

**IMPEDANTNA METODA ZA ODREĐIVANJE LOKACIJE JEDNOPOLNOG KVARA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA****IMPEDANCE-BASED METHOD FOR LOCATING SINGLE LINE-TO-GROUND FAULT IN DISTRIBUTION NETWORKS**Slavka Trakilović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je razmatrana lokacija kvara kao jedna od najznačajnijih komponenti upravljanja kvarom u distributivnim mrežama. Detaljno su objašnjene impedantne metode za jednopolni kvar kao najčešći i najkompliciraniji za lociranje. Takođe je obrađen uticaj uzemljenja zvjezdišta na proračun struja kvara, a samim tim i na lokaciju kvara. Svi proračuni su realizovani pomoću programa koji je za potrebe ovog rada razvijen u programskom jeziku Fortran. Dobijeni rezultati su predstavljeni tabelarno i kroz dijagrame i izvršena je njihova analiza.

**Ključne reči:** Distributivna mreža, Impedantna metoda, Lokacija kvara

**Abstract** – This work considers fault location as one of the most important components of fault management in distribution networks. It gives detailed explanation of the impedance-based methods for the single line-to-ground fault as the most frequent and most complicated for determining the fault site location. Besides, it considers the influence of the neutral grounding on short-circuit calculation, and, by the same token, on the fault location. All calculations are done using a program specially designed for the need of this work, developed in the programming language Fortran. The obtained results are presented in the form of tables and diagrams, and they were appropriately analyzed.

**Keywords:** Distribution network, Impedance-based method, Fault location

**1. UVOD**

Glavni cilj svakog preduzeća za distribuciju električne energije je da održi što kvalitetnije snabdijevanje potrošača električnom energijom uz što manje troškova. Moderne distributivne mreže (DM) su ogromni sistemi sa velikim brojem elemenata, i kao posljedica toga događaju se različiti kvarovi.

Ti kvarovi mogu biti uzrokovani atmosferskim uticajima, uslovima infrastrukture, konfiguracijom terena. Pri pojavi kvara, nakon djelovanja zaštite, najvažnije je što prije popraviti kvar i obnoviti napajanje potrošača. Prvi korak u ovom procesu je određivanje lokacije kvara.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je dr Duško Bekut, red. prof.

Postupak lokacije kvara sastoji se iz dva koraka. U prvom koraku se procjenjuje gdje se nalazi mjesto sa kvarom, dok se u drugom koraku nalazi stvarno mjesto kvara, pri čemu se polazi od procijenjenog mjesta kvara [1].

Prva pretpostavka pri razmatranju lokacije kvara jeste da je DM opremljena brzim mjernim jedinicama koje povezivanjem sa stabilnim računarskim sistemom omogućuju brz proračun kvarova. Uz brze mjerne jedinice postoje razna tehnička izvođenja koja omogućavaju pouzdanu lokaciju kvarova na mreži.

Drugi dio rada je posvećen značaju i osnovnim principima lociranja kvarova, a treći prilikama u mreži za vrijeme trajanja jednopolnog kvara. Impedantna metoda se razmatra u četvrtom dijelu, a peti dio verifikaciji metode za lokaciju kvara. U poslednja dva dijela su dati zaključak i literatura.

**2. ZNAČAJ I OSNOVNI PRINCIPI LOCIRANJA KVAROVA**

Poznavanje tačne lokacije kvara, bez obzira da li je kvar prolazan ili trajan, je bitno za unapređenje rada distributivnog sistema, odnosno povećanja pouzdanosti napajanja potrošača i smanjenja troškova rada sistema. Lociranje kvara je proces procjene mjesta kvara sa što većom tačnošću. Načini implementacije funkcija za lociranje kvara su [2]:

- mikroprocesorskim zaštitnim relejima,
- digitalnim snimačima kvara,
- samostalnim lokatorima kvara,
- programima za analizu sistema poslije kvara.

Funkcija za lociranje kvara se uglavnom u praksi implementira u mikroprocesorske releje kao dodatna funkcija. Digitalni snimači kvara omogućavaju jedno-stavnu i jeftinu implementaciju ovakvih funkcija. Samostalni lokatori koriste sofisticirane algoritme i primjenjuju se kada su prihvatljivi veći troškovi. Programi za analizu sistema poslije kvara sadrže u sebi algoritme za procjenu mjesta kvara i uglavnom se koriste za upravljanje relejima [2].

Većina algoritama za procjenu mjesta kvara je zasnovana na principu mjerenja impedanse korišćenjem napona i struja osnovne frekvencije. Ulazni signali se mogu, u zavisnosti od mogućnosti lokatora kvara, klasifikovati na ulazne signale koji se dovode samo sa jednog kraja voda i ulazne signale koji se dovode lokatoru sa oba kraja voda [3]. Faktori koji utiču na tačnost lociranja kvara su:

- mjesto kvara,
- tip kvara,

- nehomogenost vodova,
- netačnost procjene parametara nadzemnih vodova i kablova,
- prisustvo otočnih elemenata, kao što su kondezatorske baterije,
- pogrešna identifikacija tipa kvara,
- početni fazni stav,
- tačnost analogno/digitalnih konvertora, itd.

Način uzemljenja neutralne tačke distributivnih transformatora utiče na procjenu mjesta jednopolnog kvara u DM. Uticaj načina uzemljenja neutralne tačke na lociranje mjesta kvara je detaljnije objašnjen u narednim glavama.

### 3. PRILIKE U MREŽI TOKOM JEDNOPOLNOG KVARA

Statistički podaci pokazuju da se najčešće u DM pojavljuju jednopolni dozemni kvarovi, koji u zavisnosti od uzemljenja zvjezdišta mogu biti zemljospoj ili jednopolni kvar. Iz navedenog razloga, u nastavku rada je posvećena pažnja prilikama u mreži za vrijeme ovog kvara, prenaponima do kojih dolazi, naponu dodira i koraka, specifičnoj otpornosti tla [4].

#### 3.1 Prilike u mreži za vrijeme zemljospoja

Prema statistici kvarova, najčešći su jednopolni dozemni – čine 50% od ukupnog broja kvarova. U zavisnosti od uzemljenja neutralne tačke, dozemni kvar se tretira kao zemljospoj ili jednopolni kvar. Jednopolni kvar sa zemljom ima značenje kvara ako je zvjezdište mreže direktno uzemljeno [5]. U tom slučaju iznos veličine struje jednopolnog kvara reda je veličine iznosa struje tropolnog kvara. U mrežama sa izolovanim zvjezdištem, jednopolni kvar se tretira kao zemljospoj. Struje zemljospoja su kapacitivne i teku kroz dozemne kapacitete.

U mrežama koje su direktno uzemljene, tokom jednopolnog kvara struja kvara teče samo u fazi sa kvarom i vraća se kroz zemlju. Duž zdravih faznih vodova fazni naponi su konstantni, dok na faznom vodu koji je obuhvaćen kvarom napon opada od nazivnog napona u izvoru do nule u tački kvara [5].

U mrežama sa izolovanim zvjezdištem, tokom zemljospoja, napon faze pod kvarom u tački zemljospoja jednak je nuli, dok fazni naponi zdravih faza postaju jednaki linijskim naponima. Kroz dozemni kapacitet faze u kvaru ne teče struja, jer je fazni napon faze u kvaru nula. Posljedica zemljospoja je termičko opterećenje vodova i izolatora usljed električnog luka na mjestu kvara. Električni luk se može proširiti i na zdrave faze i na taj način se pretvoriti u kvar. Struja zemljospoja nije velika, ali na mjestu gdje utiče u zemlju stvara velike i po život opasne potencijalne razlike. Zbog povećanja napona zdravih faza, povećava se i mogućnost pojave korone. Kapacitivne struje pri jednopolnom kvaru ne teku samo kroz vod u kvaru, nego i u zdravim vodovima. Smjer im je prema sabirnicama, a veličina proporcionalna kapacitetu zdrave dionice. Kablovi najvećim dijelom utiču na veličinu kapacitivne komponente struje zemljospoja, dok nadzemni vodovi veoma malo utiču. Visina kapacitivne komponente struje zemljospoja galvanski povezane mreže je osnovni kriterijum za odluku o prelasku mreže na rad sa uzemljenim zvjezdištem.

### 4. IMPEDANTNA METODA ZA LOKACIJU KVARA

Postoje različiti algoritmi za lociranje kvara, koji su bazirani na mjerenju impedanse kvara. Tokom implementacije tehnika zasnovanih na mjerenju impedanse javljaju se problemi zbog specifičnosti DM, poput nehomogenih vodova sa priključenim opterećenjima i otcjepima po cijeloj dužini. Generalno, svi impedantni algoritmi sastoje se iz tri koraka:

- Na osnovu režima prije kvara određuje se ekvivalentna impedansa direktnog i nultog redoslijeda uvažavajući topologiju, priključena opterećenja, kao i parametre mreže.
- Nakon detektovanja kvara računa se ekvivalentna impedansa petlje kvara koja zavisi od tipa kvara (međufazni kvarovi, kvarovi sa zemljom). Na osnovu izračunate impedanse je moguće doći do lokacije kvara.
- U slučaju kada postoji više potencijalnih mjesta kvara, potrebno je primijeniti adekvatni postupak da bi se pronašlo najvjerovatnije rješenje.

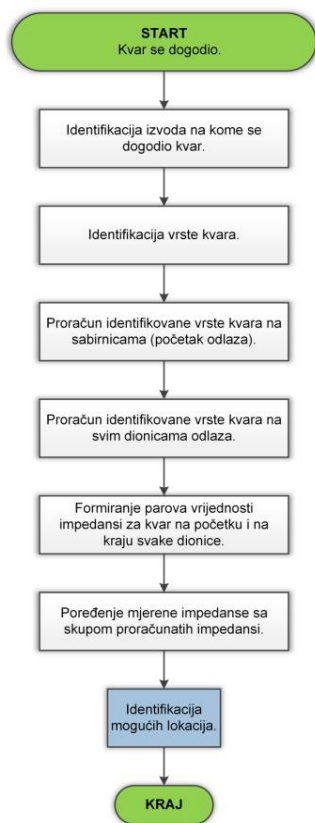
Metoda pogonske impedanse se zasniva na principima koji se primjenjuju kod distantne zaštite. Sam distantni relej nije dovoljan za lociranje kvara. On se podešava u nekoliko stepeni, gdje se za svaki od njih podešava odgovarajuća impedansa u okviru koje relej treba da odreaguje.

Na osnovu vrijednosti struje i napona koji su zabilježeni mjernim uređajem u SN polju napojnog transformatora VN/SN, računa se impedansa između mjerne jedinice i mjesta kvara. Na osnovu prorade releja se zna na kom fideru se desio kvar, a na osnovu mjerenja se dobija i tip kvara, tako što se identifikuju faze u kojima je povećana struja (odnosno, snižen napon). Kao i kod svih distantnih releja, za mjeru udaljenosti uzima se pogonska impedansa voda do mjesta kvara i ta impedansa odgovara impedansi za direktni režim. Relej je podešen da mjeri impedansu direktnog redoslijeda, tačnije dovode mu se naponi i struje iz čijeg će se količnika dobiti impedansa direktnog redoslijeda. Skup primarnih dionica sa kvarom se identifikuje pomoću sljedeće relacije:

$$Im\{Z_{ff1}\} \leq Im\{Z_{ff}\} \leq Im\{Z_{ff2}\} \quad (4.1)$$

gdje su  $Z_{ff1}$  i  $Z_{ff2}$  impedanse dionice na početku i kraju, a sa  $Z_{ff}$  je označena izračunata impedansa.

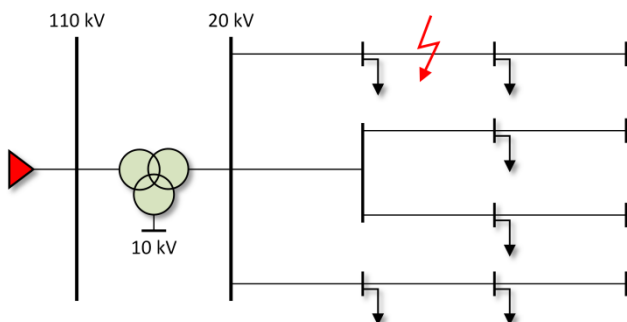
Kako bi se odredio skup sekundarnih lokacija kvara uzimaju se u obzir greške u mjerenju, i smatra se da one iznose oko 2%. Iz tog razloga se izračunata impedansa  $Z_{ff}$  množi sa 0.98, odnosno 1.02 i sada se ta nova vrijednost poredi sa  $Z_{ff1}$  i  $Z_{ff2}$ . Ovaj algoritam daje najbolje rezultate za velike struje kvara pa se on u mrežama u kojima su struje kvara male ne primjenjuje. Pogodan je za korišćenje i u kablovskim i u vazдушnim mrežama. Njegov nedostatak je mala preciznost pri procjeni mjesta kvara na početnim dionicama izvoda. Javlja se i problem kod primjene na mješovitim izvodima gdje se koeficijent zemljospoja mijenja u zavisnosti od dužina kablovskih i vazдушnih dionica od početka izvoda do mjesta kvara. Globalni dijagram impedantnog metoda dat je na slici 4.1.



Slika 4.1 – Blok dijagram impedantnog algoritma lokacije kvara

## 5. VERIFIKACIJA METODE ZA LOKACIJU KVARA

Nakon opisa impedantnog algoritma, u nastavku rada su dati primjeri procjene lokacije mjesta kvara impedantnim algoritmom. Za realizaciju primjera korišćena je distributivna test mreža prikazana na slici 5.1. Obrađeni su slučajevi lokacije kvara impedantnom metodom u zavisnosti od načina uzemljenja ekvivalentiranog tronamotajnog transformatora. Svi proračuni koji su od interesa izvršeni su pomoću programskog jezika Fortran.



Slika 5.1 – Distributivna test mreža

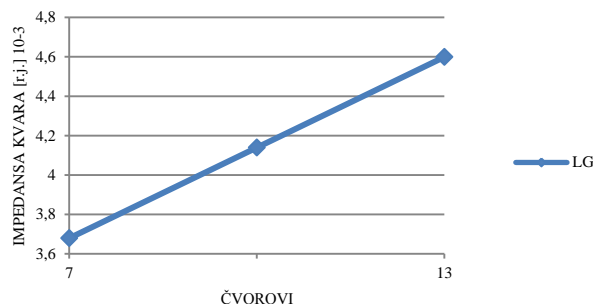
Obrađeni su slučajevi lokacije kvara impedantnom metodom u zavisnosti od načina uzemljenja zvjezdišta ekvivalentiranog transformatora. Razmatrano je nekoliko slučajeva: kada je zvjezdište sekundara uzemljeno preko male otpornosti, zatim kada je zvjezdište sekundara uzemljeno direktno i kada je zvjezdište sekundara izolovano. Nakon proračuna lokacije kvara na distributivnoj test mreži, analizirani su i prikazani dobijeni rezultati, tabelarno i grafički.

**Prvi primjer** – simuliran je jednopolni kvar na sredini druge dionice izvoda (4007) i impedantnim algoritmom je urađena lokacija kvara za direktno uzemljenu mrežu. Rezultati proračuna lokacije jednopolnog kvara impedantnim algoritmom u relativnim jedinicama, za direktno uzemljenu mrežu, su predstavljeni u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 – Rezultati proračuna lokacije jednopolnog kvara impedantnim algoritmom za direktno uzemljenu mrežu

| Izmjerena impedansa kvara | Sekcija sa kvarom |                  |            |
|---------------------------|-------------------|------------------|------------|
|                           | Impedansa čvor 1  | Impedansa čvor 2 | ID sekcije |
| 0.00413940                | 0.00367948        | 0.00459929       | 4007       |

Na slici 5.2 grafički su prikazani dobijeni rezultati (označeni rombovima) proračuna lokacije kvara impedantnim algoritmom, pri simulaciji jednopolnog kvara, u slučaju direktno uzemljene test mreže. Za ovaj kvar imaginarni dio impedanse je 0.00413940 [r.j.] što je veće od imaginarnog dijela impedanse za čvor na početku druge dionice izvoda (dionica 4007 u mreži), dok je istovremeno manji od dijela impedanse za čvor na kraju druge dionice izvoda (dionica 4007 u mreži). Time je ispunjen uslov (4.1), što znači da se kvar nalazi na dionici 4007. Preciznija kriva promjene vrijednosti impedanse duž izvoda dobila bi se kada bi se na više mjesta simulirali kvarovi, pri čemu bi se za interpolaciju između tačaka, umjesto pravih, koristio polinom višeg stepena (drugog, trećeg). Dijagram na slici 5.2 se može iskoristiti da se iz presjeka interpolacije krive i mjerene vrijednosti odredi orijentaciona mikro lokacija kvara.



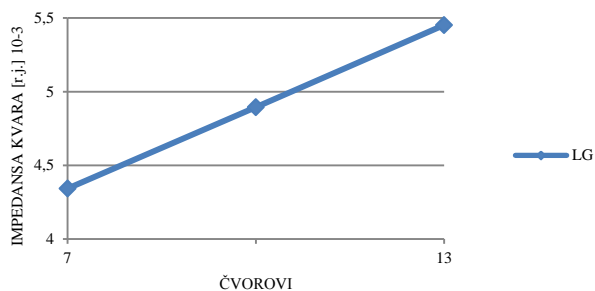
Slika 5.2 – Grafički prikaz rezultata impedantnog algoritma za direktno uzemljenu mrežu

**Drugi primjer** – simuliran je jednopolni kvar na sredini druge dionice izvoda i impedantnim algoritmom je urađena lokacija kvara za uzemljenu mrežu preko male otpornosti Ruzem. = 40 [Ω]. Rezultati proračuna lokacije jednopolnog kvara impedantnim algoritmom u relativnim jedinicama, za uzemljenu mrežu preko male otpornosti, su predstavljeni u tabeli 5.2.

Tabela 5.2 – Rezultati proračuna lokacije jednopolnog kvara impedantnim algoritmom za mrežu uzemljenu niskoomskim otpornikom

| Izmjerena impedansa kvara | Sekcija sa kvarom |                  |            |
|---------------------------|-------------------|------------------|------------|
|                           | Impedansa čvor 1  | Impedansa čvor 2 | ID sekcije |
| 0.00489498                | 0.00434250        | 0.00545224       | 4007       |

Na slici 5.3 grafički su prikazani dobijeni rezultati proračuna lokacije kvara impedantnim algoritmom, pri simulaciji jednopolnog kvara, u slučaju uzemljene mreže preko niskoomskog otpornika. Za ovaj kvar imaginarni dio impedanse je 0.00489498 [r.j.] što je veće od imaginarnog dijela impedanse za čvor na početku druge dionice izvoda, dok je istovremeno manji od dijela impedanse za čvor na kraju druge dionice izvoda. Time je ispunjen uslov (4.1), što znači da je kvar na dionici 4007. Kao rezultat procjene mjesta kvara dobijena je upravo dionica na kojoj je simulirano mjesto kvara.



Slika 5.3 – Grafički prikaz rezultata impedantnog algoritma za mrežu uzemljenu niskoomskim otpornikom

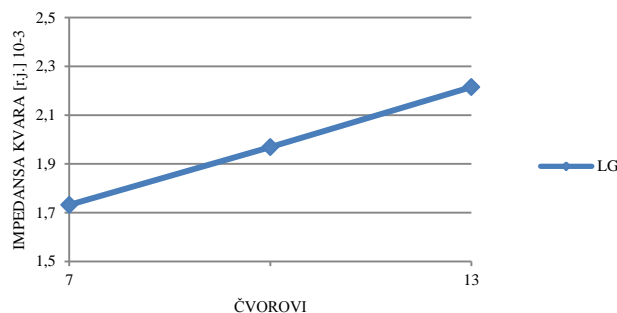
**Treći primjer** – simuliran je jednopolni kvar na sredini druge dionice izvoda i impedantnim algoritmom je urađena lokacija kvara za mrežu sa izolovanim zvjezdištem. Rezultati proračuna lokacije jednopolnog kvara impedantnim algoritmom za mrežu sa izolovanim zvjezdištem su predstavljani u tabeli 5.3.

Tabela 5.3 – Rezultati proračuna lokacije jednopolnog kvara impedantnim algoritmom za mrežu sa izolovanim zvjezdištem

| Izmjerena impedansa kvara | Sekcija sa kvarom |                  |            |
|---------------------------|-------------------|------------------|------------|
|                           | Impedansa čvor 1  | Impedansa čvor 2 | ID sekcije |
| 0.01968451                | 0.01731880        | 0.02214944       | 4007       |

Jedna od osnovnih prednosti mreže sa izolovanom neutralnom tačkom jeste mogućnost samogašenja struje jednopolnog zemljospoja, što omogućava samogašenje prolaznog zemljospoja.

Konkretno u ovom primjeru izmjerena struja kvara iznosi 35,85A, manja je od 40A, tako da je omogućeno samogašenje zemljospoja. Međutim, rezultati dobijeni impedantnim algoritmom su utoliko bolji ukoliko su struje kvarova veće. Impedantni algoritam je primjenljiv u svim mrežama, osim za jednopolne kvarove u mrežama u kojima su zvjezdišta transformatora izolovana. Na slici 5.4 grafički su predstavljeni dobijeni rezultati proračuna lokacije kvara impedantnim algoritmom, tokom jednopolnog kvara, u slučaju izolovane mreže.



Slika 5.4 – Grafički prikaz rezultata impedantnog algoritma za mrežu sa izolovanim zvjezdištem

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena impedantna metoda kao jedna od najzastupljenijih za lokaciju kvarova u DM, zasnovana na principima koji se primjenjuju kod distantne zaštite. Glavna prednost ove metode je mogućnost izostavljanja komunikacije, jer sa zadovoljavajućom tačnošću koristi mjerenu impedansu samo sa jednog kraja, kao i mogućnost jednostavne implementacije u digitalne snimače i zaštitne releje. Ekonomska opravdanost primjene neke od tehnika za lociranje kvara i tehnička opremljenost mreže mogu da se uzmu kao početna tačka pri strateškim odlukama tokom izbora metoda za lokaciju kvara u DM.

## 7. LITERATURA

- [1] M.M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski: *Fault Location on Power Networks*, Springer-Verlag, London, 2010.
- [2] L. Jian: *Fault Location and Service Restoration for Electrical Distribution Systems*, Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [3] D. Bekut: *Relejna zaštita*, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2009.
- [4] S. Hanninen, M. Lehtonen: *Earth fault distance computation with fundamental frequency signals based on measurements in substation supply bay*, Reasearch notes, Espoo, 2002.
- [5] S. Hanninen, *Single phase earth faults in high impedance grounded networks, Characteristics, indication and location*, Doctoral dissertation, Helsink University of Technology, Finland, 2006.

## Kratka biografija:



**Slavka Trakilović** rođena je u Tuzli 1991. godine. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka 2016. godine iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi. Master rad na istom fakultetu smjer Elektroenergetika – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2019. godine.