

Mr. sc. Šeila Gruhonjić Ferhatbegović
JP Elektroprivreda BiH, Elektrodistribucija Tuzla
s.gruhonjic@elektroprivreda.ba

Prof. dr. sc. Ante Marušić
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
ante.marusic@fer.hr

LOKACIJA KVARA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

U ovom se radu razmatra automatizirana lokacija kvara u distribucijskoj 10 i 20 kV-noj mreži. Osim pregleda objavljenih metoda lokacije kvara za distribucijske mreže, naveden je matematički model procjene mjesta kvara na osnovu tranzijentnih zapisa struja i napona u postrojenjima TS VN/SN. Estimirana reaktancija do mjesta kvara poredi se s rezultatima proračuna struja kratkog spoja u svim čvorovima razmatranog distribucijskog izlaza. Ovaj pristup ispitan je simulacijama kvara na modelima realnih distribucijskih izlaza pretpostavljajući izoliranu i uzemljenu mrežu. Na estimaciji impedancije tijekom kvara zasniva se rad postojećih komercijalnih modula lokatora kvara u sastavu suvremenih numeričkih zaštita za distribucijske mreže. Namjera je da se analizom ovog pristupa, u određenoj mjeri, istaknu problemi i specifičnosti u procesu lociranja kvara u realnom vremenu u distribucijskom sustavu. Ovdje je, u kratkim crtama, navedena mogućnost primjene teorije neizrazitih (fazi) skupova kao podrška odlučivanju i za modeliranje neodređenosti tijekom procesa lociranja kvara. U tom slučaju treba biti uključen veliki broj podataka kao što je poznavanje kvalitete mreže, vrste terena, iskustvo stručnjaka u distribucijskim firmama te statistika kvarova.

Ključne riječi: distribucijska mreža, lokacija kvara, numerička nadstrujna zaštita

FAULT LOCATION IN DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

In this paper is considered automated fault location in distribution 10 and 20 kV network. Except overview of published fault location methods for distribution network, mathematical model of fault place estimation based on transient recording of currents and voltages in substation HV/MV was referred. Estimated reactance to the fault place is compared with calculation of short circuit currents in all nodes of considered distribution feeder. This approach was examined by fault simulations in modeled real distribution feeders by assuming isolated and low reactance grounded network. Usually the operations of available fault locators belonging to the modern distribution numerical protections have been based on the impedance estimation during a fault. The intention is to distinguish problems and specifics in on line fault location process in distribution system. The possibility of fuzzy set theory application was referred in the aim of support of decision and for uncertainty modeling during fault location process. In that case it is necessary to include large number of data as knowledge of network quality, type of terrain and experience of experts in distribution firms and fault statistics.

Key words: distribution network, fault location, numerical over current protection

1. UVOD

U postojećim uvjetima SN mreža, koja je predmet ovog rada, podrazumijeva 10, 20 i 35 kV-nu naponsku razinu. Dionice 35 kV-ne mreže su kraće i može se smatrati da je ovaj napon u procesu ukidanja. U slučaju prelaska na transformaciju 110/20(10) kV, predmet ovog istraživanja bit će lociranje kvarova na 20 i 10 kV-im izlazima. Na primjer, trase postojećih 10 kV-ih vodova često prolaze nepristupačnim terenom i nadzemna mreža je izložena atmosferskim utjecajima (vjetar, led, snijeg, udari groma). Osim atmosferskih utjecaja, SN vodovi su često izloženi velikom broju kvarova uzrokovanih uvjetima infrastrukture voda kao što su stari drveni stupovi, stari vodiči s mnogo spojeva, grane drveća koje padaju na vodiče te klizanje terena koje pomiče stupove s trase. Kao posljedica svega ovoga događaju se različiti kvarovi koji mogu biti kratki spojevi, pokidani vodiči, zemljospojevi ili njihova kombinacija. Lokacija kvara, koja se razmatra u ovom radu, na osnovu zabilježenih vrijednosti struja i napona prije isključenja izlaza u kvaru, može u velikoj mjeri skratiti vrijeme potrebno za obnovu napajanja. Ovdje analizirana metoda zasniva se na procjeni reaktancije do mjesta kvara. Izračunata reaktancija se uspoređuje s rezultatima proračuna struja kvara u svim čvorovima distribucijskog izlaza. U distribucijskim tvrtkama, za proračun tokova snage i kratkih spojeva, postoji modelirana 10, 20 i 35 kV-na mreža s ucrtanim dionicama i transformatorskim stanicama 10(20)/0,4 kV. Program za proračun tokova snaga koji je bio na raspolaganju pretpostavlja uravnoteženi trofazni sustav, a proračuni su izvršeni na jednopolnoj shemi mreže. U stvarnosti ovo nije uvijek točno, pogotovu kada je u pitanju raspored opterećenja po fazama, tako da ovo može dovesti do manjih ili većih odstupanja u primijenjenim algoritmima. U sastavu suvremenih numeričkih distribucijskih zaštita, ponekad je na raspolaganju i modul lokatora kvara. Postojeći komercijalni lokatori kvara zasnivaju se na proračunu impedancije do mjesta kvara. Ovim modulima se proslijeđuju sekundarne vrijednosti struja sve tri faze i fazni naponi. Međutim, za distribucijski sustav i uz odgovarajući izbor parametara koji se trebaju zadati lokatoru, ovo često ne daje dovoljno točnu lokaciju kvara. Za neke konfiguracije distribucijske mreže pokazivanja lokatora uopće nisu prihvatljiva. Ovdje su najprije ukratko navedene vrste kvarova i značaj automatizirane lokacije kvara. Navedena je osnovna podjela objavljenih metoda lokacije kvara u distribucijskom sustavu. U četvrtom dijelu rada prezentiran je matematički model reaktantne metode lociranja kvara. Za izlaze sa znatnom duljinom mreže i velikim brojem ogranka ovaj pristup nije dovoljan, pa je navedena je primjena teorije neizrazitih skupova za modeliranje netočnosti tijekom standardne procedure lociranja kvara (Fault Location Process – FLP). Ispitivanja i verifikacija navedenog pristupa su izvršena simulacijom kvarova na realnim distribucijskim izlazima. Rezultati ispitivanja prezentirani su u petom dijelu rada.

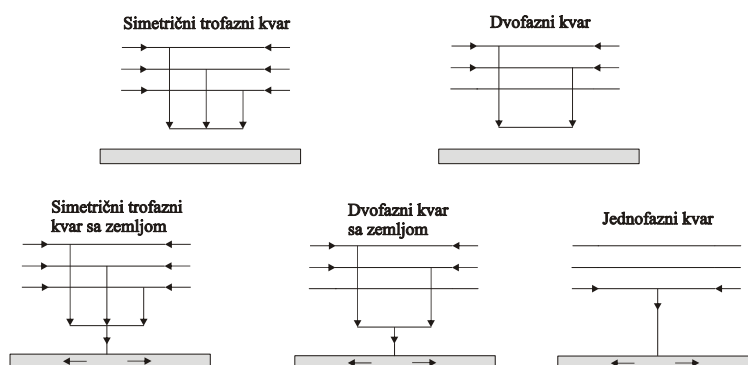
2. ZNAČAJ AUTOMATIZIRANE LOKACIJE KVARA

Statistički podaci pokazuju da je značajan broj prekida u isporuci električne energije uzrokovan kvarovima u SN mreži, osobito u 10 kV-noj mreži. Broj kvarova u NN mreži je znatno manji te je u tom slučaju broj kupaca koji ostaje bez napajanja relativno mali. U ukupnom broju kvarova u distribucijskom sustavu, oko 90 % su kvarovi na 10 kV mreži, a 10 % su kvarovi na transformatorskim stanicama [21]. Uopće, vrijeme restauracije (do ponovnog uspostavljanja napona) sastoji se od vremena potrebnog za pronalaženje mjesta kvara i vremena potrebnog za otklanjanje kvara. Kada se dogodi kvar na distribucijskom 10(20) kV-nom izlazu, pripadajuća zaštita isključuje prekidač u TS VN/SN. U slučaju da ne postoji sustav automatizirane lokacije kvara, poznato je jedino da se kvar nalazi negdje na 10(20) kV-noj mreži izlaza koji je ostao bez napajanja. Slijedi obilazak trase voda u cilju iznalaženja i popravke kvara. Dojave kupaca mogu skratiti vrijeme potrebno za lociranje kvara. Kao i kod prijenosnih vodova, s primjenom neke vrste on-line (automatizirane) lokacije kvara, znatno se skraćuje vrijeme potrebno za obnovu napajanja. Prilikom isključenja prekidača izlaza, u slučaju kvara, može odmah biti poznata dionica u kvaru ili mjesto kvara. Evidentan je i ekonomski efekt, obzirom na manje angažiranje ljudi i vozila na terenu kao i manje količine neisporučene električne energije. Ukoliko izgrađenost mreže to dozvoljava, automatizirani sustavi lociranja kvara, mogu ubrzati uključanje rezervnog napajanja. Ovo se uglavnom odnosi na kabelsku mrežu u urbanim sredinama tako što su, u normalnom pogonu, distribucijski izlazi radijalni, ali potrošači obično imaju mogućnost rezervnog napajanja. Također, svrha on-line lokacije kvara je da se reducira broj nepotrebnih uključenja izlaza u slučaju kvara i na takav način reducira mogućnost proširenja područja kvara kao i mogućnost prerastanja jednofaznih kvarova u međufazne kvarove.

2.1. Kvarovi u distribucijskoj mreži

U elektroenergetskim sustavima, kvar se definira kao nepravilna električna veza između vodiča. Uopće, u distribucijskoj mreži, mogu se pojaviti slijedeće vrste kvarova (slika 1):

- trofazni kvar; kratki spoj tri faze (sa zemljom ili bez),
- dvofazni kvar; kratki spoj dvije faze ili faze i nule (sa zemljom ili bez),
- jednofazni kvar ili zemljospoj; spoj jedne faze s nulom ili zemljom. U uzemljenim mrežama ovo se definira kao jednofazni kvar dok se u izoliranim mrežama ovaj kvar naziva zemljospoj.



Slika 1. Vrste kvarova u distribucijskom sustavu

Kvarovi nemaju istu vjerojatnost događanja za nadzemne vodove i podzemne kabele te nisu iste vrste. Na primjer, statističke studije pokazuju da kvarovi najčešće nisu trajni (približno 90 %), a najveći broj kvarova su jednofazni (približno 75 %) [1, 21]. Na primjer, otežana dijagnoza i lokacija kvara može biti u slučaju dvostrukog jednofaznog kvara. Drugi intermitentni jednofazni kvar može se događati povremeno u istom dijelu energetskog sustava. Kvar nije stalni, ali se događa periodično, na istoj lokaciji, što se može dogoditi kada je nadzemni vod u blizini grane drveća i kontakt može biti uzrokovan vjetrom. Može se pojaviti i ovakav rijedak i složen događaj: dva jednofazna kvara događaju se na dvije različite faze i dvije različite lokacije. Glavni uzroci kvarova su nevrijeme ili pad vodiča na zemlju. Za podzemne kabele kvarovi su uglavnom trajni (gotovo 100 %) i jednofazni ili trofazni, zavisno od vrste kabela. Za jednožilne kabele kvarovi su uglavnom jednofazni, tako što se ekran direktno spaja sa zemljom. Za trožilne kabele kvar često prelazi u trofazni zbog brze termičke degradacije materijala. Čak i ako je u pitanju jednofazni ili dvofazni kvar, otvaranje glavnog prekidača odnosi se na sve tri faze. Ovaj prekidač je instaliran na početku SN izlaza (u pripadajućoj TS 110/x kV ili 35/10 kV).

2.2. Osobnosti lokacije kvara u distribucijskoj mreži

U odnosu na prijenosne mreže, lociranje kvarova u distribucijskom sustavu ima neke osobnosti koje, prilikom formiranja algoritama i analize rezultata, treba uzeti u obzir:

- **Raznolikost vodiča i konstrukcija**: Duž tipičnog distribucijskog izlaza postoje različiti vodiči i konfiguracije; stoga ne može postojati linearna veza između impedancije voda i udaljenosti između mjesta kvara i transformatorske stanice VN/SN.
- **Bočni ogranci**: Za razliku od prijenosnih vodova, tipični distribucijski izlazi obično imaju više bočnih ograna. Pregledom realnih distribucijskih mreža može se zaključiti da je ovo više karakteristično za izlaze s nadzemnom mrežom. Tako kvarovi, na različitim geografskim lokacijama, mogu proizvesti iste struje i napone, mjereno od transformatorske stanice. Prema tome, procedura lociranja kvara može rezultirati različitim točkama kao mogućim lokacijama kvara.
- **Distribuirana opterećenja duž izlaza**: Struja mjerena u transformatorskoj stanici, tijekom kvara, uključuje doprinos dobiven od sume struja opterećenja u svakom čvoru i, za razliku od prijenosnih sustava, nemoguće je precizno procijeniti ove struje.
- **Promjena konfiguracije izlaza**: Distribucijske mreže su predmet stalne promjene topologije. Kao rezultat toga, bilo koji algoritam lokacije kvara mora imati pristup bazi podataka, koja se periodički ažurira, da bi se dobila dovoljno precizna estimacija točke kvara.

2.3. Otpor kvara

Kvarovi sa zemljom su rijetko trajni i uključuju promjenljivu vrijednost impedancije. U najvećem broju studija o relejnoj zaštiti pretpostavlja se da veza faznog vodiča sa zemljom uključuje veoma malu i uopće zanemarljivu vrijednost impedancije. Za više napone prijenosa ovo je dovoljno točno. Međutim, u distribucijskim sustavima, može postojati veoma velika impedancija kvara. Mnogi kvarovi na nadzemnoj

mreži su posljedica kontakta s drvećem koji mogu biti visoke impedancije, posebno u zimsko vrijeme kada je zemlja smrznuta. Za procjenu impedancije kvara potrebno je izvršiti veliki broj ispitivanja tijekom godine na vlažnom tlu, suhom tlu, kamenu, asfaltu ili betonu. Praktično je pretpostaviti da je dozemna impedancija nula za maksimalne vrijednosti struje kvara. Nadalje, uobičajena je pretpostavka da je impedancija kvara djelatnog karaktera. Ovdje se Također, u cilju preciznijeg određivanja mjesta kvara, polazi od pretpostavke da je prelazni otpor na mjestu kvara pretežno aktivnog karaktera i radi se procjena reaktancije od napojne transformatorske stanice do mjesta kvara. Ukoliko se radi procjena impedancije do mjesta kvara, tada se za prelazni otpor na mjestu kvara može uzeti empirijska formula [1]:

$$R = 8750 \cdot l / (0.305 \cdot I^{1/4}) \quad (1)$$

Ovdje je:

R izraženo u $[\Omega]$,

l je dužina luka u $[m]$ bez utjecaja vjetra,

I je struja kvara u $[A]$

3. METODE LOKACIJE KVARA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU

Pregledom literature koja se odnosi na postupak on-line lokacije kvara vidi se da je veliki broj algoritama razvijen za prijenosni sustav [20] i nije pogodan za radijalne distribucijske mreže s karakteristikama istaknutim u prethodnom poglavlju. Tako na primjer, metode koje su navedene za distribucijski sustav, trebaju sugerirati način eliminacije višeznačnih lokacija kvara, razmotriti odgovarajuću aproksimaciju opterećenja te prema potrebi uzeti u obzir greške u slučaju nesimetričnog distribucijskog sustava.

U osnovi, postoje dva pristupa lociranju kvarova u distribucijskoj mreži. Jedan se zasniva na detektorima kvara instaliranim duž izlaza [2, 3] i u tom slučaju uglavnom je potrebno odrediti optimalan raspored detektora kvara za određene konfiguracije distribucijskih izlaza. Drugi pristup zasniva se na algoritmima koji koriste mjerenja struja i napona osiguranim od numeričkih zaštita (Intelligent Electronic Devices – IEDs) lociranim samo u napojnoj transformatorskoj stanici (TS 110/x kV ili 35/10 kV) [4 - 16].

Najviše postojećih algoritama, pripadaju slijedećim grupama:

- Algoritmi zasnovani na fazorima [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13],
- Algoritmi zasnovani na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama i putujućim valovima [14, 15, 16].

Algoritmi zasnovani na fazorima koriste samo signale osnovnog harmonika. Model voda je obično model s koncentriranim parametrima. Ova skupina algoritama može se podijeliti na iterativne metode s trofaznim izračunavanjem tokova snaga [6, 7, 8] i metode koje procjenjuju impedanciju od TS VN/SN do mjesta kvara [4, 5, 9, 10]. Obzirom na konfiguraciju i osobnosti distribucijske mreže, svaka od metoda predlaže neki postupak tzv. dijagnoze kvara čija je svrha određivanje jednoznačne lokacije kvara. Tako u postupku eliminacije višeznačnih lociranja kvara mogu pomoći programski bazirani indikatori kvara locirani na početku svakog ogranka [5] ili dodatne informacije povezane s koordinacijom zaštita i sustavom opterećenja [6, 7, 8]. Postupak naveden u [12] primjenjuje metode tzv. neizrazite logike odlučivanja za određivanje najvjerojatnije lokacije kvara. Međutim, promatrajući realne distribucijske mreže može se konstatirati da postoje takve konfiguracije mreže u kojima indikatori nisu uvijek dovoljni, da koordinacija zaštita nije dobro izvršena ili da nisu ugrađeni zaštitni uređaji na svim pretpostavljenim točkama duž distribucijskog 10 kV-nog ili 20 kV-nog izlaza. Opterećenja se u distribucijskom sustavu često promatraju kao naponski ovisna [5, 6, 7, 8] i, u nekim slučajevima, zbog neodređenosti karakteristike opterećenja [18], iterativno se izračunavaju naponi i struje u svakom čvoru izlaza u kvaru.

Algoritmi zasnovani na parcijalnim diferencijalnim jednadžbama koriste tranzijentne komponente signala. Model voda je obično zasnovan na distribuiranim parametrima. Osim rješenja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, analizira se i pristup zasnovan na putujućim valovima. Reaktantna metoda lokacije kvara, prezentirana ovdje, najviše odgovara metodi na kojoj se zasniva rad modula lokatora kvara u sastavu numeričke distribucijske zaštite [4]. Koriste se simetrične komponente fazora struje i napona estimirane iz memoriranih vrijednosti signala struje i napona. Metoda se može primijeniti samo na uravnoteženu mrežu. U ovoj fazi nije uzeta u obzir dinamika opterećenja. Za dijagnozu kvara, koja treba odrediti najvjerojatnije mjesto kvara, odabrana je teorija neizrazitih skupova. Budući da se, u postojećim uvjetima, za realnu razmatranu distribucijsku mrežu, ne može osloniti na koordinaciju zaštita cijelom dužinom 10 kV-nog voda, početna namjera je bila iskoristiti raspoloživu bazu podataka koja se odnosi na kvalitetu mreže, vrstu terena i statistiku zastoja pogona [21].

4. REAKTANTNA METODA LOKACIJE KVARA

Metoda analizirana u ovom radu zasniva se na procjeni reaktancije od napojne transformatorske stanice do mjesta kvara, na osnovu zabilježenih vrijednosti struja i napona tijekom kvara. Neophodni uvjet za identificiranje sekcija u kvaru (ili mjesta kvara), na ovaj način, je postojanje modelirane distribucijske mreže zasnovane na stvarnoj topografiji razmatranog područja.

4.1. Estimacija reaktancije tijekom kvara

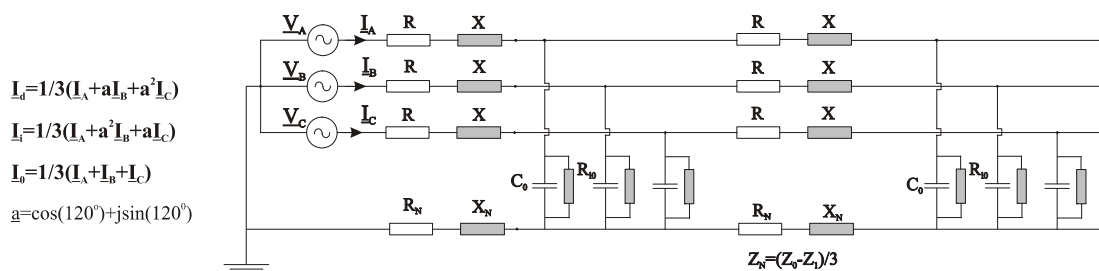
Procjena reaktancije do mjesta kvara, na osnovu fazorskih vrijednosti struja i napona, određuje se kao imaginarni dio od vrijednosti fazora impedancije \underline{Z} :

$$\underline{Z} = \frac{\underline{V}}{\underline{I}} = R + jX \quad (2)$$

Ovdje su s \underline{V} i \underline{I} označeni naponi i struje tijekom kvara, tj. od trenutka nastanka kvara do trenutka isključenja prekidača izlaza u kvaru, djelovanjem odgovarajuće zaštite. Sa R i X označene su vrijednosti aktivne otpornosti i reaktancije do mjesta kvara (slika 2). Vrijednosti fazora napona i struje ovise o vrsti kvara. Za slučaj simetričnog trofaznog kvara, impedancija do mjesta kvara, korištenjem vrijednosti simetričnih komponentata, je:

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{V}_d}{\underline{I}_d} = \frac{(\text{Re}\underline{V}_d \text{Re}\underline{I}_d + \text{Im}\underline{V}_d \text{Im}\underline{I}_d)}{(\text{Re}\underline{I}_d)^2 + (\text{Im}\underline{I}_d)^2} + \frac{j(\text{Im}\underline{V}_d \text{Re}\underline{I}_d - \text{Re}\underline{V}_d \text{Im}\underline{I}_d)}{(\text{Re}\underline{I}_d)^2 + (\text{Im}\underline{I}_d)^2} \quad (3)$$

Imaginarni dio izraza (3) predstavlja vrijednost reaktancije do mjesta kvara. Analogno se izračunavaju impedancije do mjesta kvara za slučaj dvofaznog kvara i jednofaznog kvara u uzemljenoj mreži. Lokatoru kvara dovode se vrijednosti struja i napona sve tri faze i na osnovu ovih vrijednosti određuju se simetrične komponente struja i napona pozitivnog, negativnog i nultog redoslijeda (direktna, inverzna i nulta komponenta) [1].



Slika 2. Ekvivalentni dijagram štice izlaza

Simetrične komponente struje su računate uzimajući u obzir i prosječno opterećenje prije kvara I_d' (I_i' , $I_0'=0$).

Reaktancija do mjesta kvara, u slučaju trofaznih i trofaznih kvarova sa zemljom, može se procijeniti kao:

$$X_3 = \frac{\text{Re}\underline{I}_d \cdot \text{Im}\underline{V}_d - \text{Im}\underline{I}_d \cdot \text{Re}\underline{V}_d}{\text{Re}\underline{I}_d^2 + \text{Im}\underline{I}_d^2} \quad (4)$$

Za dvofazni i dvofazni kvar sa zemljom, reaktancija se procjenjuje preko jednadžbe:

$$X_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{Re}\underline{I}_d \cdot A - \text{Im}\underline{I}_d \cdot B}{\text{Re}\underline{I}_d^2 + \text{Im}\underline{I}_d^2} \quad (5)$$

$$A = \text{Im}\underline{V}_d - \text{Im}\underline{V}_i, \quad B = \text{Re}\underline{V}_d - \text{Re}\underline{V}_i \quad (6)$$

Za jednofazne kvarove (u slučaju uzemljene mreže) reaktancija do mjesta kvara je:

$$X_1 = \frac{1}{c} \cdot \frac{\operatorname{Re} \Delta \underline{I}_d \cdot D - \operatorname{Im} \Delta \underline{I}_d \cdot C}{\operatorname{Re} \Delta \underline{I}_d^2 + \operatorname{Im} \Delta \underline{I}_d^2} \quad (7)$$

$$C = \operatorname{Re} \underline{V}_d + \operatorname{Re} \underline{V}_i + \operatorname{Re} \underline{V}_0, \quad D = \operatorname{Im} \underline{V}_d + \operatorname{Im} \underline{V}_i + \operatorname{Im} \underline{V}_0 \quad (8)$$

$$c = 2 + Z_0 / Z_d \quad (9)$$

$$\Delta \underline{I}_d = \underline{I}_d - \underline{I}_d' \quad (10)$$

Vrijednosti navedene u jednadžbama i na slici 2 su označene kao:

V_d, V_i, V_0 – fazori napona pozitivnog, negativnog i nultog redoslijeda

$V_A, V_B, V_C, I_A, I_B, I_C$ – fazori napona i struja u fazama A, B i C

I_d, I_i – fazori struja pozitivnog i negativnog redoslijeda

I_d' – struja pozitivnog redoslijeda prije kvara

Z_0 – impedancija kabela nultog redoslijeda

Z_d – impedancija kabela pozitivnog redoslijeda

Sa „Re“ i „Im“ označeni su realni i imaginarni dijelovi navedenih fazorskih veličina.

4.2. Klasifikacija kvara

Estimacija reaktancije do mjesta kvara zavisi o vrsti kvara. Poslije preuzimanja trenutnih vrijednosti struja i napona, najprije je potrebno izvršiti klasifikaciju kvara. Ovdje je klasifikacija kvara izvršena analiziranjem vrijednosti simetričnih komponenta prije i tijekom kvara [1]. Vrijednosti simetričnih komponenta mogu biti dobivene obradom podataka preuzetih iz zaštitnih uređaja.

Kada postoje modelirani distribucijski izlazi, i poslije određivanja reaktancije do mjesta kvara, potrebno je napraviti usporedbu estimiranih vrijednosti s rezultatima izračunavanja kvara u svim čvorovima razmatranog izlaza ($X, R/X, I_k$). Procijenjena reaktancija do mjesta kvara identificira sve moguće lokacije kvara i može biti smatrana kao prvi korak u FLP-u. Također, u slučaju lociranja kvara u razgranatoj i složenoj distribucijskoj mreži, izračunavanje udaljenosti od napojne transformatorske stanice do mjesta kvara ne može biti zadovoljavajuće rješenje. Stvarna distribucijska mreža je skoro uvijek sastavljena od brojnih dionica s različitim parametrima. Stoga mjesto kvara može biti određeno sukladno nazivima na modelu mreže ili udaljenošću od određenih mjesta ili objekata u blizini područja s kvarom. Također, kod mreža s izoliranom nultom točkom, metoda procjene reaktancije do mjesta kvara ne može se koristiti za jednofazne kvarove (zemljospojeve).

4.3. Primjena neizrazite logike odlučivanja u procesu lociranja kvara

Kada se kompletira postupak lociranja kvara, kao što je prethodno opisano, operator u centru vođenja imat će informacije o svim mogućim mjestima kvara kao i o proradama indikatora prolaska struje kvara. Ostali utjecajni faktori u FLP-u su vremenski uvjeti, starost i kvaliteta mreže te prolazak trase kroz nepristupačan teren. Poseban faktor u donošenju odluke mogu biti pretpostavke operatora zasnovane na njegovim iskustvima u radu s određenim mrežama i znanjem o različitim vrstama kvara i lokacijama u promjenljivim vremenskim uvjetima. Osim toga, dosta korisnih informacija može biti osigurano razgovorom sa stručnjacima u distribucijskim firmama kao i pregledom zapisa prekida pogona u dužem vremenskom periodu. Za modeliranje neodređenosti tijekom FLP-a, uz uvažavanje prethodno navedenih činjenica, moguće je upotrijebiti teoriju neizrazitih skupova [12, 17]. Razmotreni podaci se predstavljaju preko funkcija pripadnosti. Za svaku funkciju pripadnosti, na x osi su smještene razmatrane dionice izlaza u kvaru. Vrijednosti funkcija pripadnosti su uvijek u intervalu [0, 1]. U nastavku su navedene osnovne postavke teorije neizrazitih skupova korištene tijekom FLP-a [19].

Ako je X skup podataka označenih s x , tada se neizraziti skup A u X opisuje slijedećom funkcijom pripadnosti:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (11)$$

μ_A je stupanj pripadnosti za element x u neizrazitom skupu A . Prema tome, neizraziti skup A može biti predstavljen kao skup uređenih parova:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (12)$$

U postupku lociranja kvara, skup X je sastavljen od dionica koje pripadaju izlazu u kvaru (ili dionica koje pripadaju rastavljajućoj zoni s kvarom). α – presjek neizrazitog skupa A je skup svih elemenata od X takvih da, u originalnom neizrazitom skupu, imaju vrijednosti stupnja pripadnosti veće ili jednako od α .

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (13)$$

Kardinalnost i relativna kardinalnost neizrazitog skupa definiraju se slijedećim izrazima:

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x), \quad \|A\| = \frac{|A|}{|X|} \quad (14)$$

Relativna kardinalnost može se koristiti kao indikator koliko informacija sadrži neizraziti skup A . Operacije s neizrazitim skupovima su definirane preko njihovih funkcija pripadnosti. Kao primjer, unija i presjek neizrazitih skupova A i B definiraju se pomoću slijedećih operatora: unija (\vee označava max operator), i presjek (\wedge označava min operator).

$$\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (15)$$

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (16)$$

U prethodnim formulama, μ_A predstavlja stupanj pripadnosti za element u neizrazitom skupu A i μ_B predstavlja stupanj pripadnosti za odgovarajući element u neizrazitom skupu B . Osim navedenih, postoje mnogi drugi operatori unije i presjeka u teoriji neizrazitih skupova koji pokazuju kako bi stupnjevi pripadnosti, za odgovarajuće elemente u neizrazitim skupovima A i B , mogli biti kombinirani. Zbog pretpostavke korištenja tijekom FLP-a, ovdje je definiran operator Hamacher unije:

$$\mu_{A \cup B} = \frac{\mu_A(x) + \mu_B(x) - (2 - \gamma) \cdot \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)}{1 - (1 - \gamma) \cdot \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)}, \quad \gamma \in (0, \infty) \quad (17)$$

5. ISPITIVANJE SUSTAVA SIMULACIJAMA NA RAČUNALU

U cilju verifikacije ovog pristupa lokaciji kvara u distribucijskom sustavu, izvršena su ispitivanja na realnim distribucijskim 10 kV-nim izlazima. Razmatrana distribucijska mreža se može, obzirom na postupak lociranja kvara, podijeliti na izlaze s kabelskom mrežom te duge i opterećene izlaze s uglavnom nadzemnom mrežom. Izlazi s kabelskom mrežom napajaju urbana područja, imaju manji broj ogranaka i ovdje je vjerojatan skori prelazak na uzemljenu mrežu preko malog otpora. Drugi tip izlaza, koji se navodi, napaja dijelom ruralna područja, ima veliku dužinu nadzemne 10 kV mreže i veliki broj ogranaka. Dio mreže može prolaziti i nepristupačnim područjima. Obzirom na raspored naseljenosti, karakteristično je da ovi izlazi imaju i znatna opterećenja. Ispitivanja su pokazala da primjena reaktantne metode, na ovim izlazima, nije dovoljna. Broj višeznačnih lociranja kvara može biti znatan i ovdje je standardna procedura lociranja kvara proširena s teorijom neizrazitih skupova kako bi se obuhvatili ostali relevantni faktori u FLP-u.

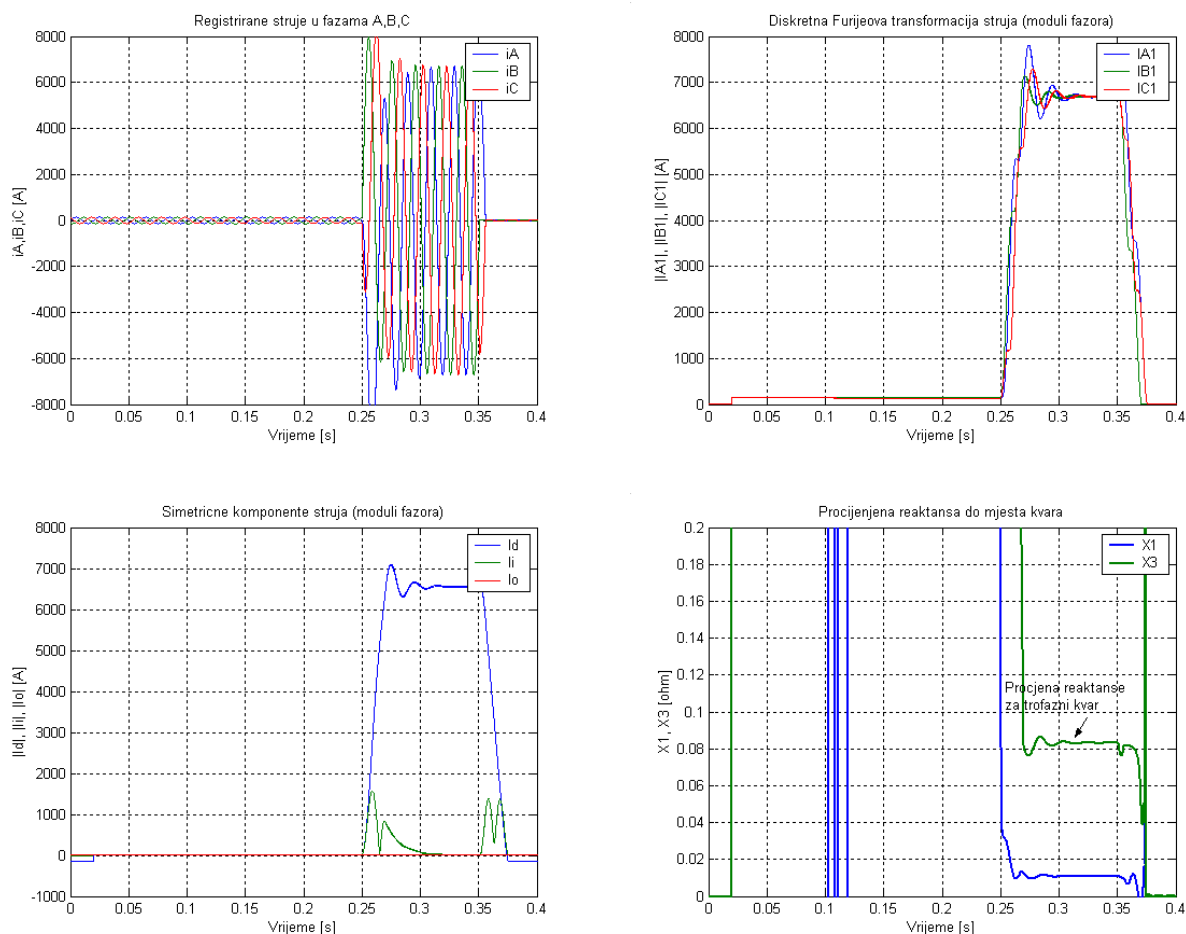
5.1. Distribucijski izlazi s pretežno podzemnom mrežom

Ovdje je navedeno ispitivanje za 10 kV-ni izlaz napajan iz TS 110/35/10 kV. Realni distribucijski izlaz s podzemnom mrežom modeliran je u programu Matlab/PSB. Modeli distribucijskih izlaza uključuju sve sekcije i prosječna (prema pretpostavci simetrična) opterećenja na 0,4 kV strani. Obrada podataka uključuje filtriranje struja i napona kako bi se formirali fazori osnovnog harmonika i procijenile vrijednosti simetričnih komponenata. Ovdje je korištena diskretna Furijeova transformacija za estimaciju fazora osnovnog harmonika [1]. Navedeni su rezultati simulacija kvara na distribucijskom izlazu označenom s „KO 10 kV A“. U normalnim radnim uvjetima, izlaz „KO 10 kV A“ napaja deset transformatorskih stanica 10/0,4 kV i ima kompletno podzemnu mrežu sastavljenu od trofaznih PVC izoliranih kabela. Ukupna dužina 10 kV-ne mreže napajane preko ovog izlaza je $l=4,889$ km. Prosječno opterećenje je 100,6 A.

Jednofazni kvar je simuliran na udaljenosti 700 m od TS 110/x kV. Prije prorade usmjerene zemljospojne zaštite ovaj kvar prerasta u trofazni kvar. Trofazni kvar na ovoj lokaciji isključuje se drugim stupnjem nadstrujne zaštite I>>. Modelirano radno vrijeme I>> stupnja nadstrujne zaštite bilo je 100 ms.

5.1.1. Jednofazni kvar koji prerasta u trofazni u izoliranoj mreži

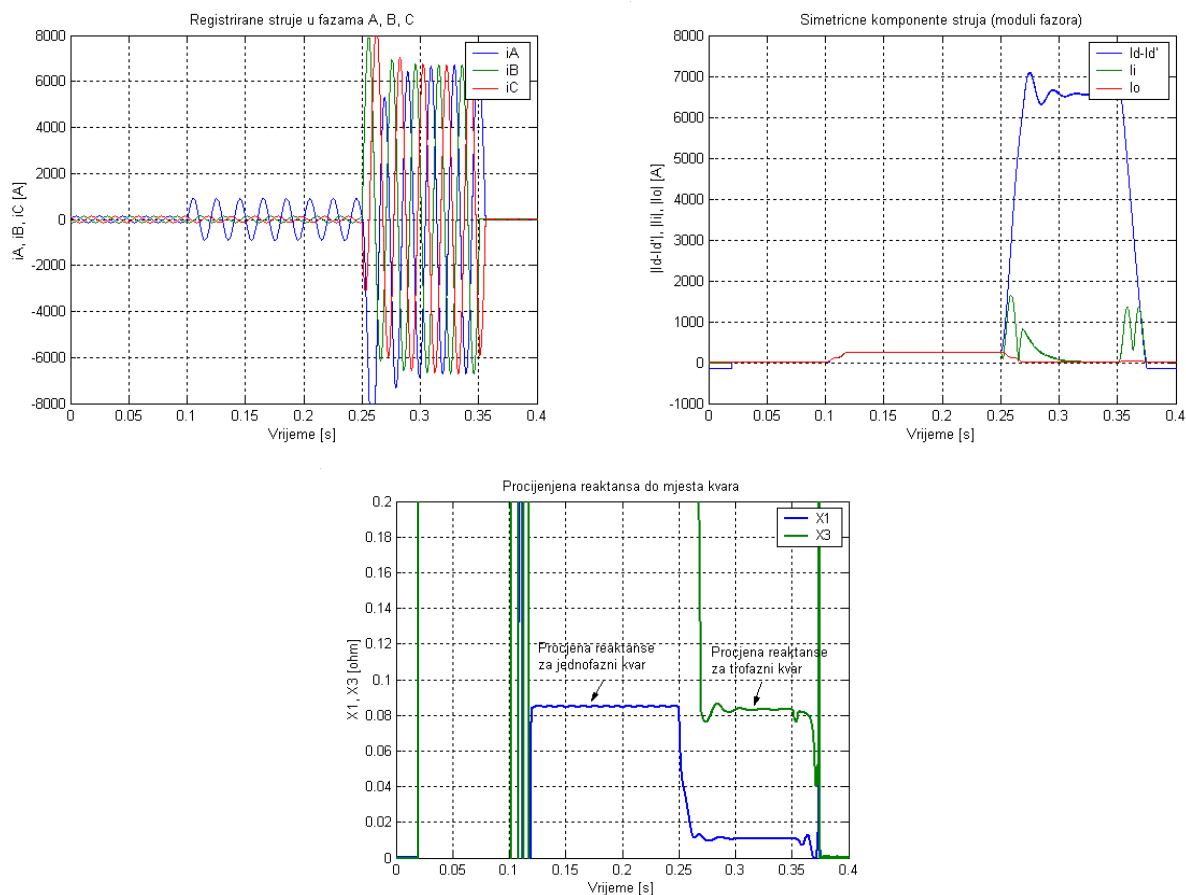
Dijagram struja na mjestu ugradnje I> zaštite, dobiven simulacijom navedenih kvarova, i struje poslije filtriranja i estimacije simetričnih komponenti navedeni su na slici 3. U slučaju jednofaznog kvara u izoliranoj mreži, nije moguće napraviti lokaciju kvara na ovaj način. Kada jednofazni kvar preraste u trofazni, moguće je procijeniti reaktanciju do mjesta kvara $X_3=0,0837 \Omega$ (slika 3). Usporedbom ovih rezultata s izračunatim strujama kvara u PowerCAD-u može se zaključiti da se kvar nalazi na prvoj dionici. Ovdje je simulirano pet ciklusa prije kvara ($f=50$ Hz). Nastanak jednofaznog kvara bio je u trenutku $t=0,1$ s. Početak trofaznog kvara je u trenutku $t=0,25$ s. I>> stupanj nadstrujne zaštite djeluje na isključenje prekidača izlaza u trenutku $t=0,35$ s.



Slika 3: Dijagrami struja na mjestu nadstrujne zaštite izlaza, dijagrami struja osnovnog harmonika i simetrične komponente struja. Procijenjena reaktancija od TS 110/x kV do mjesta kvara

5.1.2. Jednofazni kvar koji prerasta u trofazni u uzemljenoj mreži

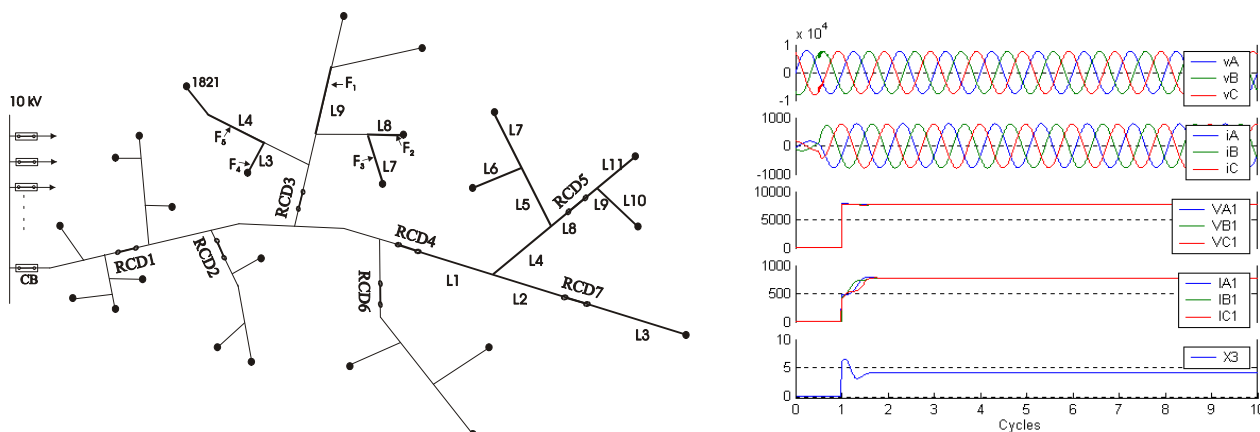
Ovdje se pretpostavlja prelazak na uzemljenu mrežu s otporom $R_{uz}=10 \Omega$. Na taj način su struje kvara ograničene na vrijednosti oko 700 A. Za uzemljenu mrežu moguća je lokacija kvara i za jednofazni kvar. Bez uzimanja u obzir struja opterećenja, estimacija reaktancije do mjesta kvara, ovim pristupom, i posebno u slučaju jednofaznog kvara, mogla bi imati značajna odstupanja. Stoga u jednadžbi (7) potrebno je uzeti ΔI_d vrijednosti. Rezultati simulacije navedenih kvarova prikazani su na dijagramu – slika 4 (samo struje). Ovdje je Također trenutak nastanka kvara $t=0,1$ s i $t=0,25$ s za jednofazni, odnosno trofazni kvar. Isključenje prekidača je simulirano u trenutku $t=0,35$ s. Procijenjena reaktancija u slučaju jednofaznog kvara je $X_1=0,0848 \Omega$ (slika 4). Ove vrijednosti pokazuju da se kvar pojavio na prvoj dionici od napojne transformatorske stanice.



Slika 4. Dijagrami struja sve tri faze na mjestu I> zaštite i simetrične komponente struja. Procijenjena vrijednost reaktancije do mjesta kvara

5.2. Distribucijski izlazi s pretežno nadzemnom mrežom

Na slici 5 predstavljena je jednopolna shema realnog 10 kV izlaza s rasporedom odgovarajućih rastavljača (Remote Control Disconnectors - RCDs). Ovdje se podrazumijevaju rastavljači s daljinskim vođenjem i indikacijom prolaska struje kvara. Ukupna dužina 10 kV mreže ovog izlaza je $l=42,627$ [km] i prosječno aktivno opterećenje je $I=156$ A. U slučaju da se promatra trofazni kvar, indikatori kvara RCD1, RCD2 i RCD3 će djelovati. Kvar je simuliran iza rastavljača RCD3. Poslije obrade podataka na mjestu ugradnje I> zaštite (TS VN/SN) dobiva se, primjenom jednadžbe (4), reaktancija do mjesta kvara $X_{kvara}=4,2 \Omega$, (slika 5).



Slika 5. Jednopolna shema izlaza „DV 10 kV B“. Procjena reaktancije do mjesta kvara

Na ovaj način se određuju mjesta F_1, F_2, F_3, F_4 i F_5 kao moguća mjesta kvara (slika 5). Ovo uključuje dionice koje pripadaju zoni rastavljača RCD3. Sukladno ovim informacijama formira se početni neizraziti skup A_1 .

$$A_1 = \left\{ (L1/0,1), (L2/0,1), (L3/0,9), (L4/0,9), (L5/0,1), (L6/0,1), \right. \\ \left. (L7/0,9), (L8/0,9), (L9/0,9), (L10/0,1), (L11/0,1) \right\}$$

Zatvaranjem svih rastavljača izuzev rastavljača RCD3, napajanje električnom energijom bit će nastavljeno. Korištenjem informacija sadržanih u neizrazitim skupovima kvaliteta mreže i uvjeti na terenu [21] i organizacijom prema jednadžbi (17) formira se konačni skup A_{FL} :

$$A_{FL} = \left\{ (L1/0,433), (L2/0,64), (L3/0,951), (L4/0,985), \right. \\ \left. (L5/0,64), (L6/0,568), (L7/0,936), (L8/0,937), \right. \\ \left. (L9/0,937), (L10/0,568), (L11/0,352) \right\}$$

Zasnovano na izboru maksimalne vrijednosti, dionica L_4 je najvjerojatnije mjesto kvara (ili dionica voda koja sadrži mjesto kvara F_5 , slika 5). Procijenjena udaljenost mjesta kvara od najbliže TS 10/0,4 kV "1821", slika 5) je 540 m.

6. ZAKLJUČAK

Primjenom automatizirane lokacije kvara u distribucijskoj mreži moguće je reducirati trajanje beznaponske pauze za značajan broj kupaca i ubrzati uključenje rezervnog napajanja. U svrhu on-line lokacije kvara mogu se koristiti trenutne vrijednosti zabilježene numeričkim zaštitama u napojnim transformatorskim stanicama. Za navedeni postupak lociranja kvara potrebno je u razmatranje uzeti struje prije nastanka kvara i omogućiti razmjenu podataka između zaštitnog sustava, SCADA sustava i programa za proračun struja kratkog spoja. Redovan nadzor i vođenje zapisa prekida može biti korisno prilikom ispravnog formiranja funkcija pripadnosti. Osim toga, potrebno je ažurirati podatke koji sačinjavaju funkcije pripadnosti u slučaju izgradnje mreže, zamjene vodiča te poslije završetka radova na održavanju. Pregledom objavljenih postupaka lokacije kvara i usporedbom s konfiguracijom i karakteristikama opterećenja realnih distribucijskih izlaza i vrstom kvarova može se vidjeti da postoji potreba za istraživanjem na ovom području. Najavljeni procesi deregulacije i tržište električne energije svakako će zahtijevati dobre pokazatelje pouzdanosti i što manje količine neisporučene električne energije. Primarni utjecaj na ovo ima automatizirana lokacija kvara u distribucijskoj mreži, čiji je cilj da što manji broj kupaca i u što kraćem vremenu ostaje bez napajanja.

LITERATURA

- [1] Y. G. Paithankar, „Transmission Network Protection“, Theory and Practice, M.D. New York, 1997.
- [2] J. Nahman, J. Spiric, „Optimal Fault Location in Overhead Radial Distribution Networks Equipped with Switching and Fault Detectors“, JUKO CIRED, Zlatibor, 2006.
- [3] E. Bjerkan, T. Venseth, „Locating Earth-Faults in Compensated Distribution Networks by means of Fault Indicators“, IPST '05 Montreal, Canada, June 2005.
- [4] FLOC Fault Locator, ABB Distribution Automation, Users guide, 2008.
- [5] R. Das, M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, „A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines“, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, Washington, USA, July 2000.
- [6] J. Zhu, D. L. Lubkeman, A. Girgis, „Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders“, IEEE Trans.on Power Delivery, April 1997., 801-809
- [7] Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi et.al, „An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems“, IEEE Trans. on Power Delivery, April 2004., 524-532
- [8] E. C. Senger et.al., „Automated Fault Location System for Primary Distribution Networks“, IEEE Transaction on Power Delivery, April 2005., 1332-1340
- [9] Myeon-Song Choi et.al, „A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution System“, IEEE Transaction on Power Delivery, January 2004., 35-41

- [10] M. M. Saha, E. Rosolowski, J. Izykowski, „ATP-EMTP Investigation for Fault Location in Medium Voltage Networks“, IPST'05 Montreal, Canada, June 2005.
- [11] L. S. Martins, et.al., „A New Accurate Fault Location Method Using $\alpha\beta$ Space Vector Algorithm“, 14th PSCC, Sevilla, June 2002
- [12] P. Jarventausta, et.al, „Using Fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution network“, IEEE Trans. On Power Delivery, April 1994., 954-960
- [13] L. S. Martins et.al, „The Application of Neural Networks and Clarke-Concordia Transformation in Fault Location on Distribution Power Systems“, IEEE 2002.
- [14] M. El-Hami, et.al, „A new travelling-wave based scheme for fault detection on overhead power distribution feeders“, IEEE Trans.on Power Delivery, October 1992., 1825-1833
- [15] David W.P. Thomas, Ricardo J.O. Carvalho, Elisete T. Pereira, „Fault Location in Distribution Systems Based on Travelling Waves“, IEEE PowerTech Conference, Bologna, June 2003.
- [16] C. Y. Evrenosoglu, A. Abur, „Fault Location in Distribution Systems with Distributed Generation“, 15th PSCC, Liege, August 2005.
- [17] J. Li, et.al, „Selecting a Fuzzy Aggregation Operator for the Multi-Criteria Fault Location Problem“, IEEE Transaction on Power Delivery, October 2004., 1476-1482
- [18] J. A. Jardini et.al, „Daily Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers“, IEEE Trans on Power Delivery, January 2000., 375-380
- [19] P. Subašić, „Fazi logika i neuronske mreže“, TK Beograd, 1997.
- [20] Š. Gruhonjić, „Algoritmi lokatora kvara na prenosnim vodovima“, magistarski rad, Tuzla, 2001.
- [21] Tehnička dokumentacija Elektrodistribucija Tuzla, 2005.
- [22] Š. Gruhonjić Ferhatbegović, A. Marušić, „Transient based Single Phase to Ground Fault Distance Computation“, Proceedings of IEEE PowerTech '09, Bucharest, June-July 2009.
- [23] Š. Gruhonjić Ferhatbegović, A. Marušić, „Fault Distance Estimation in Unearthed Distribution Network by Using Wavelet Transform“, Proceedings of Eurocon '09, Saint-Petersburg, May 2009.