitet ispitne struje zavisi i od fizičkih dimenzija sistema uzemljenja. Tako, što je sistem uzemljenja prostraniji biće potreban veći intenzitet ispitne struje.

Izvršena razmatranja jasno ukazuju na neophodnost adekvatnog podešavanja ispitne struje pre primene FSM za konkretno merenje: napr., impedanse sistema uzemljenja, merenje napona dodira ili merenje napona koraka. To je neophodno radi ostvarenja uslova za adekvatno i kontrolisano merenje s jedne strane, a sa druge strane radi ekonomičnog korišćenja izvora ispitne struje. U tradicionalnim varijantama korišćenja pomerene ispitne frekvencije (jednofrekvencijska i dvofrekvencijska) praksa je bila da se, bez prethodnih spektralnih razmatranja, ubrizga ispitna struja od oko 50 A ili do oko 100 A na ispitnoj frekvenciji (ijama). Takav prilaz niti je racionalan niti je ekonomičan, a za sistem može biti i opasan.

5.5 Princip linearne regresije

Tokom razmatranja u ovom poglavlju definisali smo set od tri ispitne frekvencije i optimalni nivo ispitne struje. Dakle, odgovarajuća merenja, koja su inače osetljiva na prisustvo smetnje na mrežnoj frekvenciji, sada smo u stanju da sukcesivno obavimo na tri ispitne frekvencije $\neq 50$ Hz i da u svakom tom merenju bude izbegnut uticaj intenzivne 50 Hz smetnje. Međutim, neophodno je da pomenuta tri rezultata, dobijena na odgovarajućim ispitnim frekvencijama, procesuiramo tako da dobijemo odgovarajući "čisti" rezultat na 50 Hz. To je krajnji cilj. Navedeni problem rešićemo koristeći princip linearne regresije.

Prvo, razmotrićemo ideju, a potom elaboriraćemo rešenje postavljenog problema.

Na svakoj ispitnoj frekvenciji vršimo odgovarajuće merenje (napr., merenje impedanse sistema uzemljenja ili merenje napona dodira ili merenje napona koraka). Svaki rezultat ima dve koordinate – po x -osi frekvenciju na kojoj je merenje izvršeno i po y -osi magnitudu merene veličine. U idealnim uslovima, u linearnom sistemu, tri rezultata na tri test frekvencije bili bi na odgovarajućoj pravoj liniji u x - y ravni. Međutim, uvek, zbog različitih razloga, događaju se slučajne greške prilikom merenja. Drugim rečima, u realnim uslovima pomenute tačke striktno posmatrano nisu na pravoj liniji. Dakle, treba da odredimo pravu liniju koja će sa minimalnom greškom odstupati od bilo koje od razmatranih tačaka. Kada odredimo takvu liniju (tzv. regresionu liniju) bićemo u stanju da na toj liniji pri $x = 50$ Hz, na ordinati očitamo odgovarajuću vrednost, \hat{y} , koja je relativno najbolja procena merene veličine na 50 Hz. Imajući u vidu prethodni komentar očigledno je da je linearna regresija preciznija od interpolacije i ekstrapolacije.

Formalno, analitički problem se svodi na određivanje koeficijenata a i b za pravu

$$y = bx + a \quad (33)$$

koja je po kriterijumu MMSE (*Minimum Mean Square Error*) najbliža setu parova vrednosti (x_i, y_i) , $i \in 1, n$. U našem slučaju je $n = 3$. Dakle, na osnovu (x_i, y_i) treba odrediti koeficijente a i b . Shodno [107] imamo

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (34)$$

i

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (35)$$

Dakle, stavljajući $x = 50$ [Hz] u jednačinu prave (33), čiji su koeficijenti definisani u (34) i (35), dobijamo \hat{y} [Ω].

5.6 Zaključak

Osnovni zaključci ovog poglavlja mogu se rezimirati u sledećim tačkama.

1. FSM je sofisticirana generalizacija tradicionalnih jednofrekvencijskih i dvofrekvencijskih metoda za eliminisanje intenzivne smetnje na mrežnoj frekvenciji, a koja je neminovno prisutna u sistemu uzemljenja.
2. FSM inherentno garantuje kvalitetnije merenje (manju mernu grešku) od bilo kog tradicionalnog metoda koji koristi pomešanu ispitnu frekvenciju(e).
3. Merenje na bazi FSM koristi optimalni intenzitet ispitne struje. On se utvrđuje na početku merenja po proceduri koja je predložena u ovom radu. Ovaj pristup bitno je različit od prakse karakteristične za tradicionalne metode, gde se intenzitet ispitne struje definiše paušalno, bez obzira na specifičnost VN postrojenja u kome treba izvršiti merenje.

6

NOVI METOD ZA MERENJE IMPEDANSE SISTEMA UZEMLJENJA

6.1 Uvodne napomene

Funkcionalni značaj rezistivnih i impedantnih karakteristika sistema uzemljenja razmotren je i elaboriran u odeljku 2.1. Odgovarajući metrološki aspekti, problemi i principi analizirani su u odeljku 3.3. U ovom poglavlju, na eksperimentalnoj osnovi, dokazujemo da je primenom FSM (videti poglavlje 5) moguće bitno poboljšati merenje impedanse sistema uzemljenja.

Vezano za merenje impedanse, preciznije – prividne impedanse, sistema uzemljenja aktivnog VN postrojenja postoje dve grupe problema:

- (a) problemi vezani za princip merenja u odsustvu konduktivnih smetnji i
- (b) problemi vezani za uticaj konduktivne systemske smetnje na izvodljivost i tačnost merenja.

Tokom višedecenijskog procesa teorijskog i eksperimentalnog usavršavanja, problem naveden pod (a) apsolviran je u metodološkom pogledu. Na toj osnovi, danas se isključivo primenjuje nekonvencionalni FOP.

Do sada, problemi navedeni pod (b) nisu adekvatno rešeni. Naime, u tom pogledu, relativno najbolje aktuelno rešenje, TCRM (*Test Current Reversal Method*), ima barem dva bitna ograničenja:

- TCRM je striktno primenljiv pod pretpostavkom da je intenzitet konduktivne systemske smetnje⁵⁴ nepromenljiv u vremenu i
- pomoćno uzemljenje (uobičajeno, sistem uzemljenja susednog postrojenja), koji se koristi kao strujna sonda, mora pripadati postrojenju koje za vreme merenja nije u normalnom radnom režimu.

U opštem slučaju, problematična je pretpostavka o nepromenljivosti intenziteta konduktivne smetnje u sistemu uzemljenja aktivnog VN postrojenja. Drugim rečima, da bi TCRM uopšte bio izvodljiv neophodan je određeni vid dodatne kontrole tokom procesa

⁵⁴ Podsetimo, systemska konduktivna smetnja je na mrežnoj frekvenciji. Intenzitet smetnje zavisi od trenutne nesimetrije faza.

merjenja i/ili višestruko ponavljanje i usrednjenje rezultata merjenja. Pored toga, kada se koristi TCRM, magnituda ispitne struje zavisi od intenziteta systemske smetnje i od platoa osnovnog šuma. Sumarno, magnituda ispitne struje treba da je relativno velika. To predstavlja problem u praksi.

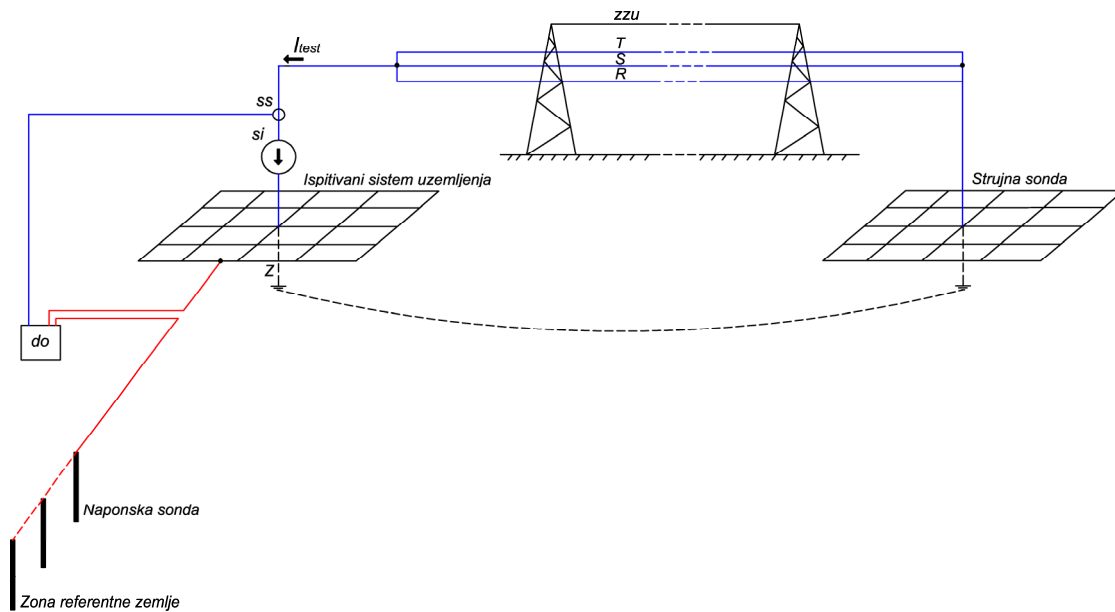
Ako se pomoćno uzemljenje nalazi u aktivnoj transformatorskoj stanici, u kolu ispitne struje superponiraju se systemske konduktivne smetnje iz dva VN postrojenja. Pomenute smetnje imaju različite magnitude i različite faze. Stoga, kompozitna systemska smetnja ima vremenski promenljivu magnitudu i fazu. U tom slučaju TCRM ne može da funkcioniše po principu koji je opisan u odeljku 2.5.1.1. Dakle, zbog funkcionalnih ograničenja koje ima TCRM, susedna transformatorska stanica treba da bude neaktivna. To ima očigledne ekonomske posledice (troškovi po osnovu zastoja u radu).

U cilju eliminisanja uticaja vremenski promenljive magnitude kompozitne systemske konduktivne smetnje i radi bitnog smanjenja neophodnog intenziteta ispitne struje, ovde se predlaže primena FSM. Da podsetimo, kada se koristi FSM, intenzitet ispitne struje isključivo zavisi od nivoa platoa osnovnog šuma, a ne i od intenziteta konduktivne smetnje na mrežnoj frekvenciji. Dakle, dalje razmatramo merenje impedanse sistema uzemljenja na bazi nekonvencionalnog FOP, a eliminisanje smetnje vršimo primenom FSM. U pitanju je kvalitativno nov metod sa poboljšanim metrološkim performansama. Takav metod merjenja označavaćemo kao FOP-FSM. Radi jasnog isticanja prednosti FOP-FSM, izvršićemo uporednu eksperimentalnu analizu sa FOP-TCRM.

6.2 FOP- FSM

6.2.1 Blok šema mernog sistema

Principska šema sistema za merenje impedanse uzemljenja na bazi FOP-FSM prikazana je na slici 47. Oznake na slici 47 imaju sledeće značenje: *do*-prenosni digitalni osciloskop (*Metrix, model Scopix III OX7104*), I_{test} -test struja, crvena linija-naponsko ispitno kolo, *si*-frekvencijski podesivi izvor ispitne struje (*California Instruments, model 5001iM*; videti sliku 48), plava linija-strujno ispitno kolo, *ss*-strujni senzor (*Metrix, model HX0073*), *z*zu-zaštitno zemljovodno uže.



Slika 47 Principalska šema sistema za merenje impedanse uzemljenja na bazi FOP-FSM



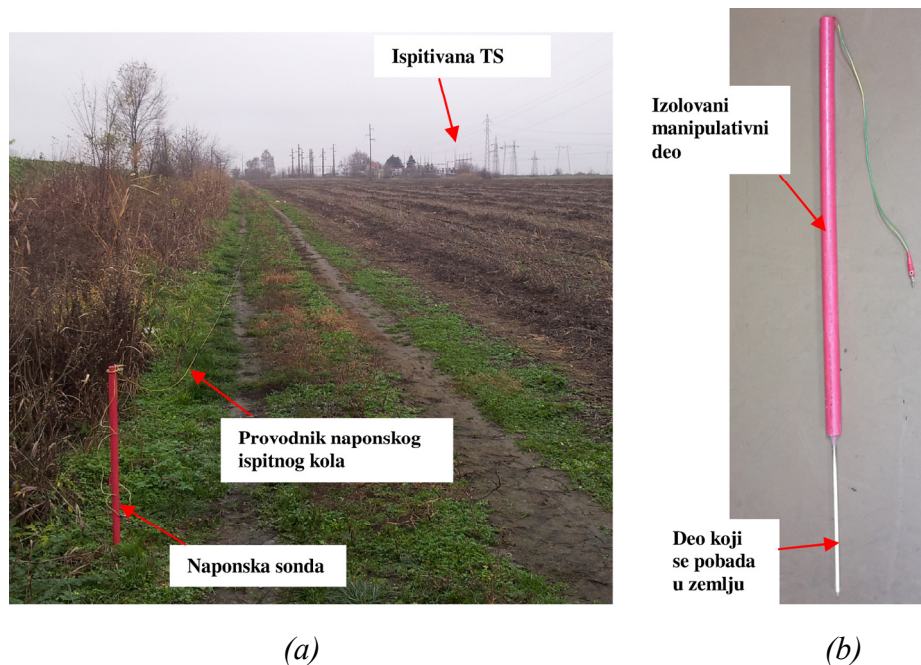
Slika 48 California Instruments, model 5001iM
(tri jedinice povezane paralelno nose oznaku 15001iM)

Dakle, šema na slici 47, ustvari, predstavlja šemu za nekonvencionalni FOP, s tim da se merenje sukcesivno vrši na tri FSM frekvencije ($f_1 = 40$ Hz, $f_2 = 60$ Hz i $f_3 = 75$ Hz). Potom, da bi se dobila vrednost prividne impedanse na 50 Hz, rezultati za tri pojedinačna merenja obrađuju se po proceduri kako je opisano u poglavlju 5, a precizirano u sledećem odeljku.

Ovde, ulogu strujne sonde vrši pomoćno uzemljenje, tj. uzemljenje aktivne susedne transformatorske stanice. Strujna sonda je, preko neaktivnog dalekovoda, sa kratko-spojenim faznim provodnicima, povezana na izvor ispitne struje. Dakle, vrsta i način povezivanja strujne sonde ovde je isti kao i pri do sada praktikovanim načinima merenja prividne impedanse. Osnovni motiv za ovakav izbor i povezivanje strujne sonde uslovljen je zahtevom da strujna sonda, preko koje teče struja reda 10 A, ne utiče na ispitivano uzemljenje prostrano

velikog VN postrojenja. Drugim rečima, rastojanje strujne sonde od ispitivanog sistema uzemljenja mora biti veće od tri ili četiri dužine dijagonale ispitivanog uzemljenja⁵⁵. Pri takvom zahtevu razuman je izbor da uzemljenje susedne transformatorske stanice služi kao strujna sonda. Sa druge strane, kao što će biti pokazano u nastavku, FOP-FSM zahteva intenzitet ispitne struje koji je za oko red veličine manji od intenziteta koji se zahteva pri konvencionalnom FOP-TCRM merenju. Ova činjenica otvara nove perspektive vezano za vrstu i položaj strujne sonde. U ovoj disertaciji, pomenuti aspekt dalje nećemo analizirati, ali ga kandidujemo za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Optimalna pozicija naponske sonde (u zoni referentne zemlje; videti sliku 49), na kojoj se očitava odmerak napona, određuje se po proceduri opisanoj u odeljku 3.3.1.2.



Slika 49 (a) Lokacija naponske sonde u području referentne zemlje, (b) izgled naponske sonde

6.2.2 Prikupljanje i obrada rezultata merenja

Prividnu impedansu sistema uzemljenja, Z_{pi} , na ispitnoj frekvenciji f_i , $i=1$ do 3, predstavimo u obliku:

⁵⁵ Navedena preporuka odnosi se na slučaj kada je polusferna strujna sonda znatno manja od ekvivalentne polusfere ispitivanog uzemljenja. Ako se kao strujna sonda koristi sistem uzemljenja susedne transformatorske stanice tada su ekvivalentne polusfere ispitivanog i pomoćnog uzemljenja dimenziono samerljive. Zbog toga, rastojanje između ispitivanog i pomoćnog uzemljenja treba da bude 15 do 20 dijagonala ispitivanog uzemljenja. Rastojanje između susednih VN transformatorskih stanica zadovoljava ovaj uslov.

$$Z_{pi} \hat{=} \frac{\overline{U}_i}{\overline{I}_i} = R_{pi} + jX_{pi} \quad (36)$$

gde je \overline{U}_i fazor napona izmeren na naponskoj sondi pri ispitnoj frekvenciji f_i , \overline{I}_i je fazor ispitne struje pri ispitnoj frekvenciji f_i , R_{pi} je realni, a X_{pi} imaginarni deo impedanse pri ispitnoj frekvenciji f_i . Fazori napona i struje izračunavaju se na bazi odgovarajućih odmeraka napona i struje u vremenskom domenu. Odmerci se uzimaju i memorišu pomoću digitalnog osciloskopa. Potom, u fazi postprocesinga, koristeći softversku realizaciju PMU (*phasor measurement unit*) [108] i [109], izračunavaju se fazori \overline{U}_i i \overline{I}_i . Na toj osnovi, konačno se izračunavaju Z_{pi} , R_{pi} i X_{pi} ($i=1$ do 3). Dalje, za svaki rezultat (Z_{pi} , R_{pi} i X_{pi}) pojedinačno sprovodi se regresiona analiza (videti odeljak 5.5) i generiše se odgovarajuća regresiona prava u funkciji od frekvencije. Za $f=50$ Hz, iz jednačine regresione prave generisane na bazi Z_{pi} , ($i=1$ do 3), očitava se vrednost prividne impedanse na 50 Hz, tj. $Z_p(50 \text{ Hz})$. Slično, iz jednačine preostale dve regresione prave određuje se $R_p(50 \text{ Hz})$, odnosno $X_p(50 \text{ Hz})$.

Kao što znamo, u aktivnom VN postrojenju, uzemljeni delovi nadzemne i/ili podzemne transmisionne infrastrukture (zaštitna zemljovodna užad i/ili plaševi podzemnih kablova), bitno utiču na Z_{pi} . Imajući u vidu frekvencijski opseg ispitnih frekvencija, X_{pi} isključivo je posledica pomenutih uticaja. Takođe, zbog pomenutih uticaja je $R_{pi} \neq R_G$, pa i $R_p(50 \text{ Hz}) \neq R_G$. Konkretna relacija između R_p i R_G zavisi od deljenja ispitne struje između sistema uzemljenja i uzemljenih delova priključene transmisionne infrastrukture. U ovom poglavlju, osnovna namera je da se jasno dokaže pogodnost FOP-FSM, a ne i detalji vezani za izračunavanja R_G . Naime, posle određivanja prividne impedanse sistema uzemljenja, $Z_p(50 \text{ Hz})$, za izračunavanje odgovarajuće vrednosti za R_G koristi se komercijalno raspoloživi softverski alat (napr., CDEGS [29]).

6.2.3 Eksperiment

6.2.3.1 Izbor VN objekata

Opisaćemo detaljno ispitivanja koja su sprovedena u dve VN transformatorske stanice. Prva transformatorska stanica je 110/20 kV (*Vrbas 1*, Vrbas), videti sliku 50. U daljem tekstu, navedena transformatorska stanica biće označena kao **lokacija 1**. Druga transformatorska

stanica je 110/35/10 kV (*Beograd 18*, *Ralja*). U daljem tekstu, navedena transformatorska stanica biće označena kao **lokacija 2**.

Na **lokaciji 1** veza između ispitivanog sistema uzemljenja i pomoćnog uzemljivača ostvarena je preko nadzemnog voda nazivnog napona 20 kV, koji nije opremljen zaštitnim zemljovodnim užetom. Fazni provodnici nadzemnog voda bili su međusobno povezani u paralelnoj vezi. Strujna sonda nalazi se na rastojanju 12 km od ispitivanog sistema uzemljenja. Razvodno postrojenje (20 kV, *Savino selo*), čiji je uzemljivački sistem imao ulogu strujne sonde, bilo je u beznaponskom stanju prilikom ispitivanja. Ispitivanja su sprovedena 8. decembra 2015. godine. Temperatura ambijenta iznosila je 6°C.

Na **lokaciji 2** veza između ispitivanog sistema uzemljenja i strujne sonde ostvarena je preko nadzemnog voda nazivnog napona 110 kV, čiji su fazni provodnici međusobno povezani u paralelnoj vezi. Zaštitno zemljovodno uže nadzemnog voda izrađeno je od čelika preseka 50 mm² i spojeno je na sistem uzemljenja koji se ispituje. Strujna sonda nalazi se na rastojanju 15 km od ispitivanog sistema uzemljenja. Transformatorska stanica (220/110 kV, *Beograd 3*), čiji je uzemljivački sistem imao ulogu strujne sonde, bila je u normalnom operativnom stanju prilikom ispitivanja. Ispitivanja su sprovedena 27. novembra 2015. godine. Temperatura ambijenta iznosila je 7°C.



(a)



(b)

Slika 50 Transformatorska stanica 110/20 kV (Vrbas 1, Vrbas) iz dve perspektive, (a) i (b)

6.2.3.2 Izbor optimalnog intenziteta test struje

Na **lokaciji 1**, saglasno proceduri opisanoj u odeljku 5.4, probna ispitna struja podešena je na vrednost od oko 10 A (u konkretnom slučaju oko **9 A**) i generisani su spektralni dijagrami (slika 51) sa ciljem da se proverí da li je vrednost odnosa signal-šum na svakoj ispitnoj frekvenciji veća od nominalno zahtevane vrednosti, tj. da li je veća od 30 dB. Ilustracije radi, uporedo su dati spektralni dijagrami za napon i za struju. Po očekivanju, odgovarajući odnosi su praktično isti bez obzira da li se radi o naponu ili o struji. Stoga, saglasno proceduri opisanoj u Poglavlju 5, dalje radimo samo sa spektralnim dijagramima koji se odnose na odnos struja.

Posmatrajući spektralne dijagrame na slici 51 (a, b i c), može se konstatovati da odnos probna ispitna struja-šum na 40 Hz iznosi ≈ 55 dB, na 60 Hz iznosi ≈ 50 dB i na 75 Hz iznosi ≈ 50 dB, što je više (bolje) u odnosu na dozvoljenih 30 dB. Stoga, možemo izvršiti optimizaciju (smanjenje) intenziteta ispitne struje.

Za probnu ispitnu struju na frekvenciji 40 Hz pri intenzitetu 9 A, saglasno proceduri koja je opisana u odeljku 5.4, dobija se:

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_n} - 20 \log \frac{I_{test1}}{I_n} = 55 - 30$$

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_{test1}} = 25 \Rightarrow \frac{I_{test}}{I_{test1}} = 10^{25/20} \Rightarrow I_{test1} = \frac{I_{test}}{10^{5/4}} = 0.51 \text{ A}$$

Dalje, za probnu ispitnu struju na frekvenciji 60 Hz pri intenzitetu 9 A dobija se:

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_n} - 20 \log \frac{I_{test2}}{I_n} = 50 - 30$$

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_{test2}} = 20 \Rightarrow \frac{I_{test}}{I_{test2}} = 10^{20/20} \Rightarrow I_{test2} = \frac{I_{test}}{10} = 0.9 \text{ A}$$

Konačno, za probnu ispitnu struju na frekvenciji 75 Hz pri intenzitetu 9 A dobija se:

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_n} - 20 \log \frac{I_{test3}}{I_n} = 50 - 30$$

$$20 \log \frac{I_{test}}{I_{test3}} = 20 \Rightarrow \frac{I_{test}}{I_{test3}} = 10^{20/20} \Rightarrow I_{test3} = \frac{I_{test}}{10} = 0.9 \text{ A}$$

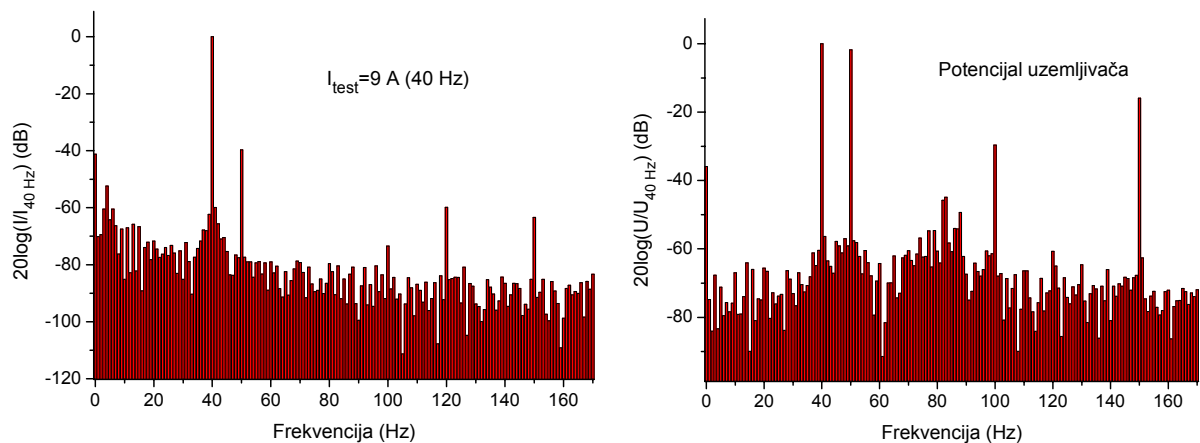
Radi jednostavnosti, a bez ugrožavanja kvaliteta merenja, na svim frekvencijama radićemo sa ispitnom strujom od **1 A**.

Na **lokaciji 2**, ponavljamo isti postupak. Probna ispitna struja podešena je na vrednost od oko **8.5 A** i generisani su spektralni dijagrami (slika 52).

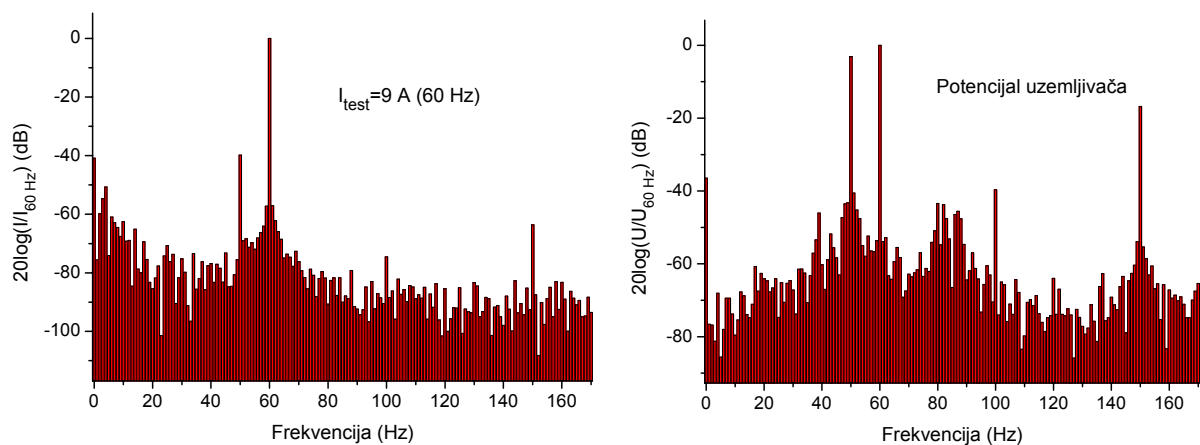
Posmatrajući spektralne dijagrame na slici 52 (*a*, *b* i *c*), može se konstatovati da odnos probna ispitna struja-šum na ispitnoj frekvenciji 40 Hz iznosi ≈ 50 dB, na 60 Hz iznosi ≈ 50 dB i na 75 Hz iznosi ≈ 50 dB, što je bolje u odnosu na zahtev od 30 dB.

Dakle, kao i u scenariju koji je razmatran na *lokaciji 1* postoji mogućnost da merenje izvršimo sa manjom ispitnom strujom. Tako, nalazimo da,

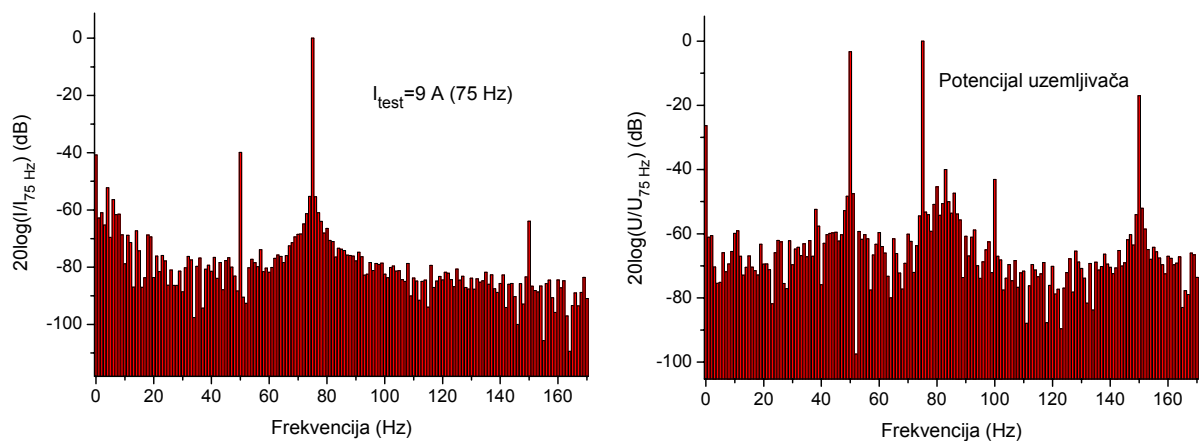
- na ispitnoj frekvenciji 40 Hz intenzitet ispitne struje može biti smanjen na **0.85 A**,
- na ispitnoj frekvenciji 60 Hz intenzitet ispitne struje može biti smanjen na **0.85 A**,
- na ispitnoj frekvenciji 75 Hz intenzitet ispitne struje može biti smanjen na **0.85 A**.



(a)

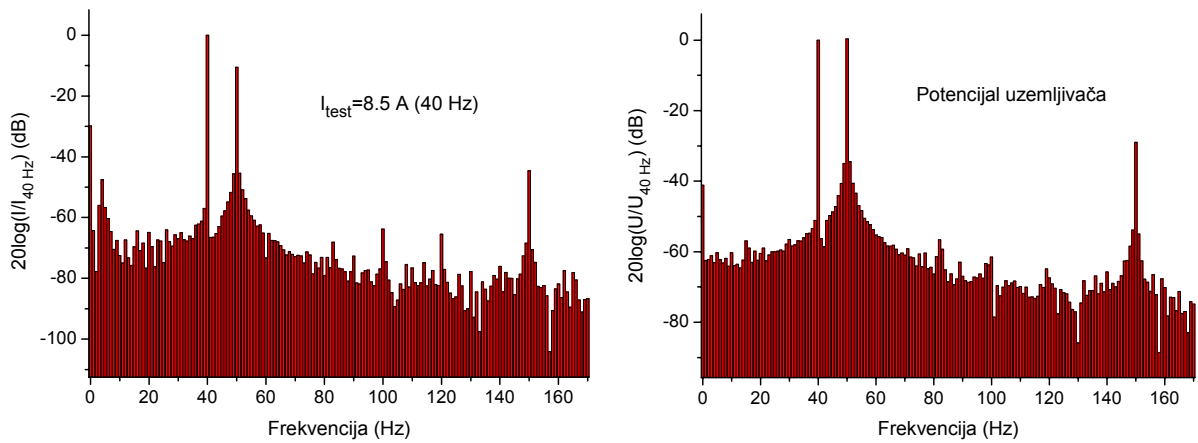


(b)

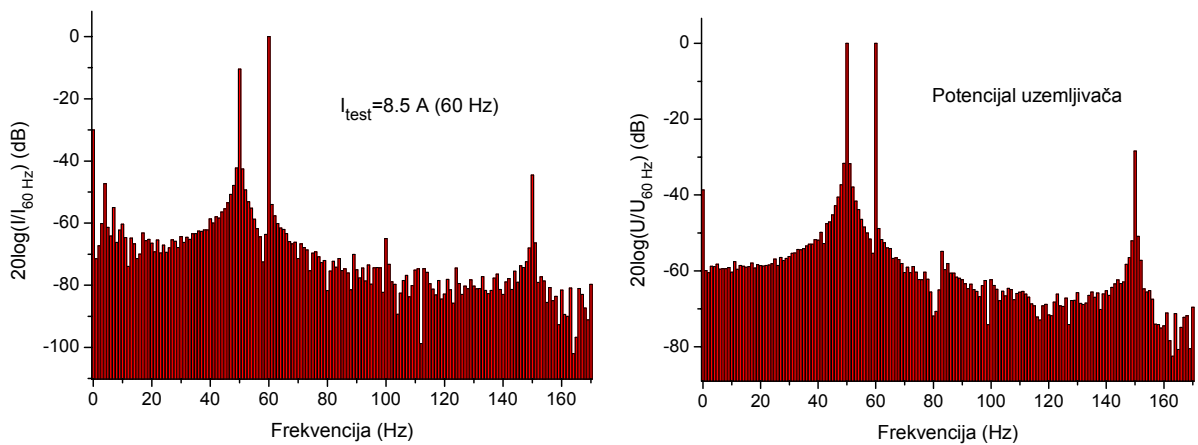


(c)

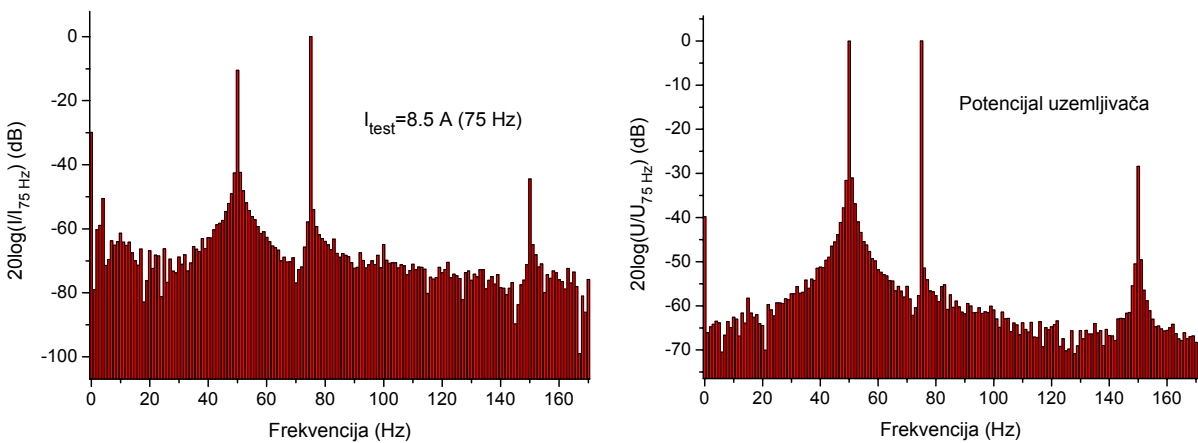
Slika 51 Lokacija 1. Spektri kompozitnog signala smetnje i probnog ispitnog signala.
 (a) $f_1=40 \text{ Hz}$, (b) $f_2=60 \text{ Hz}$, (c) $f_3=75 \text{ Hz}$.



(a)



(b)



(c)

Slika 52 Lokacija 2. Spektri kompozitnog signala smetnje i probnog ispitnog signala
 (a) $f_1=40 \text{ Hz}$, (b) $f_2=60 \text{ Hz}$, (c) $f_3=75 \text{ Hz}$.

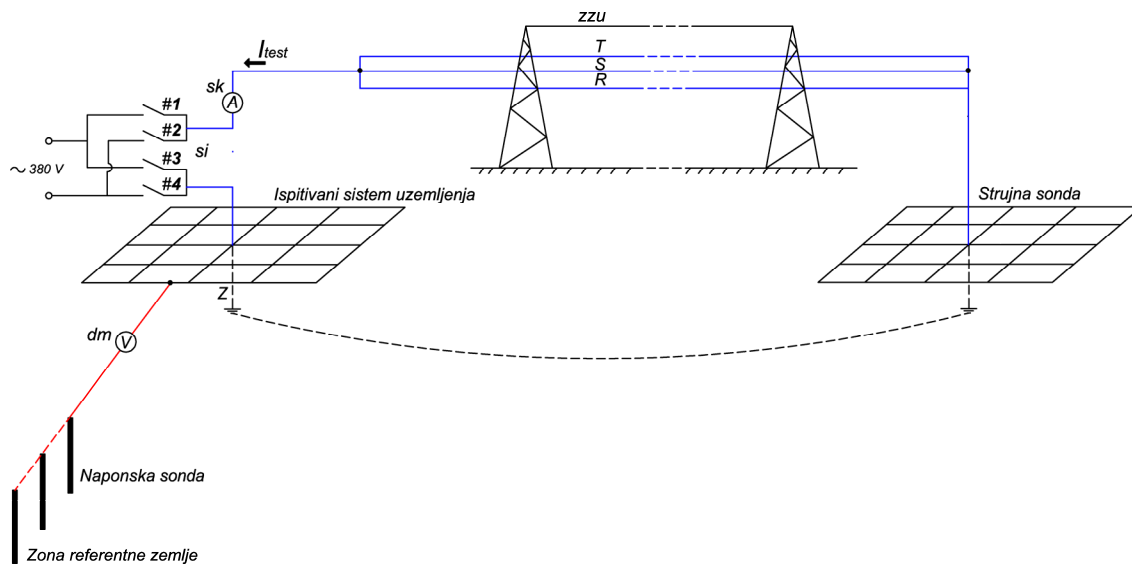
Pošto se intenziteti struja na različitim frekvencijama bitno ne razlikuju radićemo na svim frekvencijama, opet radi jednostavnosti, sa ispitnom strujom od 1 A.

6.3 FOP-TCRM

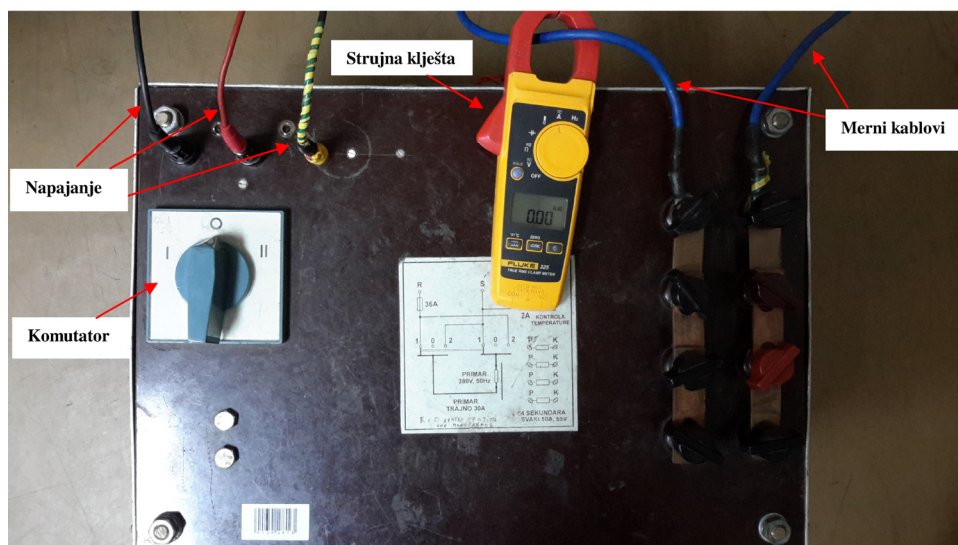
6.3.1 Blok šema mernog sistema

Principiska šema sistema za merenje impedanse uzemljenja primenom FOP-TCRM prikazana je na slici 53. Oznake na slici 53 imaju sledeće značenje: *dm*-digitalni multimeter (*Fluke 289*), I_{test} -test struja, crvena linija-naponsko ispitno kolo, *si*-izolacioni transformator i komutator polariteta ispitne struje (videti sliku 54), plava linija-strujno ispitno kolo, *sk*-digitalni multimeter sa strujnim klješćima (*Fluke 325*), *zzu*-zaštitno zemljovodno uže.

Pojavno, šema sa slike 53 razlikuje se od šeme na slici 47 samo u delu koji se odnosi na komutator koji je neophodan za primenu TCRM, tj. za potiskivanje sistemske smetnje. Pozicija naponske sonde određuje se na način koji je opisan u 3.3.1.2.



Slika 53 Principiska šema sistema za merenje impedanse uzemljenja na bazi FOP-TCRM



Slika 54 Izolacioni transformator i komutator polariteta ispitne struje, sa mernim kablovima i digitalnim multimetrom sa strujnim kličštima (Fluke 325)

6.3.2 Postupak merenja

Merenje, u segmentu koji se odnosi na primenu TCRM, odvija se u sledećim koracima [69]:

- prekidači #1 do #4 su otvoreni (isključen izvor ispitne struje); očitava se napon smetnje, U_0 , i struja smetnje, I_0 ;
- prekidači #1 i #4 su zatvoreni, prekidači #2 i #3 su otvoreni; očitava se napon $U_{(a)}$, i test struja, $I_{test(a)}$;
- prekidači #2 i #3 su zatvoreni, prekidači #1 i #4 su otvoreni; očitava se napon $U_{(b)}$, i test struja, $I_{test(b)}$;
- magnituda kompenziranog napona (eliminisan uticaj sistemske smetnje) je

$$U = \sqrt{\frac{U_{(a)}^2 + U_{(b)}^2}{2} - U_0^2} \quad (37)$$

- ispitna struja posle eliminacije sistemske smetnje je:

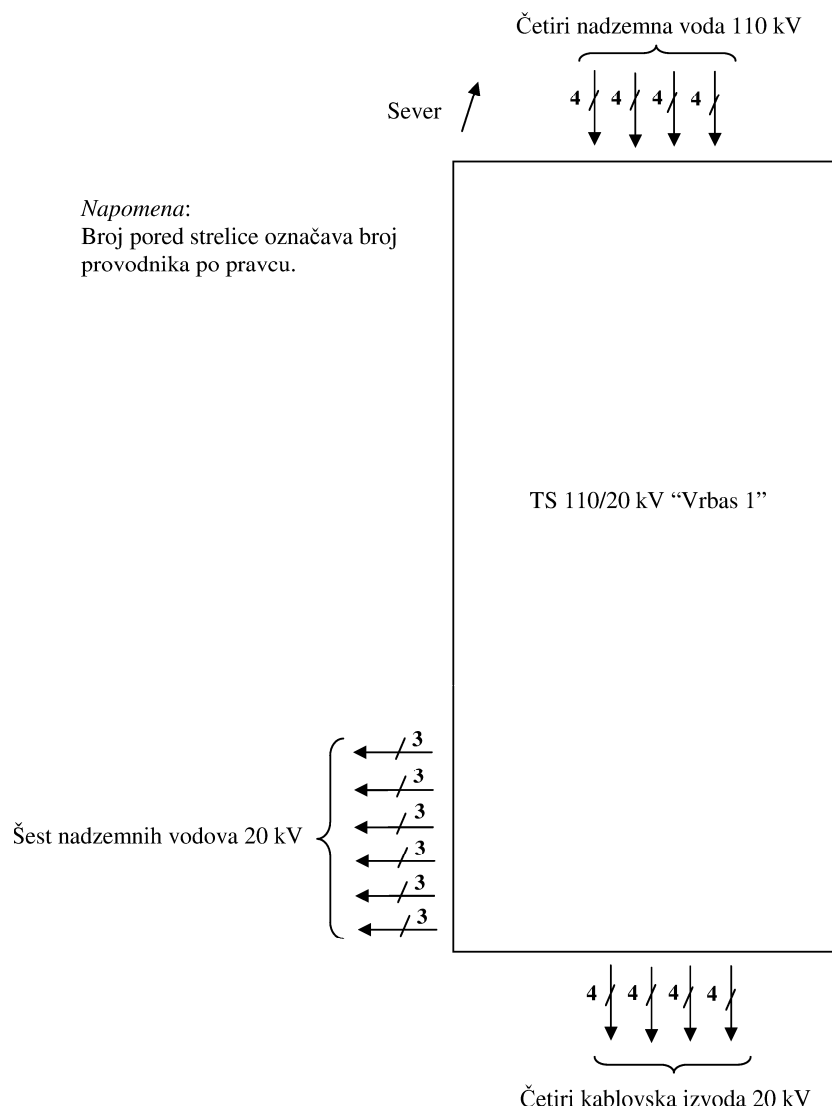
$$I_{test} = \sqrt{\frac{I_{test(a)}^2 + I_{test(b)}^2}{2} - I_0^2} \quad (38)$$

- magnituda prividne impedanse sistema uzemljenja na frekvenciji 50 Hz je

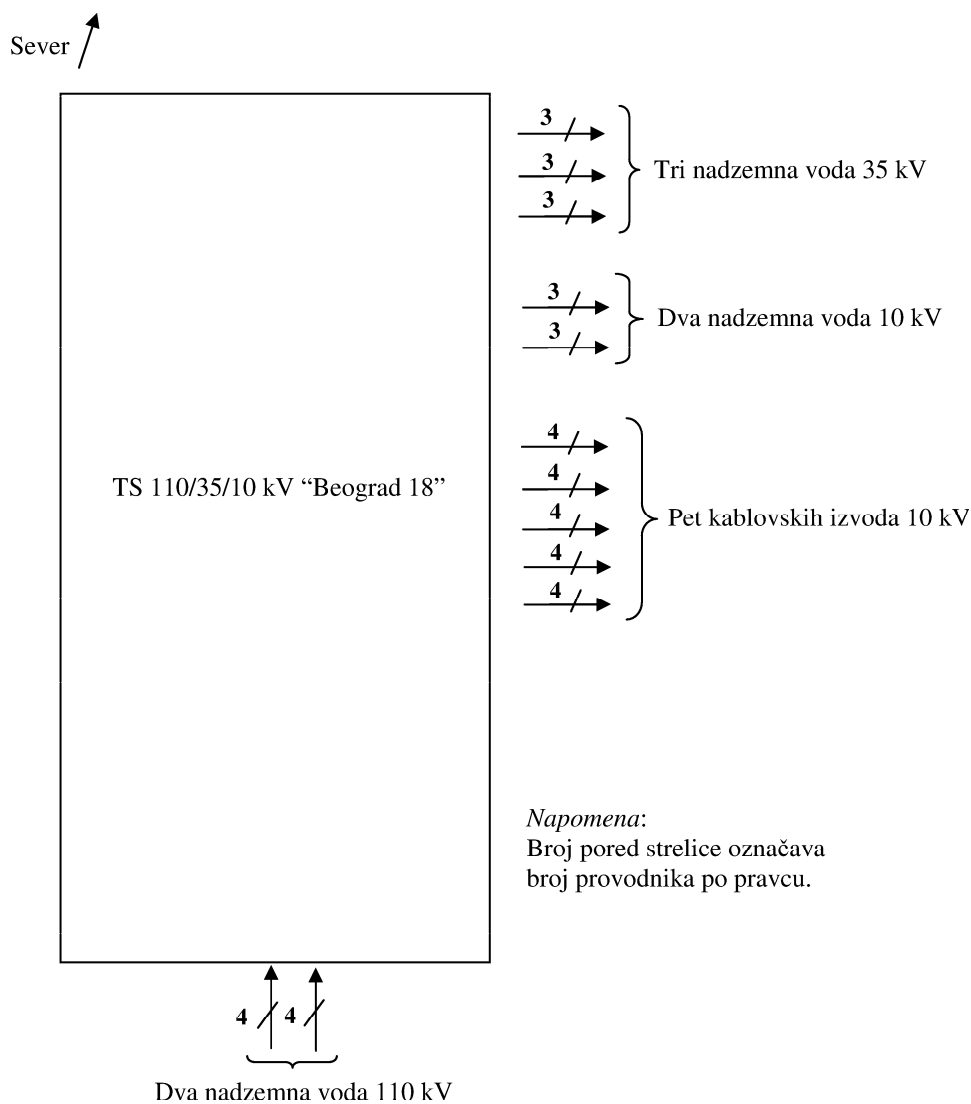
$$|Z_p(50 \text{ Hz})| = \frac{U}{I} \quad (39)$$

6.4 Analiza rezultata uporednog ispitivanja FOP-FSM i FOP-TCRM

Uporedo, primenom FOP-FSM i FOP-TCRM, izvršena su merenja impedanse sistema uzemljenja, na **lokacijama 1 i 2**. Skica lokacije sa naznakom priključenih transmisionih nadzemnih vodova i/ili podzemnih kablova prikazana je na slici 55 (**lokacija 1**) i na slici 56 (**lokacija 2**).



Slika 55 Skica lokacije 1: vrsta i pozicija priključene transmisione infrastrukture



Slika 56 Skica lokacije 2: vrsta i pozicija priključene transmisione infrastrukture

Na **lokaciji 1** merenja su izvršena sa ispitnom strujom:

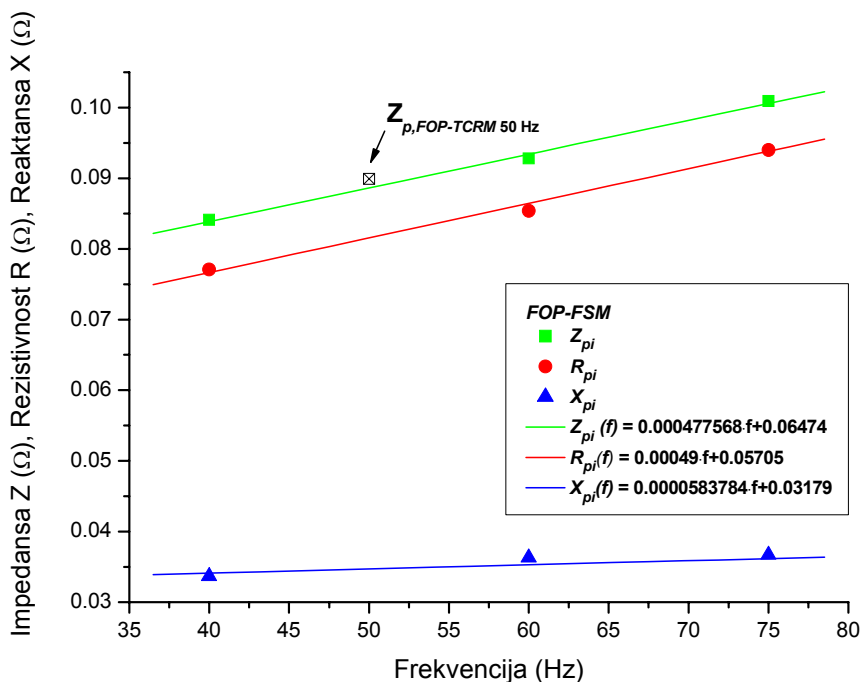
- 1 A za FOP-FSM;
- 36 A za FOP-TCRM⁵⁶.

Na **lokaciji 2** merenja su izvršena sa ispitnom strujom:

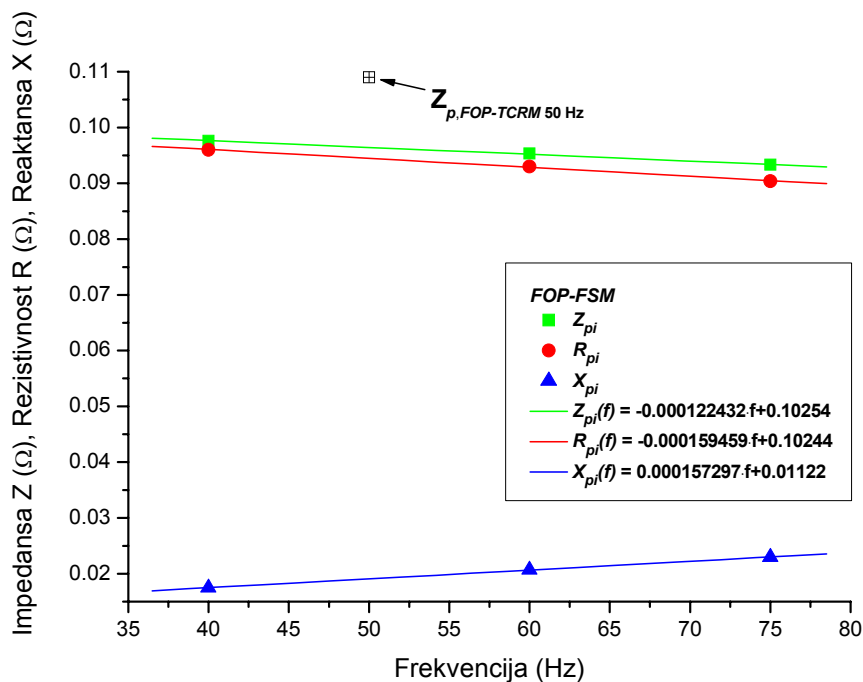
- 1 A za FOP-FSM;
- 40 A za FOP-TCRM.

⁵⁶ Snaga raspoloživog izvora ispitnog signala iznosi 15 kVA. Međutim, maksimalno mogući intenzitet struje koju izvor može da isporuči opterećenju zavisi od karakteristika opterećenja i od konstrukcijskih ograničenja izvora. Sa druge strane, primena TCRM inherentno zahteva veliki intenzitet ispitne struje radi ostvarenja velikog odnosa signal-šum i istovremeno velikog odnosa signal-smetnja (TCRM nema mogućnost da filtrira smetnju niti osnovni šum, pa enormno povećanje intenziteta ispitne struje ostaje kao jedina mogućnost da se eliminiše uticaj smetnje i osnovnog šuma). Dakle, navedena vrednost ispitne struje, 36 A, je vrednost koja je bila moguća u datim uslovima, tj. pri datom opterećenju izvora ispitnog signala. Isto važi i za lokaciju 2. Bitno je istaći da opisani problem ne postoji kada je u pitanju primena FSM.

Grafička prezentacija rezultata za FOP-FSM prikazana je na slici 57 (*lokacija 1*) i na slici 58 (*lokacija 2*). Na slikama su naznačene i tačke koje se odnose na rezultat za $Z_p(50\text{ Hz})$ dobijen primenom FOP-TCRM. U Tabeli 3 dati su detaljni rezultati za FOP-TCRM.



Slika 57 Lokacija 1: Rezultati na bazi FOP-FSM i FOP-TCRM



Slika 58 Lokacija 2: Rezultati na bazi FOP-FSM i FOP-TCRM

Tabela 3 FOP-TCRM: rezultati merenja impedanse sistema uzemljenja

Scenario	$I_{test(a)}$ [A]	$I_{test(b)}$ [A]	I_0 [A]	I_{test} [A]	$U_{(a)}$ [V]	$U_{(b)}$ [V]	U_0 [V]	U [V]	$ Z_p(50\text{ Hz}) $ [Ω]
<i>Lokacija 1</i>	36.08	36.14	0.2	36.11	4.89	2.09	1.9	3.245	0.0899
<i>Lokacija 2</i>	41	39	1.8	39.97	6.25	3.2	2.4	4.346	0.1087

Rekapitulacija uporednih merenja prividne impedanse sistema uzemljenja data je u Tabeli 4. Poslednja kolona u tabeli odnosi se na relativno odstupanje $Z_p(50\text{ Hz})$ koja je izmerena na bazi FOP-TCRM u odnosu na odgovarajući rezultat dobijen na bazi FOP-FSM. U povoljnim uslovima za FOP-TCRM (*lokacija 1*: pomoćno uzemljenje je u neaktivnoj transformatorskoj stanici i kontrolisana je promena sistemske smetnje u ispitivanoj transformatorskoj stanici), FOP-TCRM daje praktično isti rezultat kao FOP-FSM. Opisani scenario potvrđuje verodostojnost oba metoda. Međutim, u realnim, a za FOP-TCRM nepovoljnim uslovima (*lokacija 2*: prisutne su konduktivne sistemske smetnje u pomoćnom uzemljenju i u ispitivanom uzemljenju), FOP-TCRM rezultat značajno odstupa od odgovarajućeg rezultata koji je dobijen na bazi FOP-FSM. Imajući u vidu funkcionalne specifičnosti oba metoda, TCRM i FSM, ovaj scenario vrlo jasno afirmiše FOP-FSM.

Tabela 4 Relativno odstupanje rezultata merenja na 50 Hz

Scenario	f [Hz]	FOP-FSM	FOP-TCRM	$ e^r $ [%]
		$Z(f)$ [Ω]	Z [Ω]	
<i>Lokacija 1</i>	40	0.0841		1.47
	50	0.0886	0.0899	
	60	0.0928		
	75	0.1009		
<i>Lokacija 2</i>	40	0.0976		12.76
	50	0.0964	0.1087	
	60	0.0953		
	75	0.0933		

Radi suštinskog razumevanja razlike u performansama između FOP-TCRM i FOP-FSM, treba imati u vidu bitne funkcionalne razlike između TCRM i FSM. Naime, TCRM, pretpostavlja idealizovani fazor ispitnog signala na mrežnoj frekvenciji, zanemaruje

kompozitnu smetnju i širokopojasni šum, a pri tome uopšte ne koristi filtriranje. Zbog toga, intenzitet struje ispitnog signala mora biti znatno iznad nivoa kompozitne smetnje i širokopojasnog osnovnog šuma. To je teško kontrolisati. Naime, da bi u tim uslovima FOP uopšte mogao funkcionisati, paušalno se preporučuje relativno velika magnituda ispitne struje. Sasvim drugačija situacija je u slučaju primene FSM. Naime, FSM koristi uskopojasno filtriranje, pa na kontrolisan način eliminiše kompozitnu smetnju i širokopojasni šum. Zato, FOP u kombinaciji sa FSM radi u praktično savršenim uslovima i to sa vrlo malim intenzitetom ispitne struje.

Uvidom u grafičke rezultate za FOP-FSM, na obe lokacije (slike 57 i 58), konstatujemo da je prividna impedansa sistema uzemljenja dominantno rezistivna.

Dodatno, FOP-FSM omogućava i uvid u frekvencijsku zavisnost impedanse sistema uzemljenja. Karakter impedanse⁵⁷ (rastući sa frekvencijom, kao slici 57 ili opadajući sa frekvencijom, kao na slici 58) zavisi od više faktora. Ipak, dominantni uticaj ima uzemljeni deo transmisione infrastrukture (nadzemne i/ili podzemne, kao i druge podzemne metalne strukture koje su u neposrednoj blizini ispitivanog sistema uzemljenja) i frekvencijski zavisne električne karakteristike tla.

Uvidom u prave koje se odnose na reaktansu, na oba grafika, vidimo da se radi o induktivnim reaktansama. Induktivne reaktanse su posledica induktivnog uticaja transmisione infrastrukture koja je povezana sa ispitivanim sistemom uzemljenja.

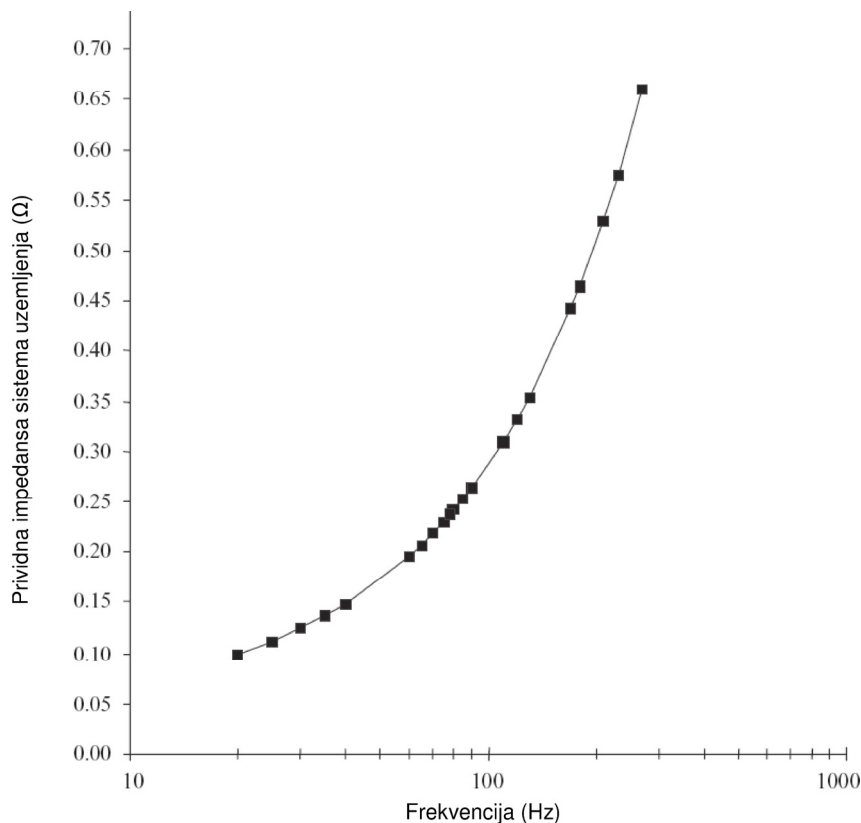
Sa druge strane, na slici 57, prava koja se odnosi na rezistivni deo prividne impedanse raste sa povećanjem frekvencije. Obrnutu situaciju konstatujemo na slici 58. Različito ponašanje rezistivnog dela impedanse u posmatranim primerima posledica je odgovarajućeg uticaja specifične električne otpornosti tla. U opštem slučaju, specifična električna otpornost tla je frekvencijski zavisna [110]. U homogenom tlu specifična električna otpornost tla raste sa porastom frekvencije. U slučaju nehomogenog tla, specifična električna otpornost tla opada sa porastom frekvencije. Pošto je rezistivni deo prividne impedanse uvek proporcionalan sa specifičnim otporom tla, struktura tla utiče na ponašanje rezistivnog dela prividne impedanse. Opisana ponašanja rezistivnog dela, kao i prividne impedanse uopšte,

⁵⁷ U opštem slučaju, kada se govori o karakteru neke impedanse uobičajeno je da se jednoznačno govori o induktivnom ili o kapacitivnom karakteru.

Međutim, kada je u pitanju prividna impedansa sistema uzemljenja, kao što će se videti u nastavku, objašnjenje je znatno složenije. Drugim rečima, termin karakter prividne impedanse podrazumeva složenije objašnjenje od uobičajenog.

pružaju mogućnost za brzu procenu karaktera tla (prosečno bočno⁵⁸ homogeno ili prosečno bočno nehomogeno). Očigledno, to je još jedna vrlo značajna pogodnost vezana za mogućnosti koje pruža FOP-FSM.

Na ovom mestu, ilustracije radi, na slici 59 prikazan je rezultat preuzet iz [4, Ch.8], koji, slično onom sa slike 57, jasno ukazuje na primer kada prividna impedansa raste sa povećanjem frekvencije.



Slika 59 [4, Ch 8] *Prividna impedansa sistema uzemljenja transformatorske stanice nazivnog napona 275 kV*

Pored detaljno opisanih rezultata dobijenih na bazi FOP-FSM, sproveli smo slična ispitivanja za još 23 VN postrojenja. Ispitivanja su sprovedena u transformatorskim stanicama (TS), razvodnim postrojenjima (RP), termoelektranama i hidroelektranama. Poimenično, navešćemo samo zaključke ispitivanja, a vezano za ponašanje (trend) prividne impedanse sa porastom frekvencije (rastući ili opadajući).

⁵⁸ Reč bočno ovde se koristi da se istakne pravac na kome postoji nehomogenost tla. Taj pravac je na liniji mernog kabla naponske sonde, a ortogonalan je na liniju dalekovoda koji služi za vezu sa strujnom sondom.

Rastući trend konstatovan je u sledećim VN postrojenjima:

TS 400/220/110 kV, *Pančevo 2*;
TS 400/110 kV, *Jagodina 4*;
TS 220/110 kV, *Beograd 17*;
TS 100/6 kV, *GTS 3*;
TS 110/35/10 kV, *Sušica*;
TS 110/20/35 kV, *Kovin*;
TS 110/35 kV, *Kragujevac 005*;
TS 110/35 kV, *Mosna*;
TS 110/35 kV, *Ilićevo*;
TS 110/10 kV, *Ristovac*;
Termoelektrana-toplana, *Novi Sad*;
Termoelektrana, *Nikola Tesla A*;
Termoelektrana *Nikola Tesla B*;
Hidroelektrana, *Zvornik*;
Hidroelektrana, *Potpeć*;
Hidroelektrana, *Uvac*;
Hidroelektrana, *Bistrica*;
Hidroelektrana, *Ovčar Banja*;
Hidroelektrana, *Međuvršje*.

Opadajući trend konstatovan je u sledećim VN postrojenjima:

RP 400 kV, *Mladost*;
TS 220/110 kV, *Valjevo 3*;
TS 110/35 kV, *Beograd 10*;
TS 35/10 kV, *Pudarci*.

Dakle, sudeći po navedenim rezultatima, a imajući u vidu diskusiju vezanu za karakter (ili trend) prividne impedanse, zaključujemo da u većini ispitivanih VN postrojenja, u preseku, tlo je homogeno. Preciznije, pošto u terminologiji koja se odnosi na strukturu specifične električne otpornosti tla, treba razlikovati horizontalnu i vertikalnu (bočnu) homogenost, ovde se radi o vertikalnoj (bočnoj) homogenosti tla.

6.5 Zaključak

Osnovni zaključci ovog poglavlja su:

1. Tačnost merenja impedanse sistema uzemljenja na bazi FOP bitno zavisi od načina na koji se potiskuje sistemska smetnja u procesu merenja.
2. Aktuelni metod (TCRM) za potiskivanje sistemske smetnje ima vrlo ograničene mogućnosti, pa je problematična i tačnost merenja na bazi FOP-TCRM.
3. FOP-FSM je otporan na sistemske konduktivne smetnje. Sprovedeni eksperimentalni rezultati dokazali su grešku (12.76%) za FOP-TCRM u odnosu na FOP-FSM.
4. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je optimalni intenzitet ispitne struje za FOP-FSM (oko 1 A) za red veličine manji od intenziteta neophodnog za FOP-TCRM (oko 40 A).
5. FOP-FSM omogućava detaljan uvid u karakter prividne impedanse sistema uzemljenja.
6. Primenom FOP-FSM dobija se i bitna kolateralna informacija o karakteru tla.
7. Praktična implementacija FOP-FSM, u hardverskom, manipulativnom i ekonomskom pogledu jednostavnija/pogodnija je od FOP-TCRM.
8. Indikativno je da se, za primenu FOP-FSM, može koristiti strujna sonda na znatno kraćem rastojanju nego pri konvencionalnom FOP-TCRM. To je afirmativna činjenica u korist FOP-FSM. Detaljno empirijsko istraživanje po ovoj osnovi kandidujemo za buduća istraživanja.

7

NOVI METOD ZA MERENJE NAPONA DODIRA I NAPONA KORAKA

7.1 Uvodne napomene

Sistem uzemljenja VN postrojenja treba da omogući da se u tlo odvede maksimalna očekivana struja kvara, a da pritom naponi dodira i naponi koraka, pre svega, unutar postrojenja, ne premaše maksimalno dozvoljene vrednosti.

Maksimalno dozvoljene vrednosti sigurnosnih karakteristika dominantno zavise od karakteristika površinskog sloja tla (unutar postrojenja) i definišu se na mrežnoj frekvenciji.

Uobičajeno je da se merenja napona dodira i napona koraka vrše u aktivnom VN postrojenju. Napon dodira meri se između uzemljenih metalnih masa i mogućih stajališta na tlu koja su na rastojanju 1 m od uzemljenih masa. Napon koraka meri se između raširenih stopala (1 m). U VN postrojenju postoji više kritičnih tačaka u kojima treba obaviti merenje napona dodira i napona koraka.

U odeljcima 3.4.1 do 3.4.3 izvršena je analiza i definisane su sigurnosne karakteristike sistema uzemljenja. Odgovarajući metrološki aspekti za FEM (*Footprint-Electrode Method*), problemi i principi analizirani su u odeljku 3.4.4. U ovom poglavlju, na eksperimentalnoj osnovi, biće dokazana bitna poboljšanja vezana za merenje napona dodira i napona koraka. Osnovni aspekti poboljšanja, u odnosu na konvencionalni FEM, su:

- (a) adekvatno eliminisanje uticaja sistemske smetnje,
- (b) korišćenje malog intenziteta ispitne struje i
- (c) pojednostavljenje procesa merenja.

Poboljšanja pod (a) i (b) temelje na primeni FSM (videti Poglavlje 5), a što je bitno drugačije od aktuelne merne prakse koja temelji na primeni TCRM. Naime, u Poglavlju 6 detaljno su eksperimentalno dokazani funkcionalni problemi vezani za mogućnost potiskivanja vremenski promenljive sistemske smetnje primenom TCRM. Isti tip problema postoji i u slučaju kada se TCRM koristi za potiskivanje sistemske smetnje pri merenju napona dodira i napona koraka. Stoga, u ovom kontekstu, radi jasnoće i da se izbegnu

nepotrebna ponavljanja, primenu TCRM nećemo razmatrati.

Pojednostavljenje navedeno pod (c) odnosi se na šemu merenja i na obradu rezultata merenja.

7.2 Elaboracija blok šeme sistema za merenje napona dodira i napona koraka

Kolo ispitne struje. Striktno posmatrano, za potrebe merenja napona dodira i napona koraka trebalo bi izvršiti kontrolisani zemljospoj u ispitivanom VN postrojenju. Međutim, to nije praktično niti je ekonomski opravdano. Praktično merenje napona dodira i napona koraka vrši se sa magnitudom struje koja je, u svakom slučaju, mnogo manja od projektovane struje kvara, I_f . Podaci o intenzitetu i trajanju struje kvara, za VN postrojenje u kome se vrše merenja, navedeni su u projektnoj dokumentaciji postrojenja. Pored toga, zbog ekonomskih razloga, merenje treba obaviti u uslovima kada je VN postrojenje aktivno. S tim u vezi, neophodno je eliminisati uticaj sistemske smetnje (smetnja na mrežnoj frekvenciji). U tu svrhu koristićemo FSM. Dakle, primenićemo sukcesivno ispitnu struju na tri ispitne frekvencije ($f_1=40$ Hz, $f_2=60$ Hz i $f_3=75$ Hz). Slično kao i prilikom merenja prividne impedanse sistema uzemljenja, prvo ćemo, koristeći kolo ispitne struje, ubrizgati probnu ispitnu struju (oko 10 A). Potom, na osnovu rezultata spektralne analize izvršićemo definitivni izbor intenziteta ispitne struje za potrebe merenja napona dodira i napona koraka.

U pogledu izbora vrste i načina povezivanja strujne sonde odgovarajuća objašnjenja su kao što je navedeno u kontekstu šeme za merenje impedanse sistema uzemljenja (videti odeljak 6.2.1).

Kolo ispitnog napona. Kada je uspostavljeno kolo ispitne struje ostaje da se, po scenariju opisanom uz sliku 25 (korišćenje diskova za simuliranje stopala i tegova za simuliranje težine čoveka), izvrši merenje napona dodira u praznom hodu, V_{dt} , i merenje napona koraka u praznom hodu, V_{ds} . Potom, na osnovu *Thevenin*-ovog ekvivalentnog kola (slika 26) treba izračunati napon dodira, V_b i napon koraka, V_s . Zatim, naponi V_t i V_s množe se sa faktorom I_f / I_{test} te tako dobijeni rezultati, V_T i V_S , upoređuju se sa odgovarajućim vrednostima iz Tabele 1 ili iz Tabele 2. Sigurnosni kriterijum je zadovoljen ako su naponi V_T i V_S manji od odgovarajućih vrednosti iz pomenutih tabela. Ovde treba imati u vidu da su vrednosti navedene u kolonama pomenutih tabela specificirane za odgovarajući homogeni površinski sloj tla, jer, za napon dodira i napon koraka, površinski sloj ima ključnu ulogu. Pomenuti sloj karakteriše se odgovarajućim specifičnim električnim otporom. Pored toga, kontaktne

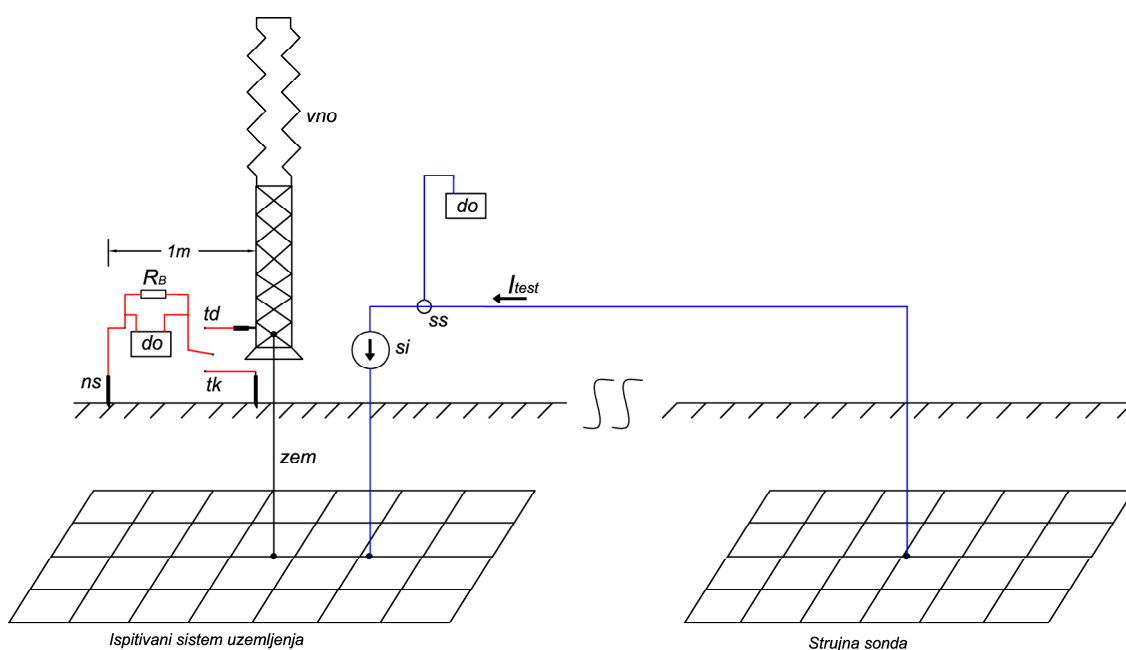
otpornosti stopala sa tlom (R_{ft} i R_{fs} , deo su *Thevenin*-ovog ekvivalenta), takođe zavise od karakteristika površinskog sloja tla.

Opisani postupak za merenje V_t i V_s , pa potom i izračunavanje V_T i V_S , komplikovan je u manipulativnom smislu (pre svega, zbog diskova i tegova).

Imajući ovo u vidu, predlažemo pojednostavljenije merne šeme, a bez narušavanja i/ili gubitka kontrole sigurnosnih kriterijuma. Osnovno objašnjenje po toj osnovi sastoji se u sledećem:

- Ljudsko telo, u električnom pogledu, predstavljamo sa ekvivalentnim otporom $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ (odgovarajuće objašnjenje po osnovu R_B dato je u odeljku 3.4.1).
- Ispitna struja generiše odgovarajući napon na R_B . Taj napon je srazmeran naponu dodira, odnosno naponu koraka.

Konačno, sada smo u poziciji da možemo kompletirati mernu šemu. Tako, za merenje napona dodira i napona koraka predlažemo principsku šemu kao što je prikazano na slici 60. Oznake na slici 60 imaju sledeće značenje: *do*-prenosni digitalni osciloskop (*Metrix, model Scopix III OX7104*), I_{test} -test struja, crvena linija-naponsko ispitno kolo, *si*-frekvencijski podesivi izvor (*California Instruments, model 5001iM*), *ns*-naponska sonda (prečnik 6 mm, dužina 150 mm; videti sliku 49), $R_B = 1000 \Omega$, plava linija-strujno ispitno kolo, *ss*-strujni senzor (*Metrix, model HX0073*), *td-ns* tačke između kojih se meri napon dodira, *tk-ns* tačke između kojih se meri napon koraka, *vno*-visokonaponska oprema, *zem*-zemljovod.



Slika 60 Principska šema sistema za merenje napona dodira i napona koraka

7.3 Prikupljanje i obrada rezultata merenja

Saglasno aktuelnom predlogu, princip merenja i obrada rezultata isti su za napon dodira i za napon koraka. Radi jednostavnosti i preglednosti, princip merenja i princip obrade rezultata objasnićemo detaljno za napon dodira pri ispitnoj frekvenciji f_i .

Na bazi odmeraka napona dodira u vremenskom domenu, koji su prikupljeni sa otpornika R_B pri ispitnoj frekvenciji f_i i memorisani u digitalnom osciloskopu, posle digitalnog filtriranja dobija se napon dodira, $V'_i(f_i)$. Slično, na bazi odmeraka ispitne struje, na frekvenciji f_i dobija se $I'_{test}(f_i)$.

Označimo sa $V'_T(f_i)$ napon dodira, ako je na otporniku R_B napon $V'_i(f_i)$. U tom slučaju možemo zapisati sledeću relaciju

$$\frac{V'_i(f_i)}{V'_T(f_i)} = \frac{I'_{test}(f_i)}{I'_{fa}(f_i)} \quad (40)$$

gde je $I'_{fa}(f_i)$ deo struje kvara koja se pri realnom zemljospoju odvodi sa sistema uzemljenja.

Dakle, ako je za razmatrano postrojenje faktor deljenja struje $S_f(f_i)$ na frekvenciji f_i , tada je

$$I'_{fa}(f_i) = S_f(f_i) \cdot I_f(f_i) \quad (41)$$

gde je $I_f(f_i)$ struja kvara na frekvenciji f_i . Kombinujući izraze (40) i (41) imamo:

$$\begin{aligned} V'_T(f_i) &= V'_i(f_i) \cdot \frac{I'_{fa}(f_i)}{I'_{test}(f_i)} \\ &= V'_i(f_i) \cdot \frac{I_f(f_i)}{I'_{test}(f_i)} \cdot S_f(f_i) \\ &= Z_{t,trans}(f_i) \cdot I_f(f_i) \cdot S_f(f_i) \end{aligned} \quad (42)$$

gde je

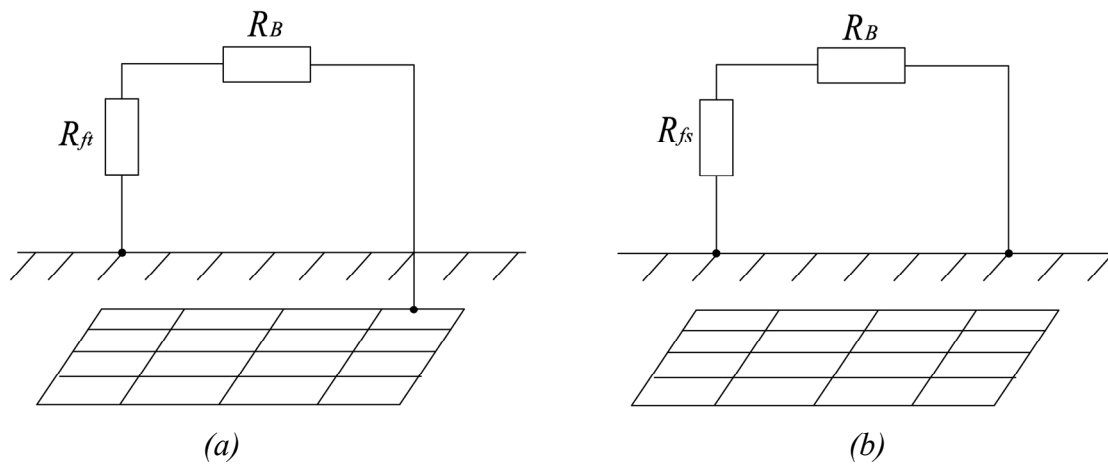
$$Z_{t,trans}(f_i) \hat{=} \frac{V'_i(f_i)}{I'_{test}(f_i)} \quad (43)$$

transimpedansa na frekvenciji f_i . Naime, odnos napona $V'_t(f_i)$ na otporniku R_B , i test struje, $I'_{test}(f_i)$ daje veličinu čija je dimenzija $[\Omega]$. U strogo formalnom smislu, odnos $V'_t(f_i)/I'_{test}(f_i)$ nije impedansa budući da struja $I'_{test}(f_i)$ ne protiče kroz otpornik R_B . Međutim, očigledno je da je struja, $I_R(f_i)$, koja protiče kroz otpornik R_B , proporcionalna sa ispitnom strujom $I'_{test}(f_i)$ koja protiče kroz sistem uzemljenja. Stoga, odnos $V'_t(f_i)/I'_{test}(f_i)$ proporcionalan je sa impedansom sistema uzemljenja. Otuda naziv transimpedansa.

Primenom linearne regresije na rezultate $Z_{t,trans}(f_1)$, $Z_{t,trans}(f_2)$ i $Z_{t,trans}(f_3)$, dobija se regresiona prava. Sa regresione prave, za $f=50$ Hz, očitava se $Z_{t,trans}(50$ Hz). Napon dodira dobijen na bazi merenja prema šemi sa slike 60, je

$$V'_T(50 \text{ Hz}) = Z_t(50 \text{ Hz}) \cdot I_f \cdot S_f \quad (44)$$

gde je I_f struja kvara i S_f koeficijent deljenja struje, obe veličine definisane su na 50 Hz. Međutim, treba voditi računa da merenje na osnovu šeme sa slike 60 ne vodi računa o



Slika 61 (a) Ekvivalentna šema relevantna za merenje napona dodira
(b) Ekvivalentna šema relevantna za merenje napona koraka

kontaktnoj otpornosti skupljenih stopala, R_{ft} . Dakle, u (44) treba uvesti odgovarajući korekcionni faktor. Naime, kada postoji simulacija stopala, napon na R_B srazmeran je sa $R_B/(R_{ft}+R_B)$ (videti sliku 61(a)). Imajući ovo u vidu, stvarni napon dodira, V_T , je

$$V_T = \frac{R_B}{R_{ft} + R_B} \cdot Z_{t,trans}(50 \text{ Hz}) \cdot I_f \cdot S_f \quad (45)$$

gde je $Z_{t,trans}$ (50 Hz), (ranije skraćeno označena sa Z_t (50 Hz)), transimpedansa napona dodira, R_{ft} kontaktna otpornost između skupljenih stopala [98]; $R_{ft} = R_f / 2 = 1.5 \cdot \rho_s$, $R_f = 3 \cdot \rho_s$ kontaktna otpornost pojedinačnog stopala (stopalo je aproksimirano sa diskom čija je površina 200 cm^2), ρ_s – specifična električna otpornost homogenog površinskog sloja.

Na osnovu sličnih razmatranja može se utvrditi da je napon koraka V_S :

$$V_S = \frac{R_B}{R_{fs} + R_B} \cdot Z_{s,trans} (50 \text{ Hz}) \cdot I_f \cdot S_f \quad (46)$$

gde je $Z_{s,trans}$ (50 Hz) transimpedansa za napon koraka, R_{fs} je kontaktna otpornost raširenih stopala [98]; $R_{fs} = 6 \cdot \rho_s$, ρ_s – specifična električna otpornost površinskog sloja.

Dakle, opisani metod, u užem i u širem smislu⁵⁹, praktičniji je i inherentno tačniji od FEM-TCRM [69].

Radi provere u pogledu zadovoljenja sigurnosnih kriterijuma, napon V_T odnosno V_S , pri datoj vrednosti ρ_s , upoređuju se sa odgovarajućim graničnim vrednostima iz Tabele 1, odnosno Tabele 2.

U praksi, napon dodira je ključna sigurnosna karakteristika. Naime, ako je zadovoljen sigurnosni kriterijum za napon dodira biće zadovoljen i odgovarajući kriterijum za napon koraka.

7.4 Eksperiment

7.4.1 Izbor VN objekta

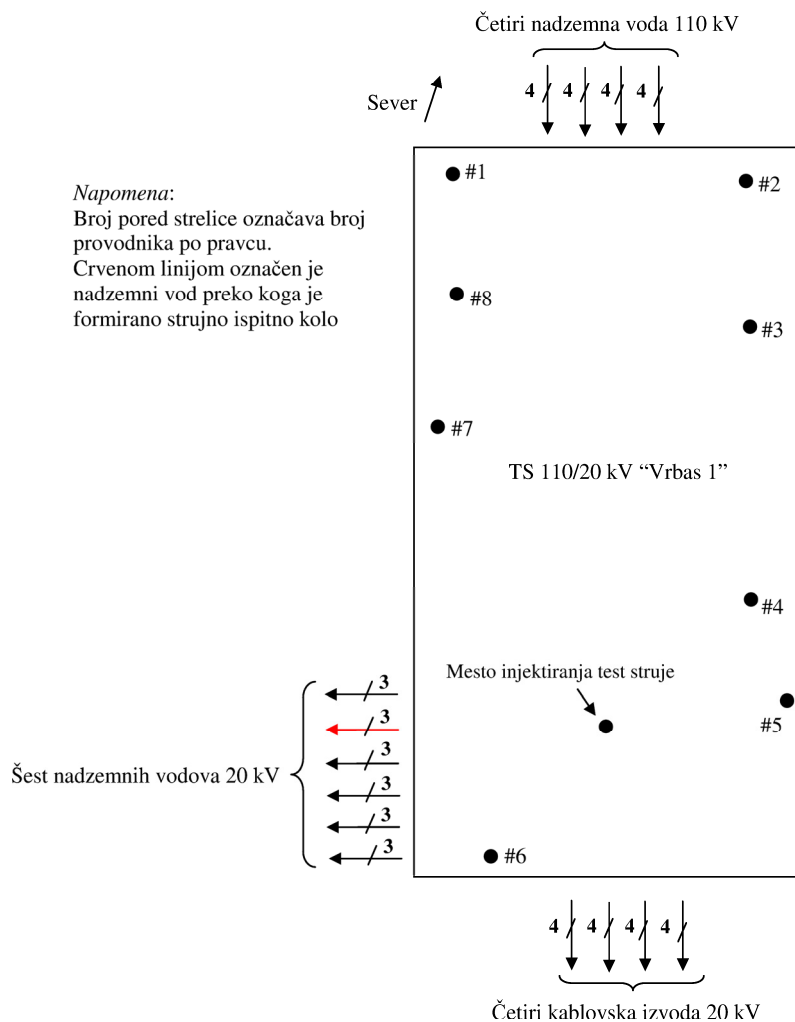
Ispitivanja su sprovedena u transformatorskoj stanici TS 110/20 kV (*Vrbas 1*, Vrbas). Skica lokacije sa pozicijama mernih tačaka data je na slici 62. Projektovani intenzitet struje kvara iznosi $I_f = 8.75 \text{ kA}$. Trajanje kvara 0.4 s. Faktor deljenja struje $S_f = 0.56$. Površinski sloj tla na kom su izvršena merenja ima specifičnu električnu otpornost od oko $100 \Omega\text{m}$.

Veza između ispitivanog sistema uzemljenja i strujne sonde ostvarena je preko neaktivnog dalekovoda nazivnog napona 20 kV, čiji su fazni provodnici, za ovu namenu, međusobno povezani. Strujna sonda nalazi se na rastojanju 12 km od ispitivanog sistema uzemljenja.

⁵⁹ Fraza u užem smislu odnosi se na metod merenja napona dodira i napona koraka bez uticaja smetnji. Fraza u širem smislu odnosi se na robustnost metoda u odnosu na sistemsku smetnju.

Razvodno postrojenje (20 kV, *Savino selo*), čiji je uzemljivački sistem imao ulogu strujne sonde, bilo je u beznaponskom stanju prilikom predmetnog merenja.

Ispitivanja su sprovedena 9. decembra 2015. godine.



Slika 62 Skica lokacije i raspored mernih tačaka.

Na pozicijama #1 do #7 meri se napon dodira, na poziciji #8 meri se napon koraka.

Spektralnom analizom probne ispitne struje utvrđeno je da optimalni intenzitet ispitne struje⁶⁰ iznosi 2 A. Iz praktičnih razloga, bez uticaja na opštost i/ili tačnost, merenje napona dodira i napona koraka obavljeno je sa ispitnom strujom od oko 3 A.

⁶⁰ Merenje je obavljeno sa ispitnom strujom od 3 A, umesto sa optimalnim intenzitetom od 2 A. Jednostavno, postojao je operativni problem u izvoru ispitne struje, pa u terenskim uslovima intenzitet nije mogao biti smanjen na 2 A. To ni u kom pogledu nije uticalo na tačnost merenja. Naime, povećanje intenziteta ispitne struje iznad optimalne vrednosti, koja garantuje 30 dB za vrednost odnosa signal-šum, nema praktični uticaj na poboljšanje kvaliteta merenja (videti diskusiju u poglavlju 5). Dakle, isključivo radi korektnosti, navedena je činjenica da je merenje sprovedeno sa 3 A.

7.4.2 Rezultati

Merenje napona dodira izvršeno je na pozicijama koje su označene sa #1 do #7, a merenje napona koraka na poziciji #8. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tabeli 5. Pretposljednja kolona odnosi se na transimpedansu za napon dodira, odnosno napon koraka na mrežnoj frekvenciji. Slično, u poslednjoj koloni navedene su odgovarajuće vrednosti za napon dodira i napon koraka (na mrežnoj frekvenciji).

Tabela 5 Rezultati merenja napona dodira i napona koraka

Scenario		f [Hz]	$I'_{test}(f_i)$ [A]	$V'_{i(s)}(f_i)$ [mV]	$Z_{trans}(f)$ [Ω]	$Z_t(50\text{ Hz})$ [Ω]	$V_{T(S)}$ [V]	
TS 110/20 kV, Vrbas I	#1	40	3.0	108.21	0.03607	0.03854	164.22	
		60	3.0	123.02	0.04101			
		75	3.0	134.12	0.04471			
	#2	40	3.0	83.30	0.02777	0.02922	124.51	
		60	3.0	92.29	0.03076			
		75	3.0	97.70	0.03257			
	#3	40	3.0	36.92	0.01231	0.01264	53.86	
		60	3.0	39.18	0.01306			
		75	3.0	39.58	0.01319			
	#4	40	3.0	56.86	0.01895	0.02004	85.39	
		60	3.0	63.89	0.02130			
		75	3.0	66.66	0.02222			
	#5	40	3.0	67.35	0.02245	0.02364	100.73	
		60	3.0	74.75	0.02492			
		75	3.0	79.05	0.02635			
	#6	40	3.0	52.90	0.01763	0.01867	79.55	
		60	3.0	59.52	0.01984			
		75	3.0	62.67	0.02089			
	#7	40	3.0	74.16	0.02472	0.02584	110.10	
		60	3.0	81.58	0.02719			
		75	3.0	83.98	0.02799			
	#8	Korak	40	3.0	29.16	0.00972	0.00990	30.32
			60	3.0	30.30	0.01010		
			75	3.0	30.83	0.01028		

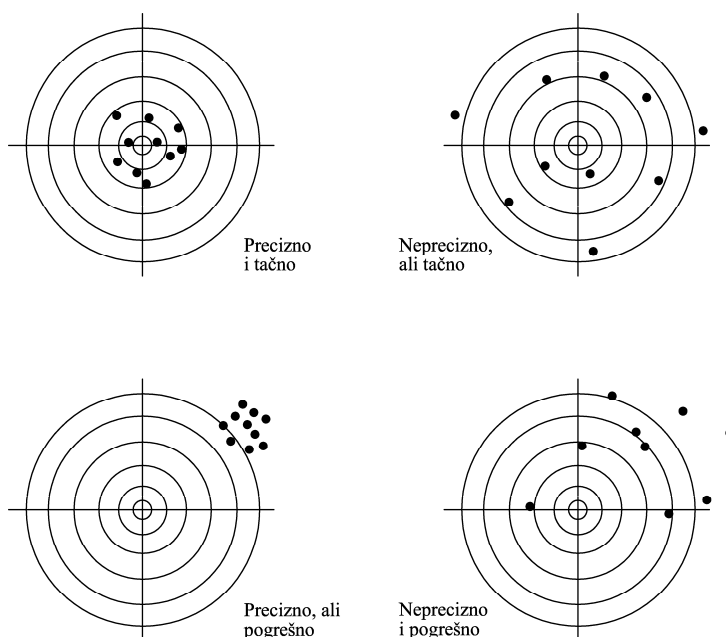
Poređenjem vrednosti za napon dodira (poslednja kolona Tabele 5) sa graničnim vrednostima iz Tabele 1 (za $\rho_s=100\ \Omega\text{m}$) nalazimo da je u mernim tačkama #1 do #7 napon dodira znatno ispod dopuštene granične vrednosti (212 V), tj. u pomenutim tačkama napon

dodira nije opasan po čoveka. Slično, poređenjem rezultata za napon koraka sa graničnim vrednostima iz Tabele 2 nalazimo da i izmereni napon koraka nije opasan po čoveka.

7.4.3 Analiza merne nesigurnosti

Na kraju, korisno je izračunati interval proširene merne nesigurnosti. Naravno, nije u pitanju vrsta analize koja je specifična samo za merenje napona dodira i/ili napona koraka. U opštem slučaju, za bilo koje merenje, posebno ono koje se ponavlja više puta, korisno je sprovesti takvu analizu radi provere da li su pojedinačni rezultati regularni, tj. da li se nalaze unutar očekivanog opsega.

Radi vizuelnog doživljaja tačnosti i preciznosti merenja (drugim rečima, radi uvida u specifičnosti rasipanja rezultata), a s tim u vezi i radi uvida u motiv za kvantitativno razmatranje merne nesigurnosti, može da posluži dobro poznata slika mete i pogodaka (slika 63).



Slika 63 Vizuelizacija tačnosti i preciznosti merenja – analogija sa modelom mete

Analogija sa ponovljenim merenjima je: centar mete simbolizuje hipotetički (nepoznati) tačni rezultat merenja, tačke simbolizuju pojedinačne rezultate pri ponovljenim merenjima.

Uz ovu napomenu, korisno je izvršiti analizu merne nesigurnosti za rezultat koji bazira na primeni FSM (merenje napona i struja na tri različite frekvencije). U konkretnom primeru

razmatramo FEM-FSM gde se merna nesigurnost potencijalno odnosi na transimpedansu. Na isti način može se razmatrati merna nesigurnost za FOP-FSM, jer je prividna impedansa sistema uzemljenja srazmerna ovde razmatranoj transimpedansi.

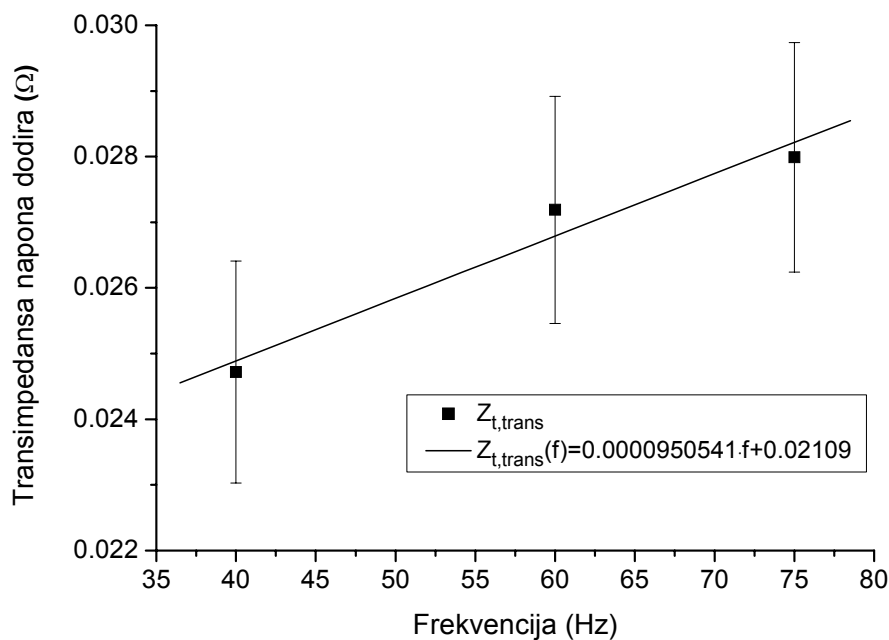
Uvidom u izraze (45) i (46) konstatujemo da je napon dodira, odnosno napon koraka, proporcionalan sa odgovarajućom transimpedansom. Dakle, problem se svodi na izračunavanje merne nesigurnosti [111], za $Z_{t,trans}$ i $Z_{s,trans}$, potom i za V_T i V_S .

U opštoj formi, analiza obuhvata:

$$\frac{V \pm \Delta V}{I \pm \Delta I} \Rightarrow Z \pm \Delta Z \Rightarrow V_{T(S)} \pm u_{e,T(S)}$$

gde je $\pm u_e$ proširena merna nesigurnost.

Intervali proširene merne nesigurnosti, konačne vrednosti napona dodira i napona koraka, kao i ocena ispunjenosti bezbednosnih zahteva, predstavljeni su u Tabeli 6. Na slici 64, ilustracije radi, dat je grafički rezultat za transimpedansu u mernoj tački #7. Vertikalni



Slika 64 Regresiona analiza za transimpedansu u mernoj tački #7. Pravougaonici označavaju merne rezultate na ispitnim frekvencijama. Vertikalni graničnici definišu moguće odstupanje rezultata za transimpedansu na pojedinačnoj ispitnoj frekvenciji.

graničnik odstupanja (*error bar*) označava mogući raspon vrednosti unutar kog se može naći veličina sa ordinate, a po osnovu merenja napona i struje. Naravno, taj raspon nije posledica

FSM, ali je snažan indikator pogodnosti primene linearne regresije na bazi tri FSM rezultata. Naime, očigledno je da bi odgovarajući rezultat dobijen na bazi interpolacije rezultata po osnovu dve ispitne frekvencije pomerene u odnosu na 50 Hz, ili rezultat dobijen na bazi ekstrapolacije po osnovu rezultata na jednoj frekvenciji pomeenoj u odnosu na 50 Hz, imao veću grešku na 50 Hz nego rezultat dobijen na bazi linearne regresije rezultata dobijenih po osnovu tri ispitne frekvencije.

Tabela 6 Procena merne nesigurnosti

Scenario		f [Hz]	$\pm u_e$ [Ω]	$Z_t(f) \pm u_e$ [Ω]	$V_{T,S} \pm u_e$ [V]	Ocena*
TS 110/20 kV, Vrbaš I	#1	40	0.00188	0.03607±0.00188		DA
		50		0.03854±0.00192	164.22±8.18	
		60	0.00196	0.04101±0.00196		
		75	0.00205	0.04471±0.00205		
	#2	40	0.00174	0.02777±0.00174		DA
		50		0.02922±0.00176	124.51±7.50	
		60	0.00178	0.03076±0.00178		
		75	0.00182	0.03257±0.00182		
	#3	40	0.00084	0.01231±0.00084		DA
		50		0.01264±0.00084	53.86±3.58	
		60	0.00085	0.01306±0.00085		
		75	0.00086	0.01319±0.00086		
	#4	40	0.00162	0.01895±0.00162		DA
		50		0.02004±0.00164	85.39±6.99	
		60	0.00165	0.02130±0.00165		
		75	0.00166	0.02222±0.00166		
	#5	40	0.00166	0.02245±0.00166		DA
		50		0.02364±0.00167	100.73±7.12	
		60	0.00169	0.02492±0.00169		
		75	0.00172	0.02635±0.00172		
	#6	40	0.00159	0.01763±0.00159		DA
		50		0.01867±0.00160	79.55±6.82	
		60	0.00163	0.01984±0.00163		
		75	0.00164	0.02089±0.00164		
	#7	40	0.00169	0.02472±0.00169		DA
		50		0.02584±0.00170	110.10±7.24	
		60	0.00174	0.02719±0.00174		
		75	0.00175	0.02799±0.00175		
#8	Korak	40	0.00080	0.00972±0.00080		DA
		50		0.00990±0.00081	30.32±2.48	
		60	0.00081	0.01010±0.00081		
		75	0.00082	0.01028±0.00082		

*DA-ispunjeni bezbednosni zahtevi, NE-nisu ispunjeni bezbednosni zahtevi.

7.5 Zaključak

Osnovni zaključci ovog poglavlja su:

1. Obrazložen je i eksperimentalno dokazan novi metod merenja napona dodira i napona koraka u aktivnom VN postrojenju.
2. U osnovi metod je ekvivalentan sa FEM. U tom kontekstu može se označiti kao FEM–FSM.
3. Po performansama novi metod (FEM-FSM) jednostavniji je, a u prisustvu sistemske smetnje i tačniji od FEM-TCRM.

Deo III: OPŠTI ZAKLJUČCI

*Science never solves a problem
without creating ten more.*
George Bernard Shaw

8

DOPRINOSI, OPŠTI ZAKLJUČCI I SUGESTIJE ZA DALJI RAD

8.1 Doprinosi i zaključci

Sistem uzemljenja u elektroenergetskom postrojenju ima ključnu ulogu, kako u funkcionalnom tako i u sigurnosnom pogledu. Funkcionalni aspekt odnosi se na samo postrojenje, a u nekim situacijama i na odgovarajući deo elektroenergetskog sistema. Sigurnosni aspekt odnosi se na osoblje i opremu u elektroenergetskom postrojenju.

U fokusu ove disertacije bilo je unapređenje merenja performansi sistema uzemljenja visokonaponskih (VN) postrojenja (naponski nivo: 110 kV, 220 kV i 400 kV).

U toku radnog veka VN postrojenja, zbog redovne kontrole, ili radi uvida u eventualne posledice vanrednog događaja (napr., posle zemljospoja), neophodno je putem merenja proveriti performanse sistema uzemljenja. Zbog ekonomskih i sistemskih razloga pomenuta merenja treba obaviti bez prekida rada VN postrojenja, tj. merenja treba obaviti na aktivnom VN postrojenju. U tim okolnostima nivo sistemske smetnje je visok što direktno utiče na izvodljivost i tačnost merenja.

Osnovne performanse sistema uzemljenja su:

- *impedansa,*
- *napon dodira,*
- *napon koraka i*
- *kontinuitet.*

Način merenja navedenih performansi predmet je razmatranja u odgovarajućim standardima (internacionalnim i nacionalnim). Globalni uticaj u ovoj oblasti ima IEEE Std 81-2012. U fokusu ove disertacije bilo je kritičko preispitivanje IEEE Std 81-2012 i s tim u vezi poboljšanje odgovarajućih mernih metoda.

U **Delu I** ove disertacije izvršen je pregled i analiza osnovnih specifičnosti sistema uzemljenja VN postrojenja. Takođe, izvršena je sistematska analiza aktuelnih problema i rešenja vezanih za proces merenja i za ublažavanje uticaja sistemske smetnje na proces

merjenja sigurnosnih karakteristika VN postrojenja – sve saglasno preporukama iz IEEE Std 81-2012. Poimenično, konstatovani su sledeći problemi.

Ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja

- Kriterijumi za ispitivanje kontinuiteta su eksplicitno subjektivni.
- Intenzitet DC ispitne struje (200 do 300 A) invazivan je za aktivno VN postrojenje.

Metod za otklanjanje uticaja sistemske smetnje

- Jednofrekvencijski i dvofrekvencijski metod pomerene ispitne frekvencije ima inherentne probleme u pogledu tačnosti (krajnji rezultat se određuje na bazi interpolacije ili ekstrapolacije pri relativno velikoj mernoj nesigurnosti).
- Korišćenje TCRM (*Test Current Reversal Method*) inherentno podrazumeva da je sistemska smetnja vremenski nepromenljiva (u stvarnosti, sistemska smetnja posledica je vremenski promenljive struje nesimetrije u sistemu).
- Primena TCRM zahteva relativno veliki intenzitet AC ispitne struje (paušalno se definiše; do oko 100 A) radi obezbeđenja adekvatnog odnosa ispitni signal - sistemska šum.
- Ako se u mernoj šemi koristi TCRM, a uzemljenje susednog VN postrojenja služi kao strujna sonda, u tom slučaju, susedno VN postrojenje mora biti neaktivno.

Merenje impedanse sistema uzemljenja

- Primena nekonvencionalnog FOP (*Fall of Potential*) metoda za merenje impedanse zahteva adekvatno otklanjanje uticaja sistemske smetnje. Imajući u vidu prethodni komentar to nije egzaktno izvodljivo primenom TCRM, niti primenom jednofrekvencijskog ili dvofrekvencijskog metoda pomerene ispitne frekvencije.
- FOP-TCRM striktno je izvodljiv u uslovima vremenski nepromenljive sistemske smetnje.
- FOP-TCRM inherentno zahteva relativno veliki intenzitet AC ispitne struje (paušalno se definiše; do oko 100 A).

Merenje napona dodira i napona koraka

- *Footprint-Electrode Method* (FEM) za merenje napona dodira i napona koraka zahteva adekvatno otklanjanje uticaja sistemske smetnje, a u manipulativnom pogledu je nepraktičan jer zahteva diskove i tegove (za simuliranje stopala i težine čoveka). Očigledno, kombinacija FEM-TCRM problematična je sa stanovišta izvodljivosti i sa stanovišta praktičnosti.

U **Delu II** ove disertacije analizirana su i eksperimentalno verifikovana poboljšanja koja potpuno eliminišu gore pomenute probleme i/ili nedostatke. Poimenično, osnovna poboljšanja i novi kvalitet predloženih mernih metoda, mogu se rezimirati na sledeći način.

Ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja

1. Detaljno je elaboriran poboljšani A-HCM (*Advanced High Current Test Method*) za ispitivanje kontinuiteta sistema uzemljenja VN postrojenja sa ispitnom DC strujom od 100 A.
2. Za razliku od konvencionalnog HCM (*High Current Test Method*), A-HCM zasnovan je na objektivnim i jasno definisanim kriterijumima.
3. Proces merenja i proces obrade mernih rezultata jasno su razdvojeni. Proces merenja nije opterećen analizom i/ili interpretacijom rezultata.
4. Proces obrade mernih rezultata je potpuno automatizovan.
5. A-HCM uspešno je eksperimentalno verifikovan u šesnaest VN objekata različitog naponskog nivoa.

FSM - metod za eliminisanje uticaja sistemske smetnje

1. Eksperimentalno je potvrđeno da FSM uspešno otklanja uticaj sistemske smetnje (iz VN postrojenja koje je predmet ispitivanja i iz susednog postrojenja čije uzemljenje služi kao strujna sonda) i obezbeđuje kontrolisani odnos ispitni signal- sistemski šum.
2. FSM je praktično neosetljiv na fluktuacije sistemske smetnje.
3. FSM inherentno garantuje kvalitetnije merenje (manju mernu grešku) od bilo kog tradicionalnog metoda koji koristi pomerenu test frekvenciju(e).

4. U procesu merenja na bazi FSM koristi se optimalni intenzitet ispitne struje. On se utvrđuje na početku merenja po proceduri koja je predložena u ovom radu. Ovaj pristup je bitno različit od prakse karakteristične za tradicionalne metode, gde se intenzitet test struje definiše paušalno, bez obzira na specifičnost VN postrojenja.
5. FSM eksperimentalno je potvrđen u oko pedeset mernih scenarija u VN postrojenjima različitog naponskog nivoa.

Merenje impedanse sistema uzemljenja

1. Nekonvencionalni FOP (*Fall of Potential*) metod za merenje impedanse sistema uzemljenja u kombinaciji sa FSM, FOP-FSM, bolji je od FOP-TCRM.
2. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je potrebniji intenzitet ispitne struje za FOP-FSM (oko 1 A) za red veličine manji od intenziteta neophodnog za FOP-TCRM (oko 40 A) u istim uslovima.
3. FOP-FSM omogućava detaljan uvid u karakter prividne impedanse sistema uzemljenja.
4. Praktična implementacija FOP-FSM, u hardverskom, manipulativnom i ekonomskom pogledu jednostavnija/pogodnija je od FOP-TCRM.
5. Primenom FOP-FSM dobija se i bitna kolateralna informacija o karakteru tla (homogeno, nehomogeno) unutar VN postrojenja.
6. Indikativno je i vrlo značajno da se, za primenu FOP-FSM, može koristiti strujna sonda na znatno kraćem rastojanju nego pri konvencionalnom FOP-TCRM.
7. FOP-FSM uspešno je primenjen u dvadeset pet VN postrojenja različitog naponskog nivoa.

Merenje napona dodira i napona koraka

1. Analitički i eksperimentalno dokazan je novi metod (FEM-FSM) za merenje napona dodira i napona koraka, u aktivnom VN postrojenju.
2. Po performansama novi metod je jednostavniji, a u prisustvu sistemske smetnje i tačniji od FEM-TCRM.
3. Novi metod za merenje napona dodira i napona koraka uspešno je primenjen u dvadeset pet VN postrojenja različitog naponskog nivoa.

8.2 Sugestije za dalji rad

Mogući pravci za dalji rad po osnovu tematike razmatrane u ovoj disertaciji su:

A. Prikupljanje i sistematizacija rezultata merenja dobijenih primenom novih metoda elaboriranih u ovoj disertaciji, a u cilju kandidovanja pomenutih metoda za razmatranje od strane odgovarajućeg standardizacionog tela.

Preciznije, po osnovu FSM koncepta, FOP-FSM i novog metoda za merenje napona dodira i napona koraka već postoji reprezentativni uzorak merenja.

Po osnovu novog metoda za ispitivanje kontinuiteta, u masi, postoji reprezentativni broj merenja. Međutim, kao što je navedeno u Poglavlju 4, neophodno je nastaviti sa empirijskom potvrdom uspostavljenih kriterijuma za VN postrojenja nazivnog napona 220 kV i 400 kV.

B. Pozicija strujne sonde.

FSM koncept zahteva da intenzitet ispitne struje bude reda 1 A. Dakle, kada se primenjuje FSM koncept (za merenje impedanse sistema uzemljenja, kao i za merenje napona dodira i napona koraka, a eventualno i za ispitivanje kontinuiteta) uticaj strujne sonde (tradicionalno - sistem uzemljenja susednog VN postrojenja) je teorijski i praktično zanemarljiv na ispitivani sistem uzemljenja. Drugim rečima, pri maloj ispitnoj struji, strujna sonda može biti na relativno malom rastojanju od ispitivanog sistema uzemljenja. Ovo je očigledna činjenica i potpuno je različita od konvencionalnog pristupa. Međutim, praktično korišćenje te mogućnosti, barem u ovom času, nije jednostavno. Stoga, predlažemo dalje istraživanje ovog problema na empirijskoj osnovi.

C. Potpuna automatizacija merenja.

Prema aktuelnom stanju, nivo automatizacije metoda elaboriranih i empirijski potvrđenih u okviru ove disertacije nije isti.

U pogledu automatizacije najdalje se odmaklo u novom metodu za proveru kontinuiteta sistema uzemljenja. Takođe, automatizovan je FSM koncept, pa u tom delu i FOP-FSM, kao i novi metod za merenje napona dodira i napona koraka. Međutim, merenje impedanse sistema uzemljenja i merenje napona dodira i napona koraka, u aktivnom VN postrojenju, zahteva poznavanje vrednosti faktora

deljenja struje, S_f . Merenje je najverodostojniji način da se dođe do pomenutog podatka. Drugim rečima, treba sinhronizovano meriti fazore struja u prostorno udaljenim tačkama unutar VN postrojenja. Takođe, izmerene rezultate treba preneti do računara koji treba da procesuiru te podatke zajedno sa drugim podacima dobijenim u procesu merenja. Dakle, postoje dva problema koje treba rešiti:

- (a) merenje fazora i
- (b) prenos podataka o rezultatu merenja.

Tip problema koji je označen pod (a), u ovoj disertaciji, već je rešen na softverskom nivou (PMU; videti odeljak 6.2.2). Za potrebe merenja o kojim se ovde govori neophodna je hardverska realizacija sklopa za merenje fazora.

Po pitanju prenosa, u principu, postoje dve mogućnosti: korišćenje bežičnog prenosa ili korišćenje optičkog vlakna. Bežični prenos omogućava punu fleksibilnost. Međutim, radio-prenos u VN postrojenju je izložen intenzivnim smetnjama. Sasvim suprotno, korišćenje optičkog vlakna je lišeno problema vezanih za smetnje, ali je manje fleksibilno.

Sumarno, puna automatizacija procesa merenja u VN postrojenju zahteva razvoj odgovarajućih hardverskih sklopova.

LITERATURA*

- [1] J. He, R. Zeng, B. Zhang, *Methodology and technology for power system grounding*, first ed., John Wiley & Sons, Singapore Pte. Ltd., Singapore, 2013.
- [2] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Std 81-2012, Dec. 2012.
- [3] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-2000, Jan. 2000.
- [4] A. Haddad and D. F. Warne, Eds, *Advances in High Voltage Engineering*, reprint with new cover, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2007.
- [5] H. Seyedi, and B. Tabei, "Appropriate placement of fault current limiting reactors in different HV substation arrangements", *Circuits and Systems*, 2012, No. 3, pp.252-262, <http://dx.doi.org/10.4236/cs.2012.33035>.
- [6] M. A. Laughton, *Electrical engineer's reference book*, 16th Ed., Elsevier, 2003.
- [7] F. Dawalibi, "Ground fault current distribution between soil and neutral conductors". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, 1980, No. 2, pp. 452- 461.
- [8] A. P. Meliopoulos, R.P.Webb, E.B. Joy, and S. Patel,"Computation of maximum earth current in substation switchyards". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, 1983, No.9, pp. 3131-3139.
- [9] F. Dawalibi, "Measurements and computations of fault current distribution on overhead transmission lines" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, 1984, No. 3, pp. 553-560.
- [10] J. M. Nahman, "Proximity effects on the ground fault current distribution within the earthing system formed by a substation and the associated transmission lines", *IEE Proceedings C – Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 135, 1988, No. 6, pp. 497-502.
- [11] Lj. M. Popovic, "Practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wire," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, 1998, No. 1, pp.123-128.
- [12] Lj. M. Popovic, "Efficient reduction of fault current through the grounding grid of substation supplied by cable line," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 15, 2000, No. 2, pp. 556-561.

*Lista ne sadrži reference autora ove teze, jer su, radi preglednosti, iste već navedene u sekciji 1.4.

- [13] E. Viel, and H. Griffiths, "Fault current distribution in HV cable systems", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 147, 2000, No. 4, pp. 231-238.
- [14] N. Ramezani, and S. M. Shahrthash, "A complete procedure to determine earth fault current distribution and split factor for grounding grid design of HV substations". *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 32, 2008., No. B3, pp 205-221.
- [15] Lj. M. Popovic, "Improved analytical expressions for the determination of the reduction factor of the feeding line consisting of tree single-core cables," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 18, 2008, pp.190-203.
- [16] Lj. M. Popovic, "Influence of the metal installations surrounding the feeding cable line on the ground fault current distribution in supplied substations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, 2008. No. 4, pp. 2583-2590.
- [17] S. Mangione, "A simple method for evaluating ground-fault current transfer at the transition station of a combined overhead-cable line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol, 23, 2008, No, 3, pp. 1413-1418.
- [18] Y. Li, and F. Dawalibi "Advanced practical considerations of fault current analysis in power system grounding design", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol. 2, 2012, No. 4, pp. 409-414.
- [19] Lj. M. Popović, "Ground fault current distribution when a ground fault occurs in HV substations located in an urban area". *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 59, 2014, pp. 167-179.
- [20] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial, and A. Hellany, "HV substation earth grid commissioning using current injection test (CIT) method: Worst case scenario determination". *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 6, 2015, Issue 4, pp.347-356.
- [21] B. Nekhoul, P. Labie, F. X. Zgainski, G. Meunier, F. Morillon, and S. Bourg, "Calculating the impedance of a grounding system", *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol.32, 1996, No.3, pp.1509-1512.
- [22] D. Zhongdong, Y. Zhenyu, W. Xishan, and X. Hun, "The optimum design of grounding grid of large substation", *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, 2005, Tsinghua University, Beijing, China.
- [23] T.M.El-Khodragy, *Optimum design of earthing system of substations by using Artificial Neural Network*, Ph. D. thesis, Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt, 2007.
- [24] G. Gilbert, *High voltage grounding systems*, Ph.D. thesis, University of Waterloo, Ontario, 2011.

- [25] G. Ossama, A. Ghada, and I. Hana "Earth Surface Potentials and GPR of Substation Grounding". *21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 6-9 June 2011, paper 0020.
- [26] Jose-M. Bueno-Barrachina, S. Catalan-Izquierdo and Cesar-S. Cañas-Peñuelas, "Grounding system impedance characterization using FEM", *ICREPQ'11*, Las Palmas de Gran Canaria, 2011.
- [27] L. Zhiweia, Z. Zhao, "The grounding impedance calculation of large steel grounding grid". *Energy Procedia*, 2012, 17, pp. 157 – 163.
- [28] Z. X. Li, Y. Yin, C.-X. Zhang, and L.-C. Zhang, "Frequency dependent characteristics of grounding system buried in multilayered earth model based on quasi-static electromagnetic field theory". *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 33, 2013, pp. 169-183.
- [29] CDEGS Software Package, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Quebec, Canada, 1991 - 2012.
- [30] S. Ghoneim, *Optimization of grounding grids design with evolutionary strategies*, Ph.D. thesis, Univeristät Duisburg-Essen, 2007.
- [31] A. Morstad, *Grounding of outdoor high voltage substation - Samnanger substation*, Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [32] F. M. Mentre, and L. Grcev, "EMTP-based model for grounding system analysis" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, 1994, No. 4, pp. 1838-1849.
- [33] A. El Mghairbi, *Assessment of earthing systems and enhancment of their performance*, Ph.D. thesis, Cardiff University, Cardiff, 2012.
- [34] L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, 2009, No 1, pp. 441-451.
- [35] J. He, Y. Gao, R. Zeng, J. Zou, X. Liang, B. Zhang, J. Lee, and S. Chang, "Effective length of counterpoise wire under lightning Current", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.20, 2005, No. 2, pp. 1585-1591.
- [36] A. P. Meliopoulos, and M. G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 9, 1983, No. 4, pp. 389-399.
- [37] M. Davies, *High frequency and transient performance of earthing systems*, Ph.D. thesis, Cardiff University, Cardiff, 1999.
- [38] B. Zedan, *Characterisation of substation earth grid under high frequency and transient conditions*, Ph.D. thesis, Cardiff University, Cardiff, 2005.

- [39] H. Griffiths, *Aspects of earthing system under variable and impulse conditions*, Ph.D. thesis, Cardiff University, Cardiff, 2008.
- [40] N. Ramezani, and S. M. Shahrtash, "Calculating the transient behavior of grounding systems using inverse Laplace transform", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics)*, 2011 12(3), pp.250-262.
- [41] B. R. Gupta, and V. K. Singh "Impulse impedance of rectangular grounding grids", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.7, 1992, No.1, pp.214-218,
- [42] L. D. Grcev, and F.E.Menter, "Transient electromagnetic fields near large earthing systems", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.32, 1996, No.3, pp.1525-1528.
- [43] I. Cotton, "The soil ionization process", *ERA Conference*, 2000. pp. 4.4.1-4.4.11.
- [44] J.A. Martinez – Velasco, *Power system transients: Parameter determination*, CRC Press, Taylor&Francis Group, 2010.
- [45] J. He, R. Zeng, Y. Tu, J. Zou, S. Chen, and Z. Guan, " Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.18, 2003, No.3, pp. 994-1001.
- [46] J. A. Martinez – Velasco, Ed., *Transient analysis of power systems: Solution techniques, tools and applications*, first ed. Wiley, 2015.
- [47] Y. L. Chow, and M .M. A. Salama, "A simplified method for calculating the substation grounding grid resistance", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, 1994, No. 2, pp. 736-742.
- [48] Z. Stojković, M. S. Savić, J. M. Nahman, D. Salamon, B. Bukorović, "Sensitivity analysis of experimentally determined grounding grid impulse characteristics", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 13, 1998, No. 4, pp 1136-1142.
- [49] L. Grcev, "Lightning surge efficiency of grounding grids", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, 2011, No.3, pp. 1692-1699.
- [50] S. Visacro, and R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, 2012, No. 2, pp. 927-935.
- [51] A. G. Pedrosa, M. A. O. Shroeder, M. M. Afonso, R. S. Alípio, S. de Castro Assis, T. A. S. Oliveira, and A. R. Braga, "Transient response of grounding electrodes for the frequency-dependence of soil parameters", 2010 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, Sao Paulo, 2010, pp. 839-845.

- [52] M. Nayel, "Investigation of ground frequency characteristics", *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol. 5, 2013, No. 8, pp. 322-327.
- [53] A. Baggini, Ed. *Handbook of power quality*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2008.
- [54] M. J. Lindinger, H. Renner, and E. Schmautzer, "New optimized analysis method for measuring extended grounding systems", *21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 6-9 June 2011, Paper 0085.
- [55] H. G. Sarmiento, J. Fortin and D. Mukhedkar, "Substation ground impedance: Comparative field measurements with high and low current injection methods", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, 1984, No. 7, pp. 1677-1683.
- [56] H. Griffiths, P. Jones, N. Harid and A. Haddad, "Proposal for measurement of earth impedance using variable frequency injection", *Measurement Science and Technology*, 21 (2010) 085102 (8pp).
- [57] M. Abdel-Salam, and A. Al-Shehri, "Induced voltages on fence wires and pipelines by AC power transmission lines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, 1994, No.2, pp. 341-349.
- [58] R. S. Girgis, and C. D. Ko, "Calculation techniques and results of effects of GIC currents as applied to large power transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, 1992, No. 2, pp. 699-705.
- [59] A. Erinmez, J. G. Kappenman, W. A. Radasky, "Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, 2002, No. 5-6, pp.743-756.
- [60] P. Picher, L. Bolduc, A. Dutil, and V.Q. Pham, "Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, 1997, No. 1, pp. 257-265.
- [61] N. Takasu, T. Oshi, F. Miyawaki, S. Saito, and Y. Fujiwara, "An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, 1994, No. 2, pp. 1173-1182.
- [62] M. Lahtinen, and J. Elovaara, "GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, 2002, No. 2, pp. 555-561.
- [63] P. R. Price, "Geomagnetically induced current effects on transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, 2002, No. 4, pp. 1002-1008.
- [64] R. Gigis, K. Vedante, and K. Gramm, "Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems", *CIGRE 2012*, A2-304, pp. 1-8

- [65] T. Hutchins, *Geomagnetically Induced Currents and Their Effect on Power Systems*. Ms.C. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [66] R. Thorberg, *Risk analysis of geomagnetically induced currents in power systems*, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, LTH, Lund University, 2012.
- [67] A. Viljanen, R. Pirjola, E. Pracser, J. Katkalov, and M. Wik, "Geomagnetically induced currents in Europe". *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, 4, A09.
- [68] J. R. Myers, and A. Cohen, "Conditions contributing to underground copper corrosion", *American Water Works Association Journal*, Aug. 1984, pp.68-71.
- [69] IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, IEEE Std 81.2-1991, Dec. 1991.
- [70] T. Trick, W. Mayeda, and A. Sakla, "Calculation of parameter values from node voltage measurements", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 26, 1979, no. 7, pp. 466–474.
- [71] Huang, Z.F., Lin, C.S., and Liu, R.W. "Topological condition on multiple fault: testability of analog circuits", *Proc. of IEEE International Symposium on Circuit and Systems*, 1982, pp. 1152–1155.
- [72] Z. Huang, C. Lin, and R. Liu, "Node-fault diagnosis and a design of testability". *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 30, 1983.No.5, pp. 257–265.
- [73] Lin, C.S., Huang, Z.F., and Liu, R.W. "Fault diagnosis of linear analog network: a theory and its implementation". *Proc. of IEEE International Symposium on Circuit and Systems*, 1983, pp. 1090–1093.
- [74] S. Wang, J. Liu, S. Wang, Z. Li, "Grounding grid corrosion diagnosis and uncertainly analysis of branches". *Journal of Computers*, Vol. 5, 2010, No. 8, pp. 1289-1295
- [75] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short Conductors, Part 2-Ground conductor", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.1, 1986, No. 4, pp.112-119.
- [76] Li Chunli, He Wei, Yao Degui, Yang Fan, Kou Xiaokuo, Wang Xiaoyu, "Topological measurement and characterization of substation grounding grids based on derivative method", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 63, 2014, pp. 158–164.
- [77] Y.Ma, G. G. Karady, S. Kucuksari, "Testing continuity of grounding grid using the AC current injection method", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010, pp. 1-6.

- [78] Bo Zhang, Zhibin Zhao, Xiang Cui, and Lin Li, "Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, 2002, No. 2, pp.473-476.
- [79] Y. Ma, G. Karady, "Investigating grounding grid integrity based on the current injection method," *Proceedings of the 41st Annual North American Power Symposium*, Oct. 2009, pp.1-5.
- [80] Y. Chikarov, *A new approach to monitor the integrity of grounding grid*. Ph.D. thesis, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand, 2013.
- [81] N. R. N. M. Rodrigues, R. M. S. de Oliveira, L. F. P. Carvalho and J. F. S. de Almeida, "A Method Based on High Frequency Electromagnetic Transients for Fault Location on Grounding Grids", *International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2013*, pp. 1-5
- [82] E. C. T. Macedo, L. V. Gomes, G. V. de Andrade Jr., A. D. Dias, E. G. da Costa, R. C. S. Freire, M. S. Castro, "Measurement system applied to energized substations grounding grids diagnosis", *IMEKO, TC-4*, 2011, paper 055.
- [83] G. F. Tagg, "Measurements of the resistance of an earth-electrode system covering a large area", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 116, No.3, pp. 475-479, March 1969.
- [84] M. Bouchard, F. P. Dawalibi, and D. Mukhedkar, "Survey on ground resistance and earth resistivity measurements," *IEEE Winter Power Meeting*, January 30 - February 4, 1977.
- [85] F. Dawalibi, and D. Mukhedkar, "Resistance measurement of large grounding system", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, 1979, No. 6, pp. 2348-2354.
- [86] Y. Li, J. Ma, and F. P. Dawalibi, "Impedance Measurement of Large Grounding Systems Using the Fall-of-potential Method, " *Proceedings of the Third IASTED International Conference on Power and Energy Systems*, EuroPES 2003, Marbella, Spain, 2003, pp. 701-706.
- [87] H. Huang, H. Liu, H. Luo, H. Du, Y. Xing, Y. Li, F. P. Dawalibi, H. Zhou, L. Fu, "Analysis of a large grounding system and subsequent field test validation using the fall of potential method", *Energy and Power Engineering*, 2013, 5, pp. 1266-1272.
- [88] C. Wang, T. Takasima, T. Sakuta and Y. Tsubota, "Grounding resistance measurement method using fall-of-potential method with potential probe located in opposite direction to the current probe", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, 1998, No. 4, pp.1128-1135.

- [89] R. Zeng, J. He, and Z. Guan, "Novel measurement system for grounding impedance of substation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, 2006, No. 2, pp. 719-725.
- [90] R. Zeng, J. He, J. Lee, S. Chang, Y. Tu, Y. Gao, J. Zou, and Z. Guan, "Influence of overhead transmission line on grounding impedance measurement of substation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.20, 2005. No. 2, pp. 1219-1225.
- [91] J. K. Choi, Y. H. Ahn, J. W. Woo, G. J. Jung, B. S. Han, K. C. Kim, "Evaluation of grounding performance of energized substation by ground current measurement", *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, Montreal, 2005, Paper No. IPST05 – 128
- [92] J. Ma and F. P. Dawalibi, "Extended analysis of ground impedance measurement using the fall-of-potential method", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.17, 2002. No. 4, pp. 881-885.
- [93] L. S. Devarakonda, J. Moskos, and A. Wood, "Evaluation of ground grid resistance for inservice substations," *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, New Orleans, LA, USA*, Apr. 2010, pp. 1–4.
- [94] IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage From a Power Fault, ANSI/IEEE Std 367-1996, Feb. 1997.
- [95] Dalziel, C. F., and Lee, W. R., "Lethal electric currents," *IEEE Spectrum*, pp. 44–50, Feb. 1969.
- [96] P. G. Beigelmeier, and W. R. Lee, "New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50-60 Hz", *IEE Proceedings, Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews*, Vol. 127, No. 2, March 1980, pp. 103-110.
- [97] International Electrotechnical Commission IEC Report: 'Effects of current passing through the human body, part 1: general aspects', 479-1, IEC 1984.
- [98] C. H. Lee, and A. P. S. Meliopoulos, "Comparison of touch and step voltages between IEEE Std. 80 and IEC 479-1", *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, 1999, No. 5, pp. 593–601.
- [99] C. H. Lee, A. P. S. Meliopoulos, and R. James, "A Graphical method for safety assessment of grounding systems" *IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting*, Singapore, 23-27 January 2000.
- [100] Y. L. Chow, M.M.A. Salama and G. Djogo, "Thevenin Source Resistance of the Touch, Transferred and Step Voltages of a Grounding System". *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, 1999, No. 2, pp. 107–114.

- [101] P. Colella P, R. Napoli, E. Pons, R. Tommasini, A Barresi, G. Cafaro, A. De Simone, M. L. Di Silvestre, L. Martirano, P. Montegiglio, E. Morozova, G. Parise, L. Parise, E. Riva Sanseverino, F. Torelli, F. Tummolillo, G. Valtorta, G. Zizzo, "Current and voltage behaviour during a fault in a HV/MV system: Methods and Measurements". *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Roma, June 10-13, 2015. pp. 404-409.
- [102] R. Kosztaluk, R. Mukhedkar, and Y. Gervais, "Field measurements of touch and step voltages", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, 1984., No. 11, pp. 3286–3294.
- [103] A. P. S. Meliopoulos, S. Patel, and G. J. Cokkinides, "A new method and instrument for touch and step voltage measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, Oct. 1994, No. 4, pp. 1850–1860.
- [104] C. Day and S. Patel, "Touch and Step Voltage Measurements on Field Installed Ground Grid Overlaid with Gravel and Asphalt Beds". NEETRAC Project Number: 09-075, October 29, 2010.
- [105] J.G. Proakis, and D.G. Manolakis, *Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 1996.
- [106] C. Britton Rorabaugh, *Digital Filter Designer's Handbook : Featuring C Routines*, ISBN: 0079111661, McGraw-Hill Education – Europe, 1993.
- [107] W. J. DeCoursey, *Statistics and Probability for Engineering Applications With Microsoft Excel*, Newnes, 2003. Ch.14.
- [108] A. G. Phadke, J. S. Thorp, *Synchronised phasor measurements and their Applications*, Springer, 2010.
- [109] B. Singh, N. K. Sharma, A. N. Tiwari, K. S. Verma, and S. N. Singh, "Applications of phasor measurement units (PMUs) in electric power system networks incorporated with FACTS controllers". *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, 2011, No.3, pp. 64–82.
- [110] J. Montaña, J. Herrera, J. Rios, and J. Silva, "High frequency behavior of grounding systems considering the frequency dependence of soil parameters". *International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects*, Manaus, Brazil, May, 2014.
- [111] Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Sep. 2008.



BIOGRAFIJA AUTORA DOKTORSKE DISERTACIJE

Vojin I. Kostić je rođen 26. juna 1977. godine u Beogradu. XI beogradsku gimnaziju, prirodno-matematički smer, završio je 1996. godine. Osnovne akademske studije završio je na Energetskom odseku, smera za elektroenergetske sisteme Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu 2005. godine. Magistarsku tezu pod nazivom “Unapređenje metoda za utvrđivanje stanja uzemljenja elektroenergetskih objekata posle višegodišnje eksploatacije” odbranio je 2013. godine na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu i stekao zvanje magistra elektrotehničkih nauka za oblast Elektroenergetska postrojenja i oprema.

Naučno-istraživačku karijeru započeo je dolaskom u Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, gde je zaposlen od 1. maja 2006. godine. Stručno i naučno interesovanje usmerio je u oblast ispitivanja uzemljivačkih sistema elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V. Bio je rukovodilac i saradnik na više studija za naručioce JP EPS i JP EMS. Trenutno je angažovan kao viši stručni saradnik, u istraživačkom zvanju kao istraživač saradnik, na poslovima zamenika rukovodioca specijalizovane laboratorije za ispitivanje uzemljenja, gromobranskih i električnih instalacija i elektromagnetnih polja (ovlašćenja u skladu sa INT-046-L).



Prilog 1.

CURRICULUM VITAE

LIČNI PODACI

Ime i prezime : **Vojin I. Kostić**
Adresa poslodavca: **Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, Koste Glavinića 8a**
Telefon: **+381 64 8259 722**
Fax : **+381 11 3690 823**
E-mail: **vojin@ieent.org**
Državljanstvo: **Republika Srbija**
Datum rođenja : **26.06.1977. godine**

OBRAZOVANJE

- Datum: **19.03.2013. godine**
- Naziv organizacije: **Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija**
- Zvanje: **magistar elektrotehničkih nauka, oblast elektroenergetska postrojenja i oprema**
- Naslov teze: **"Unapređenje metoda za utvrđivanje stanja uzemljenja elektroenergetskih objekata posle višegodišnje eksploatacije"**

- Datum: **04.04.2005. godine**
- Naziv organizacije: **Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija**
- Zvanje: **diplomirani inženjer elektrotehnike (smer: Elektroenergetski sistemi)**
- Naslov diplomskog rada: **"Statički sistemi za besprekidno napajanje"**.

RADNO ISKUSTVO

- Datumi (od – do) : **01.01.2006. – 30.04.2006.**
 - Naziv i adresa poslodavca: **Aeffepro Italia d.o.o., Beograd, Obilićev venac 10**
 - Pozicija: **menadžer proizvodnja, rukovodilac sektora za energetiku**
 - Glavne aktivnosti : **Tehnička podrška prodaje sredjenaponske rasklopne opreme proizvođača VEI Power SpA, Italy.**

 - Datumi (od – do) : **01.05.2006.-**
 - Naziv i adresa poslodavca: **Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, Koste Glavinića 8a**
 - Pozicija: **viši stručni saradnik, u istraživačkom zvanju „istraživač saradnik“;**
zamenik rukovodioca specijalizovane laboratorije za ispitivanje uzemljenja, gromobranskih i električnih instalacija i elektromagnetnih polja (ovlašćenja u skladu sa INT-046-L).
 - Glavne aktivnosti : **ispitivanja sistema uzemljenja,**
ispitivanja sistema gromobranske zaštite,
ispitivanja niskonaponskih instalacija,
merenje uticaja elektomagnetskih polja niskih frekvencija na bezbednost ljudi i visokoosetljive elektronske opreme,
visokonaponska ispitivanja energetskih kablova i rasklopne opreme.
rukovodilac i saradnik na više studija za naručioce JP EPS i JP EMS.
-



Prilog 2.

SPISAK OBJAVLJENIH RADOVA

a) Naučni radovi u međunarodnim časopisima sa impakt faktorom:

- a1. **Vojin I. Kostić**, Nebojša B. Raičević, "An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations", *Electric Power Systems Research Journal*, vol. 130, pp. 59–66, ISSN: 0378-7796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.023>, January 2016. (M22, IF 2014=1.749).
- a2. **Vojin I. Kostić**, Nebojša B. Raičević, "A study on high-voltage substation ground grid integrity measurement", *Electric Power Systems Research Journal*, vol. 131, pp. 31-40, ISSN: 0378-7796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.006>, February 2016. (M22, IF 2014=1.749).
- a3. **Vojin Kostić**, Nebojša Raičević, Aleksandar Pavlović, "Enhanced grounding system impedance measurements for high-voltage substations", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 1875–1883, ISSN: 2050-7038, <http://dx.doi.org/10.1002/etep.1939>, September 2015. (M23, IF 2014=0.49).

b) Radovi u časopisima međunarodnog značaja verifikovani posebnom odlukom (M24):

- b1. **Vojin I. Kostić**, Nebojša B. Raičević, Dragan S. Kovačević, "The choice of suitable frequencies for measurements based on FSM". *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics* (rad prihvaćen za objavljivanje 30.03.2016. godine).

c) Naučni radovi u nacionalnim časopisima:

- c1. **Vojin Kostić**, Žarko Janda, Zoran Nedeljković, „Analiza frekvencijske zavisnosti specifične električne otpornosti tla – metoda merenja i praktična primena”, 2015., *Tehnika*, Br. 64, Iz. 3, pp. 481-486, ISSN: 0040-2176 (M51).
- c2. Dragana Naumović Vuković, Aleksandar Pavlović, Slobodan Škundrić, **Vojin Kostić**, "Etaloniranje merila gustine naizmjeničnog magnetskog polja", *Elektroprivreda*, br.3, Beograd, pp. 97-102, 2009., ISSN: 0013-5755 (M51).
- c3. **Vojin Kostić**, Maja Grbić, Predrag Branislavljević, Žarko Janda, Jovan Mrvić, "Ispitivanje specifične električne otpornosti guste hidromešavine pepela i povratne vode iz TE "Kostolac A" u laboratorijskim uslovima", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 25, pp. 31-39, 2015., ISSN: 0350-8528 (M53).
- c4. Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, **Vojin Kostić**, "Prenaponi pri radu vakuumskih prekidača 36 kV i 12 kV u elektrodistributivnoj mreži Kraljeva", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 19, pp. 207-216, 2008. – 2009., ISSN: 0350-8528 (M53).
- c5. Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, **Vojin Kostić**, "Struje zemljospoja i prelazni fazni naponi u mrežama 10 kV grada Niša ", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 19, pp. 217-224, 2008. – 2009., ISSN: 0350-8528 (M53).



Prilog 2.

- c6. Momčilo Petrović, Dejan Hrvić, **Vojin Kostić**, "Metode merenja jačina električnog polja i magnetske indukcije", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 19, pp. 225-236, 2008. – 2009., ISSN: 0350-8528 (M53).
- c7. Dejan Hrvić, Momčilo Petrović, **Vojin Kostić**, "Merenja jačina električnog polja i magnetske indukcije ispod nadzemnih vodova visokih napona", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 19, pp. 237-248, 2008. – 2009., ISSN: 0350-8528 (M53).

d) Radovi saopšteni na međunarodnim naučnim skupovima i štampani u odgovarajućim zbornicima radova (M33):

- d1. **Vojin Kostić**, Nebojša Raičević, "Grounding system impedance measurement using shifted frequency method", *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives - POWERENG 2015*, Riga, Latvia, LF-000124 (CD), pp. 1-4, 11-13 May 2015, ISBN: 978-1-4799-9978-1/151.
- d2. **Vojin Kostić**, Nebojša Raičević, Jovan Mrvić, Slavica 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, ISBN: 978-86-6125-144-3.

e) Radovi saopšteni na nacionalnim naučnim skupovima i štampani u odgovarajućim zbornicima radova (M63):

- e1. **Vojin Kostić**, Dragutin Salamon, Aleksandar Pavlović, Saša Milić, "Poboljšanje U-I metode za merenje impedanse sistema uzemljenja", *Elektrane 2012*, Društvo termičara Srbije, E2012-027 (CD), ISBN: 978-86-7877-021-0.
- e2. **Vojin Kostić**, Slavica Rebrić, Dragan Kovačević, Nebojša Raičević, "Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja dimenziono velikih elektroenergetskih objekata najvišeg pogonskog napona metodom pomerene frekvencije", *Elektrane 2014*, Društvo termičara Srbije, E2014-148 (CD), ISBN: 978-86-7877-024-1.
- e3. **Vojin Kostić**, Dragutin Salamon, Saša Milić, Aleksandar Pavlović, Jovan Mrvić, "Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja metodom pomerene frekvencije", *31. Savetovanje Cigre Srbija*, R B3 09 (CD), 2013.
- e4. **Vojin Kostić**, Srdan Mijušković, Jovan Mrvić, Nebojša Raičević, "Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja transformatorskih stanica i razvodnih postrojenja najvišeg pogonskog napona metodom pomerene frekvencije", *4. Savjetovanje CG KO Cigre*, R B3-01 (CD), 2015.
- e5. **Vojin Kostić**, Dragan Kovačević, Aleksandar Pavlović, Nebojša Raičević, "Ispitivanje kontinuiteta mrežastog uzemljivača elektroenergetskog postrojenja", *4. Savjetovanje CG KO Cigre*, R B3-02 (CD), 2015.
- e6. Momčilo Petrović, Dejan Hrvić, **Vojin Kostić**, Aleksandar Pavlović, Mladen Šupić, "Merenje jačina električnog i magnetskog polja u termoelektranama Elektroprivrede Srbije", *28. Savetovanje JUKO Cigre*, R C4 07 (CD), 2007.
- e7. Momčilo Petrović, Dejan Hrvić, **Vojin Kostić**, Aleksandar Pavlović, "Merenje jačina električnog polja i magnetske indukcije u razvodnim postrojenjima 400 kV, 220 kV i 110 kV", *29. Savetovanje Cigre Srbija*, R C4 06 (CD), 2009.



Prilog 2.

- e8. Aleksandar Pavlović, **Vojin Kostić**, Momčilo Petrović, "Elektromagnetska polja niskih frekvencija-preporuke, tehnički standardi i zakonska regulativa", *Peta regionalna naučno-istraživačka konferencija o sistemu upravljanja zaštitom životne sredine u elektroprivredi - Electra V*, Divčibare, 2008.
- e9. Aleksandar Pavlović, **Vojin Kostić**, Maja Grbić, "Mere za smanjenje uticaja nejonizujućih zračenja na životnu sredinu", *Šesta regionalna naučno-istraživačka konferencija o sistemu upravljanja zaštitom životne sredine u elektroprivredi - Electra VI*, Zlatibor 6.dec.–10 dec. 2010.
- e10. Dejan Hrvic, Aleksandar Pavlović, Momčilo Petrović, **Vojin Kostić**, "Ispitivanja magnetske indukcije u zonama povećane osetljivosti u blizini TS 10/0.4 kV i TS 10/0.4 kV ", *10. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije*, R-1.12 (CD), 2010.
- e11. Jovan Mrvić, Ninoslav Simić, **Vojin Kostić**, Ljubiša Čičkarić: "Preneti prenaponi kroz blok transformator 410 kV/ 22 kV pri dolasku atmosferskih i sklopnih prenapona na priključke visokonaponskog namotaja", *32. Savetovanje Cigre Srbija*, R C4 04 (CD), 2015.



Prilog 3.

Izjava 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

**Poboljšani metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema
uzemljenja u visokonaponskim postrojenjima**

koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 20.05.2016.

Autor disertacije: mr Vojin I. Kostić dipl. inž.

Potpis autora disertacije:

Vojin Kostić



Prilog 3.

Izjava 2.

IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora: **Vojin I. Kostić**

Naslov disertacije: **Poboljšani metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja u visokonaponskim postrojenjima**

Mentor: **doc. dr Nebojša B. Raičević**

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije istovetna elektronskoj verziji, koju sam predao za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**.

U Nišu, 20.05.2016.

Potpis autora disertacije:

Vojin Kostić



Prilog 3.

Izjava 3.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da, u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

Poboljšani metodi za merenje sigurnosnih karakteristika sistema uzemljenja u visokonaponskim postrojenjima

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Nišu, 20.05.2016.

Autor disertacije: mr Vojin I. Kostić dipl. inž.

Potpis autora disertacije:

Vojin Kostić
