

Uticaj opterećenja strujnih transformatora na diferencijalnu zaštitu energetskog transformatora

Jelisaveta Krstivojević

Univerzitet u Beogradu

Elektrotehnički fakultet

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme

j.krstivojevic@etf.rs

Milenko Đurić

Univerzitet u Beogradu

Elektrotehnički fakultet

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme

mdjuric@etf.rs

Sadržaj— Kada se posmatraju performanse sistema zaštite energetskog transformatora (ET) i njihovo podešavanje treba uzeti u obzir zasićenje strujnih transformatora (ST) i njihov efekat na zaštitne releje. Ponašanje strujnih transformatora zavisi od njihovih karakteristika i od njihovog opterećenja. Da bi ST verno preslikavali primarnu struju na sekundar osim pravilnog izbora ST potrebno je pravilno izabrati i njihovo opterećenje. U radu će biti provereno ponašanje diferencijalne zaštite energetskog transformatora usled nepravilno izabranog opterećenja ST. Zasićenje strujnih transformatora predstavlja jedan od problema koji može uticati na pravilan rad diferencijalne zaštite. U programskom paketu Matlab – Simulink razvijen je model mreže u kojoj su simulirani kvarovi unutar i van šticiene zone zaštite. Simulacijama su generisani potrebni ulazni signali kojima je testiran rad diferencijalne zaštite. Formiranje modela za simulaciju, model pomoću koga je simuliran rad ST i rezultati testova su dati u radu.

Ključne reči— 1 digitalna zaštita; 2 diferencijalna zaštita transformatora; 3 strujni transformatori; 4 opterećenje strujnih transformatora.

I. UVOD

Pred uređaje za zaštitu energetskih transformatora postavljaju se oštri zahtevi u pogledu pouzdanosti, sigurnosti u radu kao i brzine delovanja. Trenutno jedna od najzastupljenijih zaštita energetskog transformatora od unutrašnjih kvarova jeste procentualna diferencijalna zaštita.[1] Tradicionalno se za sprečavanje nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite energetskog transformatora koristi blokada po višim harmonicima struje.

Ponašanje strujnih transformatora zavisi od njihovih karakteristika i od njihovog opterećenja.[2] Pojava zasićenja ST može imati dvostruk nepovoljan uticaj na rad diferencijalne zaštite. Tokom unutrašnjeg kvara, prisustvo harmonika u sekundarnoj struji nastalo usled zasićenja ST, može nepoželjno odložiti reagovanje releja. Dok tokom spoljašnjeg kvara zasićenje može uzrokovati pojavu lažne diferencijalne struje i nepotrebno reagovanje zaštite. [3]

U radu će biti testiran rad diferencijalne zaštite energetskih transformatora koja koristi blokadu usled prisustva viših harmonika. Cilj ovog rada je da se ispita uticaj nepravilno izabranog opterećenja ST na rad zaštite. Potrebni signali za testiranje rada zaštite su dobijeni kompjuterskim simulacijama.

II. FAZNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA

Diferencijalna zaštita predstavlja brzu i selektivnu zaštitu energetskih transformatora od unutrašnjih kratkih spojeva. Procentualni diferencijalni releji su u upotrebi više godina.[4] Oni pored diferencijalnu struju sa stabilizacionom. Diferencijalna struja se može izračunati kao:

$$I_{dif} = |I_1 - I_2| \quad (1)$$

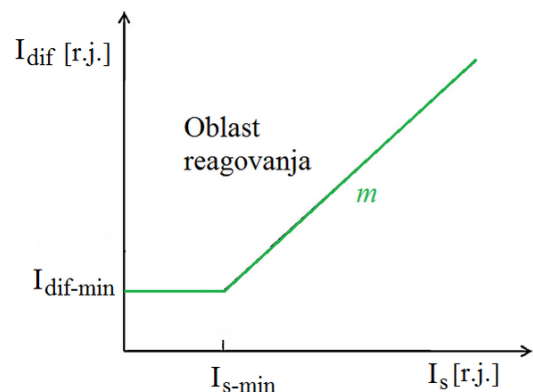
Stabilizaciona struja se može izračunati na više različitih načina. U primeni je najčešće izraz (2), gde se za faktor k često uzima vrednost 1 ili 0.5.

$$I_s = k|I_1 + I_2| \quad (2)$$

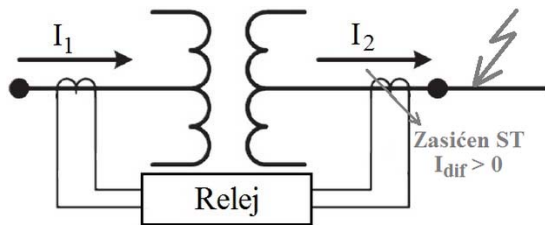
Na Sl. 1 je prikazana tipična karakteristika reagovanja diferencijalnog releja. Karakteristika se sastoji od horizontalne linije, koja definiše minimalnu diferencijalnu struju pri kojoj relej reaguje, i od linije sa nagibom (m). Oblast reagovanja se nalazi iznad karakteristike reagovanja.

U uslovima rada kada nije prisutan kvar u transformatoru, struja koja ulazi u šticienu zonu jednaka je struji koja je napušta, odnosno diferencijalna struja je jednaka nuli. Dok pojava značajnijih vrednosti diferencijalne struje ukazuje na prisustvo kvara unutar šticiene zone transformatora.

U slučaju prisustva spoljašnjeg kvara diferencijalni releji rade korektno dokle god strujni transformatori verno preslikavaju primarnu struju na sekundar. Ako bi jedan od ST-a ušao u zasićenje, ili ako bi nivo zasićenja dva ST-a bio različit, pojavljuje se lažna diferencijalna struja (Sl. 2).



Slika 1. Karakteristika reagovanja procentalnog diferencijalnog releja



Slika 2. Tipična šema diferencijalne zaštite

Zasićenje ST-a predstavlja samo jedan od razloga za pojavu lažne diferencijalne struje. Veoma složen problem za ovaj tip diferencijalne zaštite jeste da napravi razliku između unutrašnjeg kvara i: udarne struje magnećenja ili prepobuđenosti ET. Ovi problemi su u velikom broju slučajeva prevaziđeni upotrebom procentualnih diferencijalnih releja sa mogućnošću blokade usled prisustva viših harmonika.

Udarna struja magnećenja sadrži visok viših harmonika, posebno drugog što se koristi za blokiranje releja. Ovakav pristup je najčešće korišćen i pomoću njega se u većini slučajeva izbegava nepotrebno reagovanje releja. [3] Poslednjih godina pokazano je da upotreba parnih harmonika, drugog i četvrtog, za blokiranje obezbeđuje sigurnost u radu tokom pojave udarnih struja uključanja koje sadrže veoma nizak nivo drugog harmonika. Prepobuđenost transformatora karakteriše prisustvo neparnih harmonika u struji magnećenja. Najizraženije je prisustvo trećeg i petog harmonika. Da diferencijalna zaštita ne bi nepotrebno reagovala kada je transformator prepobuđen za blokadu se koristi peti harmonik.

U ovom radu će biti ispitan rad diferencijalne zaštite čija je karakteristika reagovanja prikazana na Sl. 1, za: $I_{d,min}=0,3$ r.j., $I_{s,min}=1$ r.j., nagib $m=0,2$ i vrednost $k=0,5$ u relaciji (2). Rad diferencijalne zaštite će biti blokiran u slučaju prisustva viših harmonika, i to drugog, trećeg, četvrtog i petog. Granice svih navedenih harmonika će biti podešene na 15%.

III. UTICAJ ZASIĆENJA STRUJNIH TRANSFORMATORA NA DIFERENCIJALNU ZAŠTITU

Kao što je već pomenuto, zasićenje strujnih transformatora ima dvostruki efekat na diferencijalnu zaštitu. Prvo, kod eksternih kvarova lažna diferencijalna struja može izazvati neželjeno reagovanje releja. Drugo, internih kvarova harmonici koji se pojavljuju zbog zasićenja strujnih transformatora mogu odložiti delovanje diferencijalnih releja čiji rad se blokira usled prisustva viših harmonika.

Ovde će biti navedene neke od bitnih karakteristika zasićenja ST [3]:

– Nakon uspostavljanja kvara ST-i ne ulaze odmah u zasićenje, već određeno vreme verno preslikavaju primarnu struju na sekundar. Ovo vreme se kreće od četvrtine periode do nekoliko perioda.

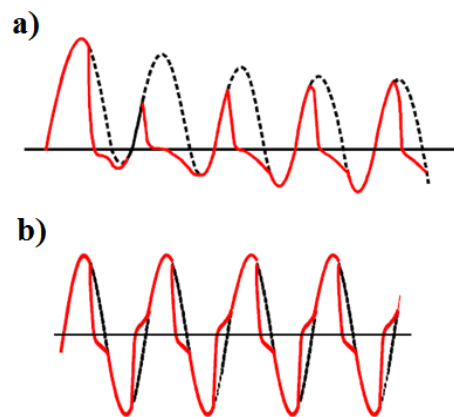
– Najizraženije zasićenje strujnih transformatora nastaje usled prisustva opadajuće jednosmerne komponente u primarnoj struji ST. Tada sekundarna struja ST može sadržati opadajuću jednosmernu komponentu, parne i neparne harmonike (Sl. 3.a).

– Nakon iščezavanja opadajuće jednosmerne komponente ostaje zasićenje usled AC komponente struje koje karakteriše prisustvo neparnih harmonika u sekundarnoj struji (Sl. 3.b).

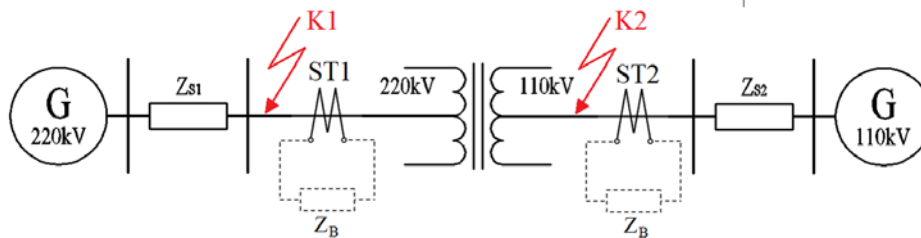
IV. TESTIRANJE RADA DIFERENCIJALNE ZAŠTITE

A. Model za simulaciju kvarova

Na Sl. 4 je prikazana jednopolna šema na osnovu koje je formiran model pomoću koga su vršene simulacije. Trofazni transformator 220 kV/110 kV je sprege YNyn. Zaštitna zona diferencijalne zaštite se nalazi između strujnih transformatora ST1 i ST2. Pomoću ovog modela simulirani su jednofazni kratki spojevi van štice zone (K1) i jednofazni kratki spojevi unutar štice zone (K2). Izvršeno je po pet različitih simulacija za K1 i K2 u cilju dobijanja struja kvara koje imaju različitu opadajuću jednosmernu komponentu. Nakon izvršenih simulacija, dobijeni signali su propušteni kroz model strujnog transformatora koji će biti opisan u narednom poglavlju. Na taj način dobijene su struje na sekundarima ST kojima je testiran rad diferencijalne zaštite.



Slika 3. Talasni oblik sekundarne struje ST usled zasićenja a) opadajućom jednosmernom i naizmjeničnom komponentom u primarnoj struji b) naizmjeničnom komponentom u primarnoj struji



Slika 4. Model za simulaciju kvarova

Tokom simulacije rada strujnih transformatora smatrano je da je impedansa strujnog transformatora ST1 jednaka nominalnoj vrednosti ($Z_{B1} = Z_{B1n}$), dok su za opterećenja strujnog transformatora ST2 posmatrana četiri slučaja:

$$\begin{aligned} Z_{B2}^{(1)} &= Z_{B2n}, Z_{B2}^{(2)} = 2 \cdot Z_{B2n}, \\ Z_{B2}^{(3)} &= 3 \cdot Z_{B2n}, Z_{B2}^{(4)} = 4 \cdot Z_{B2n} \end{aligned} \quad (3)$$

Na ovaj način posmatrano je 40 različitih slučajeva koji su prikazani u Tabelama 1 i 2.

TABELA I. OPTEREĆENJA STRUJNIH TRANSFORMATORA ST1 I ST2 - EKSTERNI KVAROVI

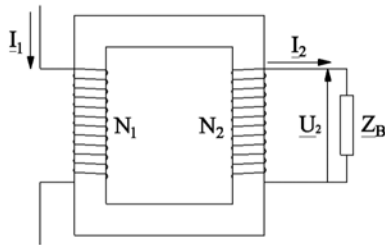
Spoljašnji kvarovi K1					
out1	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
out2	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
out3	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
out4	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
out5	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$

TABELA II. OPTEREĆENJA STRUJNIH TRANSFORMATORA ST1 I ST2 - INTERNI KVAROVI

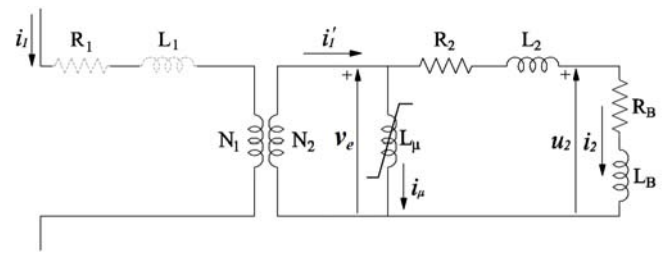
Unutrašnji kvarovi K2					
in1	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
in2	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
in3	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
in4	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$
in5	Z_{B1}	Z_{B1n}			
	Z_{B2}	$Z_{B2}^{(1)}$	$Z_{B2}^{(2)}$	$Z_{B2}^{(3)}$	$Z_{B2}^{(4)}$

B. Model strujnog transformatora

Na Sl. 5 i Sl. 6 su prikazani strujni transformator i njegova zamenska šema, gde su: N_1 i N_2 broj navojaka primara i sekundara, I_1 i I_2 su primarna i sekundarna struja, Z_B je impedansa potrošača u sekundarnom kolu. Impedansa Z_B obuhvata povezne vodove u sekundarnom kolu ST i sve uređaje koji su priključeni na posmatrani sekundarni namotaj.[5]



Slika 5. Strujni transformator



Slika 6. Zamenska šema strujnog transformatora

Za simulaciju rada strujnih transformatora korišćen je model *IEEE PSRC CT SAT* koji je detaljno predstavljen u [6].

Da bi se pomoću ovog modela simulirao rad ST najpre je potrebno izabrati karakteristiku magnećenja. Tipične karakteristike magnećenja se mogu pronaći u [7]. Ova karakteristika se dobija od proizvođača. Nakon izbora odgovarajuće karakteristike magnećenja sa nje je potrebno očitati dva parametra: recipročnu vrednost nagiba S i napon V_s koji je prema definiciji datoj u standardu jednak naponu u tački gde je struja magnećenja jednaka 10 A. Da bi mogla da se izvrši simulacija potrebno je znati vrednosti:

R_2 – otpornost sekundarnog namotaja strujnog transformatora;
 L_2 – induktivnost rasipanja sekundarnog namotaja strujnog transformatora;

R_b – otpornost potrošača;

L_b – induktivnost potrošača.

Na osnovu unetih vrednosti, u modelu se struja magnećenja predstavlja na sledeći način:

$$i_\mu = A \cdot \text{sgn}(\lambda) \cdot |\lambda|^S, \quad (4)$$

gde je: λ – fluks u jezgru ST, a A – se može proračunati za svaku krivu magnećenja posebno u zavisnosti od: ω , S i V_s .

Za kolo prikazano na Sl. 6 važi sledeća relacija:

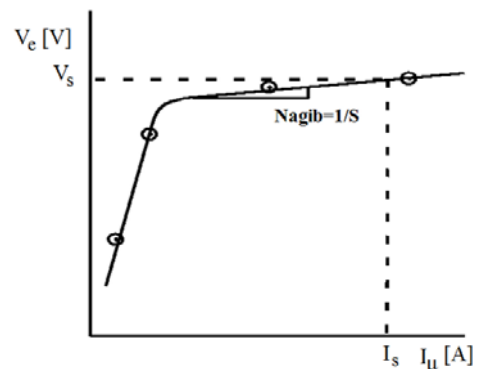
$$v_e - (R_2 + R_B) \cdot (i'_1 - i_\mu) - (L_2 + L_B) \cdot \frac{d}{dt}(i'_1 - i_\mu) = 0 \quad (5)$$

gde su:

v_e - trenutna vrednost pobudnog napona,

i'_1 - trenutna vrednost primarne struje transformisane na sekundar,

i_μ - trenutna vrednost struje magnećenja.



Slika 7. Karakteristika magnećenja strujnog transformatora

Ako se u relaciji (5) pretpostavi da je $L_2=0$, što je najčešći slučaj, i ako se uvaži:

$$\frac{di_\mu}{dt} = \frac{di_\mu}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{di_\mu}{d\lambda} = A \cdot S \cdot |\lambda|^{s-1} \quad (7)$$

Iz relacije (5) se može dobiti:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dt} \left[1 + L_B \cdot A \cdot S \cdot |\lambda|^{s-1} \right] = \\ = -(R_2 + R_B) \cdot i_\mu + (R_2 + R_B) \frac{i_1}{N} + L_B \frac{1}{N} \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

Vrednost struje na sekundaru ST se dobija pomoću izraza:

$$i_2 = i_1' - i_\mu \quad (9)$$

V. REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati svih simuliranih kvarova pomoću modela sa Sl. 4.

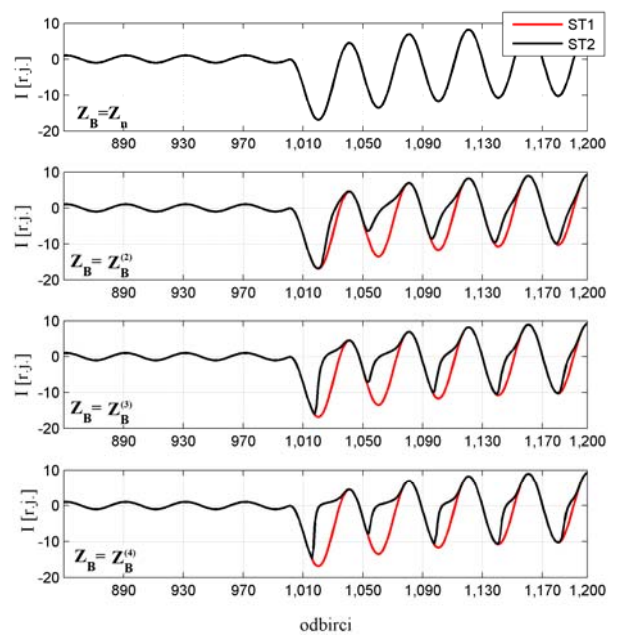
Sl. 8. prikazuje talasne oblike struja u fazi sa kvarom na sekundarima strujnih transformatora za jedan slučaj spoljašnjeg kvara. Može se uočiti da struja sekundara ST2 ulazi u zasićenje kada je impedansa Z_B različita od nominalne.

S obzirom da je posmatran rad diferencijalne zaštite koja ima blokadu po drugom, trećem, četvrtom i petom harmoniku, na Sl. 9 – Sl. 12 prikazani su nivoi ovih harmonika. Slike prikazuju nivoe viših harmonika za sve ispitane slučajeve, po isteku jedne, dve i tri periode nakon uspostavljanja kvara. Na slikama oznake kvarova odgovaraju oznakama u Tabelama 1 i 2.

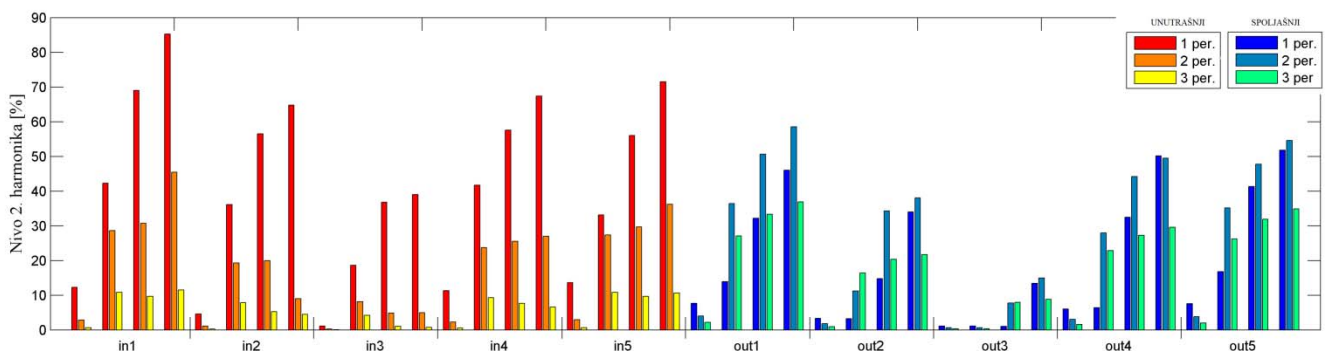
Na Sl. 13 prikazano je vreme kada je diferencijalni relej reagovao. Na ovoj slici posebno je prikazano reagovanje procentualne diferencijalne zaštite čija karakteristika reagovanja je data na Sl. 1. i kombinacije ove zaštite sa

blokadom usled prisustva viših harmonika. Može se uočiti da bi u slučaju svih analiziranih unutrašnjih kvarova diferencijalna zaštita reagovala u toku 10 ms. Ako bi diferencijalna zaštita bila blokirana usled prisustva viših harmonika, tada bi u slučajevima kada je opterećenje ST jednako nominalnom, zaštita reagovala u okviru 20 ms. Za opterećenja različita od nominalnog $Z_{B2}^{(2)}$ i $Z_{B2}^{(3)}$ zaštititi je trebalo više od 50 ms da reaguje, dok u slučaju opterećenja $Z_{B2}^{(4)}$, usled izraženog prisustva viših harmonika zaštita biva blokirana i uopšte ne reaguje.

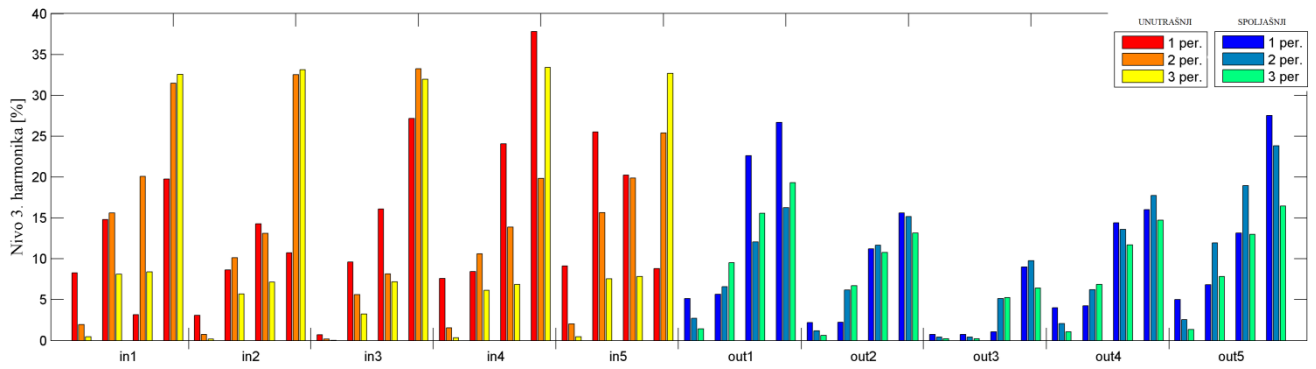
U slučaju spoljašnjih kvarova, za dobro izabrana opterećenja ST-a, zaštita korektno radi. Dok se može uočiti da za nepravilno odabrana opterećenja ST zaštita u nekim slučajevima nepravilno reaguje. Ako bi se koristila zaštita koja se bazira samo na diferencijalnom principu, tada bi 13 puta došlo do nepotrebnog reagovanja. Dok bi zaštita blokirana usled prisustva viših harmonika nepotrebno reagovala 5 puta.



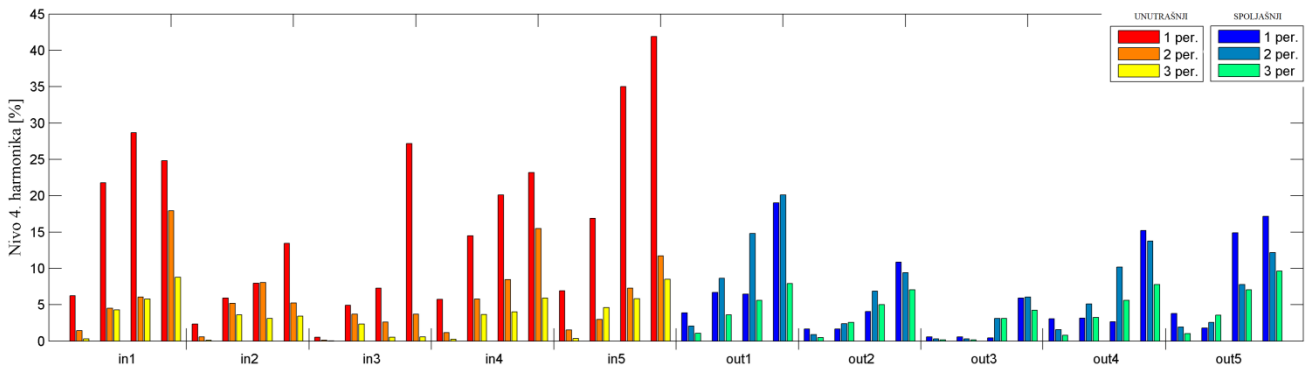
Slika 8. Talasni oblici struja u fazi sa kvarom



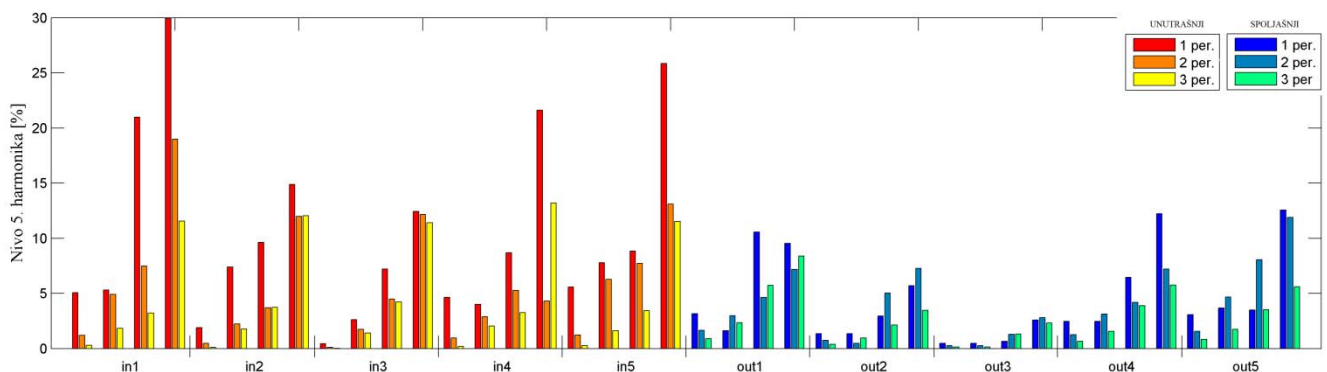
Slika 9. Nivo drugog harmonika u struji nakon isteka jedne, dve i tri periode od uspostavljanja kvara



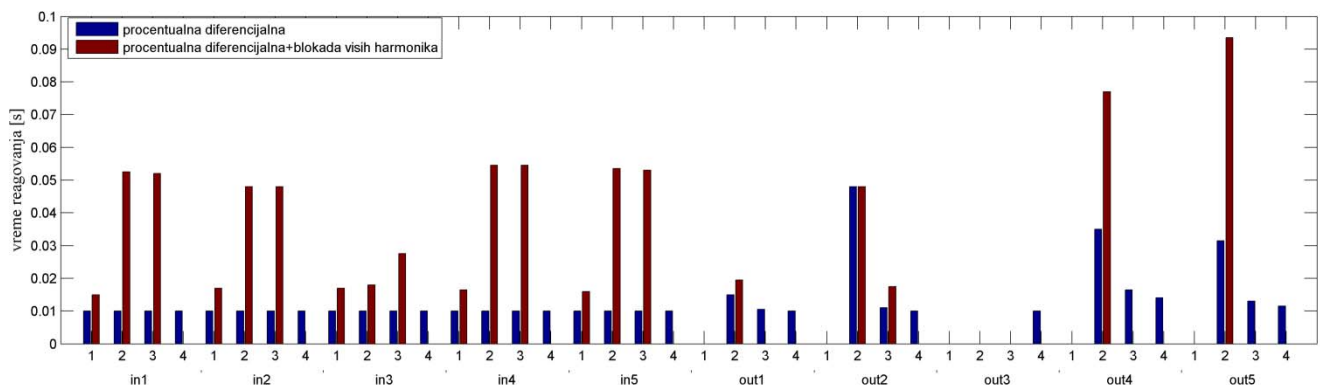
Slika 10. Nivo trećeg harmonika u struji nakon isteka jedne, dve i tri periode od uspostavljanja kvara



Slika 11. Nivo četvrtog harmonika u struji nakon isteka jedne, dve i tri periode od uspostavljanja kvara



Slika 12. Nivo petog harmonika u struji nakon isteka jedne, dve i tri periode od uspostavljanja kvara



Slika 13. Vremena reagovanja procentualne diferencijalne zaštite sa blokadom usled prisustva viših harmonika

VI. ZAKLJUČAK

Kada se posmatraju performanse sistema zaštite energetskog transformatora i njihovo podešavanje treba uzeti u obzir zasićenje strujnih transformatora i njihov efekat na zaštitne releje. U radu je ispitan rad procentualne diferencijalne zaštite energetskog transformatora za različita opterećenja strujnih transformatora.

Pokazano je da blokada usled prisustva viših harmonika u slučaju pojave zasićenja strujnih transformatora u toku unutrašnjih kvarova odlaže delovanje zaštite ili dovodi do toga da zaštita uopšte ne deluje. Takođe, pokazano je da u slučaju spoljašnjih kvarova diferencijalna zaštita u kombinaciji sa blokadom po višim harmonicima može reagovati nepotrebno.

Da bi zaštita mogla tačno da radi potrebno je da ST verno preslikavaju primarnu struju na svoj sekundar. Može se zaključiti da osim što je potrebno pravilno odabrati strujne transformatore, neophodno je pravilno odabrati i njihovo opterećenje.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta III 42009 "Inteligentne energetske mreže".

LITERATURA

- [1] M. Đurić, "Relejna zaštita", Beopres, Beograd 2008.
- [2] L. J. Powell, "Current Transformer Burden and Saturation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, No. 3, May/June 1979.

- [3] Guzman, A.; Zocholl, Z. ; Benmouyal, G. ; Altuve, H.J, A current-based solution for transformer differential protection. I. Problem statement, Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume:16 , Issue: 4), Oct 2001, 485 – 491
- [4] IEEE PC37.91/D05, Draft IEEE Guide for Protecting Power Transformers
- [5] M. Đurić, "Razvodna postrojenja", Beopres, Beograd 2008.
- [6] Tziouvaras, D.A.; McLaren, P.; Alexander, G.; Dawson, D.; Esztergalyos, J.; Fromen, C.; Glinkowski, M., et al., "Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, no. 1, pp. 62 – 72, Jan. 2000.
- [7] IEEE Standard C37.110, "IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes".

ABSTRACT

When performance of a power transformer protection system and its adjustment are considered, it is necessary to take into account current transformer saturation and its effect on protective relay. The behavior of current transformers depends on their characteristics and of their burden. So, for the proper functioning of the current transformer it is necessary to properly choose their characteristics and burdens. The paper examines the behavior of the differential protection of power transformers due to incorrectly selected burden of current transformer.

INFLUENCE OF BURDEN OF CURRENT TRANSFORMERS ON POWER TRANSFORMER DIFFERENTIAL PROTECTION

Jelisaveta Krstivojević, Milenko Đurić