

PROCENA MESTA KVARA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI NA OSNOVU SNIMLJENIH SIGNALA U NAPOJNOJ TRANSFORMATORSKOJ STANICI

FAULT LOCATION ASSESSMENT IN DISTRIBUTION NETWORK BASED ON RECORDED SIGNALS FROM SUBSTATION

Đorđe LAZOVIĆ, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija
Darko ŠOŠIĆ, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Distributivni sistemi su tokom poslednjih decenija pretrpeli niz značajnih promena, od deregulacije sistema i uvođenja tržišta, do sve intenzivnije integracije distribuiranih proizvodnih jedinica, povećanja potrošačkog konzuma i implementacije savremenih uređaja za zaštitu i upravljanje. Sve ovo uticalo je na postavljanje strožih zahteva za kontinuirano i kvalitetno napajanje potrošača električnom energijom. Prekid napajanja potrošača usled kvarova u mreži je nepoželjno stanje, te je potrebno preduzeti odgovarajuće mere da se ono što pre eliminiše. Informacija o lokaciji kvara nakon kvara je veoma korisna za efikasnu restauraciju napajanja i adekvatnu rekonfiguraciju mreže, a time se smanjuje vreme prekida napajanja krajnjih korisnika i troškovi neisporučene električne energije. U ove svrhe razvijene su brojne metode čija je primena vezana za tehničku opremljenost mreže. U ovom radu je predložena metoda za nalaženje mesta kvara u distributivnoj mreži, neposredno nakon nastanka kvara, na osnovu snimljenih signala iz zaštitnih uređaja postavljenih u delu mreže pogođene kvarom. Njome je obuhvaćen algoritam za obradu signala kojim se estimiraju veličine od interesa i predložen je model za procenu rastojanja kvara od mernog mesta. Predložena metoda za lokaciju kvara je testirana i verifikovana na realnoj distributivnoj mreži.

Ključne reči: Neplanirani ispadi, lokacija kvara, estimacija parametara signala.

ABSTRACT

In the last several decades, distribution systems have undergone a number of significant changes, from system deregulation and market competition to the increasing integration of distributed generation units, load expansion and the implementation of modern protection and control devices. This imposed more restrictive requirements for providing a continuous and good-quality power supply. Interruption of power supply due faults in the network is an undesirable condition and appropriate measures should be taken to eliminate this state as soon as possible. Information about fault location after failure is very useful for efficient supply restoration and adequate network reconfiguration, thus reducing outage time and costs of unsupplied electrical energy. For this purpose, numerous methods have been developed whose application is related to the technical equipment in the network. This paper proposes a method for assessment of fault location in the distribution network, immediately after the fault occurs, based on the recorded signals from the protective devices placed in the part of the network affected by the fault. It consists of a signal-processing algorithm that serves for signal parameter estimation and mathematical model for fault distance evaluation from the measurement point. The proposed method for fault location has been tested and verified on a real distribution network.

Key words: Unplanned outages, fault location, signal parameter estimation.

Đorđe Lazović: *lazovic@etf.rs*
Darko Šošić: *sosic@etf.rs*

UVOD

Analizom statističkih podataka o kvarovima, došlo se do zaključka da se u elektroenergetskom sistemu najveći broj kvarova događa u distributivnoj mreži, pri čemu se najveći udeo dešava na srednjenaponskim vodovima. Analize pokazuju da su najčešći kvarovi u distributivnim mrežama kratki spojevi. Po svojoj prirodi, oni mogu biti prolazni i trajni. Sa stanovišta prekida napajanja, od interesa su samo trajni kvarovi, jer se u ovom slučaju prekida snabdevanje potrošača tokom značajnog vremenskog perioda. Prekid napajanja potrošača je nepoželjno stanje, te je potrebno preduzeti odgovarajuće mere da se ono što pre eliminiše. Zato je prvo neophodno ustanoviti gde se nalazi mesto sa kvarom, zatim ga izolovati od ostalog dela distributivne mreže, da bi se potom obnovilo napajanje kod potrošača kod kojih je došlo do prekida napajanja, a kod kojih je to moguće izvesti [1].

Lokacija kvara se sastoji iz dva koraka. U prvom koraku se procenjuje gde se nalazi mesto sa kvarom, dok se u drugom koraku nalazi stvarno mesto kvara, pri čemu se polazi od procenjenog mesta kvara. Za lokaciju kvara koriste se razne metode [2-4] čija primena je direktno vezana za tehničku opremljenost mreže: postojanje brzih mernih jedinica (eng. *fault recorder*), detektora kvara (eng. *fault locators*) sa lokalnom ili daljinskom signalizacijom, daljinski komandovanih rasklopnih uređaja, odgovarajućih resursa prekidačke opreme, kao i od načina uzemljenja distributivne mreže, parametara mreže, statističkih podataka o prethodnim kvarovima, itd.

U mrežama koje nisu tehnički opremljene uređajima za lokaciju kvara, iskustvo dispečera predstavlja jedinu osnovu za procenu mesta kvara na izvodu. U tom slučaju šalju se ekipe na određena "slaba mesta" na izvodu. Tako se procena mesta kvara usmerava na mesta gde su se i ranije događali kvarovi ili na mesta za koja se na osnovu iskustva zna da su podložnija kvarovima i pretraživanje počinje od njih, čime je u nekim slučajevima moguće skratiti ukupno vreme potrebno za lokaciju kvara. Kvalitet procene se značajno poboljšava ukoliko u mreži postoje detektori kvara. Ako se koriste detektori sa lokalnom signalizacijom, onda se i dalje moraju slati ekipe na teren kako bi se vizuelno detektovalo njihovo pokazivanje. Ako su detektori sa daljinskom signalizacijom, postupak procene se značajno pojednostavljuje, pošto se njihova signalizacija detektuje trenutno pomoću SCADA sistema. Dalje unapređenje postupka procene mesta kvara je moguće u mrežama koje su opremljene sa brzim mernim jedinicama. Ako se pri tome koriste i detektori kvara onda se može povećati pouzdanost dobijenih procena. Konačno, kada se pored brzih mernih jedinica koriste i računarske metode u kojima se za proračune koristi i model mreže, mogu se dobiti najkvalitetnije procene. Svakako, sa povećanjem nivoa automatizacije distributivnih mreža, skraćuje se vreme za određivanje lokacije kvara, a samim tim poboljšavaju pokazatelji pouzdanosti rada mreže, tj. smanjuje neisporučena električna energija.

Najčešće korišćeni algoritmi za procenu mesta kratkog spoja, zasnovani na korišćenju brzih mernih jedinica i računarskih metoda su [5]:

1. Strujni algoritmi, koji se zasnivaju na merenju struje,
2. Impedantni algoritmi, koji se zasnivaju na merenju impedanse.

U ovom radu je predložena metoda za procenu lokacije kvara koja se zasniva na proračunu impedanse direktnog redosleda od tačke merenja do mesta kvara. Pretpostavka je da na početku svakog izvoda distributivne mreže, u svakoj fazi, postoje brze merne jedinice kojima se mere naponski i strujni signali, čiji se digitalni zapisi u upravljački centar mogu slati automatski putem SCADA sistema, ili se mogu pročitati na licu mesta. Ove signale je potrebno adekvatno obraditi, za šta je postupak opisan u narednom poglavlju. Pored estimacije parametara signala, u radu je opisan postupak za estimaciju stanja mreže pre nastanka kvara, i izložen je matematički model algoritma za procenu lokacije kvara, koji je testiran na realnoj distributivnoj mreži. Na kraju su izneti zaključci o efikasnosti i tačnosti rezultata koje daje primena predloženog algoritma.

ESTIMACIJA PARAMETARA SIGNALA

Estimacija parametara signala ima veoma važnu ulogu u primeni algoritama za detekciju lokacije kvara, pošto je procenjena lokacija jako osetljiva na pojedine parametre signala. Talasni oblik signala tokom kvara može pored osnovnog sadržati i više harmonike, interharmonike, visoko-frekventne oscilacije, šumove i eksponencijalno opadajuću jednosmernu komponentu. Eksponencijalno opadajuća jednosmerna komponenta prisutna je u strujnom signalu i može imati različitu početnu vrednost sa nepoznatom vremenskom konstantom prigušenja, te ukoliko se u analizama adekvatno ne uvaži, može dovesti do značajne greške u proceni lokacije kvara. U ovom radu korišćena je Modifikovana metoda najmanjih kvadrata odstupanja (eng. *Modified Least Error Square-MLES*) [6], koja uvažava i estimira eksponencijalno opadajuću jednosmernu komponentu. Ova metoda, na osnovu snimljenih

odbiraka signala, na efikasan i precizan način procenjuje sve parametre signala, za koji je pretpostavljeno da ima sledeću matematičku formulaciju:

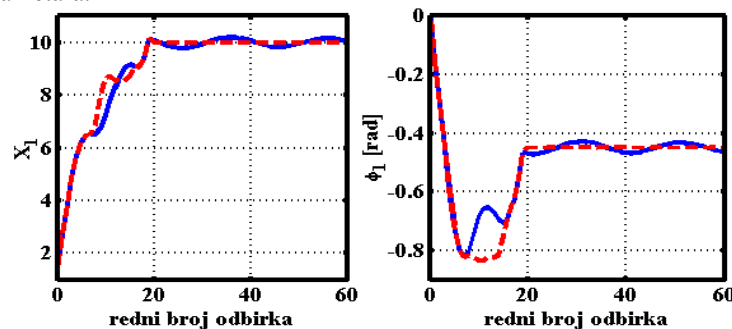
$$x(t) = X_0 e^{(-t/\tau)} + \sum_{m=1}^K X_m \cos(mw_1 t - \varphi_m), \quad (1)$$

gde su: X_0 , τ - amplituda i vremenska konstanta eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente, respektivno; K - broj harmonika koji se uvažava; $w_1 = 2\pi/T_1$ - sistemska kružna učestanost; T_1 - perioda osnovnog harmonika; φ_m i X_m - početna faza i amplituda m -tog harmonika.

Da bi se pokazao doprinos tačne procene eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente, predloženi algoritam je testiran na sledećem analitički formiranom signalu:

$$x(t) = 4 \cdot e^{(-t/0.1)} + 10 \cdot \cos(w_1 \cdot t - \pi/7) + 1 \cdot \cos(3 \cdot w_1 \cdot t + \pi/3) + 0.5 \cdot \cos(5 \cdot w_1 \cdot t). \quad (2)$$

Pored osnovnog harmonika ($w_1 = 2\pi f_1$, $f_1 = 50\text{Hz}$), ovaj signal sadrži 3. i 5. harmonik, kao i eksponencijalno opadajuću jednosmernu komponentu. Uzeto je da je broj odbiraka po periodu 20, kao i da šetajući prozor podataka pokriva 20 odbiraka. Za svaki prozor podataka izvršena je estimacija parametara signala MLES i Furijeovom metodom. Od interesa je bilo proceniti amplitudu i početnu fazu osnovnog harmonika signala. Rezultati su ilustrovani na Sl. 1. Kod oba algoritma za konvergenciju, potrebna je jedna osnovna perioda signala, tj. vreme dok se ceo prozor podataka ne popuni odbircima signala. U slučaju upotrebe Furijeove metode, ortogonalne komponente signala u ustaljenom stanju poseduju blago oscilatornu komponentu, jer ova metoda u svakom prozoru podataka uvažava jednosmernu komponentu signala kao konstantnu veličinu. Ovo dalje za posledicu ima izražene oscilacije prilikom estimacije amplitude i početne faze osnovnog harmonika signala, dok se u slučaju upotrebe MLES metode dobijaju ustaljene i tačne vrednosti ovih parametara.



SLIKA 1. ESTIMACIJA PARAMETARA SIGNALA MLES I FFT METODOM

KALIBRACIJA POTROŠNJE I ESTIMACIJA STANJA

Za implementaciju predloženog algoritma za procenu lokacije kvara u distributivnim mrežama, potrebno je poznavati stanje mreže pre nastanka kvara. Zbog toga je potrebno izvršiti kalibraciju potrošnje i estimaciju stanja mreže neposredno pre nastanka kvara. Pri izvođenju ovih postupaka usvojena je početna pretpostavka da jedino na početku izvoda distributivne mreže, u svakoj fazi, postoji merenje naponskih i strujnih signala. Kalibracija potrošnje predstavlja postupak u kome se na osnovu raspoloživih podataka procenjuje potrošnja u svim tačkama u distributivnoj mreži u izabranom trenutku. Ovako dobijene snage potrošnje predstavljaju ulazni podatak za estimaciju stanja čiji kvalitet u velikoj meri zavisi upravo od kvaliteta kalibracije potrošnje. Postupak koji će biti izložen podrazumeva da normalizovani hronološki dnevni dijagrami potrošnje nisu poznati.

Estimacija stanja je osnovna funkcija, čiji se rezultati koriste u gotovo svim ostalim funkcijama za analizu, upravljanje i planiranje pogona distributivnih mreža. Tri su osnovna cilja koja se postavljaju pred estimaciju stanja: proračuni promenljivih stanja, verifikacija i korekcija merenja i verifikacija topologije mreže. Za razvoj algoritma za procenu lokacije kvara osnovni cilj je proračun promenljivih stanja mreže, kojim se može rekonstruisati režim mreže pre nastanka kvara. Kako su merenja dostupna samo na početku izvoda distributivne mreže, tj. kako se analiziraju mreže koje su slabo opservabilne, ulaz u algoritam estimacije stanja biće kalibrisana potrošnja i izmereni signali.

Analizira se fider m na čijem je početku pre nastanka kvara izmeren napon \underline{U}_m i proračunata prividna snaga \underline{S}_m . Obeležićemo sa i indeks sabirnica sa potrošnjom, sa a_m skup indeksa potrošnji koje se napajaju preko izvoda m , a sa W_i vrednost pokazatelja potrošnje i -og potrošača, za koji se u zavisnosti od dostupnosti podataka mogu uzeti sledeće veličine:

- vrednosti nominalnih snaga transformatora SN/NN,
- vrednosti ampermetara maksimalne potrošnje na transformatorima SN/NN,
- vrednosti protoka energije kroz transformatore SN/NN.

Algoritam se realizuje kroz 8. koraka. Koraci 1-3 se odnose na postupak kalibracije potrošnje, dok se koraci 4-8 odnose na estimaciju stanja u mreži:

1. Formirati sumu: $W_m = \sum_{i \in \alpha_m} W_i$.
2. Za svaki čvor $i \in \alpha_m$ izvršiti normalizaciju pokazatelja potrošnje: $w_i = W_i / W_m$.
3. Za svaki čvor $i \in \alpha_m$ izvršiti kalibraciju potrošnje prema: $\underline{S}_i^o = \underline{S}_m \cdot w_i$.
4. Povećati iterativni indeks $v=v+1$.
5. Pokrenuti postupak za proračun tokova snaga u radialnim distributivnim mrežama za napon u korenu \underline{U}_m i snage potrošnje $\underline{S}_i^{(v-1)}$ [9].
6. Za svaki čvor $i \in \alpha_m$ sračunati kompleksne koeficijente redukcije potrošnje prema:

$$\underline{r}_i^{(v)} = \frac{\underline{S}_m - (P_{\gamma m} + i \cdot Q_{\gamma m})^{(v)}}{\sum_{i \in \alpha_m} \underline{S}_i^{(v-1)}}$$

gde su $P_{\gamma m}$ i $Q_{\gamma m}$ proračunati gubici aktivne i reaktivne snage na fideru m , respektivno.

7. Za svaki čvor $i \in \alpha_m$ izvršiti korekciju potrošnje prema: $\underline{S}_i^{(v)} = \underline{S}_i^{(v-1)} \cdot \underline{r}_i^{(v)}$
8. Proveriti uslov $\max \{abs(\underline{r}_i^{(v)}) \approx 1\}$. Ako je ovaj uslov ispunjen zaustaviti iterativni postupak i očitati promenljive stanja, a ako nije, vratiti se na korak 4.

Opisani algoritam predstavlja brz i robustan postupak za procenu promenljivih stanja pre nastanka kvara, tj. svih otočnih impedansi na fideru od interesa. Kao rezultat dobijaju se estimirani fazori: napona na sabirnicama \underline{U}_i , struja potrošnje \underline{I}_i i struja po granama \underline{I}_{i-j} . Zbog malog broja dostupnih merenja, greške u estimaciji su neizbežne, ali pošto su otočne impedanse dosta veće od rednih, ovo se neće znatno odraziti na tačnost postupka za procenu lokacije sa kvarom.

ALGORITAM ZA PROCENU LOKACIJE KVARA

Algoritmi za procenu lokacije kvara u prenosnim mrežama dominantno su bazirani na principima rada distantne zaštite. Za razliku od prenosnih mreža, distributivne mreže odlikuje slaba opservabilnost, radialna topologija, prisustvo razgranatih odvoda duž glavnog fidera, neuniformnost parametara vodova/kablova po deonicama, itd. Primena algoritama za lokaciju kvara koji su zasnovani na proceni impedanse do mesta kvara moguća je i u distributivnim mrežama ukoliko je ona opremljena brzim mernim jedinicama, ali se zbog prethodno navedenih osobina distributivnih mreža mogu očekivati manje tačni rezultati, kao i više potencijalnih lokacija sa kvarom. U razmatranom problemu podrazumeva se dostupnost digitalnih releja na početku svakog izvoda distributivne mreže, te će biti izložen algoritam za procenu lokacije kvara koji će se odnositi samo na ovakvu postavku. Algoritam je moguće prilagoditi i situaciji kada su merenja dostupna samo na pojedinim izvodima mreže, ili čak samo u trafo polju napojne transformatorske stanice.

Predloženi algoritam za procenu lokacije kvara u distributivnim mrežama se može realizovati u dva koraka koji podrazumevaju:

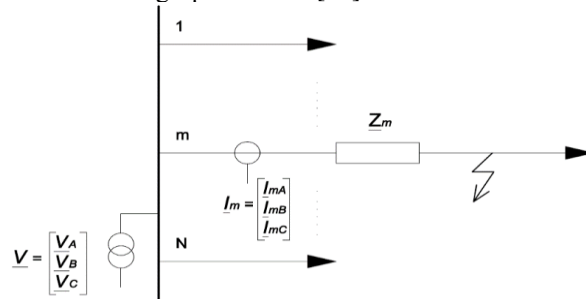
- Proračun impedanse petlje kvara na osnovu snimljenih naponskih i strujnih signala,
- Estimaciju rastojanja do mesta kvara.

Proračun impedanse petlje kvara

Analiziraju se jednostrano napajane radialne distributivne mreže koje poseduju digitalne merne uređaje na početku svakog izvoda. Na SI 2. je šematski prikazana mreža sa mernim jedinicama na izvodu m , na kojem je pretpostavljeno da se dešava kratak spoj. Na osnovu snimljenih mernih signala potrebno je sračunati impedansu petlje kvara \underline{Z}_m , koja

će ovde predstavljati impedansu direktnog redosleda od početka izvoda do mesta kvara. Izrazi za proračun ove impedanse se razlikuju u zavisnosti od tipa kvara. Detekcija izvoda pogođenog kvarom i određivanje tipa kvara, ostvariva je na osnovu informacija o reagovanju releja i prekidača, kao i snimljenih talasnih oblika signala za vreme kvara.

Proračun \underline{Z}_m biće odvojeno sproveden za dve grupe kvarova [10]:



SLIKA 2. ŠEMATSKI PRIKAZ DISTRIBUTIVNE MREŽE SA MERNIM JEDNICAMA NA POČETKU M -TOG FIDERA

a) proračun impedanse petlje kvara za međufazne kvarove (k_3, k_2, k_2z)

$$\underline{Z}_m = \frac{V_{pp}}{I_{mpp}}, \quad (3)$$

gde su: V_{pp} - napon petlje kvara, I_{mpp} - struja petlje kvara.

b) proračun impedanse petlje kvara za kvarove sa zemljom (k_1z)

$$\underline{Z}_m = \frac{V_{ph}}{I_{mph} + k_{mN} \cdot I_{mN}}, \quad (4)$$

gde su: V_{ph} - napon faze pogođene kvarom, I_{mph} - struja faze pogođene kvarom, k_{mN} - koeficijent kompenzacije,

$$k_{mN} = \frac{\underline{Z}'_0 - \underline{Z}'_1}{3 \cdot \underline{Z}'_1} \quad (5)$$

$\underline{Z}'_0, \underline{Z}'_1$ - podužni parametri nultog i direktnog redosleda, fidera pogođenim kvarom

$$I_{mN} = I_{mA} + I_{mB} + I_{mC} \quad (6)$$

Estimacija rastojanja do mesta kvara

Na osnovu proračunate impedanse do mesta kvara, estimiranog stanja pre nastanka kvara, poznate topologije mreže i parametara vodova, moguće je proceniti rastojanje do mesta kvara. Na Sl. 3 je predstavljena jednopolna šema direktnog redosleda fidera m pogođenog kvarom na deonici iza sabirnica k . Čvor 1 predstavlja koren distributivne mreže. Usvojene su sledeće oznake:

\underline{Z}_m - proračunata impedansa do mesta kvara,

\underline{Z}_{Fi} - impedansa koja se "vidi" od čvora i do mesta kvara,

\underline{Z}_{Si} - redna impedansa grane i ,

\underline{Z}_{Pi} - otočna impedansa koja se "vidi" iz čvora i .

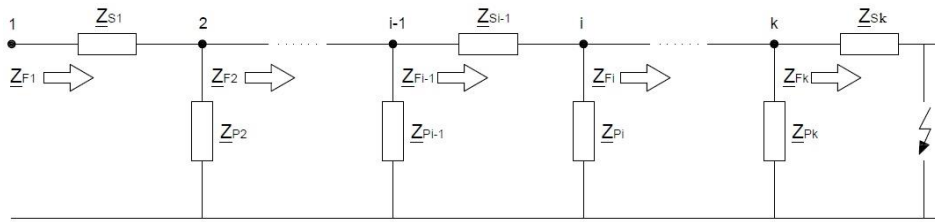
Impedansu \underline{Z}_{Pi} mogu da čine: potrošnja, otočni uređaji za kompenzaciju reaktivne snage, otočni parametri vodova/kablova, kao i ekvivalent mreže koji se vidi iz čvora i , a koji ne pripada stazi sa kvarom (laterali, odvodi). Svi ovi parametri dobijaju se iz estimacije stanja i pretpostavka je da se ne menjaju tokom trajanja kvara.

Analizirajući šemu sa slike, može se zapisati:

$$\underline{Z}_{Fi-1} = \underline{Z}_{Si-1} + \frac{\underline{Z}_{Pi} \cdot \underline{Z}_{Fi}}{\underline{Z}_{Pi} + \underline{Z}_{Fi}} \quad (7)$$

Sređivanjem prethodne relacije, dobija se:

$$\underline{Z}_{Fi} = \frac{\underline{Z}_{Pi} \cdot (\underline{Z}_{Si-1} - \underline{Z}_{Fi-1})}{(\underline{Z}_{Fi-1} - \underline{Z}_{Pi} - \underline{Z}_{Si-1})} \quad (8)$$



SLIKA 3. JEDNOPOLNA ŠEMA DIREKTOG REDOSLEDA FIDERA POGOĐENOG KVAROM

Izraz (8) predstavlja rekurzivnu relaciju za proračun impedanse koja se “vidi” od nekog čvora duž staze pogođene kvarom do mesta kvara. Lako se pokazuje da važi $|\underline{Z}_{Fi-1}| > |\underline{Z}_{Fi}|$, tj. da pomenuta impedansa opada kako se tačka i udaljava od napojne trafostanice.

Procedura za estimaciju rastojanja do mesta kvara započinje iterativnom primenom relacije (8), pri čemu za inicijalizaciju treba uzeti $\underline{Z}_{F1} = \underline{Z}_m$. Proceduru je potrebno zaustaviti kada se ispuni uslov $Im\{\underline{Z}_{Fk+1}\} < 0$. Na kraju, određivši \underline{Z}_{Fk} pomoću (8), moguće je estimirati rastojanje do mesta kvara, kao i otpornost električnog luka:

$$\underline{Z}_{Fk} = l_{Fk} \cdot \underline{Z}_{Sk} + R_f, \quad (23)$$

gde su: l_{Fk} - rastojanje od čvora k do mesta kvara u sistemu r.j., R_f - otpornost električnog luka.

Ukoliko uslov $Im\{\underline{Z}_{Fk+1}\} < 0$ ne bude zadovoljen ni za poslednji čvor u okviru posmatrane staze, zaključak je da u posmatranoj stazi nije sigurno došlo do kvara.

Postupak za procenu lokacije kvara na realnom distributivnom fideru

Postupak za procenu lokacije kvara sastoji se od sledećih 10 koraka:

1. Detektovati fider m pogođen kvarom i tip kvara na osnovu informacija o proradi releja i prekidača, kao i snimljenih talasnih oblika signala za vreme kvara.
2. Na osnovu snimljenih talasnih oblika signala pokrenuti estimator parametara signala. Kao rezultat ovog postupka dobijaju se fazori osnovnog harmonika napona i struje na početku fidera pogođenog kvarom.
3. Za posmatrani fider pokrenuti algoritam za estimaciju stanja neposredno pre nastanka kvara. Kao rezultat ovog postupka dobijaju se fazori: napona na sabirnicama \underline{U}_i^{pre} , struja potrošnje \underline{I}_i^{pre} i struja po granama $\underline{I}_{i-j}^{pre}$.
4. Proračunati impedansu petlje kvara \underline{Z}_m na osnovu fazora napona i struje za vreme kvara prema relacijama (3) ili (4) u zavisnosti od tipa kvara.
5. Detektovati stazu s , tako da $s \in \alpha_s$, gde α_s predstavlja skup svih mogućih putanja od korena mreže do poslednjeg čvora u mreži.

6. Ukoliko za neki čvor r u okviru staze s postoji veza sa čvorom p koji ne pripada stazi s (laterali, odvodi), sračunati ekvivalent dela mreže koji se “vidi” iz čvora r prema čvoru p na osnovu relacije: $\underline{Z}_{r-p}^{kv} = \frac{\underline{U}_r^{pre}}{\underline{I}_{r-p}^{pre}}$.

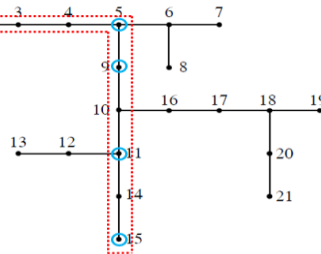
7. Ukoliko je neki čvor r u okviru staze s potrošački, potrebno je za njega sračunati ekvivalent potrošnje (model konstantne impedanse) prema relaciji: $\underline{Z}_r^{load} = \frac{\underline{U}_r^{pre}}{\underline{I}_r^{pre}}$.

8. Za svaki čvor r u okviru staze s sračunati otočnu impedansu koja se vidi iz čvora r prema: $\underline{Z}_{Pr} = \underline{Z}_{r-p}^{kv} \square \underline{Z}_r^{load}$. U prethodnom izrazu treba uvažiti i impedanse ostalih otočnih elementa ukoliko oni postoje u čvoru r (uređaji za kompenzaciju reaktivne snage, otočni parametri vodova/kablova).

9. Za stazu s primeniti algoritam za estimaciju rastojanja do mesta kvara. Ako je kvar detektovan, ispisati rezultate.

10. Ako postoji nova staza, vratiti se na korak 5, u suprotnom kraj postupka.

Radi lakšeg razumevanja koraka 5,6,7 na Sl. 4. je prikazan jedan realan, radijalni fider sa 21 čvorom. Skupu α_s pripada 6 staza (putanje od napojne transformatorske stanice do čvorova 7,8,13,15,19 i 21). Na slici je crvenom isprekidanom linijom obeležena staza 4: TS-1-2-3-4-5-9-10-11-14-15. Plavim kružićima obeleženi su potrošački čvorovi u okviru analizirane staze. U okviru koraka 6 potrebno je sračunati sledeće impedanse: Z_{5-6}^{ekv} , Z_{10-16}^{ekv} i Z_{11-12}^{ekv} , dok se u koraku 7. računaju: Z_2^{load} , Z_5^{load} , Z_9^{load} , Z_{11}^{load} i Z_{15}^{load} .



SLIKA 4. PRIKAZ RELANOG DISTRIBUTIVNOG FIDERA SA DETEKTOVANOM STAZOM I OBELEŽENIM POTROŠAČKIM ČVOROVIMA

REZULTATI

Opisani postupak za procenu lokacije kvara verifikovan je na realnoj distributivnoj mreži Operatora Distributivnog Sistema - Eps Distribucija d.o.o. Beograd. Analiziraju se fideri koji polaze sa napojne trafostanice Blok 32 (rb. 42), gde na početku svakog fidera postoje digitalne merne jedinice sa snimljenim prelaznim pojavama u periodu tokom 2019. godine i rezolucijom od 16 odbiraka po periodi. Inspekcijom mesta kvara određene su deonice (vodovi između dve trafostanice SN/NN) sa kvarom, te je stvarna lokacija kvara unapred bila poznata. Prvobitno je analiziran fider koji polazi iz ćelije 36 sa kvarom na deonici između čvorova Z-393 i Z-789 (Sl. 5). Strujni i naponski signali tokom tranzijenta prikazani su u softveru za grafičku vizuelizaciju, analizu i procenu zapisa kvarova- SIGRA [11] (Sl. 6).

Talasnici signala ukazuju na to da se desio jednofazni kratak spoj sa zemljom u fazi A, koji je prerastao u dvofazni kratak spoj sa zemljom između faza A i B. Na osnovu signala pre nastanka kvara, topologije i parametara mreže, izvršena je estimacija stanja pre nastanka kvara. Kako podaci o energiji i maksimalnoj struji trafostanica SN/NN nisu bili poznati, to je za proračun pokazatelja potrošnje korišćena nominalna snaga transformatora. Analiza je rađena za fazu B, i pretpostavljen je simetričan režim. Dobijeno je da fazni napon u korenu mreže iznosi (-5.8536+i0.8926) kV, dok je prividna snaga po fazi (0.1328+i0.0376) MVA u smeru ka distributivnoj mreži. Ostali rezultati prikazani su u Tab. 1, pri čemu je usvojeno da grana ima naziv kao njen predajni čvor.

Upotrebom algoritma za estimaciju parametara signala estimirane su efektivne vrednosti napona i struja, kao i njihovi fazni stavovi za vreme kvara. Ovo je dalje poslužilo da se proračunaju impedanse petlje kvara. Proračun je vršen za svaki prozor podataka, pri čemu je zanemaren period tokom kojeg algoritam za estimaciju parametara signala nije konvergirao. Impedanse su na Sl. 7 prikazane u R-X ravni za slučajeve jednofaznog i dvofaznog kratkog spoja sa zemljom. Kako impedanse nemaju konstantnu vrednost tokom tranzijenta, to je urađeno njihovo filtriranje, prema tački nagomilavanja u R-X ravni (zvezdice obeležene crvenom bojom).

Očekivane impedanse do mesta kvara dalje su poslužile za procenu lokacije kvara. U slučaju jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, algoritam je kao rezultat izbacio kvar između 6% i 16% deonice od čvora Z-393 do čvora Z-789. U slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom, algoritam kao rezultat daje lokacije između 46% i 58% deonice od čvora Z-393 do čvora Z-789.

Razlog što algoritam daje opseg potencijalne lokacije kvara je što impedansa do mesta kvara nije konstantna za sve odbirke, pa se s toga ne može sa sigurnošću odrediti jedinstvena lokacija. U oba slučaja, algoritam je procenio tačnu deonicu sa kvarom.

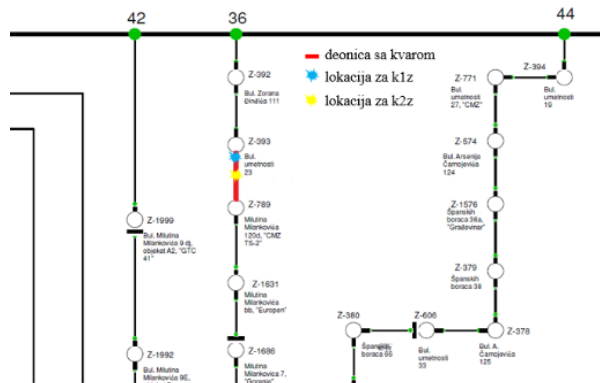
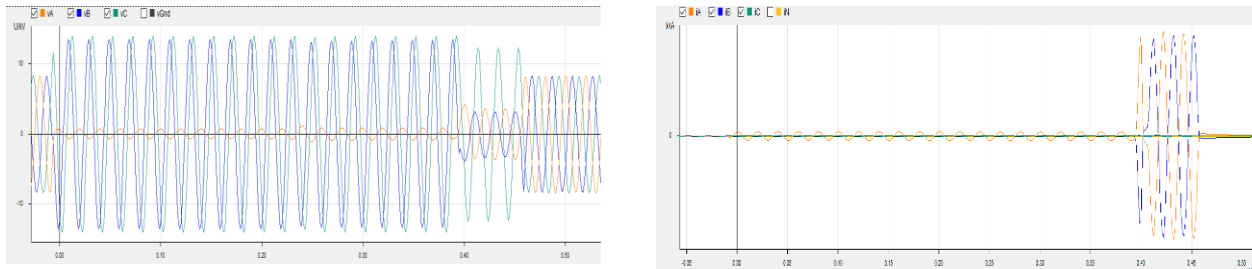
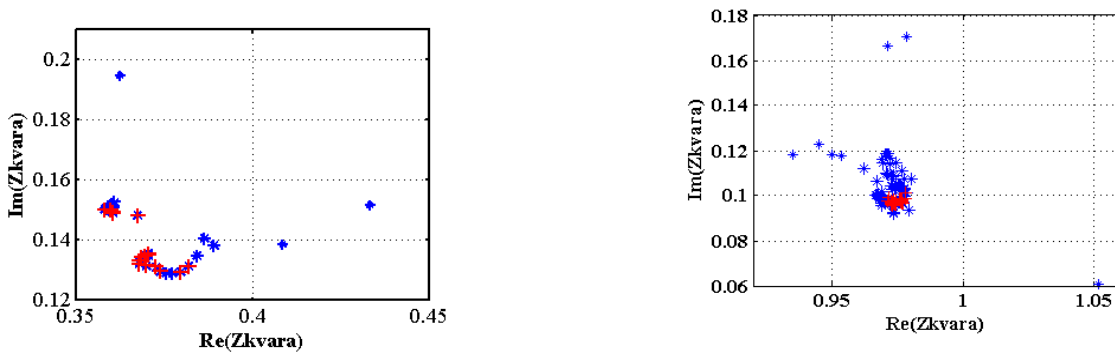


TABELA 1- NAPONI U ČVOROVIMA, STRUJE POTROŠNJE I STRUJE PO GRANAMA PRE NASTANKA KVARA NA FIDERU 36

	U [kV]	I [kA]	J [kA]
Z-392	-5.8499 + i0.8925	-0.0063 + i0.0038	-0.0212+ i0.0096
Z-393	-5.8487 + i0.8925	-0.0040 + i0.0024	-0.0147+ i0.0063
Z-789	-5.8442 + i0.8926	-0.0040 + i0.0024	-0.0107+ i0.0041
Z-1631	-5.8431 + i0.8925	-0.0063 + i0.0038	-0.0064+ i0.0031
Z-1686	-5.8431 + i0.8925	0 + i0	-0.00002 - i0.0001

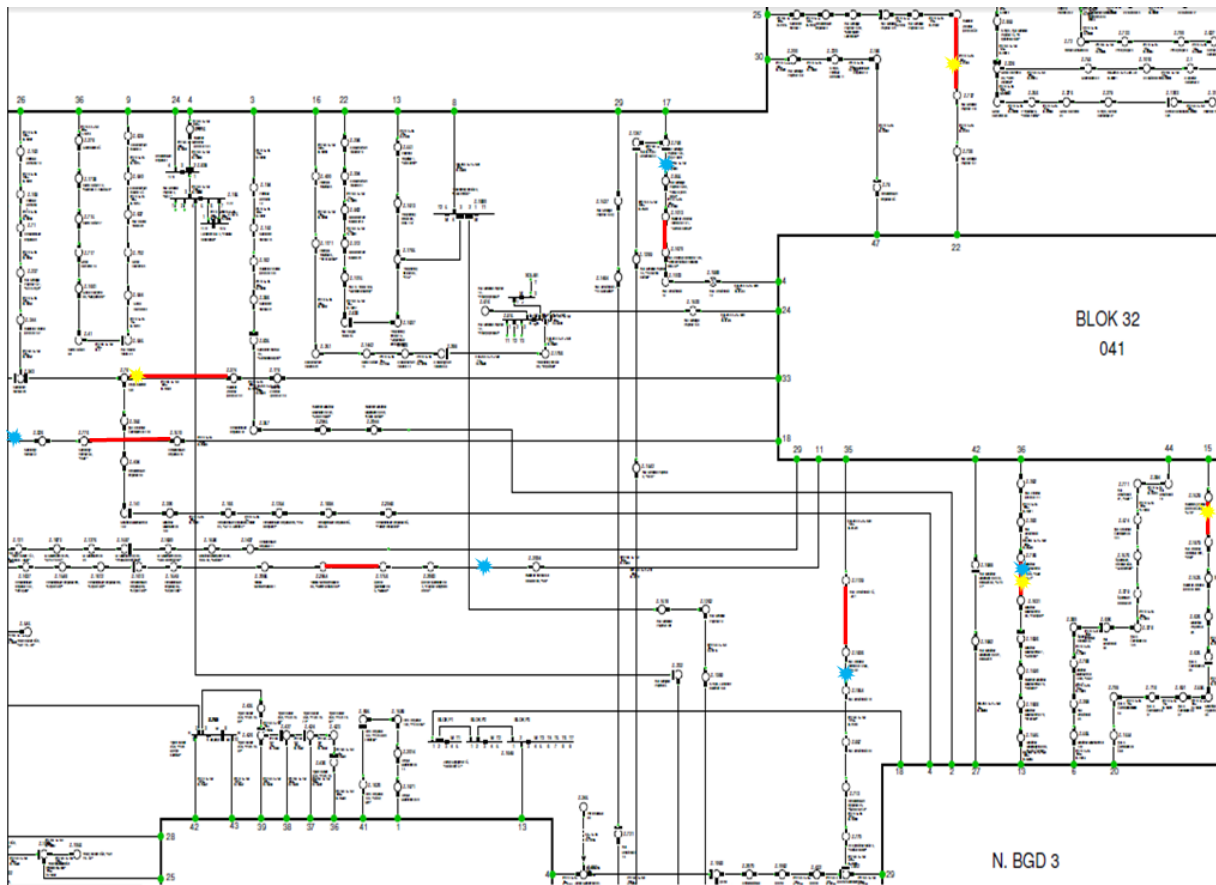


SLIKA 6. SNIMLJENI TALASNI OBLICI NAPONA (SLIKA LEVO) I STRUJE (SLIKA DESNO) ZA VREME KVARA NA POČETKU FIDERA 36



SLIKA 7. IMPEDANSE PETLJE KVARA U R-X RAVNI ZA SLUČAJ K2Z (SLIKA LEVO) I K1Z (SLIKA DESNO)

Algoritam za procenu lokacije kvara je testiran na distributivnoj mreži koja se napaja iz trafostanice Blok 32. U analizi su obuhvaćeni samo fideri koji su tokom analiziranog perioda bili pogođeni kvarovima, i za koje postoje dostupni podaci o lokacijama sa kvarom i snimljeni signali tokom trazijenta. Rezultati prikazani na Sl. 8 ukazuju na to da je u slučaju međufaznih kratkih spojeva uvek detektovana tačna deonica sa kvarom. S druge strane, u slučaju jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, algoritam pravi izvesnu grešku prilikom estimacije lokacije kvara. U odnosu na stvarnu deonicu sa kvarom, ove greške se kreću i do 350 m, i posledica su više faktora.



SLIKA 8. ESTIMIRANE I STVARNE LOKACIJE KVARA U REALNOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Prvi faktor je otpornost električnog luka, koja je nepoznata veličina i koja je promenljiva u vremenu. Kako u izrazu (4) ne figuriše otpornost luka, ovo će svakako za posledicu imati grešku u estimaciji merene impedanse do mesta kvara i njenu promenljivost tokom trajanja kvara. Drugi faktor predstavlja neuniformnost nultih parametara vodova. Naime, većina fidera u analiziranoj distributivnoj mreži se sastoji od kablova različitih karakteristika, pri čemu se kablovi različitog tipa mogu javiti čak i na jednoj deonici. Pored toga, nulti parametri kablova se određuju sa manjom tačnošću od parametara direktnog redosleda, i generalno njihov odnos varira duž fidera. Sve ovo dalje dovodi do greški prilikom proračuna koeficijenta kompenzacije (5) za koji je potrebno usvojiti jedinstvenu kompleksnu vrednost. Treći faktor odnosi se na kvalitet snimanja signala, tj. na mernu rezoluciju digitalnih uređaja. Naime, pri jednofaznim kvarovima sa zemljom, struja kvara se često zatvara preko nelinearne impedanse, što dovodi do izobličenja talasnih oblika struje i napona. Kako analizirani digitalni merni uređaji snimaju 16 odbiraka po periodu, to se prema teoremi o odabiranju signala uspešno mogu detektovati harmonici do reda 8. Prema tome, ukoliko talasni oblici sadrže i više harmonike, greške u estimaciji osnovnog harmonika, koji je od interesa, su neminovne.

ZAKLJUČAK

U radu je izložen matematički model i razvijen je algoritam za procenu lokacije kvara u distributivnim mrežama. Takođe, izložene su i funkcije koje prethode ovom algoritmu: estimacija korisnih parametara signala i estimacija stanja mreže pre nastanka kvara. Algoritam za detekciju lokacije kvara počiva na principima rada distantne zaštite u prenosnim mrežama i prilagođen je konfiguraciji i topologiji distributivnih mreža. Njegova primena odnosi se na slabo automatizovane srednjenaponske distributivne mreže koje na početku fidera imaju instalirane brze merne digitalne jedinice. Snimljeni strujni i naponski signali predstavljaju ulaze u pomenuti algoritam i mogu se trenutno prikupiti putem SCADA sistema, ili se mogu očitati na licu mesta. Algoritam za procenu lokacije kvara testiran je na realnoj distributivnoj mreži. Pokazalo se, da u slučaju međufaznih kratkih spojeva, algoritam radi sa velikom tačnošću, dok se, u slučaju jednofaznih kratkih spojeva, prave izvesne greške koje zavise od otpornosti luka,

uniformnosti nultih parametara vodova duž fidera i rezolucije merenja. Zaključak je da se primenom opisanog algoritma može efikasno detektovati deonica sa kvarom u slučaju međufaznih kvarova, dok se u slučaju jednofaznih kvarova može u dobroj meri smanjiti oblast pretraživanja. Sve ovo dalje vodi ka smanjenju vremena izolacije kvara i restauracije napajanja u odnosu na mreže kod kojih su korišćene konvencionalne metode za detekciju mesta kvara. Na ovaj način, poboljšavaju se pokazatelji pouzdanosti rada distributivne mreže i smanjuje neisporučena električna energija.

ZAHVALNICA

Rad nastao tokom istraživanja finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

LITERATURA

1. Popović D, Bekut D, Treskanica V. Specijalizovani DMS algoritmi. DMS Group; 2004.
2. Mirzaei, M., Ab Kadir, M.Z.A., Moazami, E. and Hizam, H., 2009. Review of fault location methods for distribution power system. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(3), pp.2670-2676.
3. Farughian, A., Kumpulainen, L. and Kauhaniemi, K., 2018. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. Electric power systems research, 154, pp.373-380.
4. Shafiullah, M. and Abido, M.A., 2017. A review on distribution grid fault location techniques. Electric Power Components and Systems, 45(8), pp.807-824.
5. Chen K, Huang C, He J. Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods. High voltage. 2016 Jul 14; 1(1):25-33.
6. Saha MM, Izykowski JJ, Rosolowski E. Fault location on power networks. Springer Science & Business Media;
7. Đurić M. Algoritmi za digitalne relejne zaštite. ETA; 2012.
8. Hostetter G. Recursive discrete Fourier transformation. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1980 Apr; 28(2):184-90.
9. Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A, Luo GX. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. IEEE Transactions on power systems. 1988 May; 3(2):753-62.
10. Saha MM, Rosolowski E, Izykowski J. Atp-empt investigation for fault location in medium voltage networks. In International Conference on Power Systems Transients 2005 Jun.
11. Son, Yong-Beom, et al. "Practical Use of the Fault Record Analysis Software, SIGRA by Editing the Data of a Comtrade File." Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference journal. 2017.