

Bruno Buble, dipl. ing. el.  
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.  
[bruno.buble@hep.hr](mailto:bruno.buble@hep.hr)

Krunomir Petric, dipl. ing. el.  
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.  
[krunomir.petric@hep.hr](mailto:krunomir.petric@hep.hr)

Ante Mamić, dipl. ing. el.  
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.  
[ante.mamic@hep.hr](mailto:ante.mamic@hep.hr)

## ODREĐIVANJE MJESTA KVARA POMOĆU NUMERIČKOG RELEJA

### SAŽETAK

U ovom radu smo testirali funkciju određivanja mjesta kvara (fault locator) pomoću numeričkog releja REF630 ugrađenog na 35 kV-nom vodnom polju. Pokusi jednopolnih kratkih spojeva su se izveli na 35 kV-noj distribucijskoj mreži uzemljenoj preko malog otpora.

Analizirani su pogonski rezultati lociranja kvarova s numeričkog releja REF630, te ispitana njegova točnost u odnosu na stvarno mjesto kvara. Također, prikazani su vektorski dijagrami napona i struja jednopolnih kratkih spojeva za svako mjesto kvara.

**Glavne riječi:** lokator kvara, numerički releji, jednopolni kratki spoj, distribucijska mreža

## NUMERICAL RELAY FAULT LOCATION DETECTION

### SUMMARY

This paper reviews functionality of detecting fault location with numerical relay REF630 installed in 35 kV power line. Line-to-ground fault experiments were performed in 35 kV distribution system with resistance grounded system.

Numerical relay results of locating fault point were analyzed and its accuracy was tested considering actual fault distance. Also, phasor diagram of voltage and current for line-to-ground fault are shown.

**Key words:** fault locator, numerical relay, line-to-ground fault, distribution system

## 1. UVOD

Elektroenergetske mreže su danas većinom ogromni sustavi, a broj vodova u pogonu i njihova ukupna duljina mnogostruko se povećala od vremena polovice prošlog stoljeća i početaka masovne elektrifikacije. Na tim vodovima pojavljuju se kvarovi zbog raznoraznih razloga. To mogu biti nevrijeme, grmljavina, tuča, snijeg, pad neke grane ili ptice na nadzemni vod, proboj izolacije na izolatorima nadzemnog vodiča ili na plaštu kabela. Kao posljedica svega ovoga događaju se različiti kvarovi koji mogu biti kratki spojevi, pokidani vodiči, zemljospojevi ili njihova kombinacija. U mnogo slučajeva taj električni kvar je posljedica nekog mehaničkog kvara na vodu, i prije ponovnog stavljanja u pogon taj kvar mora biti otklonjen.

Električni kvarovi mogu biti prolazni i trajni. Trajni kvarovi uzrokovani su sigurno nekim mehaničkim kvarom, ali i prolazni kvarovi također mogu biti uzrokovani nekim mehaničkim kvarom manjeg utjecaja kojeg bi također trebalo otkloniti radi sigurnosti pogona, iako je pogon moguć. Kao jedna od bitnih komponenti postupka "upravljanja kvarom" (engl. *fault management*) u elektroenergetskom sustavu pojavljuje se određivanje samog mjesta kvara kako bi se došlo na lokaciju i otklonio uzrok. Pri pojavi kvara u elektroenergetskom sustavu, nakon prorade zaštite, važno je što prije obnoviti napajanje potrošača.

Kao prvi postupak u "upravljanju kvarom", ali samo u nadzemnim mrežama, koristi se automatski ponovni uklop koji eliminira kvarove prolaznog karaktera. Ako je kvar trajnog karaktera, napajanje potrošača može se dijelom obnoviti samo ako je lokacija kvara točno poznata ili se može procijeniti sa zadovoljavajućom preciznošću. Ukoliko lokaciju kvara možemo približno odrediti pristupa se sekcioniranju mreže i uspostavi ponovnog napajanja onog dijela mreže koji nije u kvaru. Što se točnije može odrediti lokaciju kvara, tj. segment mreže koji je u kvaru, to se za veći dio mreže, naravno, u ovisnosti o konfiguraciji mreže, može ponovno uspostaviti napajanje. Brzina i točnost lociranja mjesta kvara određuje vrijeme dolaska do mjesta kvara, a time i brzinu procesa otklanjanja kvara. Posljednji postupak u upravljanju kvarom je fizičko otklanjanje uzroka kvara i uspostava ponovnog napajanja cijele mreže.

Razvoj energetskeg sustava i pojava tržišta električne energije u novije vrijeme povećavaju važnost brzog lociranja kvara i u razdjelnim mrežama, u cilju smanjenja vremena u kojem su potrošači bez napajanja koje u uvjetima tržišta predstavlja trošak za opskrbljivača u vidu penala. Procjena mjesta kvara je veoma važno pitanje u elektroenergetskom sustavu u cilju što bržeg otklanjanja kvara i brzog povratka sustava u pogon sa minimalnim prekidima. Time se postiže manje naprezanje elektroenergetske opreme i veće zadovoljstvo kupca.

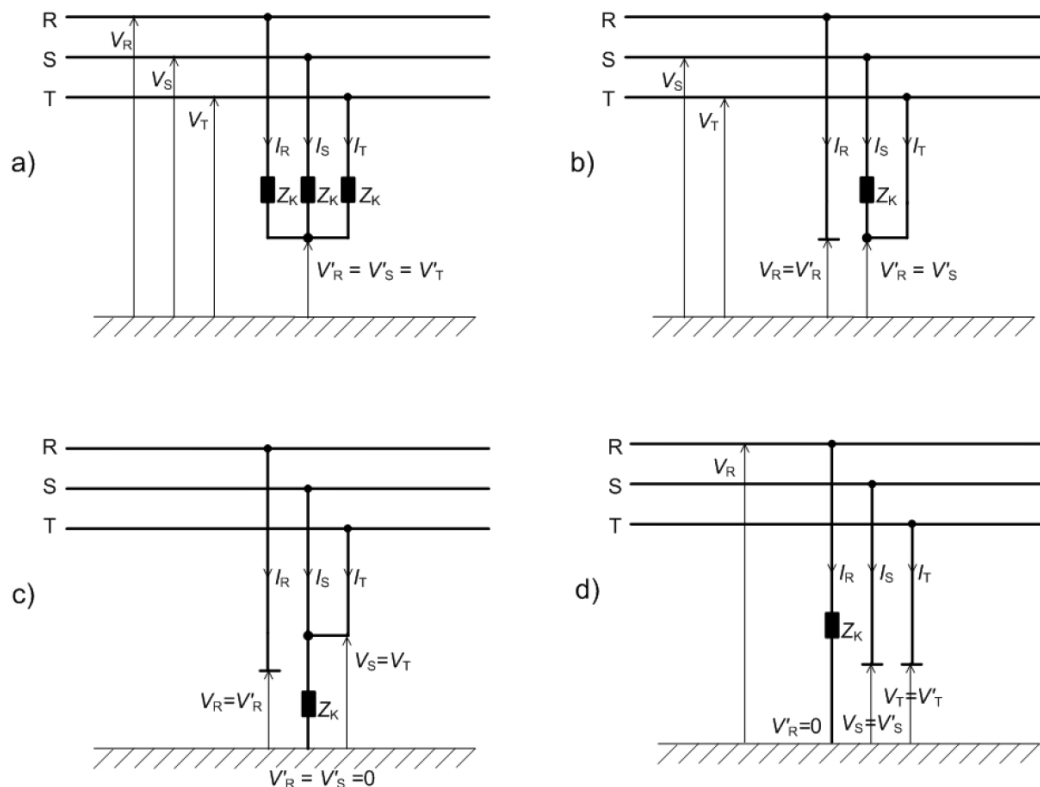
U ovom radu procjena mjesta kvara se vrši primjenom numeričkog releja REF 630. Navedeni relej koristi blok funkciju SCEFRLO koja na temelju ulaznih parametara, te trofaznog sustava napona i struja voda izračunava mjesto udaljenosti na kojem je nastao kvar. U ovom radu analiziramo jednopolne kratke spojeve na 35 kV vodnom polju između TS 35/10 kV Prančevići i TS 110/35 kV Sinj. Napajanje električnom energijom u trenutku kratkih spojeva je iz smjera TS 35/10 kV Trilj.

## 2. KVAROVI U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

Najčešći kvarovi u elektroenergetskim mrežama su kratki spojevi. U trofaznim mrežama razlikuju se četiri vrste kratkih spojeva: tropolni, dvopolni, dvopolni s istovremenim spojem sa zemljom i jednopolni kratki spoj. Na slici 1. su kratko opisani pojednostavljeni slučajevi.

- a) trofazni kvar; kratki spoj tri faze (sa zemljom ili bez) i to:
- b) dvofazni kvar; kratki spoj dvije faze,
- c) dvofazni sa zemljom
- d) jednofazni kvar ili zemljospoj;

Spoj jedne faze sa zemljom se u uzemljenim mrežama definira kao jednofazni kvar, dok se u izoliranim mrežama ovaj kvar naziva zemljospoj.



Slika 1. Kratki spojevi preko impedancije kvara a) trifazni, b) dvopolni, c) dvopolni sa zemljom d) jednopolni kratki spoj,

Prema statistikama kvarova, većina kvarova u distribucijskim (srednjenaponskim) mrežama su zemljospojevi. Od ukupnog broja kvarova oko 60% i više se odnosi na jednopolne kratke spojeve i zemljospojeve.

Pojava jednopolnog kratkog spoja uzrokuje:

- pojavu visokih napona dodira koji mogu prouzrokovati opasnosti po zdravlje i život ljudi
- toplinska naprezanja koja izaziva struja kvara skraćuju životni vijek opreme te mogu dovesti do trajnog oštećenja elemenata postrojenja
- naponska naprezanja (prenaponi)
- interferencija s telekomunikacijskim vodovima
- prekid napajanja

### 3. PROBLEMATIKA LOCIRANJA KVARA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Distributivni su vodovi u pravilu u radijalnom pogonu. Opterećenja su obično priključena na odcjepima duž pojnog voda. Konstrukcija voda je obično nehomogena jer se distributivni vodovi dograđuju kako se pojavljuju nova opterećenja.

Podjela načina lociranja kvara bi se mogla podijeliti na četiri kategorije: tehnike koje upotrebljavaju struje i napone osnovnih frekvencija, tehnike temeljene na fenomenu putujućih valova, pristupi temeljeni na topološkim metodama i oni temeljeni na poznavanju mreže (znanju o učestalosti kvarova na pojedinim dionicama). Jako su česte mješovite metode koje koriste više nabrojanih tehnika. Najviše se predloženih metoda temelji na mjerenju impedancije upotrebom mjerene struje i napona osnovnih frekvencija.

Naglasak je na tehnikama lociranja kvara za prijenosne mreže kod metoda koje su temeljene na mjerenju impedancije, te se pretpostavlja da je vod homogen i da nema odcjeka. To je problem u primjeni tih metoda na razdjelnim mrežama. Metode temeljene na mjerenju impedancije za razdjelne mreže koriste napone i struje osnovne frekvencije na kraju voda te parametre voda i opterećenja. Algoritmi ovih metoda sastoje se od računanja impedancije voda koja se vidi s kraja voda i koriste

izračunatu impedanciju za procjenu udaljenosti kvara od kraja voda. Neke su izvedene iz metoda za prijenosne mreže i obično imaju ograničenja, npr. ne uzimaju u obzir dinamičku prirodu opterećenja, nisu prikladne za nehomogene vodove ili ne uzimaju u obzir prisutnost odcjeka u distributivnom sustavu.

Metode temeljene na putujućim valovima koriste tranzijente struja i napona uzrokovane kvarom koji pokreće strujne i naponske putujuće valove između kvara i kraja voda. Ova metode su kompleksne i skupe zbog potrebnih sofisticiranih uređaja. Upotrebljavaju se za lociranje mjesta zemljospoja u mrežama s izoliranom ili kompenziranom neutralnom točkom, gdje su struje zemljospoja osnovne frekvencije obično jako male pa se razumna procjena udaljenosti kvara iz njih ne može dobiti.

Još jedna metoda, koja se danas u praksi koristi za određivanje dionice u kvaru, sastoji se od upotrebe indikatora kvara u svakoj dionici radijalnog voda. Ova metoda nije od neke koristi ukoliko je dionica duža od nekoliko kilometara. Većina indikatora kvara daje indicaciju lokalno što otežava upotrebu te informacije, pogotovo ako su loše vremenske prilike pa neki proizvođači nude indikatore kvara koji podržavaju daljinsku komunikaciju.

### **3.1. Faktori koji imaju utjecaja pri određivanju mjesta kvara u razdjelnoj mreži**

Karakteristike razdjelnih mreža razlikuju se od onih kod prijenosnih mreža, a neke od njih imaju velikog utjecaja na preciznost metoda za određivanje mjesta kvara koje se uspješno primjenjuju u prijenosnim mrežama. U sljedećim potpoglavljima opisane su specifičnosti razdjelnih distributivnih mreža koje utječu na točnost algoritama koji računaju mjesto kvara.

#### **3.1.1. Razgranati vodovi**

Posebno u mrežama u ruralnim područjima, vodovi su često razgranati, tako da je određivanje impedancije do lokacije kvara nepouzdan jer više točaka u mreži može imati jednaku tu impedanciju. Stoga je potrebno voditi računa o konfiguraciji cijele mreže pri formiranju metode za određivanje mjesta kvara.

#### **3.1.2. Nehomogeni vodovi**

Općenito su vodovi sastavljeni od dijelova različitih tehničkih osobina (različiti vodiči, presjeci vodiča, geometrije stupova, različiti tipovi kabela, miješani nadzemno-kabelski dijelovi itd.) pa dolazi do pojave nekontinuiranog "pravca" impedancije, tj. varijacija u impedanciji voda. Da bi metoda za određivanje mjesta kvara u razdjelnoj mreži bila precizna, potrebno je imati detaljnu bazu podataka o svim dionicama mreže implementiranu u metodi.

#### **3.1.3. Utjecaj opterećenja priključenih duž izvoda**

Opterećenja na distributivnim vodovima mogu unijeti značajne greške u procjenu mjesta kvara. To ovisi o otporu kvara i o veličini i karakteristikama opterećenja.

#### **3.1.4. Prijelazni otpor na mjestu kvara**

Prijelazni otpor na mjestu kvara sastoji se od dviju glavnih komponenti, otpora luka i otpora tla. Može biti konstantan za cijelo vrijeme trajanja kvara ili može varirati s vremenom zavisno od duljine luka ili njegova gašenja i paljenja. U faznim kvarovima, otpor kvara sastoji se samo od otpora luka, dok u kvarova kod kojih se javlja i zemljospoj, otpor kvara se sastoji i od otpora luka i od otpora tla. Otpor tla uključuje u sebi otpore kontakata između vodiča i tla i otpor strujne staze kroz tlo u slučajevima kada oštećeni vodič dira tlo. U slučajevima kada oštećeni vodič dira stup, otpor tla uključuje otpor kontakata između vodiča i stupa i otpor strujne staze kroz tlo i uzemljenje stupa. U nastavku teksta će biti objašnjeno kako se vrši proračun prijelaznog otpora na mjestu kvara, i može se zaključiti da je otpor pretežno omskog karaktera, tj. da se mogu zanemariti induktivne i kapacitivne komponente.

##### **Otpor luka**

U literaturi je predložena sljedeća empirijska formula za ovisnost otpora luka o duljini i struji luka kroz luk izračunata prema poznatom „Warrington“ izrazu:

$$R_{\text{arc}} = \frac{28710 \cdot L_{\text{arc}}}{I_f^{1,4}} \quad (3.1)$$

gdje je:

$R_{arc}$  - otpor luka u ohmima ( $\Omega$ ),  
 $L_{arc}$  - duljina luka u mirnom zraku u metrima ( $m$ ),  
 $I_f$  - efektivna vrijednost struje kvara u amperima ( $A$ ).

Duljina luka je inicijalno jednaka razmaku vodiča i stupa ili razmaku dva vodiča, ali povećava se zbog produženja luka uzrokovanog poprečnim vjetrom, konvekcijom i elektromagnetskim širenjem.

### Otpor tla

Otpor tla je zbroj otpora uzemljenja stupa na lokaciji kvara i otpora strujne staze kroz tlo od kvara do izvora. U praksi se mjere i snimaju podatci o otporu uzemljenja stupova i karakterističnim otporima tla. Dominantan otpor u strujnom krugu u kvaru je otpor kontakta između vodiča i strujne staze kroz tlo ako se vodič slomi i padne na tlo. Otpor kontakta s tlom ovisi o tipu tla i vlažnosti. Također ovisi i o naponu vodiča, potreban je određen napon da izazove proboj površinske izolacije. Općenito, otpori kontakta s tlom su veći od otpora uzemljenja stupova. Otpori kvara su mali za međufazne kratke spojeve i ne prelaze nekoliko ohma. Mnogo su veći za zemljospojeve jer otpori uzemljenja stupova mogu biti do  $10 \Omega$  ili čak i viši. Otpori kvara su iznimno veliki za kontakte s drvećem ili za slomljene vodiče koji leže na suhom asfaltu. Raspon otpora kvara je od nekoliko ohma do nekoliko stotina ohma

Princip njegovog utjecaja na preciznost metoda za određivanje mjesta kvara ilustriran je na slici 2. Na slici 2. a) prikazan je jednofazni vod u praznom hodu na kojem se dogodio zemljospoj preko otpora kvara. Uz zanemarenje kapacitivnih struja slijedi da je struja  $I_{mf}$  na sabirnici M gdje se vrši mjerenje jednaka struji kvara  $I_f$ . Impedanciju koju se "vidi" s mjesta mjerenja može se izraziti kao:

$$Z_m = \frac{V_m}{I_{mf}} = mZ_{mn} + R_f \quad (3.2)$$

gdje je:

$Z_m$  - impedancija mjerena na sabirnici M,

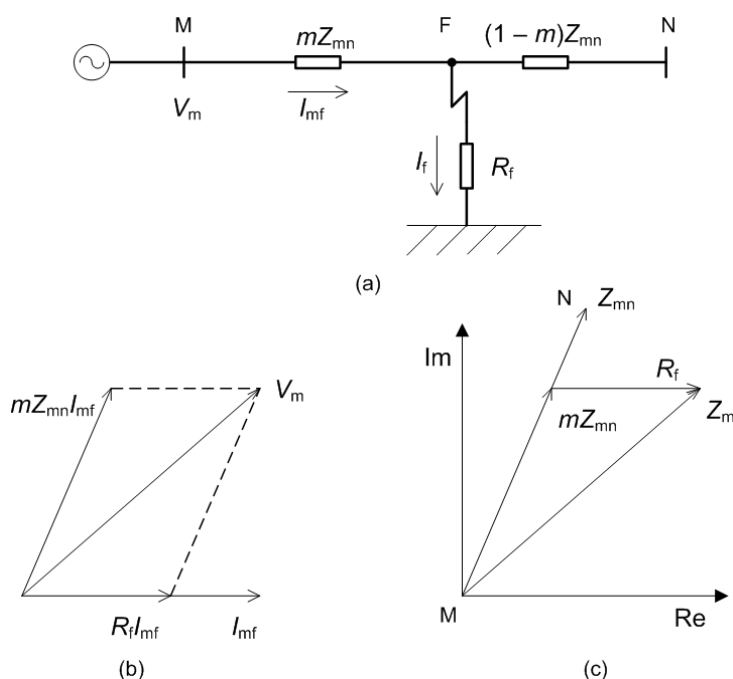
$V_m$  - napon za vrijeme kvara na sabirnici M,

$I_{mf}$  - struja na sabirnici i kroz mjesto kvara,

$m$  - udaljenost kvara od sabirnice M, izražena u postocima duljine voda,

$Z_{mn}$  - impedancija voda od M do N,

$R_f$  - prijelazni otpor kvara koji uključuje i otpor strujne staze kroz tlo.



Slika 2. Promjena impedancije koju "vidi" lokator kvara zbog utjecaja otpora kvara

$$m = \frac{\text{Im}(\mathbf{Z}_m)}{\text{Im}(\mathbf{Z}_{mn})}$$

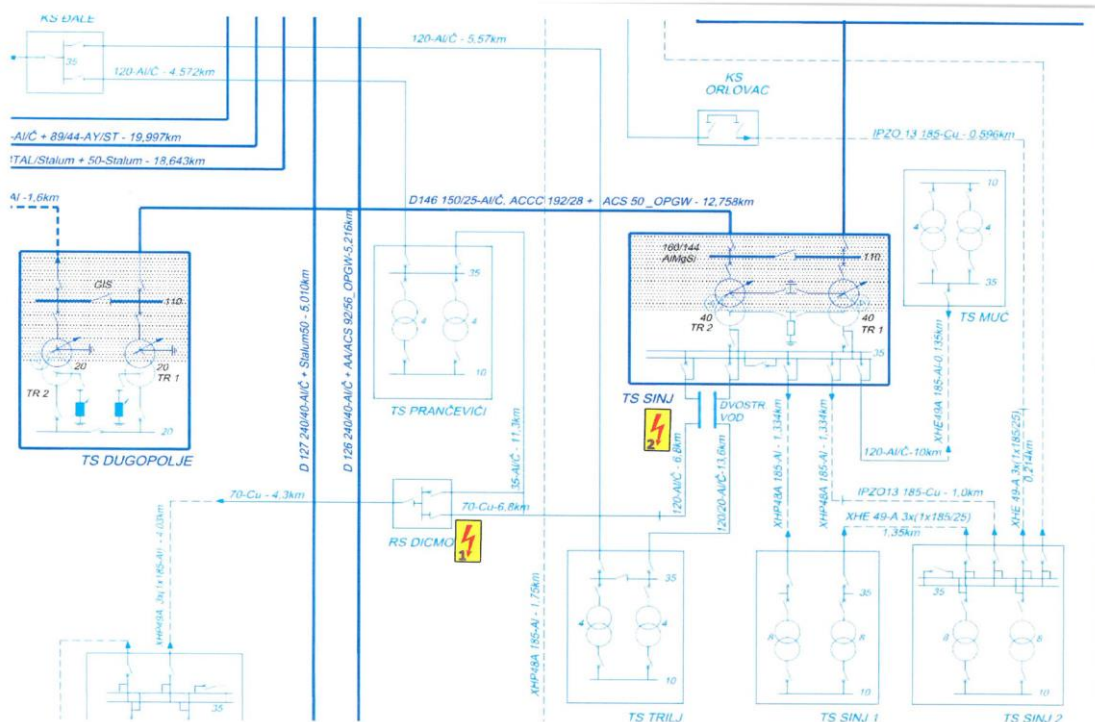
#### 4. OPIS IZVEDENIH POKUSA JEDNOPOLNIH KRATKIH SPOJEVA

Kao što vidimo iz slike 3. jednopolni kratki spojevi su odrađeni na dvije lokacije;

- a) RS 35 kV Dicmo
- b) TS 110/35 kV Sini

- 1.Uklop na kvar iz TS 35/10 kV Prančevići (faza A direktno uzemljena u RS Dicmo)
- 2.Uklop na kvar iz RS 35 kV Dicmo (faza C uzemljena preko sonde)
- 3.Uklop na kvar iz TS 35/10 kV Prančevići (faza C uzemljena bez sonde, vodič na zemlji)
- 4.Uklop na kvar iz RS 35 kV Dicmo (faza C uzemljena bez sonde, vodič na zemlji)

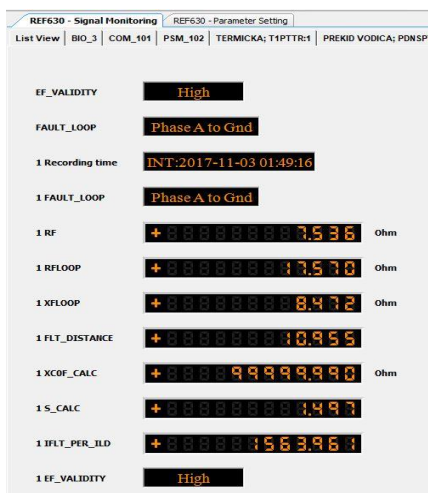
Na drugoj lokaciji je odrađen jednopolni kratki spoj sa direktno uzemljenom fazom A u trafostanici.



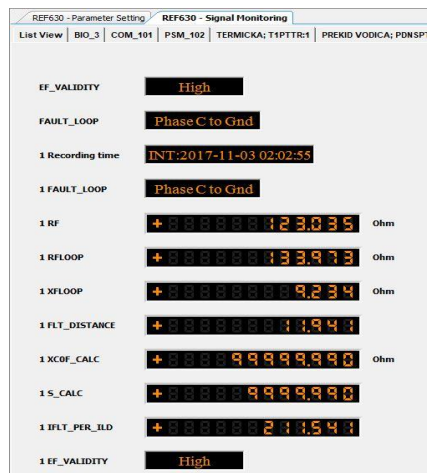
Slika 3. Jednopolna shema distribucijske mreže

## 4.1 Podatci lokacije kvarova

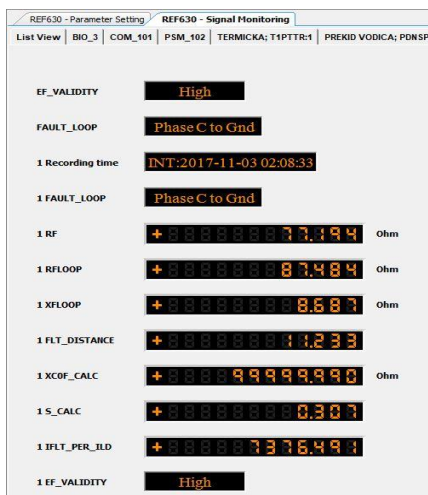
Numerički relej REF 630 izračunao je podatke vezane za lokaciju kvara prikazane na slikama 4 do 8.



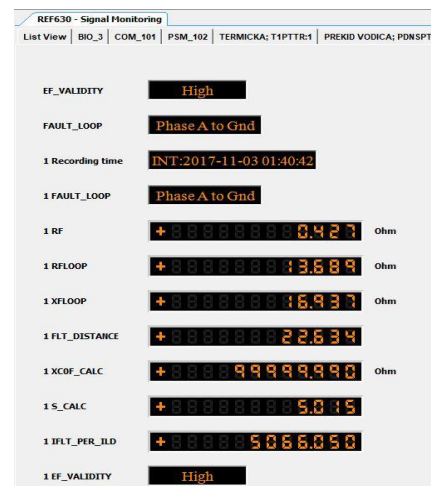
Slika 4. Uklop na kvar iz TS 35/10 kV Prančevići (faza A direktno uzemljena u RS Dicmo)



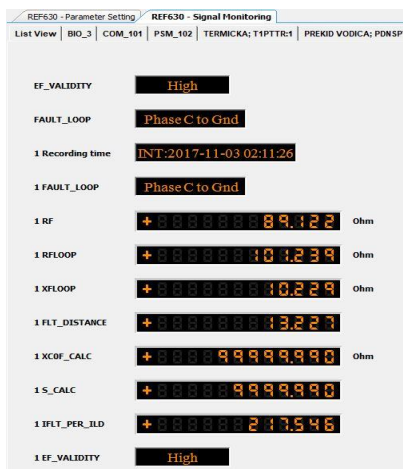
Slika 5. Uklop na kvar iz RS 35 kV Dicmo (faza C uzemljena preko sonde)



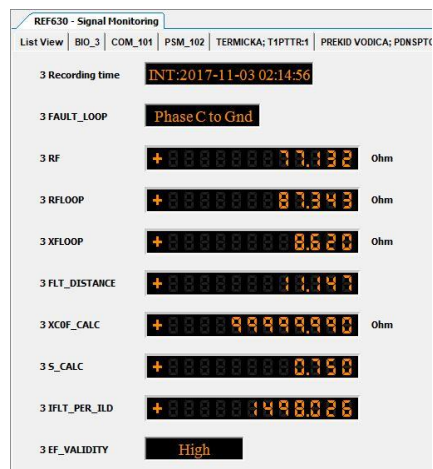
Slika 6. Uklop na kvar iz TS 35/10 kV Prančevići (faza C uzemljena bez sonde, vodič na zemlji)



Slika 8. Uklop na kvar iz TS 35/10 kV Prančevići (faza A direktno u TS 110/35 kV Sinji)



a)



b)

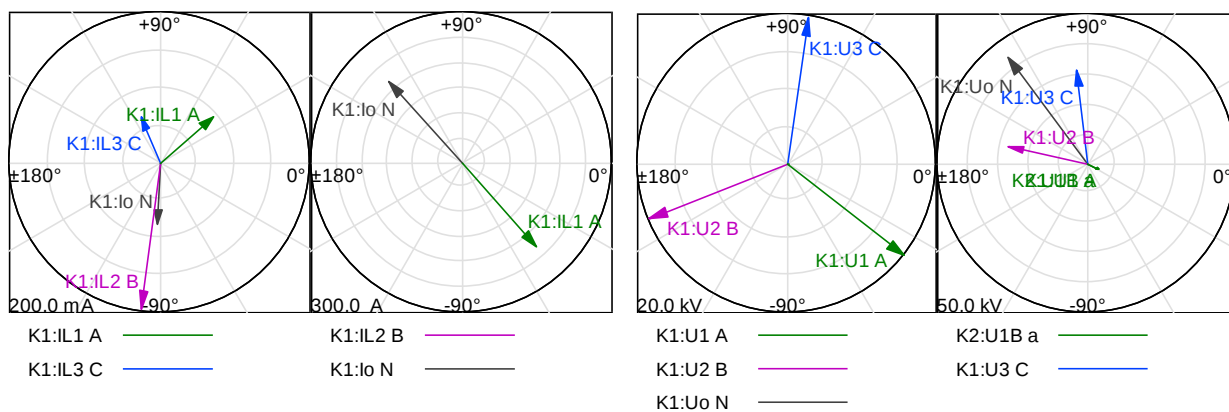
Slika 7. Uklop na kvar iz RS 35 kV Dicmo (a) fault loop 1, b) fault loop 3 (faza C uzemljena bez sonde, vodič na zemlji)

Podatci voda koji se upisuju u parametar listu numeričkog releja, direktna i nulta impedancija dionice voda te ukupna dužina dionice voda dani su u tablici I.

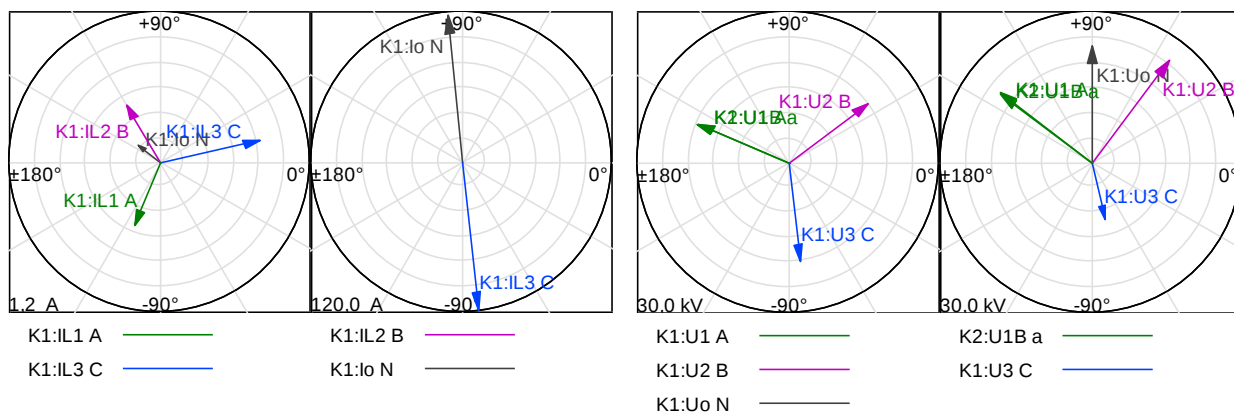
Tablica I. Podatci dionice voda

| Line parameters      |        |        |        |       |          |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|----------|
| Setting Group1       |        |        |        |       |          |
| Num of line sections | 2      | 2      | 0      | 3     |          |
| R1 line section A    | 0.866  | 0.866  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| X1 line section A    | 0.390  | 0.390  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| R0 line section A    | 1.016  | 1.016  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| X0 line section A    | 1.540  | 1.540  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| Line Len section A   | 11.200 | 11.200 | pu     | 0.001 | 1000.000 |
| R1 line section B    | 0.253  | 0.253  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| X1 line section B    | 0.350  | 0.350  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| R0 line section B    | 0.403  | 0.403  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| X0 line section B    | 1.470  | 1.470  | ohm/pu | 0.001 | 1000.000 |
| Line Len section B   | 13.316 | 13.316 | pu     | 0.001 | 1000.000 |

Slijede vektorski prikazi struja i napona na slikama 9. i 10.

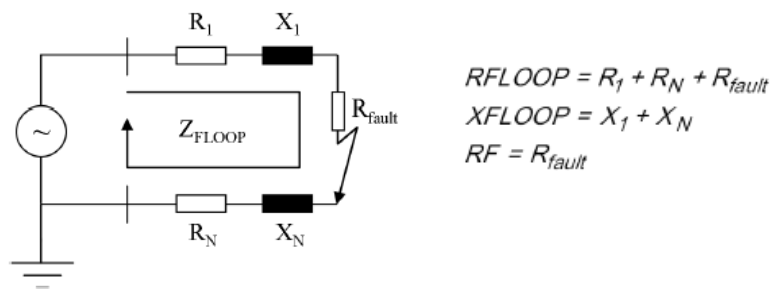


Slika 9. Vektorski prikaz struja i napona prije i poslije (faza A direktno uzemljena u RS Dicmo)

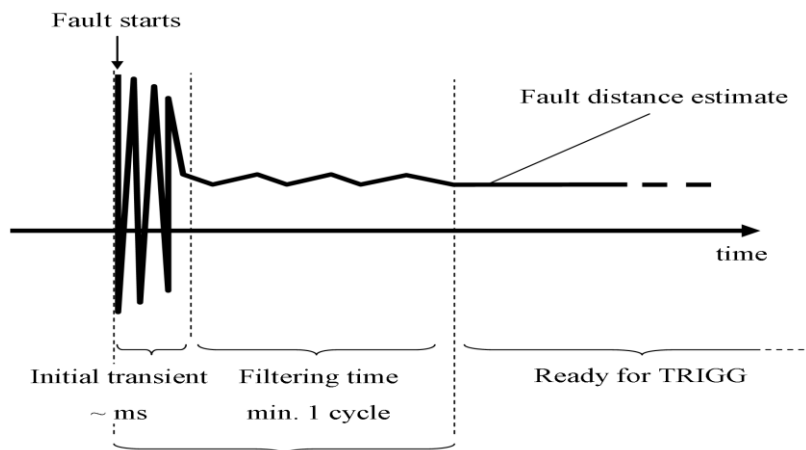


Slika 10. Vektorski prikaz struja i napona prije i poslije jednopolnog spoja (bez sonde vodič na zemlji)

Funkcija SCFRLO za proračun lokacije kvara koristi trofazni sustav struja i napona te ulazne parametre voda (broj dionica, duljina dionice, nulta i direktna impedancija). U prvoj fazi funkcija kasificira nastali kvar, a nakon toga računa njegovu udaljenost od početka voda. Petlje kvara (Fault loops, slika 11.) korištene za jednopolni kratki spoj su 1, 2 ili 3. Svaki broj određuje broj faze koja se koristi u proračunu petlje kvara.



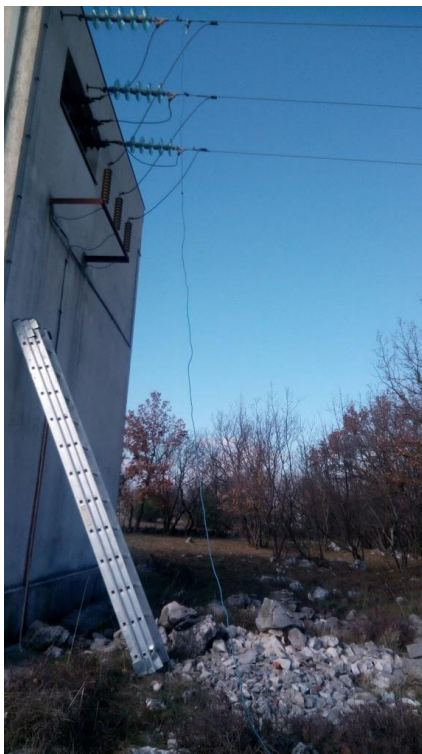
Slika 11. Petlja kvara (fault loops) i otpori petlje kvara



Slika 12. Prikaz razvitka kvara u vremenu

Nakon dva ciklusa od početka nastanka kvara funkcija SCEFRLO je spremna za proračun, i daje bolje rezultate što ima više vremena za procijenu udaljenosti kvara.

Terenske prilike na mjestima izvođenja kvarova prikazuje slika 13.



Slika 13. Slike sa terena (RS Dicmo)

## 5. ZAKLJUČAK

Iz priloženih rezultata eksperimentalnih pokusa jednopolnih kratkih spojeva vidi se da numerički relej REF 630 računa približno točnu lokaciju kvara.

Stvarna udaljenost prve dionice voda (RS Dicmo) na kojoj je nastao kvar iznosi 11,2 km, a izračunate vrijednosti iz releja daju zadovoljavajuće rezultate sa minimalnim relativnim pogreškama do 6 % (cca 600m). U drugom pokusu koji je napravljen u TS 110/35 kV Sinj stvarna udaljenost kvara od početka voda je 24.5 km, a izračunata vrijednost koju daje relej 22.6 km. Iz tih podataka možemo odrediti apsolutnu grešku od 1.9 km, te relativnu pogrešku koja iznosi cca 8 %. Ova mala odstupanja od stvarnog mjesta kvara možemo pripisati promjenjivom prijelaznom otporu, nehomogenosti vodiča, greške strujnih i naponskih transformatora, DC komponenti u struji kratkog spoja. Također kod kvara u TS 110/35 kV Sinj moramo uzeti u obzir paralelni 110 kV dalekovod koji je u trenutku kratkog spoja bio u pogonu te utjecao na pogrešku utvrđivanja udaljenosti mjesta kvara.

Ako malo bolje usporedimo vektorske dijagrame metalnog (faza direktno uzemljena na uzemljivač stanice) i realnog (slobodan pad faze po tlu) jednopolnog kratkog spoja prije i poslije kvara (slike 9 i 10), možemo uočiti da je impedancija kvara uzrokovala drastično prigušenje struje kvara. Samim smanjenjem struje kvara smanjuje se vrijednost nultog napona.

U ovom radu smo opisali funkcionalnost algoritma kojeg koristi funkcija SCEFRLO (lokator kvara) za distributivne mreže koje su uzemljene preko malog otpora, pretežno homogene i nemaju odcjepa na dionici. Podatak o lokaciji kvara koju je izračunao numerički relej se pomoću telekomunikacijskog SCADA sustava šalje u dispečerski centar i koristi se za što učinkovitije i brže otklanjanje kvara.

## 6. LITERATURA

- [1] M.Ivas, Lociranje kvara u razdjelnim mrežama, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2007
- [2] R. Das, Determining the locations of faults in distribution systems, University of Saskatchewan, Saskatoon, Kanada,
- [3] Tehnical Manual REF 630
- [4] "Fault management in electrical distribution systems", Final report of the CIRED Working Group WG03 Fault Management, 1998.