

# Podužna diferencijalna zaštita vodova sa primenom automatskog ponovnog uključenja

Tomislav Rajić, Zoran Stojanović

Univerzitet u Beogradu  
Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija

[rajic@etf.bg.ac.rs](mailto:rajic@etf.bg.ac.rs), [stojanovic@etf.bg.ac.rs](mailto:stojanovic@etf.bg.ac.rs)

**Sadržaj**— Zbog tranzijentne stabilnosti u elektroenergetskom sistemu, kvarovi na vodovima u blizini elektrane ili velikih čvorišta moraju se isključivati brzo. Za brzu i selektivnu zaštitu vodova može se primeniti diferencijalna zaštita. U ovom radu je objašnjen algoritam za realizaciju podužne diferencijalne zaštite dalekovoda najviših naponskih nivoa uz primenu automatskog ponovnog uključenja prekidača. Cilj simulacije je da se prikaže rad releja u realnom vremenu. Algoritam je primenjen na trofaznom modelu dalekovoda formiranog pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink.

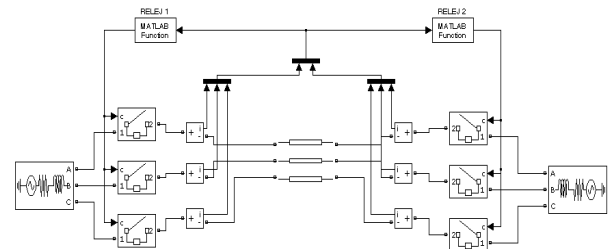
**Ključne riječi**- digitalna zaštita; diferencijalna zaštita vodova; automatsko ponovno uključenje;

## I. UVOD

Analogna podužna diferencijalna zaštita primenjuje se na kraćim, jednostrukim vodovima. Međutim, pojavom OPGW užadi, dužina voda prestaje da bude ograničavajući faktor. Princip podužne diferencijalne zaštite zasniva se na poređenju struja na početku i kraju voda, što rezultuje brzim, osjetljivim i jednostavnim konceptom zaštite koji omogućava odvajanje voda u kvaru od mreže. Štićena zona određena je položajem strujnih transformatora sa kojih se dovode signali diferencijalnom releju. Na osnovu iskustvenih podataka i literature, realizovan je algoritam diferencijalnog releja i primenjen je na trofazni model dalekovoda pomoću programskog paketa Matlab [1]-[5]. Cilj simulacije je da se prikaže rad releja u realnom vremenu [6], [7]. U okviru algoritma, implementiran je i sistem automatskog ponovnog uključenja prekidača.

## II. MODELOVANJE MREŽE

Da bi se problem sagledao što realnije, odnosno da bi se bolje simuliralo stanje duž voda, za model dalekovoda izabrana je trofazna šema dalekovoda sa raspodeljenim parametrima. Parametri voda su izračunati po uzoru na realan slučaj. Za model voda su izabrani parametri 110 kV dalekovoda. Podužni pogonski parametri voda su:  $r_d=0,12 \Omega/\text{km}$ ,  $l_d=1,3 \text{ mH}/\text{km}$  i  $c_d=8,9 \text{ nF}/\text{km}$  dok su podužni nulti parametri voda:  $r_o=0,32 \Omega/\text{km}$ ,  $l_o=4,1 \text{ mH}/\text{km}$  i  $c_o=5 \text{ nF}/\text{km}$  [1]. Pretpostavlja se da se sa obe strane dalekovoda nalaze "jake" mreže koje se mogu modelovati konstantnim impedansama. Promenom modula i faznog stava napona na dva kraja dalekovoda, može se uticati na tok snage



Slika 1. Model za simulaciju podužne diferencijalne zaštite dalekovoda.

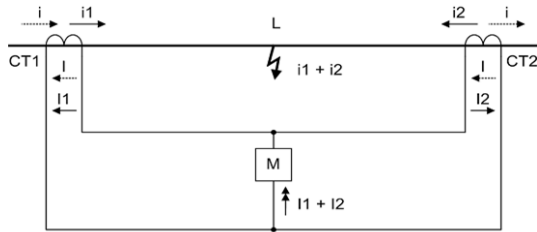
kroz dalekovod. Impedansa mreže izračunava na osnovu napona mreže i snage trofaznog kratkog spoja koja iznosi 500 MVA. Ova vrednost je uzeta da bi struje kvara bile manje, odnosno da bi prikaz rezultata bio pregledniji. Model dalekovoda za simulaciju algoritma formiran je pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink i prikazan je na Sl.1 [2].

Relej je u modelu implementiran pomoću bloka *Matlab function*. Postoje dva ovakva bloka jer se releji nalaze sa obe strane dalekovoda. Na ulaze oba bloka dovode se strujni signali iz svake faze i sa obe strane dalekovoda. U svakom trenutku odabiranja strujnih signala, ovaj blok poziva funkciju kojom se obrađuju odbirci signala. Za periodu odabiranja,  $T_{od}$ , podešena je vrednost od 1 ms. Signali koji se dovode relejima pomnoženi su koeficijentom  $k=1/400$  što predstavlja prenosni odnos strujnih transformatora. Na izlazu blokova generišu se komandni signali za uključenje odnosno isključenje prekidača, u zavisnosti od toga da li je uslov reagovanja releja ispunjen. Komandni signali dovode se na komandni ulaz modela energetskog prekidača, koji vrši prekidanje struje pri njenom prolasku kroz nulu.

## III. ALGORITAM ZA PODUŽNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU SA PRIMENOM AUTOMATSKOG PONOVOG UKLJUČENJA

Na Sl.2 prikazan je princip rada podužne diferencijalne zaštite. Kao metod utvrđivanja nastanka kvara, koristi se poređenje struja na oba kraja voda. Diferencijalnim relejima dovode se struje preko strujnih transformatora. Ako bi struje, koje se dovode relejima sa različitih krajeva voda, bile potpuno iste, njihova razlika bi bila jednaka nuli. Ovaj slučaj odgovara normalnim režimima na vodu. Međutim, u realnosti, uvek postoji razlika struja merenih na dva kraja voda

zbog nesavršenosti strujnih transformatora i struje odvođenja duž voda. To znači da se ni u normalnim režimima neće desiti



Slika 2. Princip rada podužne diferencijalne zaštite vodova

da razlika struja na različitim krajevima voda bude jednaka nuli.

Štićena zona određena je položajem strujnih transformatora. Ukoliko se kvar dogodi unutar štićene zone, struje na dva kraja voda imaju smer ka mestu kvara. U odnosu na normalni režim rada, jedna struja menja smer, te postoji i struja kroz diferencijalni relej M, koji tada reaguje.

#### A. Računanje struja merodavnih za rad releja

Za određivanje da li se mesto kvara nalazi unutar ili izvan štićene zone, treba posmatrati dve struje: diferencijalnu i stabilizacionu.

Diferencijalna struja računa se kao razlika trenutnih vrednosti struja sa obe strane voda ( $i_L$  - sa leve strane i  $i_D$  - sa desne strane), kao što je predstavljeno izrazom (1):

$$i_{dif} = i_L - i_D \quad (1)$$

dok se za računanje struje stabilizacije primenjuje izraz (2):

$$i_{stab} = k (i_L + i_D) \quad (2)$$

gde je  $k$  konstanta koja najčešće uzima vrednost 0.5 [3].

Za realizaciju algoritma, neophodno je formirati šest registara, po dva za svaku fazu. U svaki od dva registra smeštaju se odbirci diferencijalne i stabilizacione struje, koji se dobijaju prema (1) i (2). Učitavanjem novog odbirka, u registrima se vrši pomeranje, tako da se prvi element registra izbacuje, a novi odbirak zauzima poslednje mesto. Učitavanje novog odbirka, odnosno aktualizacija registara definisana je periodom odabiranja  $T_{od}$ .

Na osnovu tekućeg sadržaja registara (prozora podataka) vrši se proračun efektivnih vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje prema izrazima (3) i (4):

$$I_{dif} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m i_{dif}^2(n)}{m}} \quad (3)$$

$$I_{stab} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m i_{stab}^2(n)}{m}} \quad (4)$$

gde su:

$i_{dif}(n)$  -  $n$ -ti odbirak diferencijalne struje,

$i_{stab}(n)$  -  $n$ -ti odbirak stabilizacione struje,

$m$  - broj odbiraka u osnovnoj periodu signala  $T$ , odnosno prozoru podataka ( $m=T/T_{od}=20$ ).

U programu se dalje obrađuju samo efektivne vrednosti ovih struja i na osnovu njih se donosi odluka o reagovanju releja. Na taj način, povećava se sigurnost, odnosno sprečava lažno reagovanje releja zbog smetnji, šumova, prelaznog procesa tokom kvara, itd.

Za eliminisanje uticaja viših harmonika i sprečavanje alias efekta, signali se pre diskretizacije propuštaju kroz analogni filter drugog reda.

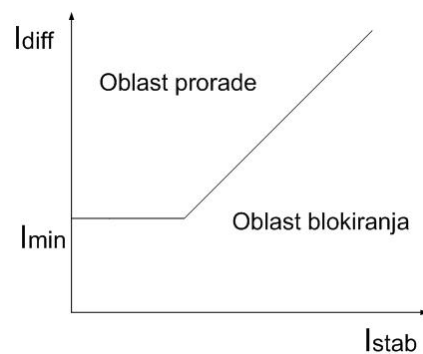
#### B. Kriterijum prorade releja

U realnom elektroenergetskom sistemu, zbog pojava mernih grešaka prouzrokovanih strujom magnećenja i zasićenjem strujnih transformatora, zatim zbog analogno-digitalne konverzije kao i kašnjenja digitalnog komunikacionog kanala, moguća je pojava diferencijalne struje, iako ne postoje mrežni poremećaji ili su poremećaji izvan zone štićenja. Takođe, u režimima bez kvara, primarne struje na početku i kraju voda nisu iste zbog oticanje kapacitivne struje duž voda.

Diferencijalna struja, koja je posledica pomenutih faktora, zove se struja debalansa. Zbog pojave struje debalansa dolazi do nepotrebnog (lažnog) isključenja štićenog voda. Zato je potrebno, u postupku podešenja releja, uzeti u obzir mogućnosti nastanka struje debalansa i eliminisati njen uticaj na reagovanje zaštitnog uređaja.

U simulacijama nisu uzeti u obzir svi ovi faktori. Pretpostavljeno je da na pojavu struje debalansa utiče jedino oticanje kapacitivne struje duž voda. Kapacitivne struje su posledica kapacitivnosti dalekovoda prema zemlji, ali i kapacitivnosti jedne faze prema drugim fazama. Ove struje su uzrok razlike struja na krajevima dalekovoda. Uticaj ovih struja je veći kod kablova jer je tu i kapacitivnost veća. U režimima bez kvara, kapacitivne struje se mogu smatrati konstantnim jer zavise samo od napona i kapacitivnosti.

Jednostavan način eliminisanja uticaja struje debalansa je primena karakteristike reagovanja releja, prikazane na Sl.3 [3]-[5].



Slika 3. Karakteristika reagovanja releja.

$I_{min}$  je struja kojom je definisan najniži prag reagovanja releja. Minimalna proradna struja  $I_{min}$ , odnosno prag osjetljivosti releja ispod kojeg isti ne reaguje, predstavlja upravo meru predostrožnosti za moguće struje neravnoteže.

Minimalna proradna struja podešava se prema kapacitivnoj struji odvođenja i računa se prema izrazu (5) [5]:

$$I_{\min} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{3}} \cdot 10^{-6} \cdot U_N \cdot f_N \cdot c_d \cdot L \cdot k_r \quad (5)$$

gde je:

- $U_N$  - naznačeni napon voda (kV),
- $f_N$  - naznačena frekvencija u sistemu (Hz),
- $c_d$  - podužna kapacitivnost (nF/km),
- $L$  - dužina voda (km),
- $k_r$  - faktor rezerve ili sigurnosti.

Koeficijent  $k_r$  ima vrednost 1,2. Dodaje se radi sigurnosti i da bi se uvažila nesavršenost mernih transformatora.

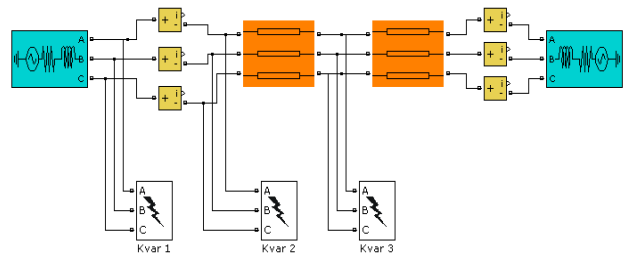
Prvi deo karakteristike je postavljen horizontalno, a drugi deo je pod uglom od 45° u odnosu na horizontalnu osu [5]. Ovaj nagib je potreban jer u realnim situacijama strujni transformatori na obe strane voda nisu identični, pa se pri velikim strujama usled kratkih spojeva van štice zone pojavljuje velika diferencijalna struja koja može izazvati nepotrebno delovanje releja.

Relej će reagovati ako se radna tačka, koju definišu efektivne vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje, bude našla unutar područja reagovanja releja, koja je obeležena na Sl. 3. U programu je uslov reagovanja releja postignut ukoliko efektivna vrednost diferencijalne struje bude veća od vrednosti diferencijalne struje prorade. Diferencijalnom strujom prorade se praktično modeluje karakteristika prorade releja. Da bi se obezbedilo sigurno reagovanje releja, signal za isključenje prekidača šalje se tek pošto uslov reagovanja bude ispunjen zadati broj puta. Preko ovog brojača, u obzir se može uzeti i realno vreme isključenja prekidača. U konkretnom slučaju, brojač je podešen na 20 provera, što za usvojenu periodu odabiranja znači vremensko kašnjenje od 20 ms za slanje signala prekidaču za isključenje.

Nakon isključenja faze koja je pogođena kvarom, startuje se vreme trajanja beznaponske pauze. Uvedeno je dvociklično automatsko ponovno uključjenje, pri čemu je prva beznaponska pauza po pravilu kraća od druge. Ako kvar nije prolazan, nakon drugog ciklusa, sledi trajno isključenje sve tri faze.

### C. Simulacija kvara

U programskom paketu MATLAB/Simulink postoji poseban blok kojim se simulira kratak spoj. Unutar bloka moguće je definisati tip kvara i trenutak njegovog nastanka. Takođe, može se precizirati i trenutak prestanka kvara (ako je kvar prolazan). Ovo je izuzetno korisno ako se želi proveriti rad automatskog ponovnog uključjenja prekidača. Na Sl. 4 prikazana su mesta gde su simulirani kvarovi.



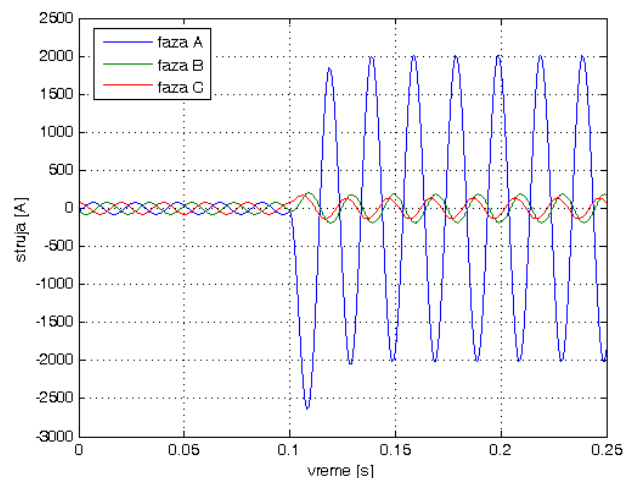
Slika 4. Šema sa prikazom mesta gde su simulirani kvarovi.

## IV. PRIKAZ REZULTATA

U ovom delu biće prikazani rezultati simulacija. Kvarovi su simulirani unutar i izvan zone diferencijalne zaštite. Na Sl. 4 mogu se videti tri pozicije gde su simulirani kvarovi.

### A. Kvar 1

Prvi kvar načinjen je van zone delovanja zaštite. Na Sl. 5 prikazane su tri faze struje merene na početku voda pri kratkom spoju faze A sa zemljom na poziciji *Kvar 1*. Može se primetiti da pri kvaru van zone zaštite nema isključenja prekidača jer se struja ne prekida. Jedino se može uočiti povećana vrednost struje u fazi A od trenutka nastanka kvara (100 ms). Struje u drugim fazama imaju veće vrednosti u odnosu na one koje su imali pre nastanka kvara. To je posledica magnetske sprege faza dalekovoda.



Slika 5. Talasni oblici struja sve tri faze, merene sa leve strane voda pri *Kvaru 1*.

### B. Kvar 2

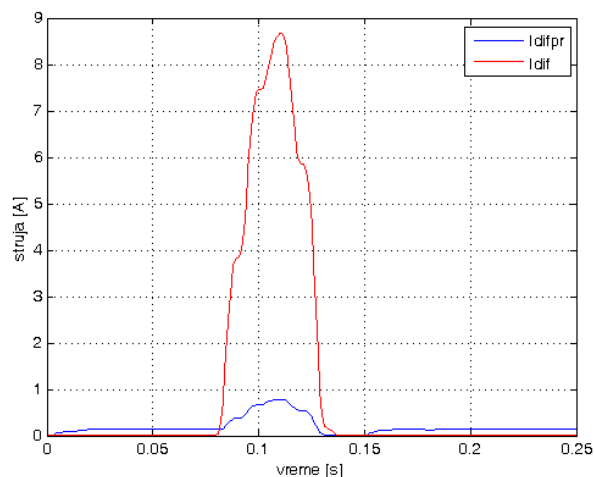
Drugi kvar je načinjen u blizini strujnih transformatora, ali unutar zone zaštite. Na Sl. 4 pozicija kvara je obeležena kao *Kvar 2*. Simuliran je dvofazan kratak spoj faza B i C koji je prolaznog karaktera. Pretpostavljeno je da se

kvar desio u trenutku 80 ms, a da je njegov prestanak usledio 30 ms kasnije.

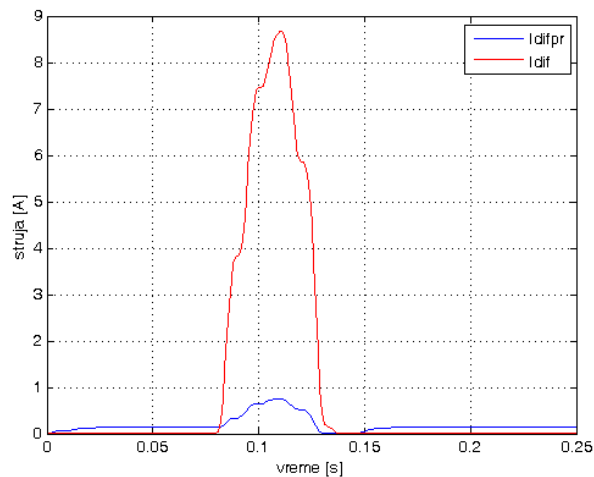
Trajanje prve beznaponske pauze podešeno je na 60 ms, a druge na 100 ms da bi prikaz rezultata bio pregledniji.

Na Sl. 6 i Sl. 7 prikazani su talasni oblici struja u sve tri faze koje se preko strujnih transformatora dovode releju sa leve, odnosno desne strane voda. Kvar se detektuje u obe faze u trenutku 84 ms, a isključuje se u trenutku 108 ms. Nakon isteka prve beznaponske pauze, ide se na ponovno uključenje prekidača u fazama B i C (trenutak 144 ms). Pošto je kvar prolazan, sistem nesmetano nastavlja sa radom. Struja u fazi A se nijednog trenutka ne prekida.

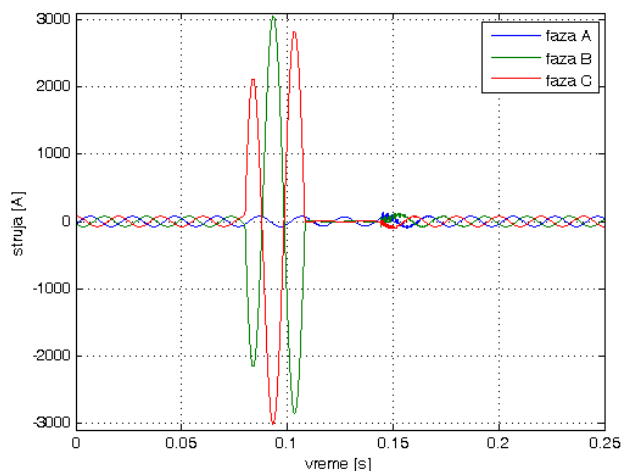
Promene efektivnih vrednosti merene i podešene diferencijalne struje za faze B i C prikazane su na Sl. 8 i Sl. 9. Može se videti kako efektivna vrednost merene diferencijalne struje postaje veća od efektivne vrednosti diferencijalne struje prorade releja, što predstavlja uslov reagovanja releja.



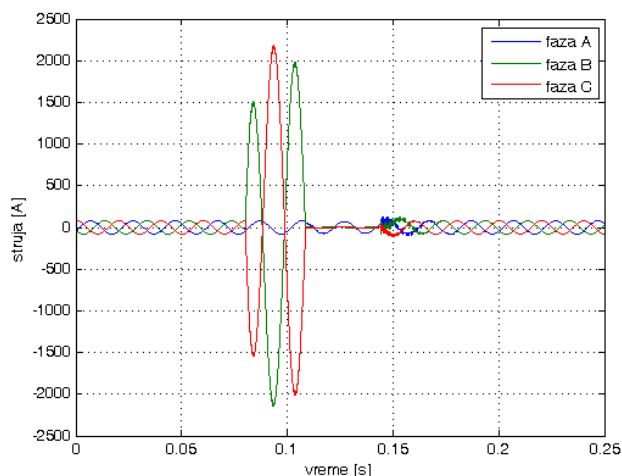
Slika 8. Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade za fazu B pri *Kvaru 2*.



Slika 9. Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade za fazu C pri *Kvaru 2*.

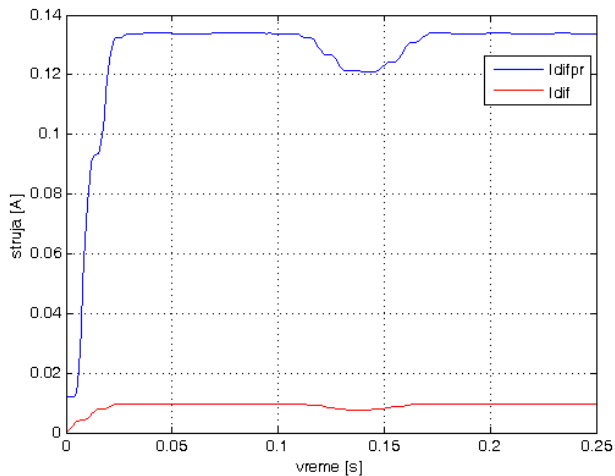


Slika 6. Talasni oblici struja u sve tri faze koje se preko strujnih transformatora dovode releju sa leve strane voda pri *Kvaru 2*.

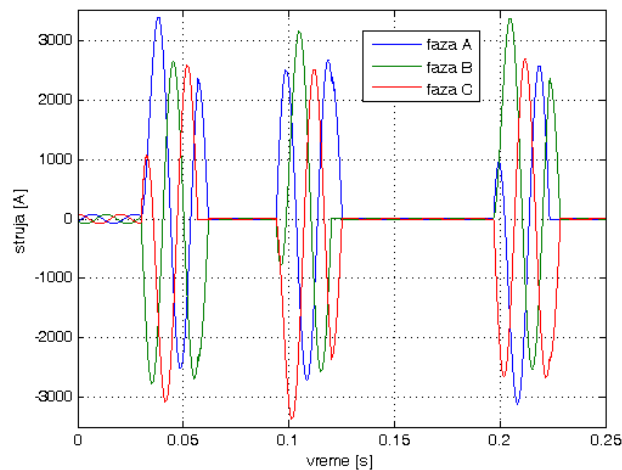


Slika 7. Talasni oblici struja u sve tri faze koje se preko strujnih transformatora dovode releju sa desne strane voda pri *Kvaru 2*.

Struja u fazi A menja se tokom manipulacija prekidačima u fazama koje su pogođene kvarom, ali se ne prekida. Promena amplitude struje faze A uslovljena je magnetskom spregom faza dalekovoda. Na Sl. 10 je prikazana promena efektivne vrednosti merene i podešene diferencijalne struje za fazu A. Jasno se vidi da efektivna vrednost diferencijalne struje nijednog trenutka ne prelazi vrednost diferencijalne struje prorade releja.



Slika 10. Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade za fazu A pri Kvaru 2.

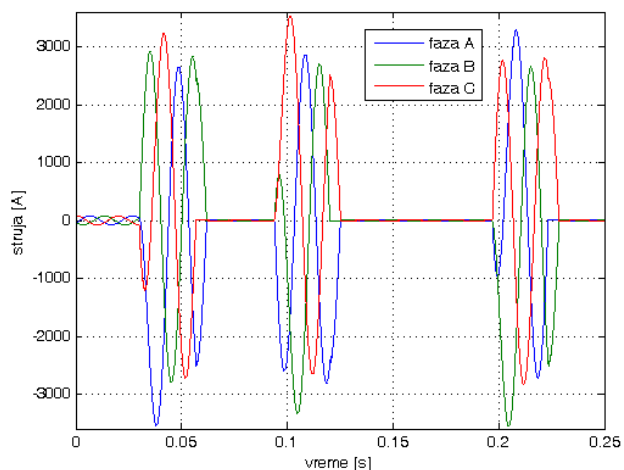


Slika 12. Talasni oblici struja u sve tri faze koje se preko strujnih transformatora dovode releju sa desne strane voda pri Kvaru 3.

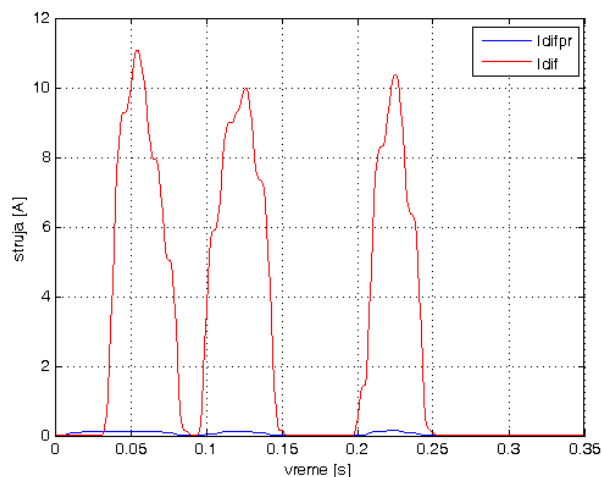
### C. Kvar 3

Treći kvar je načinjen na sredini voda. Simuliran je trofazni kratak spoj. Pretpostavljeno je da se kvar desio u trenutku 30 ms. Na Sl. 11 i Sl. 12 mogu se videti talasni oblici struja u sve tri faze, koje se preko strujnih transformatora dovode releju sa obe strane dalekovoda. Kvar se detektuje u trenucima 34 ms u fazama B i C, odnosno u trenutku 35 ms u fazi A. Isključenje kvara je usledilo u trenucima 62 ms u fazama A i B, odnosno u trenutku 57 ms u fazi C. Nakon prve beznaponske pauze poslali su signali za uključjenje prekidača u sve tri faze (trenutak 94 ms). Pošto kvar nije prolazan, zaštita ponovo reaguje i nakon druge beznaponske pauze, usledilo je trajno isključenje prekidača u sve tri faze.

Promene efektivnih vrednosti merene i podešene diferencijalne struje za faze A, B i C prikazane su na Sl. 13, Sl. 14 i Sl. 15. Može se videti kako efektivna vrednost diferencijalne struje postaje veća od efektivne vrednosti diferencijalne struje prorade releja, što predstavlja uslov reagovanja releja.



Slika 11. Talasni oblici struja u sve tri faze koje se preko strujnih transformatora dovode releju sa leve strane voda pri Kvaru 3.



Slika 13. Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade za fazu A pri Kvaru 3.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen algoritam za rad podužne diferencijalne zaštite vodova sa primenom automatskog ponovnog uključanja prekidača. Predviđeno je da algoritam radi u realnom vremenu. Najpre je formiran model elektroenergetskog sistema, a zatim je testiran algoritam podužne diferencijalne zaštite. Pri testiranju, variran je položaj kvara, vrsta kvara, trenutak kvara, trajan i prolazan kvar. U svim razmatranim situacijama, algoritam se pokazao kao veoma brz, osetljiv i selektivan.

## LITERATURA

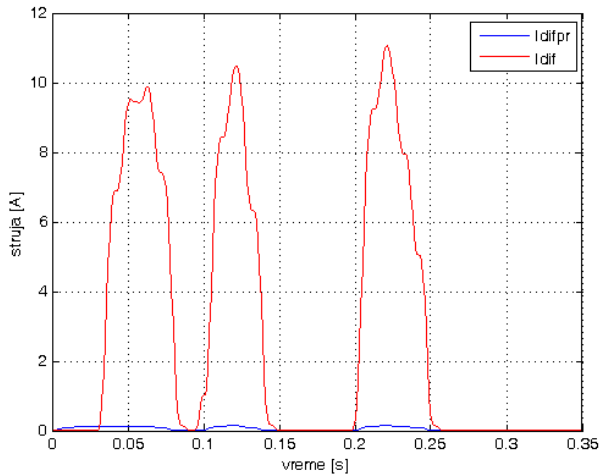
- [1] Milenko Đurić, Elementi elektroenergetskih sistema, Beograd 2009.
- [2] Z. Stojković, J. Mikulović, Z. Stojanović, "Praktikum iz softverskih alata u elektroenergetici", Akademska misao, Beograd, 2006.
- [3] M. Đurić, Z. Stojanović, "Relejna zaštita", Beopres, Beograd, 2014.
- [4] M. Đurić, V. Terzija, Z. Radojević, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, S. Zubić, V. Bajić, "Algoritmi za digitalne relejne zaštite", ETA, Beograd, 2012.
- [5] Line Differential Protection with Distance Protection 7SD52/53, SIPROTEC-Manual.
- [6] Nan Zhang, Mladen Kezunovic, "A real time fault analysis tool for monitoring operation of transmission line protective relay", Electric Power Systems Research 77 (2007) 361–370.
- [7] Yoon-Sung Cho, Chul-Kyun Lee, "Design and implementation of a real-time training environment for protective relay", Electrical Power and Energy Systems 32 (2010) 194–209.

## ABSTRACT

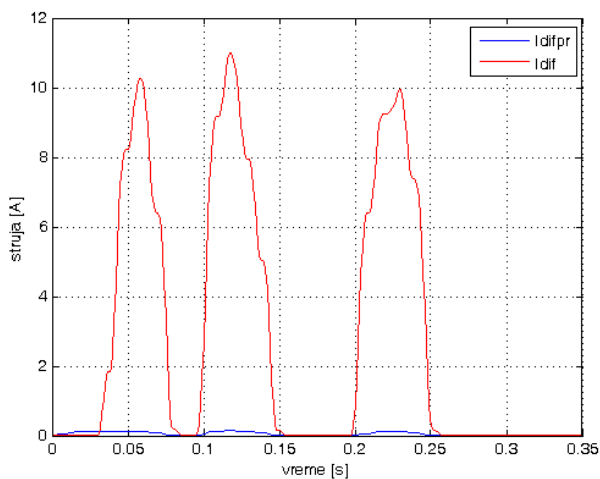
Faults near facilities must be turned off quickly because of the transient stability of the power system. Differential protection could be applied for a fast and selective protection of transmission lines. This paper describes an algorithm for implementation of longitudinal differential protection of transmission lines using circuit breakers with automatic reclosing. The aim of the simulation is to show the real time operation of the relay. The algorithm is applied to a three-phase model of the transmission line formed by the software package MATLAB / Simulink.

## LONGITUDINAL DIFFERENTIAL PROTECTION OF LINES WITH AUTOMATIC RECLOSING

Tomislav Rajić, Zoran Stojanović



Slika 14. Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade za fazu B pri Kvaru 3.



Slika 15. Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade za fazu C pri Kvaru 3.