

# Uticaj električnog luka na tačnost algoritma za estimaciju lokacije kvara u distributivnim mrežama

Predrag Mršić<sup>1,2</sup>, Zoran Stojanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Bosna i Hercegovina

predrag.mrsic@etf.unibl.org, stojanovic@etf.bg.ac.rs

*Sažetak* — Kvarovi u distributivnim mrežama mogu biti prolazni i trajni. Mnogo su češći prolazni kvarovi izazvani grmljavinom, snijegom, ledenim kišama, velikim pticama i ostalim eksternim objektima. Nemetalni kratak spoj na mjestu kvara izaziva električni luk čija se rezistansa mijenja tokom vremena. U radu je analiziran uticaj električnog luka na tačnost algoritma za estimaciju lokacije kvara u sredjenaponskim distributivnim mrežama. Lokacija kvara se procjenjuje na osnovu impedanse do mjesta kvara koja se estimira koristeći napone i struje osnovnog harmonika, prije i tokom kvara, te impedansu voda na kome je nastao kvar.

*Ključne riječi* - lokator kvara; distributivna mreža; električni luk; impedansa; pouzdanost napajanja

## I. UVOD

Rapidni razvoj elektroenergetskog sistema u posljednjim decenijama rezultovao je velikim porastom broja distributivnih vodova. Na tim vodovima nastaju kvarovi usljed udara groma, snijega, leda, starenja izolacije, kratkih spojeva uzrokovanih velikim pticama i drugim eksternim objektima. Kvarovi obično uzrokuju mehaničko oštećenje opreme koja se mora popraviti ili zamijeniti prije ponovnog uspostavljanja napajanja potrošača [1]. Da bi se skratilo vrijeme trajanja prekida napajanja potrošača koji su ugroženi kvarom, odnosno omogućila restauracija napajanja odmah po nastanku kvara, pored riklozera i indikatora prolaska struje kvara, koristi se i lokatori kvara. Lokatori kvarova su uređaji u kojima je implementiran algoritam za estimaciju udaljenosti mjesta kvara od lokacije na kojoj se nalazi lokator kvara (obično napojne transformatorske stanice). Pored lokatora kvarova algoritam za estimaciju lokacije kvara može biti ugrađen u mikroprocesorske zaštite, registratore kvarova i programe za analizu kvarova [2].

Poznavanje tačne lokacije kvara, bez obzira da li je on prolazan ili trajan, je bitno za unapređenje rada distributivnog sistema, odnosno povećanja pouzdanosti napajanja potrošača i smanjenja troškova rada sistema. Prolazni kvarovi ne uzrokuju trajne prekide napajanja potrošača, ali dovode do pogoršanja kvaliteta električne energije i smanjenja pouzdanosti napajanja potrošača te je bitno poznavati lokacije u sistemu na kojima se oni događaju kako bi se mogli otkloniti uzroci koji dovode do njihove pojave. U slučaju trajnih kvarova, lokatori kvarova omogućavaju lociranje kvara odmah po nastanku istog te adekvatnu rekonfiguraciju mreže i uspostavljanje napajanja potrošača koji nisu ugroženi kvarom.

U literaturi postoji veći broj metoda za estimaciju lokacije kvara u distributivnim mrežama. Određene metode koje se koriste u prenosnim mrežama su adaptirane za distributivne mreže u skladu sa specifičnostima distributivnih mreža, a određene samo primijenjene na distributivne mreže. Na primjer, u [3] se koristi teorija prostiranja visokofrekventnih talasa i tranzijentnih signala snimljenih tokom kvara. U [4] se koristi korelacija između poslatih i primljenih talasa za estimaciju lokacije kvara, dok se u [5] detektuje maksimum reflektovanog talasa za identifikaciju lokacije kvara koja je zasnovana na estimaciji vremena kašnjenja talasa. Nedostatak ovih metoda ogleda se u potrebi za mjernim uređajem sa velikom frekvencijom odmjerenja (reda MHz). Pored ovih metoda postoje i metode koje procjenjuju impedansu do mjesta kvara na osnovu koje određuju lokaciju kvara [6]-[8]. Nedostatak ove grupe metoda je mogućnost postojanja više lokacija za koje se dobija ista impedansa [9].

Kvarovi na nadzemnim vodovima mogu biti prolazni i trajni. Mnogo češći su prolazni kvarovi izazvani atmosferskim prenaponima ili atmosferskim pojavama, kao što su magla i rosa, izazvani rastinjem u okolini voda te krupnijim pticama. Nemetalni kratak spoj na mjestu kvara izaziva električni luk. Napon električnog luka je približno konstantan tokom poluperiode struje, tek kada struja promijeni smjer i napon električnog luka mijenja smjer. Prema tome, impedansa električnog luka je rezistivna, ali zbog promjene intenziteta struje pri konstantnom naponu mijenja se intenzitet jonizacije vazduha tokom vremena pa je i otpornost električnog luka funkcija vremena [10], [11].

U radu će biti analizirana tačnost algoritma za estimaciju lokacije kvara za slučaj kvarova sa električnim lukom i kvarova preko male rezistanse.

U drugom dijelu je ukratko izložen algoritam za estimaciju impedanse, odnosno lokacije kvara, dok je u trećem dijelu izložen model distributivne mreže i model električnog luka te dat dijagram toka algoritma za estimaciju lokacije kvara. Četvrti dio ovog rada se odnosi na rezultate simulacija i poređenje rezultata za kvarove preko električnog luka, dakle pri promjenljivoj rezistansi kvara i nepromjenljivoj rezistansi.

## II. ALGORITAM ZA ESTIMACIJU LOKACIJE KVARA

U ovom dijelu rada će biti ukratko prezentovan metod za određivanje lokacije kvara izložen u [6]. Ideja za ovaj metod potiče od metode za lociranje kvara na kratkim vodovima

prenosnog podsistema gdje se kompletno opterećenje voda uključujući i ogranke predstavlja modelom skoncentrisane impedanse koja je priključena iza kvara ( $Z_{load}$  na Sl. 1). Ovaj metod estimira lokaciju kvara i rezistansu kvara na osnovu struja i napona osnovnog harmonika mjerenih prije i za vrijeme kvara. Prvo se estimira impedansa ekvivalentnog potrošača:

$$\underline{Z}_{load} = \frac{\underline{U}_{ps}}{\underline{I}_{ps}} - \underline{Z}_L, \quad (1)$$

gdje su  $\underline{U}_{ps}$  i  $\underline{I}_{ps}$  fazori napon i struje prije kvara mjereni u transformatorskoj stanici, a  $\underline{Z}_L$  impedansa voda. Zatim se estimira impedansa izvora:

$$\underline{Z}_s = -\frac{\Delta \underline{U}_s}{\Delta \underline{I}_s}, \quad (2)$$

gdje su  $\Delta \underline{U}_s$  i  $\Delta \underline{I}_s$  priraštaji napona i struje pri nastanku kvara:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_s &= \underline{U}_{sf} - \underline{U}_{ps}, \\ \Delta \underline{I}_s &= \underline{I}_{sf} - \underline{I}_{ps}, \end{aligned} \quad (3)$$

a  $\underline{U}_{sf}$  i  $\underline{I}_{sf}$  napon i struja tokom kvara mjereni u transformatorskoj stanici.

Osnovna relacija za mjerenu impedansu tokom kvara prema Sl. 1 je:

$$\underline{Z}_m = \frac{\underline{U}_{sf}}{\underline{I}_{sf}} = m \cdot \underline{Z}_L + R_f \frac{\underline{I}_f}{\underline{I}_{sf}}, \quad (4)$$

Iz izraza (4) se može dobiti kvadratna jednačina u kojoj su nepoznate  $m$  i  $R_f$ :

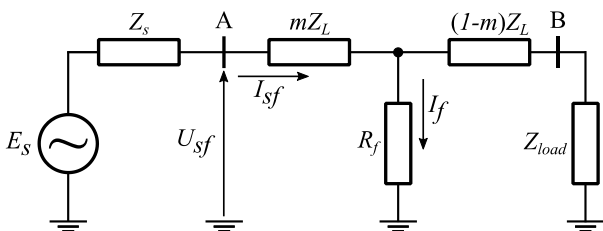
$$m^2 - m \cdot \underline{k}_1 + \underline{k}_2 - \underline{k}_3 \cdot R_f = 0, \quad (5)$$

dok su koeficijenti  $\underline{k}_1$ ,  $\underline{k}_2$  i  $\underline{k}_3$  definisani sljedećim izrazima:

$$\underline{k}_1 = \frac{\underline{U}_{sf}}{\underline{I}_{sf} \cdot \underline{Z}_L} + \frac{\underline{Z}_{load}}{\underline{Z}_L} + 1, \quad (6)$$

$$\underline{k}_2 = \frac{\underline{U}_{sf}}{\underline{I}_{sf} \cdot \underline{Z}_L} \left( \frac{\underline{Z}_{load}}{\underline{Z}_L} + 1 \right), \quad (7)$$

$$\underline{k}_3 = \frac{\Delta \underline{I}_s}{\underline{I}_{sf} \cdot \underline{Z}_L} \left( \frac{\underline{Z}_s + \underline{Z}_{load}}{\underline{Z}_L} + 1 \right). \quad (8)$$



Slika 1. Šema ekvivalentnog monofaznog voda.

Rastavljanjem izraza (5) na realni i imaginarni dio te eliminacijom  $R_f$  dobija se izraz za računanje lokacije kvara:

$$m = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \quad (9)$$

gdje su:

$$a = 1, \quad (10)$$

$$b = -\left( \operatorname{Re}(\underline{k}_1) - \frac{\operatorname{Im}(\underline{k}_1) \cdot \operatorname{Re}(\underline{k}_3)}{\operatorname{Im}(\underline{k}_3)} \right), \quad (11)$$

$$c = \operatorname{Re}(\underline{k}_2) - \frac{\operatorname{Im}(\underline{k}_2) \cdot \operatorname{Re}(\underline{k}_3)}{\operatorname{Im}(\underline{k}_3)}. \quad (12)$$

Rješavanjem imaginarnog dijela jednačine (5) uz poznato  $m$  može se dobiti rezistansa kvara:

$$R_f = -m \frac{\operatorname{Im}(\underline{k}_1)}{\operatorname{Im}(\underline{k}_3)} + \frac{\operatorname{Im}(\underline{k}_2)}{\operatorname{Im}(\underline{k}_3)}. \quad (13)$$

Izrazi (1) - (12) su izvedeni za monofazni vod. U slučaju trofaznog voda koristi se impedansa voda za direktni komponentni sistem, a struje i naponi zavise od vrste kvara. Naponi i struje prije i za vrijeme kvara, potrebni za proračun, se računaju na isti način, pa će biti prikazana samo tabela za proračun veličina tokom kvara. U tabeli I su dati naponi i struje tokom kvara i priraštaj struje izvora u zavisnosti od vrste kvara potrebni za estimaciju rezistanse i lokacije kvara [6].

TABELA I. NAPONI I STRUJE U ZAVISNOSTI OD TIPA KVARA

Tip kvara	Napon kvara $\underline{U}_{sf}$	Struja kvara $\underline{I}_{sf}$	Priraštaj struje izvora $\Delta \underline{I}_s$
AG	$\underline{U}_{sfa}$	$\underline{I}_{sfa} + \underline{k} \cdot \underline{I}_{sf0}$	$3 \cdot \Delta \underline{I}_{sda}$
BG	$\underline{U}_{sfb}$	$\underline{I}_{sfb} + \underline{k} \cdot \underline{I}_{sf0}$	$3 \cdot \Delta \underline{I}_{sdb}$
CG	$\underline{U}_{sfc}$	$\underline{I}_{sfc} + \underline{k} \cdot \underline{I}_{sf0}$	$3 \cdot \Delta \underline{I}_{sdc}$
AB	$\underline{U}_{sfa} - \underline{U}_{sfb}$	$\underline{I}_{sfa} - \underline{I}_{sfb}$	$\Delta \underline{I}_{sa} - \Delta \underline{I}_{sb}$
BC	$\underline{U}_{sfb} - \underline{U}_{sfc}$	$\underline{I}_{sfb} - \underline{I}_{sfc}$	$\Delta \underline{I}_{sb} - \Delta \underline{I}_{sc}$
CA	$\underline{U}_{sfc} - \underline{U}_{sfa}$	$\underline{I}_{sfc} - \underline{I}_{sfa}$	$\Delta \underline{I}_{sc} - \Delta \underline{I}_{sa}$
ABG	$\underline{U}_{sfa} - \underline{U}_{sfb}$	$\underline{I}_{sfa} - \underline{I}_{sfb}$	$\Delta \underline{I}_{sa} - \Delta \underline{I}_{sb}$
BCG	$\underline{U}_{sfb} - \underline{U}_{sfc}$	$\underline{I}_{sfb} - \underline{I}_{sfc}$	$\Delta \underline{I}_{sb} - \Delta \underline{I}_{sc}$
CAG	$\underline{U}_{sfc} - \underline{U}_{sfa}$	$\underline{I}_{sfc} - \underline{I}_{sfa}$	$\Delta \underline{I}_{sc} - \Delta \underline{I}_{sa}$
ABC	$\underline{U}_{sfb} - \underline{U}_{sfc}$	$\underline{I}_{sfb} - \underline{I}_{sfc}$	$\Delta \underline{I}_{sb} - \Delta \underline{I}_{sc}$
ABCG	$\underline{U}_{sfb} - \underline{U}_{sfc}$	$\underline{I}_{sfb} - \underline{I}_{sfc}$	$\Delta \underline{I}_{sb} - \Delta \underline{I}_{sc}$

Indeks  $sf$  označava veličinu tokom kvara, a indeksi  $a$ ,  $b$  i  $c$  se odnose na faze A, B i C.  $\underline{I}_{sf0}$  je nulta struja tokom kvara, a  $\Delta \underline{I}_{sda}$ ,  $\Delta \underline{I}_{sdb}$  i  $\Delta \underline{I}_{sdc}$  priraštaji direktne komponente struje za faze A, B i C. Npr. priraštaj direktne komponente struje faze A je:

$$\Delta \underline{I}_{sda} = \underline{I}_{sfa} - \underline{I}_{psda}, \quad (14)$$

gdje je  $I_{sfa}$  direktna komponenta struje kvara, a  $I_{psda}$  direktna komponenta struje prije kvara.  $\Delta I_{sa}$ ,  $\Delta I_{sb}$  i  $\Delta I_{sc}$  su priraštaji struja faza A, B i C pri nastanku kvara. Na primjer, priraštaj struje faze B pri nastanku kvara je:

$$\Delta I_{sb} = I_{sfb} - I_{psb}. \quad (15)$$

Koeficijent  $k$  određuje koji dio nulte struje voda treba dodati na faznu struju da bi se dobila pogonska impedansa voda:

$$k = \frac{Z_{L0} - Z_{Ld}}{Z_{Ld}}. \quad (16)$$

Tip kvara koji je potreban za selektovanje odgovarajućih struja i napona za estimaciju lokacije kvara se određuje na osnovu struja po fazama voda prije i u toku kvara. Prvo se računa promjena struje svake faze s tim da se prije toga eliminiše nulta struja kvara. Na primjer, priraštaj struje faze C je:

$$\Delta I_{c} = (I_{sfc} - I_{sf0}) - I_{psc}. \quad (17)$$

Nakon proračuna priraštaja struja faza A, B i C iz tabele II se očitava tip kvara [6].

TABELA II. ODREĐIVANJE TIPRA KVARA

	Tip kvara								
	AG	BG	CG	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG
$ \Delta I_a  > 1,5 \cdot  \Delta I_b $	x					x			x
$ \Delta I_a  > 1,5 \cdot  \Delta I_c $	x			x			x		
$ \Delta I_b  > 1,5 \cdot  \Delta I_a $		x			x			x	
$ \Delta I_b  > 1,5 \cdot  \Delta I_c $		x		x			x		
$ \Delta I_c  > 1,5 \cdot  \Delta I_a $			x		x			x	
$ \Delta I_c  > 1,5 \cdot  \Delta I_b $			x			x			x

Na primjer, ako je  $|\Delta I_a| > 1,5 \cdot |\Delta I_c|$  tada tip kvar može biti AG, AB ili ABG i ako je  $|\Delta I_b| > 1,5 \cdot |\Delta I_c|$  tada tip kvara može biti BG, AB i ABG. Presjek ova dva skupa tipova kvarova daje rezultat da je tip kvara AB ili ABG. Dakle, nije moguće tačno odrediti tip kvara. Međutim, iz tabele I se može vidjeti da se iste struje i naponi koriste za estimaciju impedanse u slučaju dvofaznih kvarova i dvofaznih kvarova sa zemljom.

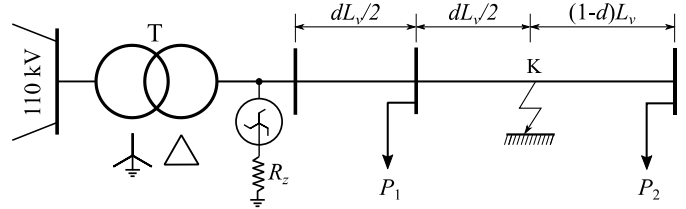
U slučaju da kriterijumi dati u tabeli II ne rezultuju identifikacijom tipa kvara tada je u pitanju trofazni kratak spoj. Opet, ne može se identifikovati da li se radi o trofaznom kratkom spoju sa zemljom ili ne, ali to nije ni važno iz razloga što se prema tabeli I koriste iste struje i naponi pri estimaciji rezistanse i lokacije kvara.

### III. MODELOVANJE I SIMULACIJA RADA SISTEMA

U ovom dijelu će biti prikazana mreža na kojoj će biti testiran uticaj električnog luka na tačnost estimacije lokacije kvara, kao i način modelovanja električnog luka te dijagram toka programa za estimaciju lokacije kvara.

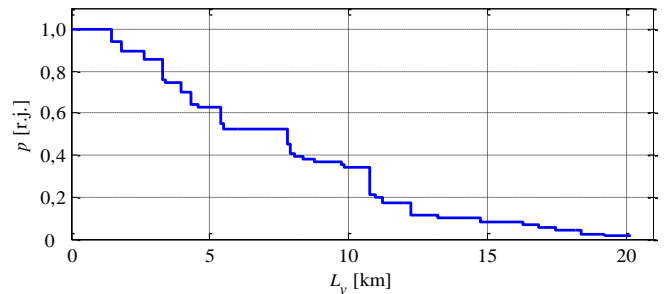
#### A. Test mreža

Mreža na kojoj će biti testiran rad algoritma i uticaj električnog luka na tačnost estimacije lokacije kvara je sredjenaponska distributivna mreža sa područja opštine Banja Luka. Kvarovi će se generisati samo na glavnom vodu pa će u simulaciji mreža biti predstavljena samo preko glavnog voda, a potrošači i ogranci će biti skoncentrisani na sredini dionice prije kvara i na kraju voda. Kako bi se obuhvatila distribucija potrošača duž glavnog voda, snaga potrošača koji su priključeni ispred i iza kvara se mijenja sa promjenom lokacije kvara. Jednopolna šema distributivnog voda je prikazana na Sl. 2.



Slika 2. Jednopolna šema distributivnog voda.

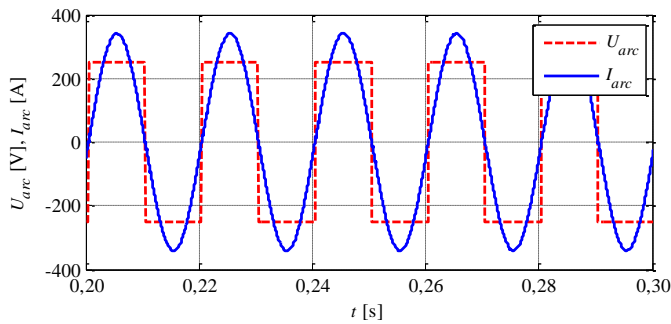
Distributivna sredjenaponska mreža je neefikasno uzemljena preko otpornika otpornosti  $R_c = 40 \Omega$  kako bi se struja jednofaznog kratkog spoja ograničila na 300 A. Ukupna dužina glavnog voda je 20 km, a podužni pogonski parametri voda su:  $r_d = 1,2027 \Omega/\text{km}$ ,  $l_d = 1,35 \text{ mH}/\text{km}$ , dok su podužni nulti parametri:  $r_0 = 1,4961 \Omega/\text{km}$  i  $l_0 = 5,03 \text{ mH}/\text{km}$ . Transformator koji povezuje prenosnu mrežu i distributivni vod je prenosnog odnosa 110/20 kV/kV snage 20 MVA. Prenosna mreža je modelovana izvorom čija je snaga trofaznog kratkog spoja 1000 MVA i odnos  $X/R = 4$ . Prosječna aktivna snaga potrošača koje napaja posmatrani vod je 1,92 MW, a relativno opterećenje duž voda je prikazano na Sl. 3. Relativno opterećenje se smanjuje kako se približavamo kraju voda zbog postojanja odcjepa.



Slika 3. Relativno opterećenje duž distributivnog voda.

#### B. Model električnog luka

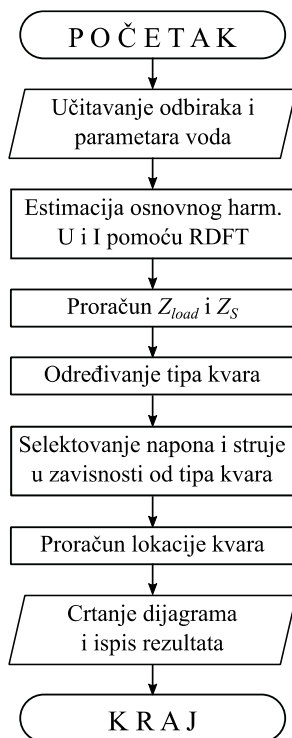
Prolazni kvarovi na nadzemnim vodovima su praćeni električnim lukom na mjestu kvara. Električni luk je nelinearna pojava koja unosi grešku u estimaciju lokacije kvara. Napon dugačkog električnog luka je u fazi sa strujom kvara i nelinearno zavisi od nje. Osnovna ideja za modelovanje električnog luka počiva na činjenici da napon luka veoma liči na pravougaoni impuls. Odstupanja od pravougaonog oblika, ne računajući šum stohastičkog karaktera, se javljaju u trenucima kada struja prolazi kroz nulu. Međutim, ta izobličenja traju jako kratko (oko 2 ms) [11], pa će se u ovom radu električni luk na mjestu kvara modelovati pravougaonim impulsom koji je u fazi sa strujom kvara, kao što je prikazano na Sl. 4.



Slika 4. Napon i struja električnog luka pri jednofaznom kratkom spoju.

### C. Dijagram toka programa za estimaciju lokacije kvara

Nakon simulacije kvara na vodu i prikupljanja odbiraka napona i struja vrši se njihova obrada. Dijagram toka programa za obradu podataka i estimaciju lokacije kvara je prikazan na Sl. 5. Na početku se prvo učitavaju odbirci napona i struja koji su dobijeni simulacijom kvara te propuštanjem dobijenih signala kroz niskopropusni filter ( $f = 500$  Hz). Zatim se vrši estimacija napona i struja pojedinih faza rekursivnom diskretnom *Fourier*-ovom transformacijom (RDFT) [11] nakon čega se proračunava impedansa izvora i impedansa koja modeluje potrošnju. U slučaju trofaznog voda mora se poznavati tip kvara da bi se mogli selektovati odgovarajući naponi i struje (prema tabeli I) potrebni za estimaciju lokacije kvara pa se prvo vrši određivanje tipa kvara prema tabeli II. Određivanjem tipa kvara te selektovanjem odgovarajućih napona i struja proračunavaju se koeficijenti dati izrazima (6) - (8), odnosno (10) - (12) i na kraju prema izrazu (9) se računa lokacija kvara. Kao izlaz, program ispisuje lokaciju kvara i iscrtava karakteristične dijagrame.



Slika 5. Dijagram toka programa za estimaciju lokacije kvara.

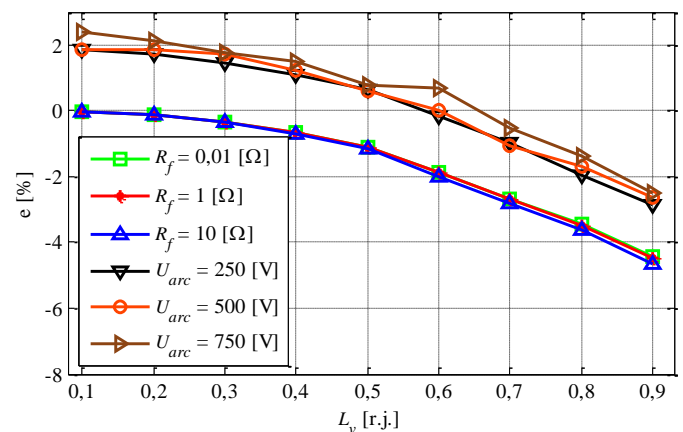
## IV. REZULTATI SIMULACIJA

Uticaj električnog luka na tačnost algoritma za estimaciju lokacije kvara će biti analiziran kroz set kvarova koji će se zadavati na različitim lokacijama i pri različitim otpornostima otpornika na mjestu kvara, odnosno pri različitim naponima električnog luka. Pri tome će se posmatrati jednofazni, dvofazni, dvofazni sa zemljom i trofazni kratki spojevi preko rezistanse kvara od  $0,01 \Omega$ ,  $1 \Omega$  i  $10 \Omega$ , odnosno napona električnog luka od  $250$  V,  $500$  V i  $750$  V. Za dvofazne i trofazne kratke spojeve smatra se da su navedene otpornosti kvara i naponi električnog luka između dvije faze. Greška koja će biti prikazana za različite tipove kratkih spojeva i različite vrijednosti rezistanse kvara se računa prema (18):

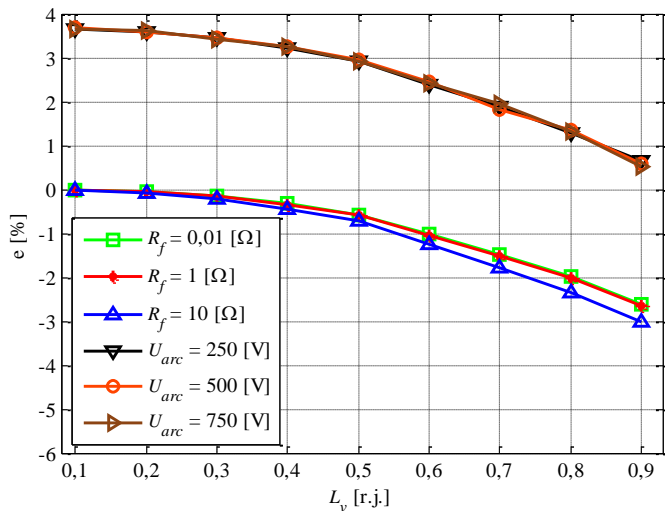
$$e [\%] = \frac{\text{estimirana lokacija} - \text{tačna lokacija}}{\text{dužina voda}} \cdot 100. \quad (18)$$

Greška estimacije lokacije kvara pri jednofaznom kratkom spoju za različite vrijednosti rezistanse kvara i različite vrijednosti napona električnog luka je prikazana na Sl. 6. Pri kratkom spoju preko rezistanse koja se ne mijenja tokom vremena greška lokacije kvara je negativna i kreće se do  $-4,65\%$ . Takođe, greška raste kako se kvar pomjera ka kraju voda. To jednim dijelom zavisi i od opterećenja voda ispred i iza kvara koje se mijenja i dovodi do većeg odstupanja u odnosu na model za koji je izvedena metoda. Za kratke spojeve preko električnog luka greška može biti pozitivna ili negativna u zavisnosti od lokacije kvara i u suštini, neznatno zavisi od napona električnog luka. U ovom slučaju je opseg u kome se nalazi greška veći (od  $2,4\%$  do  $-3\%$ ) od greške pri kvarovima preko rezistanse koja se ne mijenja tokom vremena.

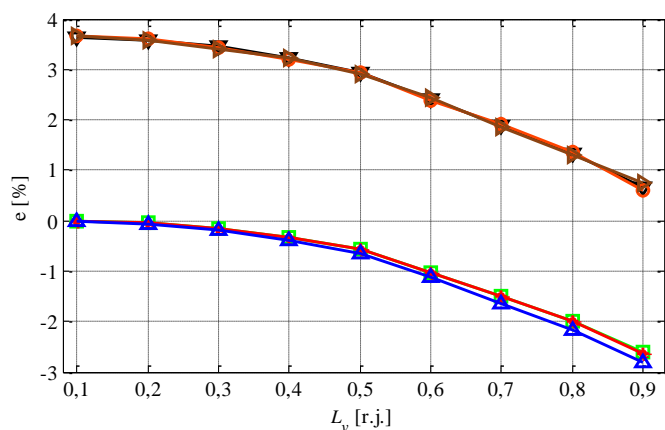
Uticaj rezistanse kvara i napona električnog luka na estimaciju lokacije kvara pri dvofaznim kratkim spojevima je prikazan na Sl. 7. Ako su u pitanju kratki spojevi preko rezistanse koja se ne mijenja u vremenu, greška je uvijek negativna i kreće se do  $-3\%$ . Takođe, greška raste kako se lokacija kvara pomjera prema kraju voda. Pri kratkim spojevima preko električnog luka greška postaje pozitivna za bilo koju lokaciju kvara. I u ovom slučaju greška se mijenja sa promjenom lokacije kvara, ali se ispostavlja da se greška smanjuje kako se lokacija kvara pomjera ka kraju voda.



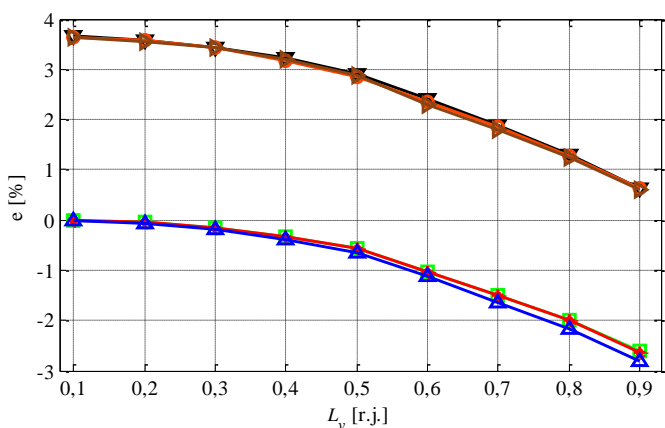
Slika 6. Greška estimacije lokacije kvara pri jednofaznom kratkom spoju za različite vrijednosti rezistanse kvara i napona električnog luka.



Slika 7. Greška estimacije lokacije kvara pri dvofaznom kratkom spoju za različite vrijednosti rezistansa kvara i napona električnog luka.



Slika 8. Greška estimacije lokacije kvara pri dvofaznom kratkom spoju sa zemljom za različite vrijednosti rezistansa i napona električnog luka.



Slika 9. Greška estimacije lokacije kvara pri trofaznom kratkom spoju za različite vrijednosti rezistansa kvara i napona električnog luka.

Za dvofazni kratki spoj sa zemljom i različite rezistansa kvara te napone električnog luka, greška estimacije lokacije kvara je prikazana na Sl. 8 (legenda je ista kao za Sl. 7). U suštini, nema značajnijih odstupanja grešaka u odnosu na

dvofazne kratke spojeve bez zemlje. Greška estimacije lokacije kvara za trofazni kratki spoj je prikazana na Sl. 9 (legenda je ista kao za Sl. 7). Kao i za ostale kvarove, greška pri konstantnoj otpornosti kvara je negativna i raste sa pomjeranjem mjesta kvara ka kraju voda. U slučaju kratkog spoja preko električnog luka greška postaje pozitivna i kreće se u opsegu 3,65 % do 0,65 % u zavisnosti od lokacije kvara. Takođe, greška neznatno zavisi od napona električnog luka.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran uticaj električnog luka na metodu za estimaciju lokacije kvara u distributivnim srednjenaponskim mrežama. Metoda se zasniva na estimaciji impedanse od lokatora kvara do mjesta kvara na osnovu struje i napona osnovnog harmonika. Testirana je na realnoj distributivnoj mreži i rezultati su upoređeni sa rezultatima koji se dobijaju za kvarove kod kojih se rezistansa kvara ne mijenja tokom vremena. Greška estimacije lokacije kvara pri kvarovima kod kojih se rezistansa kvara ne mijenja tokom vremena je uvijek negativna i kreće se do -4,6 % za jednofazne kvarove, dok je za ostale tipove kvarova nešto manja i kreće se do -3 %. Greška se mijenja sa promjenom lokacije kvara i to tako da se povećava pri pomjeranju kvara ka kraju voda. Pri kvarovima kod kojih se javlja električni luk greška može biti pozitivna i negativna u slučaju jednofaznih kratkih spojeva, a kod ostalih tipova kratkih spojeva je uvijek pozitivna. Ona se kreće od 2,4 % do -3 % za jednofazne kratke spojeve, odnosno od 3,65 % do 0,65% u slučaju ostalih kratkih spojeva. U suštini, može se zaključiti da električni luk može promijeniti znak greške, ali apsolutni iznos ostaje u opsegu do 4,6 % koliko se ima u slučaju jednofaznih kratkih spojeva sa konstantnom rezistancom kvara.

## ZAHVALNICA

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za naučnotehnoški razvoj, visoko obrazovanje i informaciono društvo Republike Srpske u okviru projekta Povećanje pouzdanosti srednjenaponskih distributivnih mreža korištenjem indikatora kvarova (FPI), i Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru Projekta III 42009 Inteligentne energetske mreže.

## LITERATURA

- [1] M. M. Saha, R. Das, P. Verho, and D. Novosel, "Review of fault location techniques for distribution systems," Power Systems and Communications Infrastructures for the future, Beijing, September 2002.
- [2] M. M. Saha, J. Izykowski, and E. Rosolowski, Fault Location on Power Networks, Springer-Verlag London Limited, 2010.
- [3] F. H. Magnago and A. Abur, "A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals," 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings, Edmonton, Alta., Canada, 1999, pp. 426-431.
- [4] D. W. P. Thomas, R. J. O. Carvalho and E. T. Pereira, "Fault location in distribution systems based on traveling waves," 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings., Bologna, Italy, 2003, pp. 5.
- [5] Z. Xiangjun, K. K. Li, L. Zhengyi and Y. Xianggen, "Fault location using traveling wave for power networks," Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting., Seattle, WA, USA, 2004, pp. 2426-2429 vol.4.
- [6] D. Novosel, D. Hart, J. Myllymaki, System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads, US Patent number 5,839,093 (1998).

- [7] L. Yang, C. Springs. One terminal fault location system that corrects for fault resistance effects, US Patent number 5,773,980 (1998).
- [8] R.K. Aggarwal, Y. Aslan, A.T. Johns, An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps, in: IEEDevelopments in Power System Protection, 1997, pp. 184–187 (Conference Publication No. 434).
- [9] J. Mora-Flórez, J. Meléndez, and G. Carrillo-Caicedo, “Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems,” Electric Power Systems Research, vol. 78, pp. 657-666, April 2008.
- [10] M. Đurić, Z. Stojanović, Relejna zaštita, KIZ Centar, Beograd, 2014.
- [11] M. Đurić, V. Terzija, Z. Radojević, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, S. Zubić, V. Bajić, Algoritmi za digitalne relejne zaštite, ETA, Beograd, 2012.

ABSTRACT

The distribution lines experience temporary and permanent faults. Temporary faults, which are more frequently faults on

overhead lines, are caused by lightning, snow, freezing rain and, short circuits caused by birds and other external objects. A non-metallic short circuit at the fault location causes an electric arc whose resistance is changing over time. In this paper, impact of electrical arc to the accuracy of the fault location algorithm in medium voltage distribution network is analyzed. The fault location algorithm is based on impedance measurement principle. Fundamental component of voltage and current during pre-fault and fault, as well as the network impedance, are used to estimate the fault location.

**IMPACT OF AN ELECTRIC ARC TO THE  
ACCURACY OF FAULT LOCATION ALGORITHM IN  
MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS**

Predrag Mršić, Zoran Stojanović