

Simulacija podužne diferencijalne zaštite dalekovoda sa primenom dodatne stabilizacije i sistema APU

TOMISLAV D. RAJI, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehni ki fakultet, Beograd

ZORAN N. STOJANOVI, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehni ki fakultet, Beograd

Stru ni rad

UDC: 6621.314.224:621.316.9

DOI: 10.5937/tehnika1606861R

U ovom radu objašnjen je algoritam za podužnu diferencijalnu zaštitu dalekovoda uz primenu automatskog ponovnog uklju enja. Upotreba klasi ne stabilizacije nije dovoljna da bi se izbeglo nepotrebno reagovanje zaštite, ukoliko do e do zasi enja strujnih transformatora. Ovakav problem može se javiti prilikom kvara van št i ene deonice dalekovoda. Prikazano je kako se bez dodatne stabilizacije može javiti nepotrebno reagovanje releja za kvarove van št i ene zone. Simulirane su razli ite vrste kvarova i upore eno je kako relej reaguje kada postoji i kada ne postoji dodatna stabilizacija. Simulacije su vršene na trofaznom modelu dalekovoda formiranog pomo u programskog paketa MATLAB/Simulink.

Klju ne re i: diferencijalna zaštita, strujni transformatori, zasi enje, stabilizacija

1. UVOD

Princip podužne diferencijalne zaštite zasniva se na pore enju struja na po etku i kraju voda. Št i ena zona odre ena je položajem strujnih transformatora sa kojih se dovode signali diferencijalnom releju. Zasi enje strujnih transformatora predstavlja jedan od problema koji može uticati na pravilan rad diferencijalne zaštite [1-2].

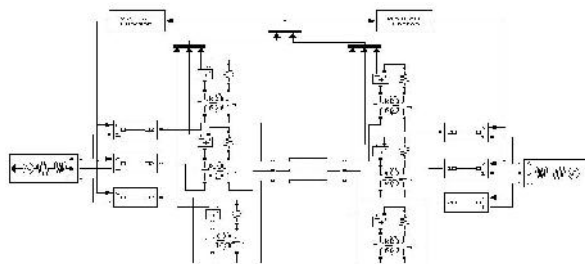
Na osnovu iskustvenih podataka i literature, realizovan je algoritam diferencijalnog releja koji radi u realnom vremenu i primenjen je na trofazni model dalekovoda kreiranog pomo u programskog paketa Matlab [1-7]. Formiran je i model strujnog transformatora kako bi se prikazao uticaj zasi enja [4-5, 8]. Kriterijum za rad releja obuhvata i dodatnu stabilizaciju [9]. Cilj ovog rada jeste da se prikaže uticaj dodatne stabilizacije na diferencijalnu zaštitu dalekovoda.

Testiran je i upore en rad diferencijalne zaštite dalekovoda kada se koristi i kada se ne koristi dodatna stabilizacija. Prikazani su rezultati simulacija razli itih vrsta kvarova. Time se može uvideti pun smisao koriš enja dodatne stabilizacije. U okviru algoritma, implementiran je i sistem automatskog ponovnog uk-

lju enja prekida a.

2. MODELOVANJE MREŽE

Za model voda izabrani su parametri 110 kV dalekovoda. Sa obe strane dalekovoda nalaze se "jake" mreže. Model dalekovoda za simulaciju algoritma formiran je pomo u programskog paketa MATLAB/Simulink i prikazan je na slici 1 [1-7].



Slika 1 - Model za simulaciju podužne diferencijalne zaštite dalekovoda

Relej je u modelu implementiran pomo u bloka Matlab function. Na ulaz bloka dovode se strujni signali iz svake faze i sa obe strane dalekovoda. Za periodu odabiranja, T_{od} , podešena je vrednost od 1 ms

3. MODELOVANJE STRUJNIH TRANSFORMATORA

Na levoj strani št i enog voda formiran je model strujnog transformatora sa slede im karakteristikama:

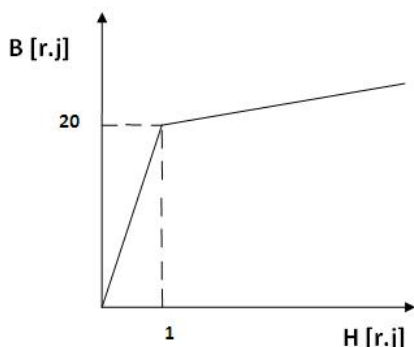
Adresa autora: Tomislav Raji, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehni ki fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 05.10.2016.

Rad prihva en: 08.11.2016.

prenosni odnos 100/1 A/A, snaga 10 VA, složena greška je 10, a grani ni faktor ta nosti 20 (10P20) [4]. Radi jednostavnosti, implementirana je linearna karakteristika magne enja (slika 2). Prvom delu karakteristike odgovara složena greška od 10%, koju strujni transformator ini za primarne struje do $20I_n$. Drugom delu karakteristike odgovara prakti no horizontalno postavljena poluprava, kojom je modelovano duboko zasi enje strujnog transformatora [5, 8].

Strujni transformatori na desnoj strani voda modelovani su tako da prakti no nikada ne ulaze u zasi enje i ne prave nikakvu složenu grešku. Njihove karakteristike bi se poklapale sa ordinatnom osom na slici 2.



Slika 2 - Karakteristika magne enja strujnih transformatora koji se nalaze sa leve strane voda

U realnosti, dva identna strujna transformatora ne postoje, pa bili oni iste klase ta nosti i istog proizvo a a. Drugim re ima, greška prilikom preslikavanja struja na krajevima voda mora postojati. Teorijski, jedan strujni transformator može praviti pozitivnu, a drugi negativnu grešku, a da budu iste klase ta nosti. Tada bi se javila i ve a diferencijalna struja od one dobijene u ovom radu.

U oblasti zasi enja strujnih transformatora više nema garantovane ta nosti i tada greške postaju daleko ve e, bez ikakvih ograni enja. Ako su na krajevima voda instalirani strujni transformatori razli itih proizvo a a, tada ne moraju oba u i u zasi enje, ve samo jedan.

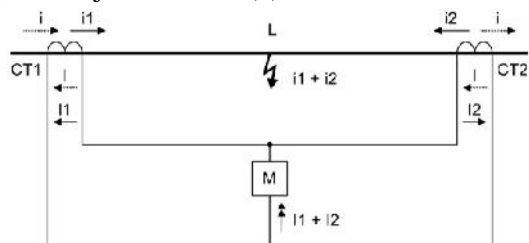
Imaju i prethodno u vidu, diferencijalna struja, koja je posledica razli itih karakteristika strujnih transformatora modelovanih u ovom radu, može se smatrati realnom.

4. MODELOVANJE RELEJA

Na slici 3 prikazan je princip rada podužne diferencijalne zaštite. Ako bi struje, koje se dovode relejima sa razli itih krajeva voda, bile potpuno iste, njihova razlika bi bila jednaka nuli. Me utim, u realnosti, u režimu bez kvara, uvek postoji razlika struja merenih na dva kraja voda zbog nesavršenosti strujnih transformatora i struje odvo enja duž voda.

Ukoliko se kvar dogodi unutar št ene zone, smer struje sa desne strane se menja, te se uspostavlja struja kroz diferencijalni relej M, koji tada reaguje.

Trenutna vrednost diferencijalne struje ra una 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):



Slika 3 - Princip rada podužne diferencijalne zaštite vodova

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

Za realizaciju algoritma, neohodno je formirati deset registara, po tri za svaku fazu. U jedan registar smeštaju se odbirci struje koja se dovodi releju sa leve strane voda, u drugi odbirci struje sa desne strane voda, a u tre i razlika ovih odbiraka (jedna ina 1). U itavanjem novog odbirka, u registrima se vrši pomeranje, tako da se prvi element registra izbacuje, a novi odbirak zauzima poslednje mesto. Svi ostali odbirci se pomeraju za jedno mesto u levo.

Na osnovu tekueg sadržaja registara (prozora podataka) vrši se prora un efektivnih vrednosti struja koje se dovode releju sa leve i sa desne strane voda, efektivne vrednosti diferencijalne struje i vrednost stabiizacije struje prema izrazima (2)-(5) [1-2, 6, 8-9]:

$$I_L = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m i_L(n)^2}{m}} \quad (2)$$

$$I_D = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m i_D(n)^2}{m}} \quad (3)$$

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

$$I_{stab} = I_L + I_D \quad (5)$$

gde su:

i_{dif} - n -ti odbirak diferencijalne struje,

$i_L(n)$ - n -ti odbirak struje koja se dovodi releju sa leve strane voda,

$i_D(n)$ - n -ti odbirak struje koja se dovodi releju sa desne strane voda,

m - broj odbiraka u osnovnoj periodi 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.

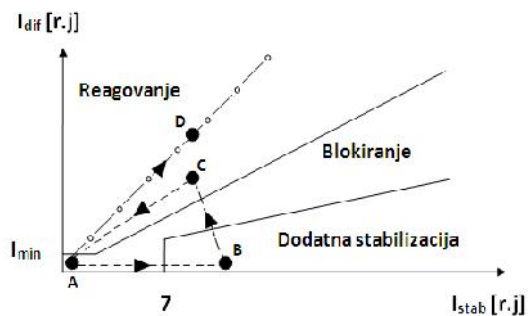
Na slici 4, punom linijom prikazana je karakteristika reagovanja diferencijalne zaštite [1-2, 5-9]. I_{min} je struja kojom je definisan najniži prag reagovanja releja. Minimalna prorađana struja podešena je na 25% naznačene struje strujnih transformatora [1-2].

Prvi deo karakteristike postavljen je horizontalno, a drugi deo je pod uglom od 20° u odnosu na horizontalnu osu [1-2]. Releji reagovati ako se radna tačka, koju definišu efektivne vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje, bude našla unutar područja reagovanja releja.

Na slici 4 prikazane su trajektorije koje opisuje radna tačka u zavisnosti od mesta kvara.

Poziciju radne tačke definišu efektivne vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje releja. Tačka A odgovara radnom režimu pre nastanka kvara. Releji reagovati ako se radna tačka nađe unutar zone reagovanja, koja je obeležena na slici 4.

Ako se desi kvar unutar zone zaštite i to recimo na sredini voda, diferencijalna i stabilizaciona struja praktično postaju jednake. Radna tačka se kretati po liniji koja je prikazana kao crta-tačka-crta i zauzeti položaj označen slovom D. Ovakav scenario dovodi do pravilnog reagovanja releja [9].



Slika 4 - Karakteristika reagovanja diferencijalne zaštite sa primenom dodatne stabilizacije

Isprekidnom linijom (slika 4), prikazano je kretanje radne tačke tokom kvara van zone zaštite, pri kome dolazi do zasićenja strujnih transformatora. Nakon nastanka takvog kvara, vrednost stabilizacione struje drastično poraste (bude veća od $7I_n$), dok vrednost diferencijalne ostane mala, čak i ispod minimalnog praga reagovanja zaštite (tačka B).

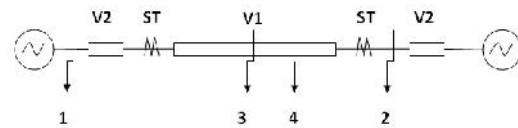
Razlog za to leži u činjenici da jezgra strujnih transformatora ne mogu trenutno da se zasite. Tek

pošto dođe do zasićenja, diferencijalna struja će postati veća i može izazvati nepotrebno reagovanje zaštite jer će radna tačka zaći u oblast reagovanja (tačka C) [9]. Releji treba da detektuju ovu trajektoriju i da blokiraju. Ako ne dodje do zasićenja, pri kvaru van zone zaštite, diferencijalna struja će uvek imati malu vrednost.

Nagib poluprave linije koja ograničava oblast dodatne stabilizacije sa gornje strane je 10° u odnosu na apscisnu osu. Ova poluprava bi u svom produžetku prošla kroz tačku lomljenja linije koja predstavlja karakteristiku reagovanja releja [9].

5. REZULTATI

Na slici 5 prikazane su pozicije simuliranih kvarova, a vrste kvarova date su u tabeli 1.



Slika 5 - Pozicije kvarova

Podužni pogonski parametri voda su: $r_d=0,12$ Ω/km , $l_d=1,3$ mH/km i $c_d=8,9$ nF/km dok su podužni nulti parametri voda: $r_o=0,32$ Ω/km , $l_o=4,1$ mH/km i $c_o=5$ nF/km [7]. Sa obe strane dalekovoda nalaze se "jake" mreže čija snaga trofaznog kratkog spoja iznosi 5000 MVA. Za odnos reaktanse i razistanse mreže usvojena je vrednost 2 [3].

Dva kvara simulirana su van zone reagovanja i to jedan sa leve strane voda (Kvar 1) i jedan sa desne strane voda (Kvar 2). Unutar zone reagovanja takođe su simulirana dva kvara. Pretpostavljeno je da se jedan desio na 50% voda (Kvar 3), a drugi na 80% voda (Kvar 4). Sa ST su označeni strujni transformatori. Štiteni vod označen je sa V1, a dužina je podešena na 80 km. Sa obe strane dodati su vodovi označeni sa V2 dužine po 5 km.

Tabela 1. Vrste kvarova i njihove pozicije

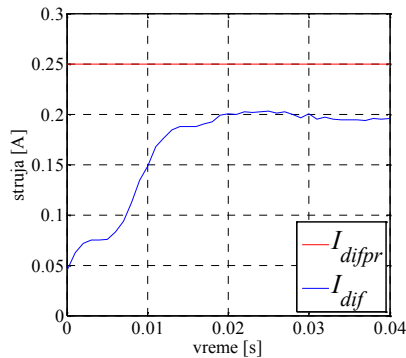
Pozicija kvara*	Vrsta kvara	Faze pogođene kvarom
Kvar 1	dvofazni	A i C
Kvar 2	trofazni	A, B i C
Kvar 3	jednofazni	A
Kvar 4	dvofazni sa zemljom	A i B

*Pozicije kvarova su usaglašene sa brojevima na slici 6

Radi preglednosti, na svim slikama su prikazane samo struje faze A. Zbog toga, faza A je u svim simulacijama obuhvaćena kvarom.

Trenutak kvara u svim simulacijama je $t=0,04$ s. Ovaj trenutak obezbe uje dovoljnu jednosmernu komponentu struje kvara u fazi A, koja e izazvati sigurno zasi enje strujnih transformatora sa leve strane štine deonice.

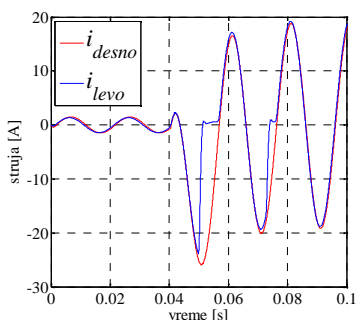
Na slici 6 prikazana je struja prorade releja i efektivna vrednost merene diferencijalne struje pre nastanka kvara.



Slika 6 - Promena efektivne vrednosti struje prorade i merene diferencijalne struje pre nastanka kvara

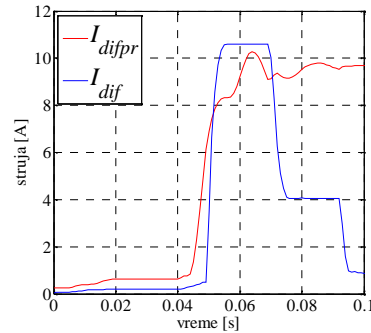
U slučaju kada nema kvara, merena diferencijalna struja I_{dif} ve a je od nule zbog nejednakih karakteristika ST-a i struje odvo enja duž voda, ali je uvek manja od struje prorade releja I_{difpr} . Diferencijalnom strujom prorade predstavljena je karakteristika reagonvanja releja i u režimu bez kvara jednaka je I_{min} .

Na slici 7 prikazane su trenutne vrednosti sekundarnih struja strujnih transformatora, koje se dovode releju sa leve (i_{levo}) i sa desne (i_{desno}) strane voda, pri Kvaru 1. Evidentno je da usled zasi enja strujnih transformatora dolazi do izobli enja sekundarne struje koja se dovodi releju sa leve strane voda.



Slika 7 - Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 1

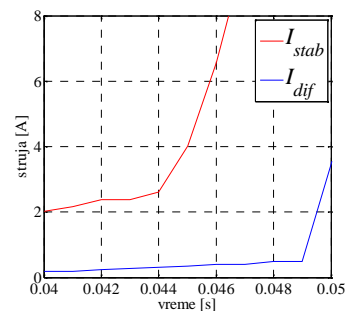
Promene efektivne vrednosti merene diferencijalne struje (I_{dif}) i diferencijalne struje prorade (I_{difpr}) prikazane su na slici 8. Releje reagovati kada efektivna vrednost merene diferencijalne struje bude ve a od efektivne vrednosti diferencijalne struje prorade. Budući da dolazi do presecanja krivih, releje bespotrebno reagovati, jer je u pitanju kvar van zone zaštite.



Slika 8 - Promena struje prorade i merene diferencijalne struje pri Kvaru 1

Na slici 9 prikazane su promene stabilizacione i diferencijalne struje pri istom kvaru.

Sa slike 9 jasno se može videti da kada stabilizaciona struja (I_{stab}) postane izrazito velika u trenutku $t_1=0,046$ s (ve a od $7 \cdot I_n$) diferencijalna struja još izvesno vreme ostaje mala i to je dovoljno da bi se obezbedilo blokiranje releja. Ovom trenutku odgovara radna ta ka obeležena slovom B na slici 4. Diferencijalna struja od trenutka $t_2=0,049$ s po inje naglo da raste i nešto kasnije postaje ve a od diferencijalne struje prorade. Na slici 8 može se uo iti da u trenutku $t_4=0,053$ s diferencijalna struje postaje ve a od diferencijalne struje prorade, iako se radi o kvaru van štine zone kada relej ne bi trebalo da reaguje. Ta ka C (slika 4) odgovara ovom trenutku. Diferencijalna struja postaje manja od diferencijalne struje prorade tek u trenutku $t_4=0,068$ s. Blokada releja ukida se posle podešene vremenske zadržke (nekoliko osnovnih perioda) ili kada merena diferencijalna struja padne ispod struje prorade).

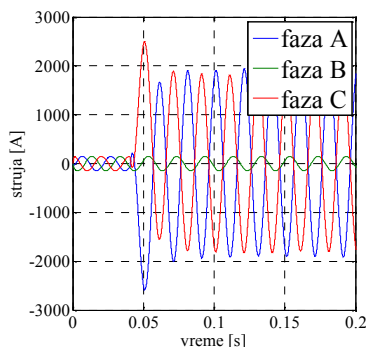


Slika 9 - Promena efektivne vrednosti merene stabilizacione i diferencijalne struje pri Kvaru 1

Struje koje teku po fazama voda pre i nakon nastanka kvara prikazane su na slici 10. Prikazane su samo struje koje teku kroz primarne namotaje strujnih transformatora na desnoj strani voda. Struje kroz primarne namotaje strujnih transformatora na levoj strani vode se zanemarljivo razlikuju pa nisu ni prikazane.

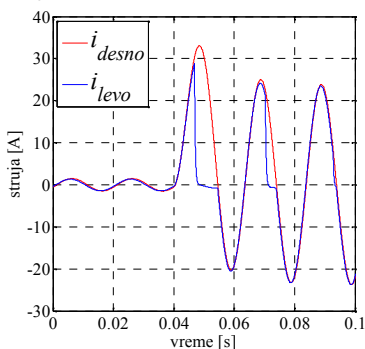
Uo ljiivo je da se struje u fazama A i C drasti no pove aju nakon nastanka kvara. Odgovaraju i prekida i u tim fazama se ne isklju uju jer relej blokira.

Struja u fazi B tako e se pove ala nakon nastanka kvara zbog elektromagnetne sprege izme u provodnika voda.

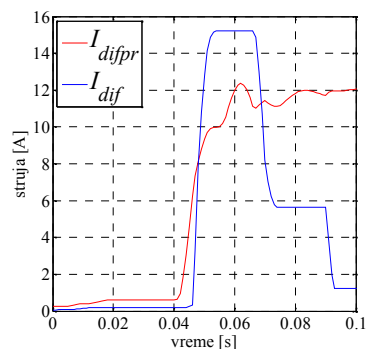


Slika 10 - Talasni oblici struja u sve tri faze merene sa desne strane voda pri Kvaru 1

Sli an scenario može se uvideti i na slikama 11, 12, 13 i 14 koje se odnose na Kvar 2.



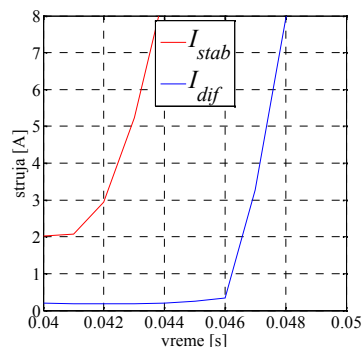
Slika 11 - Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 2



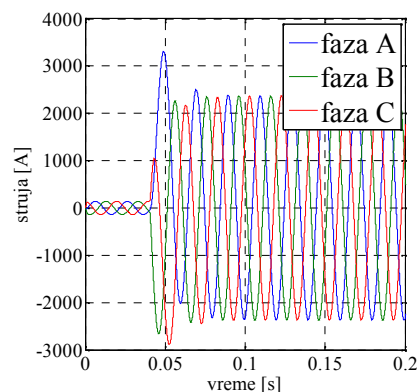
Slika 12 - Promena struje prorade i merene diferencijalne struje pri Kvaru 2

Na slikama 15, 16 i 17 prikazane su struje dobijene pri Kvaru 3 (trajan jednofazni kratak spoj unutar zone zaštite). Ubrzo nakon nastanka kvara, u trenutku $t_I=0,042$ s diferencijalna struja postaje ve a od struje prorade releja i takav odnos važi sve vreme, baš kako je i prikazano na slici 16.

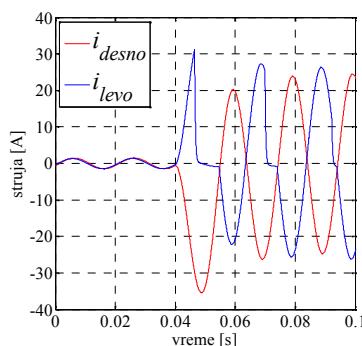
Na slici 17 može se videti da diferencijalna struja po vrednosti prati stabilizacionu. Ovom stanju odgovara radna ta ka obeležena slovom D na slici 4. Jasno je da u ovom slu aju zaštita ne e biti blokirana.



Slika 13 - Promena efektivne vrednosti merene stabilizacione i diferencijalne struje pri Kvaru 2



Slika 14 - Talasni oblici struja u sve tri faze merene sa desne strane voda pri Kvaru 2



Slika 15 - Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 3

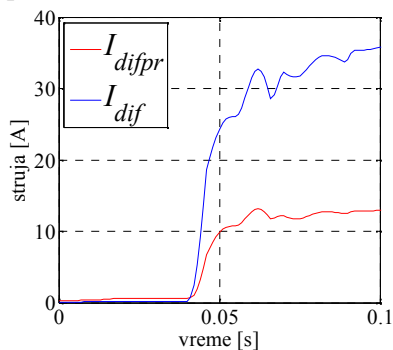
Slike 18 i 19 prikazuju struje primara strujnih transformatora sa leve i desne strane voda. Uo ljava je primena sistema automatskog ponovnog uklju enja prekida a u fazi A koja je jedina pogo ena kvarom.

Relej bi brzo reagovao i poslao signal ka prekida u, ali je to u algoritmu odloženo 60 ms kako bi se u simulaciji uvažilo vreme koje je potrebno da bi se kontakti prekida a razmakli i strujni luk, izme u njih, ugasio.

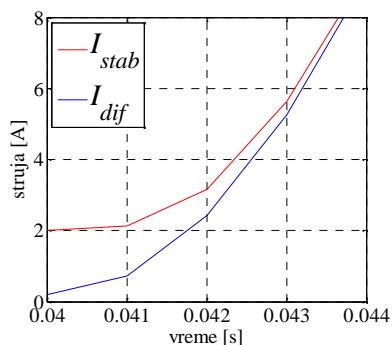
Nakon isklju enja kvara, sledi prva beznaponska pauza (40 ms) koja je kra a od druge (60ms). Iako su realna vremena beznaponskih pauza duža, u simulacijama su skra ena zbog preglednosti grafika. Nakon

isteka prve beznaponske pauze, u trenutku $t_2=0,143$ s, šalje se signal za uključivanje prekidača u fazi A.

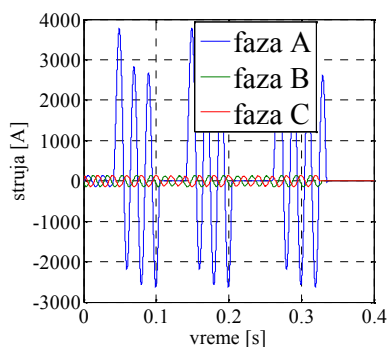
Ubrzo nakon toga, identifikuje se kvar i proces se ponavlja sa tom razlikom što druga beznaponska pauza traje 60 ms. Pošto je kvar trajan, relej vidi kvar i nakon isteka druge beznaponske pauze i šalje signal za isključivanje prekidača u svim fazama.



Slika 16 - Promena struje prorade i merene diferencijalne struje pri Kvaru 3



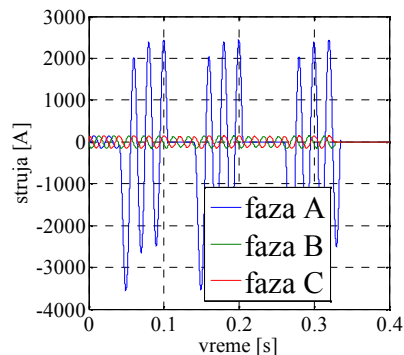
Slika 17 - Promena efektivne vrednosti merene stabilizacione i diferencijalne struje pri Kvaru 3



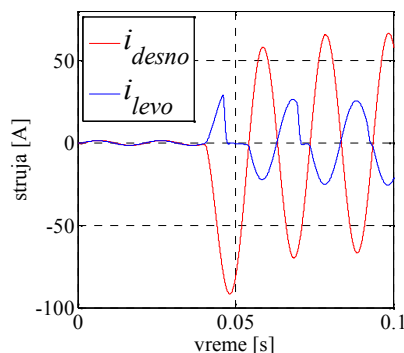
Slika 18 - Talasni oblici struja u sve tri faze merene sa leve strane voda pri Kvaru 3

Rezultati simulacija koje se odnose na Kvar 4 dati su na slikama 20, 21, 22, 23 i 24. U ovom slučaju radi se o prolaznom kvaru koji se prestanak dogodio tokom trajanja prve beznaponske pauze.

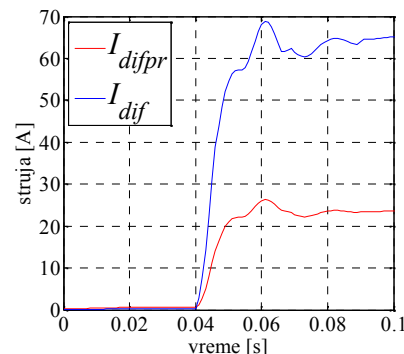
Budući da je kvar unutar zone zaštite, relej reaguje i isključuje faze A i B. APU u trenutku $t=0,144$ s izdaje nalog za uključivanje prekidača (slike 23 i 24), nakon čega sistem nastavlja normalno da funkcioniše.



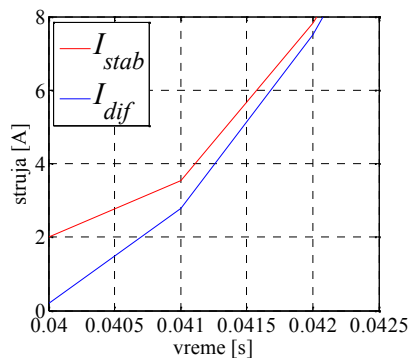
Slika 19 - Talasni oblici struja u sve tri faze merene sa desne strane voda pri Kvaru 3



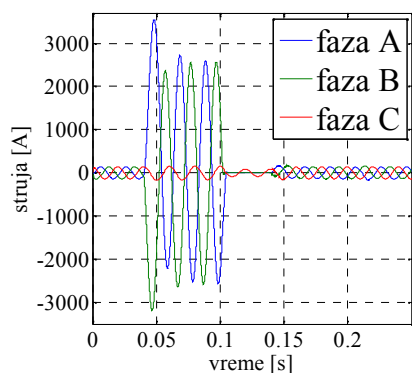
Slika 20 - Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 4



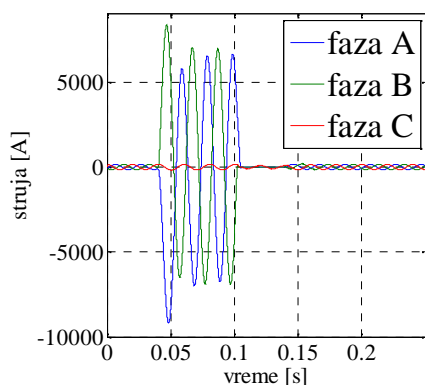
Slika 21 - Promena struje prorade i diferencijalne struje pri Kvaru 4



Slika 22 - Promena efektivne vrednosti merene stabilizacione i diferencijalne struje pri Kvaru 4



Slika 23 - Talasni oblici struja u sve tri faze merene sa leve strane voda pri kvaru 4



Slika 24 - Talasni oblici struja u sve tri faze merene sa desne strane voda pri kvaru 4

6. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena simulacija algoritma podužne diferencijalne zaštite vodova u realnom vremenu, sa primenom automatskog ponovnog uključenja prekidača. Pokazano je kako se nepotrebno reagovanje releja, izazvano zasićenjem strujnih transformatora, prevazilazi uvođenjem dodatne stabilizacije. Najpre je formiran model elektroenergetskog sistema, a zatim je testiran algoritam podužne diferencijalne zaštite. Pri testiranju, variran je položaj kvara i vrsta kvara kako bi

se pokazalo da algoritam ispravno funkcioniše u različitim situacijama. Rezultati simulacija pokazuju da upotreba dodatne stabilizacije efikasno otklanja navedeni problem.

7. ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta III 42009 Inteligentne energetske mreže koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] uri M, Stojanovi Z. *Relejna zaštita*, Beopres, Beograd, 2014.
- [2] uri M, Terzija V, Radojevi Z, uriši Ž, Stojanovi Z, Zubi S, Baji V. *Algoritmi za digitalne relejne zaštite*, ETA, Beograd, 2012.
- [3] uri M. *Elementi elektroenergetskih sistema*, Beopres, Beograd, 2009.
- [4] Nahman J, Mijailovi V. *Razvodna postrojenja*, Akademski misao, Beograd, 2015.
- [5] Stojkovi Z, Mikulovi J, Stojanovi Z. *Praktikum iz softverskih alata u elektroenergetici*, Akademski misao, Beograd, 2006.
- [6] Raji T, Stojanovi Z. Podužna diferencijalna zaštota vodova sa primenom automatskog ponovnog uključenja, *INFOTEH*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, Vol 14, pp. 180-185, Mart 2015.
- [7] EPS-JP Elektroistok, Osnovna tehnička dokumentacija, 2002.
- [8] Raji T, Stojanovi Z. Uticaj stabilizacione struje na podužnu diferencijalnu zaštitu dalekovoda, *INFOTEH*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, Vol 15, pp. 78-83, Mart 2016.
- [9] Differential Protection 7UT6x, SIPROTEC-Manual, pp 105-108

SUMMARY

SIMULATION OF LONGITUDINAL DIFFERENTIAL PROTECTION OF TRANSMISSION LINES WITH ADDITIONAL STABILIZATION AND APU SYSTEM

This paper explains the algorithm for the longitudinal differential protection of transmission lines with automatic reclosing. Classic stabilization is not sufficient for avoiding of unnecessary operations caused by saturation of current transformer. This problem can occur during the fault placed outside of the protected zone of the transmission line. It is shown how unnecessary operation can occur during the outside fault without using of additional stabilization. The different types of faults were simulated and comparison of relay operations with and without additional stabilization is presented. The simulations were performed on the three-phase model of the transmission line formed by using of MATLAB/Simulink program.

Key words: differential protection, current transformers, saturation, stabilization