

**LOKACIJA KVARA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA****FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION NETWORKS**Aleksa Simić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Ovaj rad se bavi problematikom lokacije kvara u distributivnim mrežama. Dat je pregled mogućih metoda za lokaciju kvara. Obradene su impedantne metode kao i metode bazirane na merenju propada napona. Na kraju rada izvršeno je testiranje strujne i impedantne metode na primeru test distributivne mreže.

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

**Abstract** – This paper deals with the problem of fault location in distribution networks. An overview of possible methods for fault location is given. Impedance methods as well as methods based on the measurement of voltage drop are discussed. At the end of the paper, the current and impedance methods were tested using the distribution test network.

**Keywords:** *Distribution network, Fault location*

**1. UVOD**

Elektroenergetski sistemi su konstantno izloženi kvarovima, što utiče na njihovu pouzdanost, sigurnost i kvalitet električne energije. Najveći broj kvarova se dešava u distributivnoj mreži, pri čemu su najčešći kvarovi kratki spojevi. Prekid napajanja potrošača je nepoželjno stanje, te je potrebno preduzeti odgovarajuće mere da se ono što pre eliminiše. Određivanje mesta kvara u distributivnim mrežama je od presudnog značaja, jer se na taj način smanjuje dužina prekida napajanja potrošača. U drugoj glavi dat je pregled tipova kratkih spojeva, predložene su mere za smanjenje broja kvarova, prezentovane su nove mogućnosti vizuelne inspekcije nadzemnih vodova. U trećoj glavi dat je osnovni koncept pametnih mreža kao i sistema za upravljanje prekidima napajanja. Razmatran je uticaj ugradnje pametnih brojila na unapređenje ovog sistema. Takođe opisani su i uređaji distributivne automatike. Četvrta glava bavi se raznim tehnikama i algoritmima za lokaciju kvara. U petoj glavi obrađena je strujna i impedantna metoda za lokaciju kvara čije je testiranje izvršeno u šestoj glavi. U sedmoj glavi iznesen je zaključak, dok osma glava daje spisak literature.

**2. KVAROVI U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA**

Kvar predstavlja poremećeno stanje. Najčešći tip kvarova predstavljaju kratki spojevi. Kratak spoj je slučajna ili nameran spoj provodnika, preko malog otpora ili impedanse, između dve ili više tačaka, koje su na različitim naponima [1].

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je dr Duško Bekut, redovni profesor.

Razlikuju se sledeći tipovi kratkih spojeva: jednopolni kratak spoj, dvopolni kratak spoj, dvopolni kratak spoj sa zemljom, trolpolni kratak spoj, trolpolni kratak spoj sa zemljom.

**3. AUTOMATIZACIJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA**

Korišćenje naprednih algoritama za lokaciju kvara moguće je jedino ako je distributivna mreža automatizovana u dovoljnoj meri. To podrazumeva instaliranje brzih mernih jedinica, snimača kvara, indikatora kvara kao i reklozera i sekcionalizera.

U grupu snimača kvara spadaju uređaji koji imaju sposobnost da brzo registruju trenutne vrednosti napona i struje [2]. Dva glavna tipa snimača kvara koji se najčešće koriste pri proceni mesta kvara u mrežama su digitalni snimači kvara i mikroprocesorski releji. Pri upotrebi snimača kvara za procenu mesta kvara se imaju sledeći podaci: fazori napona i struja u sve tri faze u polju transformatora sa niskonaponske strane i izvod na kojem se kvar desio. Na osnovu vrednosti napona i struje prvo se identifikuje tip kvara, a zatim se izračunava (određuje) moduo merene struje kvara kao i vrednost merene impedanse na mestu, gde je snimač kvara instaliran (na mestu merenja). Ta impedansa uz podatak na kojem se izvodu desio kvar predstavlja osnovu za procenu rastojanja do mesta kvara.

Indikator prolaska struje kvara su uređaji koji se postavljaju na strateškim mestima da bi obezbedili informacije o prolasku struje kvara. U radijalnim distributivnim mrežama bez distribuiranih generatora koriste se neumereni indikator prolaska struje kvara. Ukoliko indikator detektuje struju kvara, to znači da se kvar desio iza indikatora. Indikator kvarova mogu biti dizajnirani da informaciju o struji kvara prikazuju lokalno ili da je šalju operateru u SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) system [3].

**3.1 OMS (Outage Management System)**

OMS predstavlja deo DMS-a (*Distribution Management System*) i moćan je alat za brzo i efikasno otklanjanje beznaponskih stanja u mreži. On pomaže dispečeru da na najoptimalniji način obavi sve korake i angažuje dostupne resurse koji su neophodni za ponovno vraćanje mreže u stanje pre kvara. OMS treba obezbediti automatizaciju koraka ili čitave akcije dispečera, ekipa na terenu i administracije vezane za izdavanje radnih naloga, tako da se vreme potrebno za vraćanje u normalno stanje mreže znatno skрати. Na taj način OMS igra ključnu ulogu u svakodnevnom vođenju mreže i smanjenju broja i trajanja prekida napajanja.

OMS je moguće unaprediti integracijom sa AMI sistemom (*Advanced Metering Infrastructure*) tj. ugradnjom pametnih brojlara na mestu isporuke električne energije. Pametni brojlari mogu automatski ili na zahtev pružati informacije o statusu uključenosti. Automatski generisane informacije podrazumevaju indikaciju nestanka napajanja kada je nestalo struje i indikaciju kada se napajanje ponovo uspostavi. Nakon isključenja, brojilo i dalje ima dovoljno rezervnog napajanja kako bi poslalo poruku centralnoj jedinici da je napajanje prekinuto na mestu ugradnje tog uređaja.

#### 4. METODE LOKACIJE KVARA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Lokacija kvara predstavlja izazov u distributivnim mrežama zbog njihove topologije i specifičnih operativnih karakteristika, kao i nedostatka raspoloživih merenja. Još uvek se često koriste tehnike vizuelne inspekcije za procenu mesta kvara. Takve tehnike nisu pogodne za kablovske sisteme, i zahtevaju dugo vreme za pronalazak lokacije kvara u većim distributivnim mrežama.

Automatska lokacija kvarova se najčešće koristi. Zasniva se na određivanju fizičkog mesta kvara pomoću obrade vrednosti naponskog i strujnog talasa.

Sledeći faktori utiču na procenu mesta kvara u distributivnoj mreži: promena konfiguracije mreže, razrgranati vodovi, nehomogeni vodovi, otpor na mestu kvara, opterećenje priključeno duž izvoda, prisustvo distributivnih generatora kao i način uzemljenja neutralne tačke.

##### 4.1 Impedantne metode za lokaciju kvara

Korišćenje napona i struja na terminalima, zajedno sa parametrima vodova, predstavlja najjednostavniji način utvrđivanja mesta kvara. Pretpostavlja se da je izračunata impedansa deonice pod kvarom merilo razdaljine do mesta kvara. Metode koje spadaju u ovu kategoriju nazivaju se impedantne metode za lociranje kvara. One su ekonomične i jednostavne za primenu. U zavisnosti od ulaznih signala lokatora kvarova, ove metode se mogu dalje klasifikovati. U zavisnosti od toga da li se koriste merenja sa jednog ili oba kraja voda, ove metode se klasifikuju na sledeći način:

- metode jednog kraja,
- metode oba kraja.

##### 4.2 Metoda zasnovana na simulaciji podataka o propadu napona

Ova metoda predlaže pronalazjenje lokacije kvara poređenjem izmerene vrednosti propada napona sa vrednostima dobijenim simulacijom i pohranjenim u bazu podataka. Merenje se vrši na početku izvoda. Uvažavajući činjenicu da deonice distributivnih izvoda nisu homogene (različitih su materijala i porečnih preseka), potrebno je za svaku deonicu napraviti zasebnu jednačinu koja opisuje promenu napona pri kratkom spoju u funkciji dužine deonice. Minimalno bi trebalo izvršiti simulacije na početku i kraju svake deonice i pritom zabeležiti vrednost amplitude i faznog stava napona. Jednačine za svaku krivu modeluju se polinomom drugog stepena. Generalne forme jednačina mogu se predstaviti preko sledećih izraza [3]:

$$V_i = a_0 d^2 + a_1 d + a_2, \quad (4.1)$$

$$\theta_i = b_0 d^2 + b_1 d + b_2. \quad (4.2)$$

Ove jednačine odgovaraju  $i$ -toj sekciji.

Algoritam poređenja podataka se sastoji od tri koraka [4]:

- 1) Globalna pretraga.
- 2) Estimacija udaljenosti kvara.
- 3) Rangiranje sekcije u kvaru.

U prvom koraku algoritma cilj je odrediti sve potencijane sekcije sa kratkim spojem. Sekcija je selektovana ako amplituda i fazni stav napona upadaju u granice definisane za tu sekciju. Recimo, da bi sekcija  $i$ - $j$ , gde su  $i$  i  $j$  početni i krajni čvor sekcije, bila okarakterisana kao potencijalna sekcija sa kvarom potrebno je da budu ispunjeni sledeći uslovi [4]:

$$V_i \leq V^m \leq V_j, \quad (4.3)$$

$$\theta_i \leq \theta^m \leq \theta_j. \quad (4.4)$$

U drugom koraku estimira se udaljenost mesta kvara od početnog čvora sekcije (čvor  $i$ ). Ova udaljenost proračunava se na sledeći način [3]:

$$d_{F1} = \left( -a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - V^m)} \right) / 2a_2, \quad (4.5)$$

$$d_{F2} = \left( -b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - \theta^m)} \right) / 2b_2 \quad (4.6)$$

$$d_F = (d_{F1} + d_{F2}) / 2. \quad (4.7)$$

U slučaju da postoji više potencijalnih deonica sa kvarom potrebno je utvrditi njihov prioritet.

#### 4.1 Metoda zasnovana na korišćenju inteligentnih mernih instrumenata

Korišćenje inteligentnih mernih uređaja (*smart feeder meters*) instaliranih na raznim mestima u sredjnaponskoj distributivnoj mreži, otvara nove mogućnosti za rešenje problema lokacije kvara. Ovi uređaji imaju mogućnost prijave kvara kao i merenja napona sa klasom tačnosti od 0.1 [%] do 0.5 [%].

Glavna ideja ove metode jeste korišćenje informacija o vrednosti propada napona kako bi se proračunali indeksi lokacije kvara koji ukazuju na čvor koji je najbliži mestu kvara. Propad napona ( $\Delta V$ ) računa se na osnovu sledećeg izraza [5]:

$$\Delta V_i^{(abc)} = V_i^{(abc)p} - V_i^{(abc)k}, \quad (4.8)$$

gde su  $V_i^{(abc)p}$  i  $V_i^{(abc)k}$  amplitude napona u fazama  $a, b$  i  $c$  izmerenog u čvoru  $i$  pre i posle kvara.

Ukoliko je poznata matrica admitansi moguće je proračunati vrednost indeksa  $\delta_k$  za svaki čvor u mreži. Za čvor sa najmanjom vrednošću ovog indeksa smatra se da je najbliži mestu kvara. U pojedinim slučajevima može se desiti da više čvorova ima istu vrednost indeksa kvara što implicira višestruku estimaciju kvara. Ovaj problem može se rešiti automatskim mapiranjem otkaza koji se sužava oblast pretrage. Na osnovu prorade reklozera i ostalih zaštitnih uređaja, pretraga se ograničava samo na deenergizovani deo mreže tj. obrađuju se podaci samo sa onih uređaja koji su ugrađeni na tom delu mreže [5].

#### 5. LOKACIJA KVARA U DMS SISTEMU

Postoje sledeće metode za lokaciju kvara:

- Strujna metoda,
- Impedantna metoda.

## 5.1 Strujni metod lokacije kvara

Osnovna ideja ovog algoritma počiva na tome da se u prvom koraku na osnovu podataka o kvaru (prorada određenih releja kao i merenja vrednosti struja u sve tri faze) koji su prikupljeni iz realne mreže identifikuje izvod i tip kratkog spoja. U drugom koraku se pomoću matematičkog modela distributivne mreže simulira identifikovani tip kratkog spoja duž datog izvoda sa ciljem da se odredi mesto na izvodu gde će za zadati kvar dobiti vrednost struje koja je merena [6].

Procena mesta kvara strujnim algoritmom započinje sa identifikacijom izvoda na kome se dogodio kvar. Izvod na kome se dogodio kvar određuje se na osnovu prorade relejne zaštite koja je pozicionirana na izvodnom polju.

Tip kvara se određuje na osnovu rezultata merenja, tako što se identifikuju faze u kojima je povećana struja (snižen napon).

Zatim se za tip kvara koji je prethodno identifikovan simulira na sabirnicama sa kojih polazi izvod sa kvarom a zatim i na sabirnicama na krajevima svih deonica tog izvoda.

Za svako mesto kvara izračunava se vrednost struje koja bi se merila brzom mernom jedinicom. Na taj način kada se za svaku deonicu dobije određeni par struja, i ako je merena struja baš u tom intervalu onda je kvar baš na toj deonici.

Izrazom 5.1 definiše se potreban i dovoljan uslov lokacije kvara strujnom metodom [5]:

$$j_i^k \leq j_i^{mer} \leq j_i^p, \quad (5.1)$$

gde su  $j_i^k$  i  $j_i^p$  intenziteti struja na kraju i početku deonice  $i$ .

## 5.2 Impedantni metod lokacije kvara

Ova metoda se zasniva na principima koji se primenjuju kod distantne zaštite. Na osnovu vrednosti struje i napona koja su zabeležena mernim uređajem u SN polju napojnog transformatora VN/SN, računa se impedansa između merne jedinice i mesta kvara.

Na osnovu prorade releja se zna na kom izvodu se desio kvar, a na osnovu merenja se dobija i tip kvara, tako što se identifikuju faze u kojima je povećana struja (odnosno, snižen napon) [6].

Kao i kod svih distantnih releja, za meru udaljenosti uzima se pogonska impedansa voda do mesta kvara (ta impedansa odgovara impedansi za direktni režim). Izbor impedanse direktnog redosleda je posledica činjenice da direktni režim postoji kod svih kvarova.

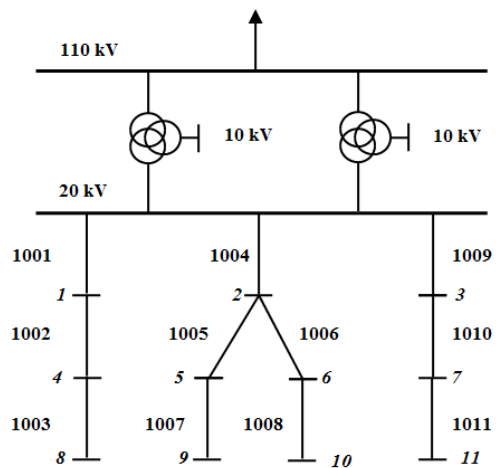
Skup primarnih deonica sa kvarom se identifikuje pomoću sledeće relacije [6]:

$$Im\{Z_{ff1}\} \leq Im\{Z_{ff}\} \leq Im\{Z_{ff2}\}, \quad (5.2)$$

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

## 6. PROVERA RADA STRUJNE I IMPEDANTNE METODE NA TEST PRIMERU

Slika 6.1. predstavlja distributivnu mrežu nad kojom je vršeno testiranje. Bitno je naglasiti da su napojni transformatori 110/20/10 [kV]/[kV]/[kV] uzemljeni preko zajedničkog otpornika otpornosti 40 [Ω].



Slika 6.1. – Jednostavna distributivna mreža

## 6.1 Lokacija kvara strujnom metodom

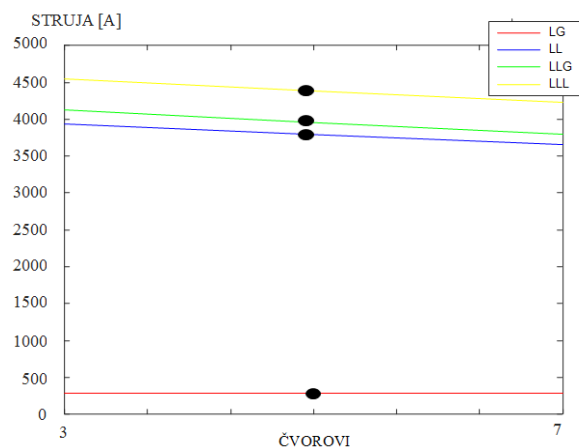
U tabeli su dati rezultati proračuna lokacije kvara primenom strujne metode.

Tabela 6.1.1. – Rezultati proračuna lokacije kvara strujnom metodom

Tip kratkog spoja	Merena struja kvara [A]	Struja kvara čvora 3 [A]	Struja kvara čvora 7 [A]	Grana
1PKS	279.850	281.10	278.61	1010
2PKS	3794.53	3936.13	3660.23	1010
2PKSZ	3858.49	4001.21	3723.06	1010
3PKS	4381.55	4545.05	4226.47	1010

Na slici su prikazani graficki rezultati proračuna lokacije kvara strujnim algoritmom.

Ovi rezultati predstavljaju primarne lokacije kratkog spoja. Algoritam je uspešno okončan, za sve vrste kratkih spojeva kvar je lociran na zadatoj deonici 1010. Na osnovu rezultata može se zaključiti da je strujna metoda lokacije kvara daleko stabilnija kada su intenziteti struja veći što predstavlja otežavajuću okolnost pri pojavi jednopolnih kratkih spojeva.



Slika 6.1.1. – Rezultati proračuna lokacije kvara strujnom metodom

U tabeli su date sekundarne deonice sa kvarom pri toleranciji merene vrednosti od  $\pm 2$  [%]. Rezultati potvrđuju da je strujna metoda nestabilna pri malim vrednostima struje kratkog spoja.

Tabela 6.1.2. – Sekundarne deonice sa kvarom pri toleranciji +2 [%]

Tip kratkog spoja	Merena struja kvara [A]	Struja kvara početnog čvora [A]	Struja kvara krajnjeg čvora [A]	Grana
1PKS	274.253	278.617	273.766	1011

Tabela 6.1.3. – Sekundarne deonice sa kvarom pri toleranciji -2 [%]

Tip kratkog spoja	Merena struja kvara [A]	Struja kvara početnog čvora [A]	Struja kvara krajnjeg čvora [A]	Grana
1PKS	285.447	291.441	281.102	1009

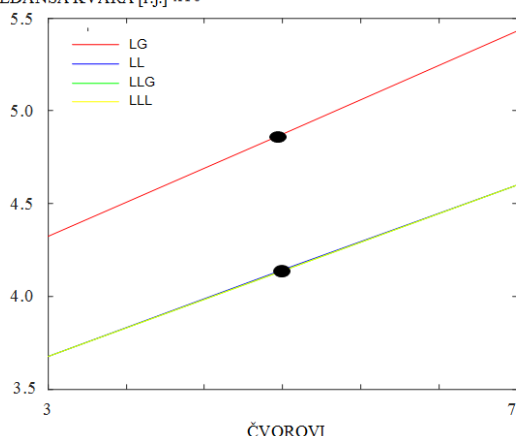
## 6.2 Lokacija kvara impedantnom metodom

Tabela 6.2.1 prikazuje rezultate proračuna lokacije kvara impedantnom metodom, na slici 6.2.1 rezultati su predstavljeni grafički.

Tabela 6.2.1 – Rezultati proračuna lokacije kvara impedantnom metodom

Tip kratkog spoja	Merena impedansa kvara [r.j.]	Impedansa kvara čvora 3 [r.j.]	Impedansa kvara čvora 7 [r.j.]	Grana
1PKS	0.0048	0.0043	0.0054	1010
2PKS	0.0041	0.0036	0.0047	1010
2PKSZ	0.0041	0.0036	0.0047	1010
3PKS	0.0041	0.0036	0.0047	1010

IMPEDANSA KVARA [r.j.]  $\times 10^{-3}$



Slika 6.2.1. – Rezultati proračuna lokacije kvara impedantnom metodom

Na osnovu rezultata može se zaključiti da je kvar uspešno lociran primenom impedantne metode. Za sva četiri tipa kratkih spojeva kvar je lociran na deonici 1010.

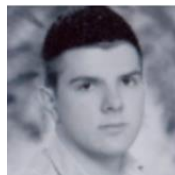
## 7. ZAKLJUČAK

Procena mesta kvara jedna je od najvažnijih akcija prilikom upravljanja distributivnom mrežom. U ovom radu je obrađeno više različitih metoda za rešenje ovog problema. Na kraju rada izvršeno je poređenje strujne i impedantne metode na primeru jednostavne distributivne mreže. Metode su se pokazale kao pouzdane. Za sve tipove kratkih spojeva kvar je lociran na odgovarajućoj deonici.

## 8. LITERATURA

- [1] Strahil Gušavac, *Osnovni principi projektovanja u mrežama srednjeg i niskog napona*, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, 2004.
- [2] Duško Bekut, *Relejna zaštita*, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, 2009.
- [3] B. Brbaklić, *Određivanje optimalnog broja, tipa i lokacije uređaja za automatizaciju elektrodistributivnih mreža*, Doktorski rad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2018.
- [4] F.C.L. Trindade, W. Freitas, J.C.M. Vieira, *Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
- [5] H. Mokhalis, H.Y. Li, A.H. Bakar, *Locating Fault Using Voltage Sag Profile for Underground Distribution System*, IEEE, 2010.
- [6] D. Popović, D. Bekut, V. Dabić, *Specijalizovani DMS algoritmi*, DMS GROUP Novi Sad, 2011.

### Kratka biografija:



**Aleksa Simić** rođen je u Novom Sadu 25.01.1994. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka završio 2018. godine na smeru Elektroenergetski sistemi. Iste godine upisao master studije, takođe na Fakultetu tehničkih nauka.