

Uticaj stabilizacione struje na podužnu diferencijalnu zaštitu dalekovoda

Tomislav Rajić, Zoran Stojanović

Univerzitet u Beogradu

Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

rajic@etf.bg.ac.rs, stojanovic@etf.bg.ac.rs

Sadržaj—Za brzu i selektivnu zaštitu vodova može se primeniti diferencijalna zaštita. U ovom radu je objašnjen algoritam za podužne diferencijalne zaštite dalekovoda. Akcenat je stavljen na probleme koji se javljaju usled zasićenja strujnih transformatora. Korišćenje stabilizacione struje je način da se ovaj problem prevaziđe. U radu je prikazano kako se bez stabilizacije može javiti nepotrebno reagovanje releja za kvarove van štice zone. Simulirane su različite vrste kvarova i upoređeno je kako relej reaguje kada postoji i kada ne postoji stabilizaciona struja. Simulacije su vršene na trofaznom modelu dalekovoda formiranog pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink.

Ključne riječi— digitalna zaštita; diferencijalna zaštita vodova; stabilizaciona struja; zasićenje strujnih transformatora

I. UVOD

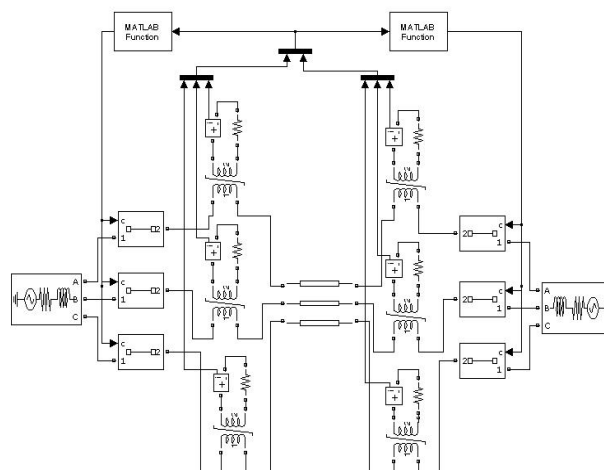
Princip podužne diferencijalne zaštite zasniva se na poređenju struja na početku i kraju voda. Štice zona određena je položajem strujnih transformatora sa kojih se dovode signali diferencijalnom releju. Na osnovu iskustvenih podataka i literature, realizovan je algoritam diferencijalnog releja i primenjen je na trofazni model dalekovoda pomoću programskog paketa Matlab [1]-[6]. Zasićenje strujnih transformatora predstavlja jedan od problema koji može uticati na pravilan rad diferencijalne zaštite. Nepotrebno reagovanje releja izaziva razlika sekundarnih struja strujnih transformatora koji se nalaze na različitim stranama voda i ovaj problem se upravo prevazilazi uvođenjem stabilizacione struje [5]-[7]. Cilj ovog rada je da se prikaže uticaj stabilizacione struje na diferencijalnu zaštitu dalekovoda. Testiran je i upoređen rad diferencijalne zaštite dalekovoda kada se koristi i kada se ne koristi stabilizaciona struja [8]. U poslednjem poglavlju prikazani su rezultati simulacija kvarova i proračuna struja relevantnih za kriterijum prorade relejne zaštite. Time se može uvideti pun smisao korišćenje stabilizacione struje.

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 izračunati su po uzoru na realan slučaj. Za model voda izabrani su 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 $c_o=5 \text{ nF}/\text{km}$. 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 kroz dalekovod. Impedansa mreže izračunava se 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 [1]-[4].

Releji 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. Na izlazu blokova generišu se komandni signali za uključivanje odnosno isključenje prekidača, u zavisnosti od toga da li je uslov reagovanja releja ispunjen.



Slika 1: Model za simulaciju podužne diferencijalne zaštite dalekovoda.

III. ALGORITAM ZA PODUŽNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU

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 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):

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

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) [4]-[7]:

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

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

gde su:

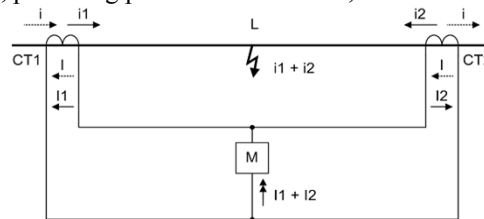
$i_{dif}(n)$ - n -ti odbirak diferencijalne struje,

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

m - broj odbiraka u osnovnoj 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.



Slika 2: Princip rada podužne diferencijalne zaštite vodova.

B. Karakteristike strujnih transformatora

Osnovna uloga strujnih transformatora jeste da proizvedu srazmerno smanjenu kopiju primarne struje, sa tačnošću koja zavisi od toga u koju se svrhu koriste. Razlikuju se strujni transformatori za zaštitu i za merenje. Jezgra strujnog transformatora za merenje moraju imati veliku tačnost tokom normalnog radnog režima, dok je kod jezgara za zaštitu tačnost važna u režimima sa kvarom.

Pod tačnošću se podrazumeva vrednost amplitude i fazni stav izmerene veličine u odnosu na merenu vrednost. Složena greška obuhvata strujnu i faznu grešku, kao i uticaj jednosmerene i višeharmoničnih komponenti u struji.

Standardne vrednosti naznačene sekundarne struje su 1 A i 5 A. Strujni transformatori sa naznačenom strujom 1 A upotrebljavaju se u slučaju većih udaljenosti između strujnih transformatora i priključenih releja, kako bi, uz iste gubitke, bila omogućena upotreba poveznih vodova manjeg preseka. Standardne vrednosti naznačenih snaga za strujne transformatore za zaštitu su: 10, 15, 30, 45 i 60 VA.

Za strujne transformatora za zaštitu definišu se faktor tačnosti i klasa tačnosti. Faktor tačnosti predstavlja umnožak primarne struje pri kojoj složena greška strujnog transformatora na prelazi dozvoljenu vrednost složene greške. Standardne vrednosti faktora tačnosti su: 5, 10, 15, 20 i 30. Klasa tačnosti predstavlja graničnu vrednost apsolutne strujne greške u (%). U oznaci klase tačnosti strujni transformatori i jezgra za zaštitu imaju simbol "P" (od reči *Protection*-zaštita). Standardne klase tačnosti strujnih transformatora za zaštitu su 5P i 10P. Primera radi, simbol 5P10, označava da složena greška strujnog transformatora za zaštitu nije veća od 5 % pri primarnoj struji 10 puta većoj od naznačene vrednosti [3].

U prikazanom modelu mreže na Sl. 1 mogu se uočiti strujni transformatori. Pomoću programskog paketa Matlab/Simulink, formirani su modeli strujnih transformatora. Cilj je da se pokaže kako zasićenje strujnih transformatora može izazvati nepotrebno reagovanje zaštite za kvarove van štićene zone ako nema korišćenja stabilizacione struje. U tu svrhu formirani su modeli strujnih transformatora na oba kraja voda pri čemu se njihove karakteristike razlikuju. Unutar bloka kojim se predstavlja strujni transformator mogu se zadati parametri transformatora i njihova kriva magnećenja.

Na levoj strani štićenog voda formiran je model strujnog transformatora sa sledećim karakteristikama: prenosni odnos 100/1 A/A, snaga 10 VA, faktor tačnosti 10 i klasa tačnosti 10 (10P10). Radi jednostavnosti, implementirana je linearna karakteristika magnećenja (Sl. 3). Prvom delu

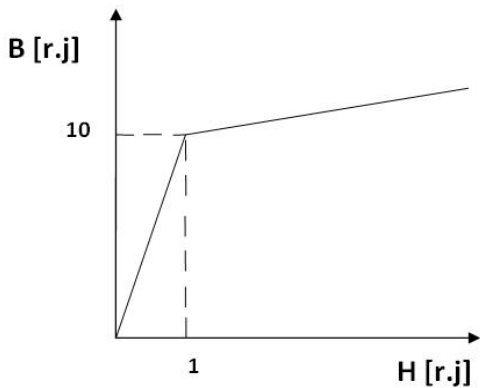
karakteristike odgovara složena greška od 10%, koju strujni transformator čini za primarne struje do $10I_n$. Drugom delu karakteristike odgovara praktično horizontalna poluprava, kojom je modelovano duboko zasićenje strujnog transformatora.

Strujni transformatori na desnoj strani voda modelovani su karakteristikom kojoj odgovara složena greška od 1% za primarne struje do $50I_n$. Na taj način, dobija se strujni transformator visoke tačnosti koji praktično nikada ne ulazi u zasićenje. Njegova karakteristika je skoro vertikalna linija i zbog preglednosti nije prikazana na Sl. 3. Strujni transformator sa ovakvom karakteristikom u realnosti ne postoji, a razlog za ovakvo podešenje leži u tome da se dobije drastična razlika u sekundarnim strujama transformatora, koji se nalaze na levom i na desnom kraju voda.

C. 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 šticećenja. 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 šticećenog voda. Zato je potrebno, u postupku podešenja releja, uzeti u obzir mogućnosti nastanka struje debalansa i eliminisati njen uticaj na reagovanje zaštitnog uređaja.



Slika 3: Karakteristika magnećenja strujnih transformatora koji se nalaze sa leve strane voda.

U simulacijama nije uzet u obzir jedino uticaj kašnjenja digitalnog komunikacionog kanala.

Kapacitivne struje su posledica kapacitivnosti dalekovoda prema zemlji, ali i kapacitivnosti jedne faze prema drugim fazama. Ove struje su uzrok razlike primarnih 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. Kapacitivna struja odvođenja može se odrediti prema izrazu [8]:

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

gde je:

U_N - naznačeni napon voda (kV),

f_N - naznačena frekvencija u sistemu (Hz),

c_d - podužna kapacitivnost (nF/km),

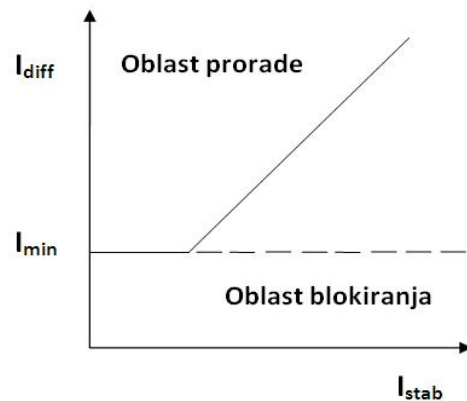
L - dužina voda (km),

Jednostavan način eliminisanja uticaja struje debalansa je primena karakteristike reagovanja releja, prikazane na Sl. 4 [1], [5]-[8].

I_{min} je struja kojom je definisan najniži prag reagovanja releja. Minimalna proradna struja I_{min} , odnosno prag osjetljivosti releja, predstavlja upravo meru predostrožnosti za moguće struje neravnoteže. Minimalna proradna struja podešena je na 25% naznačene struje strujnih transformatora [1].

Prvi deo karakteristike postavljen je horizontalno, a drugi deo je pod uglom od 45° u odnosu na horizontalnu osu [8]. Ovaj nagib je neophodan jer u realnim situacijama strujni transformatori na obe strane voda nisu identični, pa se pri velikim strujama, usled kratkih spojeva van šticećene zone, pojavljuje velika diferencijalna struja, koja može izazvati nepotrebno delovanje releja. Isprekidanom linijom na Sl. 4 prikazana je karakteristika reagovanja releja kada se ne uzima u obzir uticaj stabilizacije.

Relej će reagovati ako se radna tačka, koju definišu efektivne vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje, bude našla unutar područja reagovanja releja. Uslov reagovanja releja je postignut ukoliko efektivna vrednost merene diferencijalne struje bude veća od vrednosti diferencijalne struje prorade, koja je definisana karakteristikom sa Sl. 4.



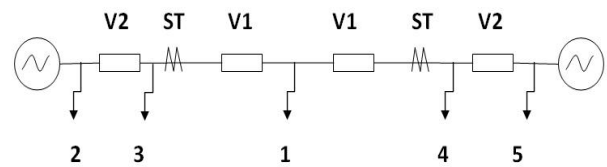
Slika 4: Karakteristika reagovanja releja.

IV. PRIKAZ REZULTATA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacija. Na Sl. 5 prikazane su pozicije kvarova, a vrste kvarova date su u Tabeli 1.

Jedan kvar je simuliran unutar zone reagovanja (Kvar 1), a ostali van zone reagovanja diferencijalne zaštite

(Kvarovi 2-5). Sa ST su označeni strujni transformatori. Vod koji se štiti, podeljen je na dva jednaka dela označena sa V1, svaki dužine 40 km. Između strujnih transformatora i "jakih" mreža nalaze se vodovi označeni sa V2. Ovi vodovi imaju iste parametre kao i vodovi označeni sa V1 samo im je dužina 10 km.



Slika 5: Pozicije kvarova.

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

Trenutak kvara u svim simulacijama je $t=0,04$ s. Ovaj trenutak obezbeđuje dovoljnu jednosmernu komponentu struje kvara u fazi A, koja će izazvati sigurno zasićenje strujnih transformatora sa leve strane štice deonice.

Na Sl 6 prikazana je minimalna struja prorade releja i efektivna vrednost merene diferencijalne struje pre nastanka kvara. U slučaju kada nema kvara efektivna vrednost diferencijalne struje je uvek manja od minimalne struje prorade releja.

Na Sl. 7, Sl 9, Sl 11, Sl 13 i Sl 15 prikazane su trenutne vrednosti sekundarnih struja strujnih transformatora, koje se dovode releju sa leve (i_{levo}) i sa desne (i_{desno}) strane voda. Evidentno je da usled zasićenje strujnih transformatora dolazi do izobličenja sekundarne struje koja se dovodi releju sa leve strane voda.

Na Sl. 8, Sl 10, Sl 12, Sl 14 i Sl 16 prikazane su promene efektivne vrednosti merene diferencijalne struje (I_{diff}) i diferencijalne struje prorade kada ima stabilizacije (I_{reg}) i kada nema stabilizacije (I_{min}). Relej će reagovati kada efektivna vrednost merene diferencijalne struje bude veća od efektivne vrednosti diferencijalne struje prorade.

Kada nema stabilizacije, diferencijalna struja prorade je konstantna i jednaka je najnižem pragu reagovanja releja. Kada nastane kvar, efektivna vrednost merene diferencijalne struje raste. Sa pomenutih slika može se videti da će relej, pri ovakvom uslovu, reagovati pri svim kvarovima bez obzira da li su oni nastali unutar ili van zone reagovanja diferencijalne zaštite.

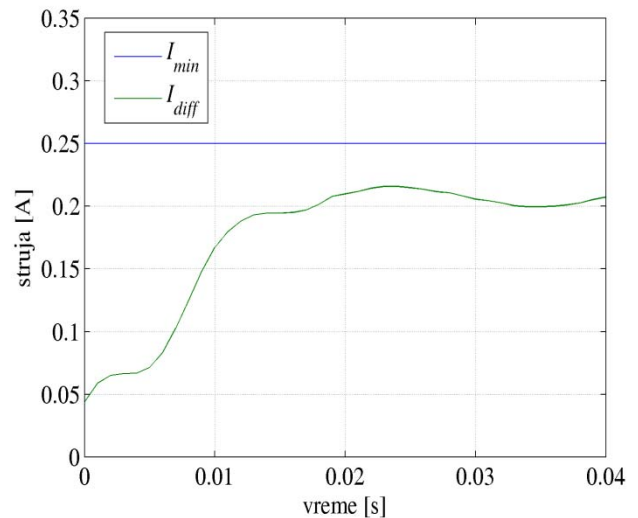
Kada postoji stabilizacija, pre nastanka kvara efektivna vrednost diferencijalne struje prorade biće jednaka najnižem pragu reagovanja releja, jer je efektivna vrednost merene diferencijalne struje mala. Kada nastane kvar, efektivna vrednost merene diferencijalne struje raste. Međutim, tada raste i efektivna vrednost diferencijalne struje prorade, jer se uzima uticaj stabilizacione struje. To za posledicu ima da relej neće reagovati za kvarove van štice deonice. Sa Sl 7 se vidi da će pri Kvaru 1 efektivna vrednost diferencijalne struje nadmašiti efektivnu vrednost diferencijalne struje prorade i da će to usloviti reagovanje releja. Reagovanje releja u ovom slučaju je i potrebno jer se Kvar 1 nalazi unutar zone zaštite. Pri svim ostalim kvarovima neće biti reagovanja diferencijalne zaštite.

Sa Sl 8 može se uočiti da vreme detektovanja kvara, koji se dešava unutar zone reagovanja, u slučaju kada nema stabilizacije iznosi 1 ms, a u slučaju kada ima stabilizacije 5 ms. Kada nema stabilizacije, vreme reagovanja je kraće ali je zato zaštita neselektivna pri kvarovima van štice deonice.

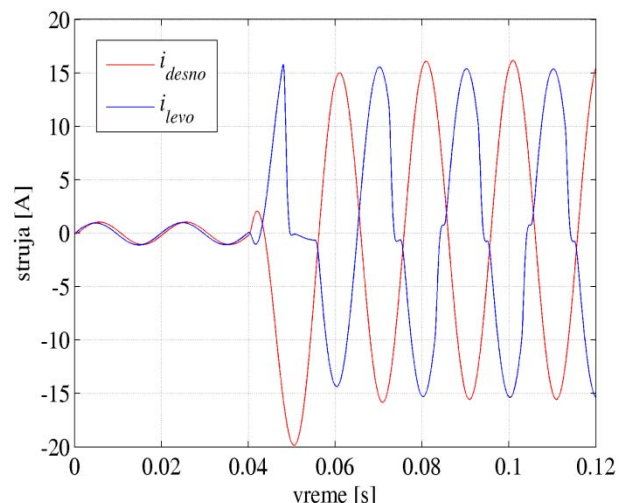
TABELA 1 Vrste kvarova i njihove pozicije

Pozicija kvara	Vrsta kvara	Faze pogodene kvarom
Kvar 1	dvofazni	A i C
Kvar 2	jednofazni	A
Kvar 3	dvofazni sa zemljom	A i B
Kvar 4	trofazni	A, B i C
Kvar 5	dvofazni sa zemljom	A i C

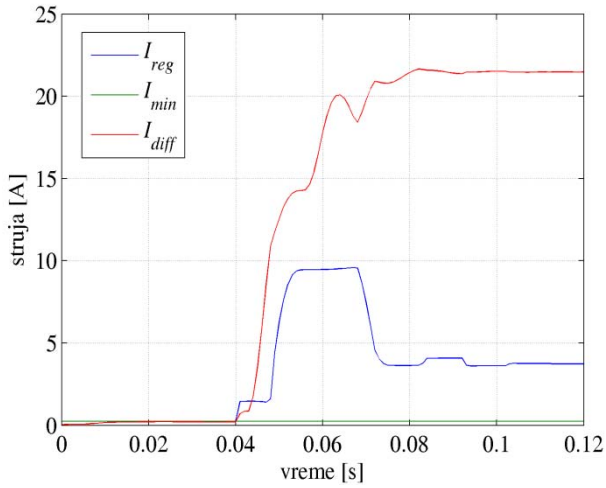
*Pozicije kvarova su usaglašene sa brojevima na Sl 5.



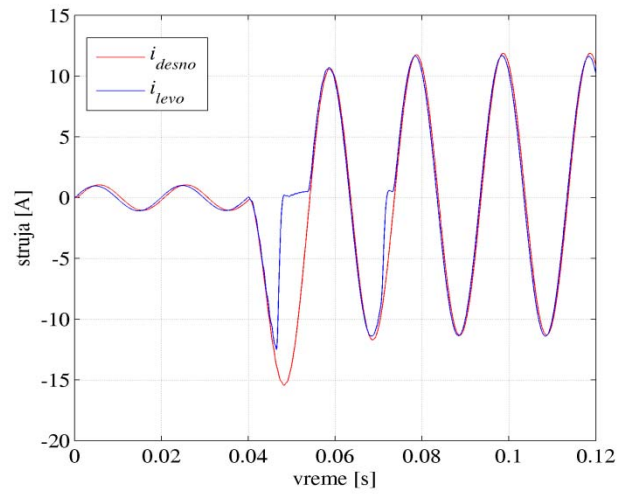
Slika 6: Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i minimalna struja prorade releja pre nastanka kvara.



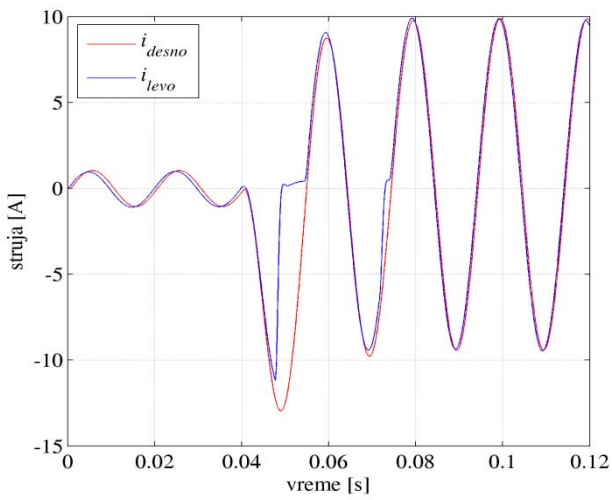
Slika 7: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 1.



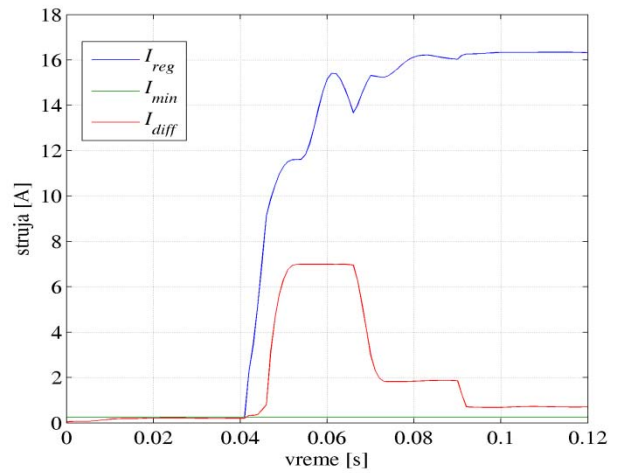
Slika 8: Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade sa i bez stabilizacije pri Kvaru 1.



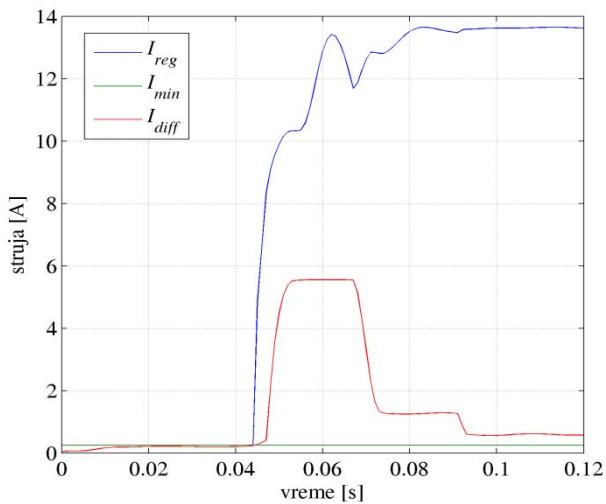
Slika 11: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 3.



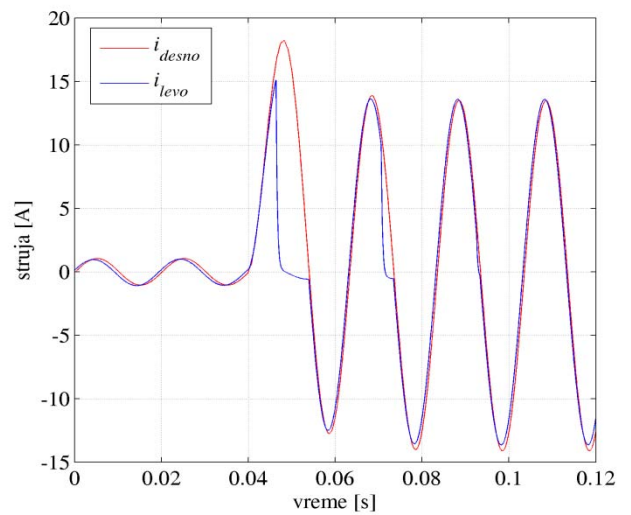
Slika 9: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 2.



Slika 12: Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade sa i bez stabilizacije pri Kvaru 3.



Slika 10: Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade sa i bez stabilizacije pri Kvaru 2.



Slika 13: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri Kvaru 4.

V. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen uticaj stabilizacione struje na rad podužne diferencijalne zaštite vodova. Pokazano je kako se nepotrebno reagovanje releja, izazvano zasićenjem strujnih transformatora, prevazilazi uvođenjem stabilizacione struje. Najpre je formiran model elektroenergetskog sistema, a zatim je testiran algoritam podužne diferencijalne zaštite. Pri testiranju, variran je položaj kvara i vrsta kvara. Testiran je i upoređen rad diferencijalne zaštite dalekovoda kada se koristi i kada se ne koristi stabilizaciona struja. Rezultati simulacija pokazuju da je upotreba stabilizacione struje neophodna u realizaciji diferencijalne zaštite dalekovoda.

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

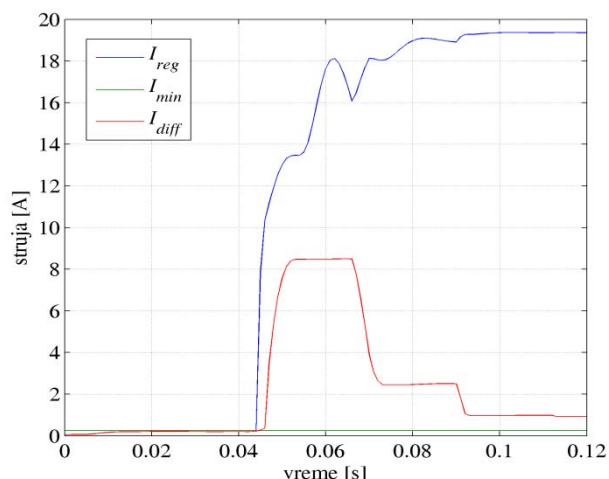
- [1] M. Đurić, Z. Stojanović, "Relejna zaštita", Beopres, Beograd, 2014.
- [2] Milenko Đurić, Elementi elektroenergetskih sistema, Beograd 2009.
- [3] J. Nahman, V. Mijailović, Razvodna postrojenja, Beograd, 2015.
- [4] Z. Stojković, J. Mikulović, Z. Stojanović, "Praktikum iz softverskih alata u elektroenergetici", Akademska misao, Beograd, 2006.
- [5] M. Đurić, V. Terzija, Z. Radojević, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, S. Zubić, V. Bajić, "Algoritmi za digitalne relejne zaštite", ETA, Beograd, 2012.
- [6] T. Rajić, Z. Stojanović, "Podužna diferencijalna zaštota vodova sa primenom automatskog ponovnog uključenja", INFOTEH, Jahorina, 2015.
- [7] J. Krstivojević, M. Đurić, "Uticaj opterećenja strujnih transformatora na diferencijalnu zaštitu energetskeg transformatora", INFOTEH, Jahorina, 2015.
- [8] Line Differential Protection with Distance Protection 7SD52/53, SIPROTEC-Manual.

ABSTRACT

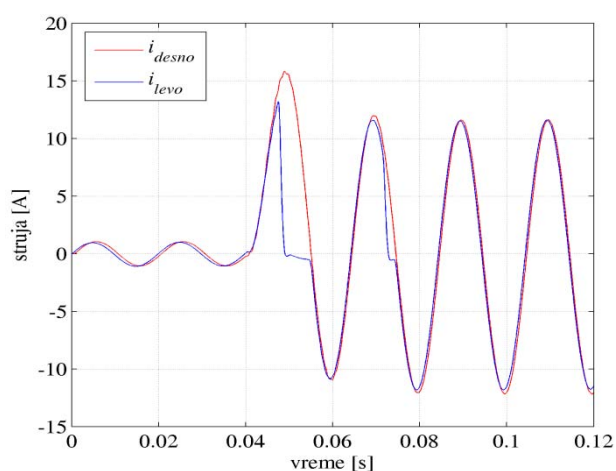
Differential protection can be applied for fast and selective protection of overhead lines. This paper describes an algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines. The problems may occur due to the saturation of current transformers. The stabilization current is used to overcome these problems. The paper shows how unnecessary tripping of the relay for faults outside of the protected zone can be avoided using stabilization. Different types of faults were simulated and results were compared when stabilization current is used and when it is not used. The simulations were performed on the three-phase model of the transmission line formed by MATLAB / Simulink.

INFLUENCE OF STABILIZATION CURRENT ON LONGITUDINAL DIFFERENTIAL PROTECTION OF TRANSMISSION LINES

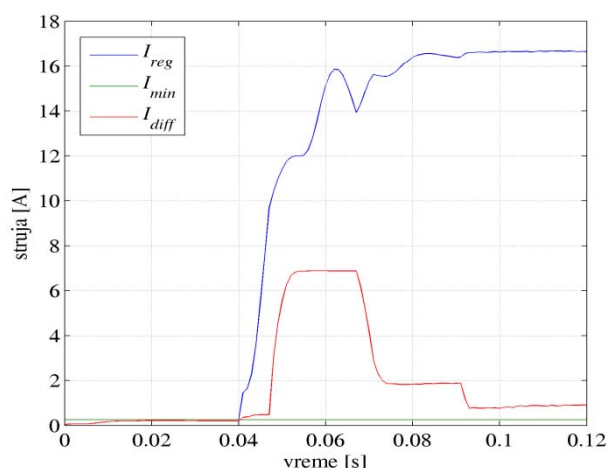
Tomislav Rajić, Zoran Stojanović



Slika 14: Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade sa i bez stabilizacije pri *Kvaru 4*.



Slika 15: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri *Kvaru 5*.



Slika 16: Promena efektivne vrednosti merene diferencijalne struje i diferencijalne struje prorade sa i bez stabilizacije pri *Kvaru 5*.