

Analiza algoritama za kompenzaciju zasićenja strujnog transformatora

Analysis of algorithms for saturation compensation of current transformer

Nenad Belčević*, Zoran Stojanović*

*Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Apstrakt- Osnovna uloga strujnih transformatora jeste da velike vrednosti primarne struje prilagode vrednostima pogodnim za rad uređaja relejne zaštite, odnosno mernih uređaja. U normalnom radnom stanju, strujni transformator transformiše primarnu struju u praktično stalnom odnosu i gotovo bez faznog pomeraja, te je struja sekundara zapravo skalirana vrednost primarne struje. Međutim, prilikom nastanka kvara u elektroenergetskom sistemu, struje postižu velike vrednosti. Usled toga, fluks u jezgru strujnog transformatora može dostići vrednosti iznad kolena karakteristike magnećenja, što izaziva zasićenje strujnog transformatora. Kada nastupi zasićenje, struja sekundara više nije skalirana vrednost primarne struje, već dolazi do njene deformacije. Deformacija struje sekundara strujnog transformatora može izazvati nepravilan rad pojedinih uređaja relejne zaštite. Razvoj digitalne relejne zaštite omogućio je da se primenom određenih algoritama izvrši softverska kompenzacija zasićenja, čime se otklanjaju negativne posledice koje zasićenje strujnog transformatora izaziva. U okviru ovog rada analiziran je jedan od mogućih pristupa za kompenzaciju zasićenja, koji se zasniva na primeni ekvivalentne šeme i krive magnećenja strujnog transformatora. Pri tome, izdvojena su dva karakteristična prisupa koja su detaljnije sagledana i testirana. Testiranje je vršeno u MATLAB/Simulink programskom okruženju.

Ključne reči – strujni transformator, digitalna relejna zaštita, kompenzacija zasićenja

Abstract - The main function of current transformers is to adapt the high values of the primary current to values suitable for the operation of relay protection devices, i.e. measuring devices. Under normal conditions, a current transformer transforms the current in a virtually permanent ratio, and practically without a phase shift, so the secondary current is actually a scaled value of the primary current. However, when a fault occurs in the power system, currents reach high values. As a result, the flux in the core of the current transformer can reach values above the knee of the magnetization characteristic, causing saturation of the current transformer. When saturation occurs, the secondary

current is no longer a scaled value of the primary current, but is deformed. Deformation of the secondary current may cause malfunctioning of some relay protection devices. The development of digital relay protection has made it possible to perform software saturation compensation by applying certain algorithms, thus eliminating the negative consequences that saturation of the current transformer causes. In this paper, one of the possible approaches for compensation of saturation is analyzed, which is based on the application of an equivalent scheme and magnetization curve of the current transformer. Two typical approaches have been singled out, which have been analyzed and tested in more detail. Testing was performed in the MATLAB/Simulink.

Keywords - current transformer, digital relay protection, saturation compensation

I. UVOD

U normalnom radnom stanju, sekundarna struja strujnog transformatora (ST) približno odgovara skaliranoj vrednosti primarne struje strujnog transformatora. Međutim, kada fluks u magnetskom jezgru ST dostigne vrednosti iznad kolena karakteristike magnećenja, struja magnećenja ST naglo raste. Tada dolazi do značajnog odstupanja talasnog oblika sekundarne struje ST u odnosu na primarnu struju, odnosno dolazi do deformacije strujnog signala. Ova pojava poznata je kao zasićenje (saturacija) ST. Pojava zasićenja ST može dovesti do nepravilnosti u radu različitih zaštita, kao što su prekostrujna zaštita sa inverznom karakteristikom reagovanja, zatim distantna zaštita, kao i diferencijalna zaštita sabirnicama, koja se u pogledu zasićenja ST može smatrati najosetljivijom.

U postojećoj literaturi prezentovan je značajan broj algoritama koji za cilj imaju kompenzaciju negativnih efekata izazvanih zasićenjem ST. Grubo posmatrano, mogu se razlikovati četiri osnovna pristupa:

1. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste neuralne mreže [1-3]. Osnovni nedostatak ovih

algoritama odnosi se na potrebu za velikim brojem trening podataka.

2. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste metodu najmanjih kvadrata primenjenju na odбирke strujnog signala iz perioda bez zasićenja ST [4-6]. Osnovna pretpostavka od koje se polazi kod ovih algoritama jeste da se struja kvara može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente, te se metoda najmanjih kvadrata primenjuje na nezasićeni ("zdravi") deo strujnog signala sa ciljem da se estimiraju parametri ovako pretpostavljenog talasnog oblika struje. Osnovni nedostatak algoritama iz ove grupe ogleđa se u njihovoj računarskoj zahtevnosti, odnosno činjenici da zahtevaju izračunvanje pseudo inverzne matrice. Drugi važan nedostatak ovih algoritama jeste da se njihovom primenom ne mogu estimirati viši harmonici strujnog signala, koji mogu biti neophodni za ispravan rad pojedinih algoritama relejne zaštite, kao što su algoritmi za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima. Naime, ukoliko bi se usvojio talasni oblik struje kvara koji uključuje i više harmonike, to bi dovelo do povećanja računarskih zahteva, s obzirom da bi se metodom najmanjih kvadrata morao estimirati veći broj nepoznatih. Pored toga, broj nepoznatih koji se mogu odrediti metodom najmanjih kvadrata ograničen je brojem odbiraka strujnog signala koji su na raspolaganju u periodu bez zasićenja ST. Ako se ima u vidu da zasićenje ST može nastati veoma rano (nakon 1/6 osnovne periode), jasno je da broj odbiraka strujnog signala koji su na raspolaganju u periodu bez zasićenja ST može biti veoma mali, naročito u uslovima niske frekvencije odabiranja.
3. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST [7-10]. Kod ovih algoritama najpre se korišćenjem merenih vrednosti struje sekundara ST i poznatih parametara ekvivalentne šeme ST, izračunava fluks u magnetskom jezgru ST. Zatim se korišćenjem ovako izračunate vrednosti fluksa, kao i poznatih parametara krive magnećenja, određuje struja magnećenja ST. Na kraju se, sabiranjem ovako izračunate struje magnećenja i merene vrednosti sekundarne struje, određuje (skalirana) primarna struja ST. Osnovni nedostatak ovih algoritama ogleđa se u činjenici da se mala greška u proračunatom fluksu značajno odražava na proračunatu struju magnećenja, a time i na tačnost algoritma za kompenzaciju zasićenja ST. Razlog ovome leži u malom nagibu karakteristike magnećenja u toku zasićenja (male promene fluksa odgovaraju značajnim promenama struje magnećenja). Usled ovog nedostatka, kod algoritama koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST, zanemarenje remanentnog fluksa se može veoma nepovoljno odraziti na tačnost algoritma [7], [8]. Kako bi se problem izazvan zanemarenjem remanentnog fluksa prevazišao, publikovano je nekoliko radova koji se zasnivaju na estimaciji fluksa u trenutku nastanka

zasićenja, odnosno inicijalnog fluksa [9], [10]. Pri tome su za estimaciju inicijalnog fluksa korišćeni različiti pristupi koji će detaljnije biti sagledani u okviru narednih poglavlja.

4. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste metodu najmanjih kvadrata primenjenju na interval sa zasićenjem ST [11], [12]. Princip rada ovih algoritama zasniva se na kombinaciji metode najmanjih kvadrata sa metodom koja za kompenzaciju zasićenja ST koristi ekvivalentnu šemu ST. Naime, dve osnovne pretpostavke od kojih se polazi pri izvođenju ovih algoritama su: 1. primarna struja ST se može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente; 2. na osnovu poznatih parametara ekvivalentne šeme ST i poznatih parametara krive magnećenja, struja magnećenja može se izraziti u funkciji struje sekundara ST. Kako je struja sekundara ST jednaka razlici (skalirane) primarne struje i struje magnećenja, primenom metode najmanjih kvadrata na sekundarnu struju ST estimiraju se parametri signala čiji je talasni oblik definisan razlikom primarne struje i struje magnećenja. Osnovni nedostatak ovakvih algoritama ogleđa se u njihovoj računarskoj zahtevnosti. Naime, ukoliko se pri izvođenju algoritma uvaži uticaj remanentnog fluksa, onda je za estimaciju parametara definisanog signala potrebno rešavati sistem nelinearnih jednačina.

U okviru ovog rada analizirani su algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST (druga grupa radova u prethodno sprovedenoj klasifikaciji), i to oni koji uvažavaju uticaj remanentnog fluksa [9], [10]. Algoritmi su testirani u MATLAB/Simulink programskom okruženju.

II. KOMPENZACIJA ZASIĆENJA ST KORIŠĆENJEM EKVALENTNE ŠEME ST

Princip rada algoritama koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST, zasniva se na izračunavanju (skalirane) primarne struje ST korišćenjem merenih vrednosti sekundarne struje ST i parametara ST (parametara ekvivalentne šeme i krive magnećenja).

Na Slika 1 prikazana je ekvivalentna šema ST, a na Slika 2, prikazana je kriva magnećenja ST.

Na osnovu ekvivalentne šeme ST može se postaviti sledeća relacija:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = R_s i_2(t) + L_s \frac{di_2(t)}{dt} \quad (1)$$

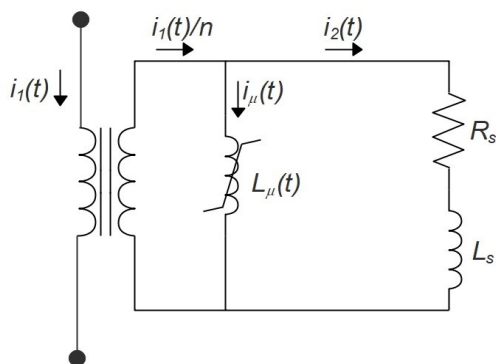
Integracijom prethodne relacije dobija se:

$$\phi(t) - \phi(t_0) = R_s \int_{t_0}^t i_2(t) dt + L_s (i_2(t) - i_2(t_0)) \quad (2)$$

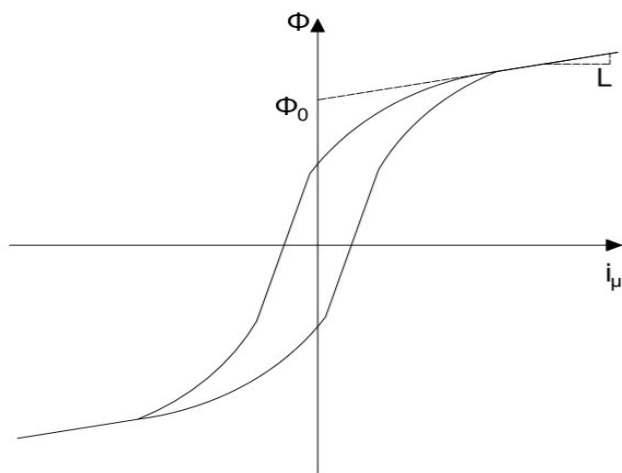
Nakon što se primenom prethodne relacije izračuna fluks u magnetskom jezgru ST, struja magnećenja se može jednostavno odrediti korišćenjem krive magnećenja. Međutim, potrebno je uočiti da fluks u trenutnu t_0 nije poznata veličina.

U prvobitno prezentovanim radovima iz ove oblasti (radovi [7] i [8]) fluks u trenutku t_0 je izjednačavan sa nulom. Međutim, ovakav pristup može dovesti do neprihvatljivih rezultata ukoliko u magnetnom jezgru postoji remanentni (zaostali) fluks. Tada (zahvaljujući malom nagibu karakteristike magnećenja u periodu saturacije) greška izazvana zanemarenjem remanentnog fluksa, dovodi do značajnih grešaka u izračunatoj vrednosti struje magnećenja.

Drugi pristup, koji uvažava uticaj remanentnog fluksa, podrazumeva izračunavanje inicijalnog fluksa, odnosno fluksa u trenutku nastanka zasićenja (pri tome se za početak integracije (t_0) u relaciji (2) bira trenutak nastanka zasićenja).



Slika 1. Ekvivalentna šema ST



Slika 2. Kriva magnećenja ST

Kod ovog pristupa, najpre se esimira struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja, a zatim se korišćenjem krive magnećenja izračunava inicijalni fluks.

Prema tome, ovakav pristup kompenzacije zasićenja ST podrazumeva sledeće korake:

- Najpre se estimira vrednost struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja. Za estimaciju struje

magnećenja u trenutku nastanka zasićenja u literaturi se koristi nekoliko različitih pristupa koji će detaljnije biti analizirani u narednim poglavljima;

- Na osnovu estimirane vrednosti struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja i poznate krive magnećenja, određuje se fluks u trenutku nastanka zasićenja, odnosno inicijalni fluks ($\Phi(t_0)$);
- Primenom relacije (2) izračunava se fluks za svaki trenutak t u toku perioda zasićenja ($\Phi(t)$);
- Na osnovu izračunate vrednosti fluksa za svaki trenutak t u toku perioda zasićenja i poznate krive magnećenja, određuje se struja magnećenja i_μ za svaki trenutak t u toku perioda zasićenja;
- Sabiranjem izračunate struje magnećenja, i merene sekundarne struje ST, određuje se (skalirana) primarna struja ST.

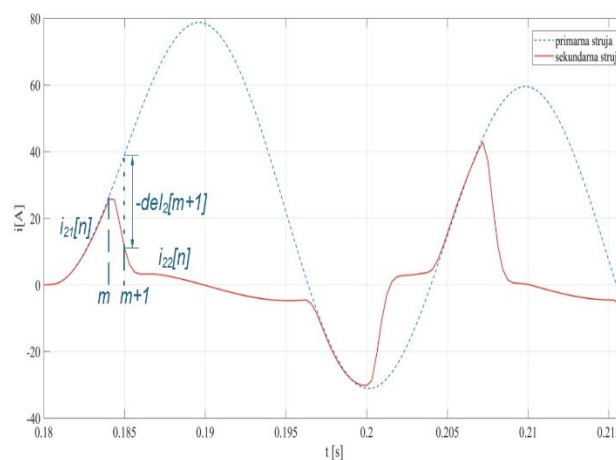
U nastavku će se detaljnije razmotriti dva osnovna pristupa za estimaciju struje magnećenja (odnosno estimaciju inicijalnog fluksa) u trenutku nastanka zasićenja.

A. Estimacija inicijalnog fluksa korišćenjem diferencijalne metode (DM)

Kao što je već elaborirano u prethodnom poglavlju, da bi se odredila vrednost inicijalnog fluksa, potrebno je estimirati vrednost struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja. Jedan od pristupa za estimaciju struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja prezentovan je u [9].

Označimo trenutak nastanka zasićenja sa $m+1$, struju pre nastanka zasićenja sa i_{21} , odnosno struju tokom zasićenja sa i_{22} , kao što je to prikazano na Slika 3.

Vrednost prvog izvoda struje u trenutku nastanka zasićenja definisan je izrazom:



Slika 3. Ilustracija estimacije inicijalnog fluksa korišćenjem diferencijalne metode

$$\begin{aligned} del1[m+1] &= i_{22}[m+1] - i_{22}[m] \\ &= i_{22}[m+1] - i_{21}[m] \end{aligned} \quad (3)$$

Za isti ovaj trenutak, možemo definisati drugi izvod prema sledećoj relaciji:

$$\begin{aligned} del2[m+1] &= i_{22}[m+1] - 2i_{22}[m] + i_{21}[m-1] \\ &= i_{22}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \quad (4) \end{aligned}$$

Ukoliko se sa $i_{21}[m+1]$ označi ekstrapolirana vrednost nezasićenog dela signala (Slika 3), onda se može usvojiti da približno važi:

$$i_{21}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \approx 0 \quad (5)$$

Ukoliko se relacija (5) implementira u relaciju (4) dobija se:

$$del2[m+1] \approx i_{22}[m+1] - i_{21}[m+1] \quad (6)$$

Na osnovu relacije (6), može se zaključiti da je struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja približno jednaka negativnoj vrednosti drugog izvoda struje u trenutku nastanka zasićenja, odnosno:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L} \\ \frac{-2}{R_s \Delta T} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{-2}{R_s \Delta T} & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{-2}{R_s \Delta T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\Phi^e(t_n)| \\ |\Phi^e(t_{n+1})| \\ \cdot \\ \cdot \\ |\Phi^e(t_{n+N-1})| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |i_\mu^e(t_n)| + \frac{\Phi_0}{L} \\ |i_\mu^e(t_{n+1})| + \frac{\Phi_0}{L} \\ \cdot \\ \cdot \\ |i_\mu^e(t_{n+N-1})| + \frac{\Phi_0}{L} \\ |i_2(t_{n+1})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} + L_s) + |i_2(t_n)|(\frac{R_s * \Delta T}{2} - L_s) \\ |i_2(t_{n+2})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} + L_s) + |i_2(t_{n+1})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} - L_s) \\ \cdot \\ \cdot \\ |i_2(t_{n+N-2})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} + L_s) + |i_2(t_{n+N-1})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} - L_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$i_\mu[m+1] \approx -del2[m+1] \quad (7)$$

Nakon što se primenom opisanog postupka odredi struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja, korišćenjem krive magnećenja jednostavno se može odrediti vrednost inicijalnog fluksa.

B. Estimacija inicijalnog fluksa korišćenjem metode najmanjih kvadrata (MNK)

Estimacija inicijalnog fluksa korišćenjem diferencijalne metode predstavlja jednostavno rešenje i značajno unapređenje u odnosu na algoritme kod kojih je remanentni fluks u potpunosti zanemaren. Međutim, mana ovakvog pristupa ogleda se u njegovoj osetljivosti na prisustvo šuma u siglanu, kao i u osetljivosti na grešku u detekciji trenutka nastanka zasićenja.

Pristup koji donosi unapređene u pogledu pouzdanosti estimacije inicijalnog fluksa, zasniva se na korišćenju metode najmanjih kvadrata [10].

Podimo od pretpostavke da se struja kvara može prikazati kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće DC komponente:

$$i_k(t) = I_{DC}e^{-t/\tau} + I_m \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

Primenom metode najmanjih kvadrata u periodu bez zasićenja ST određuju se nepoznati parametri usvojenog talasnog oblika struje. Korišćenjem ovako određenih parametara, vrši se ekstrapolacija nezasićenog dela strujnog signala u prvih nekoliko odbiraka nakon nastanka zasićenja ST (Slika 4).

Kada se od ovako ekstrapoliranih vrednosti struje oduzime struja merena na sekundaru ST, dobija se vrednost struje magnećenja u prvih nekoliko trenutaka nakon nastanka zasićenja ST. Dakle, struja magnećenja u prvih nekoliko trenutaka nakon nastanka zasićenja, može se definisati izrazom:

$$i_\mu^e(t) = i_1^e(t) - i_2(t) \quad (9)$$

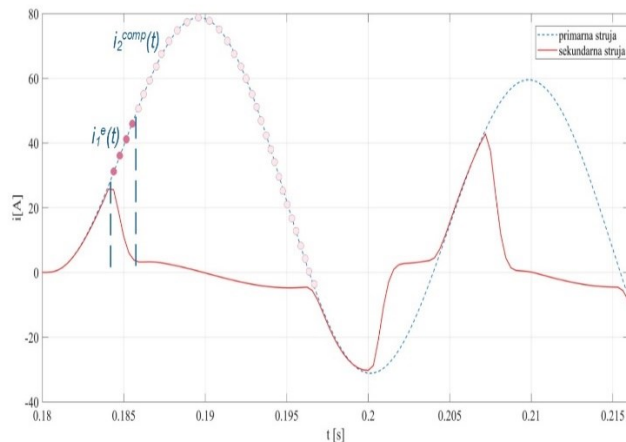
gde je i_1^e (skalirana) primarna struja, određena ekstrapolacijom nezasićenog dela strujnog signala, a i_2 merena vrednost struje sekundara ST.

Iako bi se na osnovu ovako estimirane vrednosti struje magnećenja i poznate krive magnećenja, inicijalni fluks mogao jednostavno odrediti, autori u [10] predlažu nešto složeniji postupak kako bi se poboljšala robusnost algoritma.

Označimo sa t_n trenutak nastanka zasićenja. Za ovaj trenutak može se postaviti sledeća relacija:

$$i_\mu^e(t_n) = \frac{1}{L}(\Phi(t_n) - \Phi_0) \quad (10)$$

gde je L – nagib zasićenog dela karakteristike magnećenja, a Φ_0 – vrednost koju prava definisana zasićenim delom karakteristike magnećenja odseca na ordinati (Slika 2).



Slika 4. Ilustracija estimacije inicijalnog fluksa korišćenjem metode najmanjih kvadrata

Integracijom relacije (1) na intervalu od t_n do t_{n+1} (pri čemu se predlaže korišćenje trapezoidalnog pravila integracije), odnosno na intervalu jedne periode odabiranja (ΔT), dobija se:

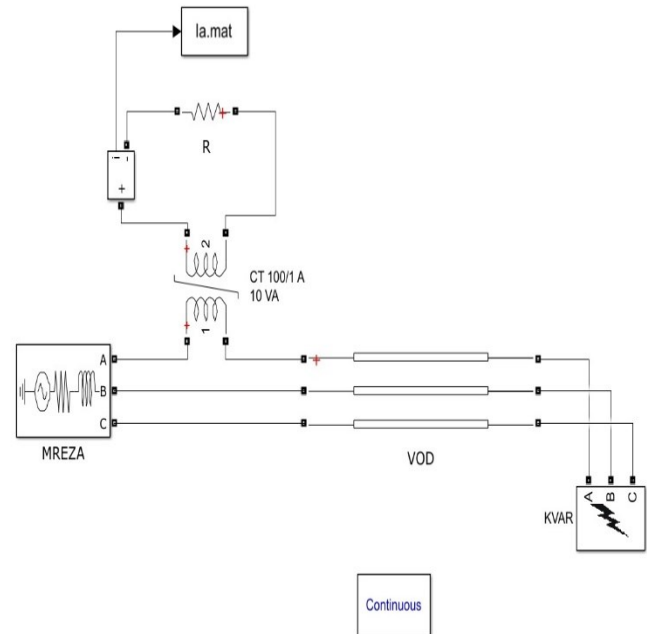
$$\phi(t_{n+1}) - \phi(t_n) = i_2(t_{n+1})\left(\frac{R_s \Delta T}{2} + L_s\right) + i_2(t_n)\left(\frac{R_s \Delta T}{2} - L_s\right) \quad (11)$$

Postavljanjem relacija (10) i (11) za prvih N odbiraka u periodu zasićenja dobija se sistem jednačina koji se u matricnoj formi može prikazati relacijom (12). Rešavanjem ovog sistema jednačina određuje se fluks u prvih nekoliko trenutaka nakon nastanka zasićenja ($\phi^e(t_n)$, $\phi^e(t_{n+1})$, $\phi^e(t_{n+N-1})$).

III. TESTIRANJE ALGORITAMA ZA KOMPENZACIJU ZASIĆENJA ST ZASNOVANIH NA PRIMENI EKVIVALENTNE ŠEME ST

A. Opis modela

Algoritmi za kompenzaciju zasićenja ST testirani su na signalima koji su generisani u Simulink okruženju programskog paketa MATLAB. U MATLAB/Simulink okruženju formiran je model jednog jednostrano napajanja 110 kV dalekovoda.



Slika 5. Simulink model

Na početku ovog dalekovoda priključen je primar ST, sa čijeg se sekundara preuzimaju signali na koje se zatim primenjuju algoritmi za kompenzaciju zasićenja ST (algoritam koji za estimaciju inicijalnog fluksa koristi diferencijalnu metodu i algoritam koji za estimaciju inicijalnog fluksa koristi metodu najmanjih kvadrata). Simulink model prikazan je na Slika 5.

Za model dalekovoda izabrana je trofazna šema dalekovoda sa raspodeljenim parametrima. Podužni pogonski parametri modelovanog dalekovoda 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 modelovanog dalekovoda: $r_0=0,32 \Omega/\text{km}$, $l_0=4,1 \text{ mH}/\text{km}$ i $c_0=5 \text{ nF}/\text{km}$.

U okviru razmatranih simulacija, posmatran je jednostrano napajani 110 kV dalekovod, čime se ne gubi na opštosti imajući u vidu da je osnovni cilj da se izazove zasićenje ST. Zasićenje ST izazivano je simuliranjem jednofaznih kvarova na različitim lokacijama duž dalekovoda.

Mreža koja napaja razmatrani 110 kV dalekovod modelovana je kao konstanta impedansa (rezistivni deo impedanse mreže je $0,154 \Omega$, dok je induktivni deo $24,2 \text{ mH}$).

Induktivnost sekundara ST najčešće se može zanemariti. Iz tog razloga, opterećenje sekundara ST modelovano je kao čisto rezistivna impedansa, a za vrednost otpornosti usvojeno je 10Ω . U modelu je korišćena uprošćena karakteristika magnetčenja ST koja se sastoji od dva linearizovana dela.

B. Testiranje algoritama pri različitim lokacijama kvara

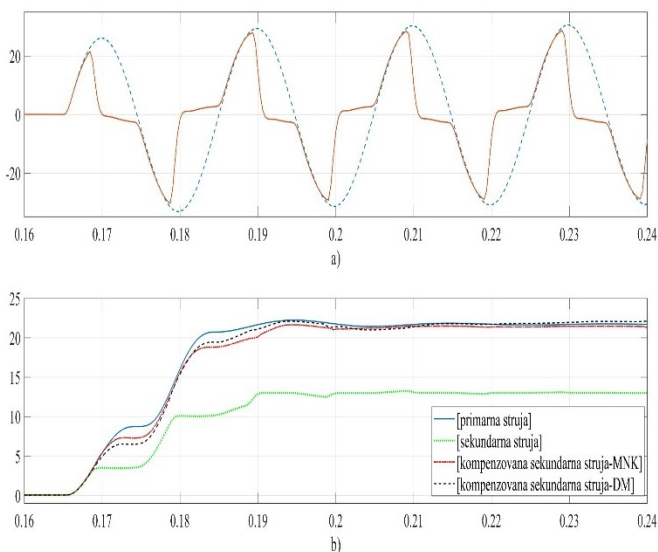
U okviru ovog poglavlja, rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST analiziran je za slučaj kada kvar nastaje na rastojanju od 30 km od početka voda, odnosno za slučaj kada kvar nastaje na 60 km od početka voda. Kvar je simuliran na dve različite lokacije kako bi se izazvao različiti nivo zasićenja ST. Cilj ovakvog testiranja zapravo je analiza rada algoritama za kompenzaciju zasićenja ST pri različitim nivoima zasićenja.

Na Slikama 6 i 7 su prikazane efektivne vrednosti struje koje su određene primenom digitalne furijeove transformacije (DFT) na sledeće signale:

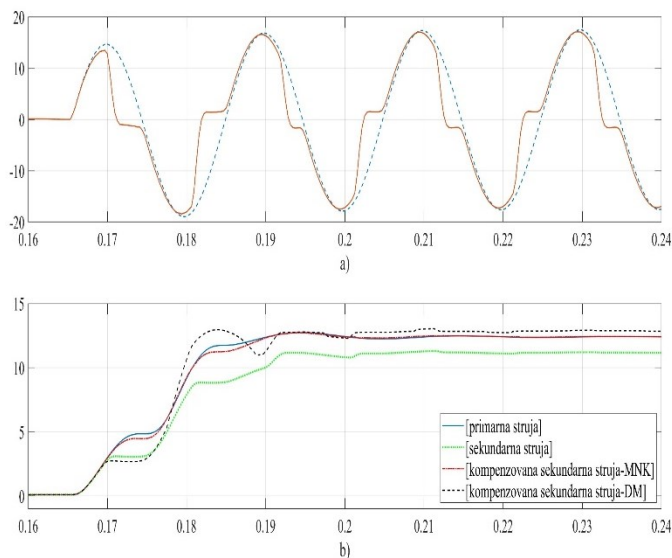
- Signal koji se dobija prmenom algoritma za kompenzaciju zasićenja ST kod koga se inicijalni fluks estimira korišćenjem diferencijalne metode - crna boja;
- Signal koji se dobija prmenom algoritma za kompenzaciju zasićenja ST kod koga se inicijalni fluks estimira korišćenjem metode najmanjih kvadrata - crvena boja;
- Signal koji se dobija na sekundaru idealnog ST (slučaj kada ne bi došlo do zasićenja ST) - plava boja;
- Signal koji se dobija na sekundaru realnog (nekompenzovanog) ST - zelena boja.

Slika 6 prikazuje rezultate koji se dobijaju u slučaju kada je kvar simuliran na rastojanju od 30 km od početka voda. Može se zaključiti da u ovom slučaju oba algoritma dobro kompenzuju zasićenje ST, s obzirom da efektivne vrednosti struje dobijene primenom algoritama za kompenzaciju zasićenja ST veoma brzo dostižu efektivnu vrednost struje sekundara idealnog ST.

Slika 7 prikazuje rezultate koji se dobijaju u slučaju kada je kvar simuliran na rastojanju od 60 km od početka voda. Može se konstatovati da i u ovom slučaju oba algoritma donose poboljšanje u odnosu na slučaj kada se kompenzacija zasićenja ST ne primenjuje. Međutim, može se uočiti da u ovom slučaju kompenzacioni metod koji inicijalni fluks estimira korišćenjem metode najmanjih kvadrata, uspešnije kompenzuje zasićenje u odnosu na kompenzacioni metod koji inicijalni fluks estimira korišćenjem diferencijalne metode



Slika 6. Kvar na $l=30$ km: (a) Primarna i sekundarna struja; (b) Efektivna vrednost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje



Slika 7. Kvar na $l=60$ km: (a) Primarna i sekundarna struja; (b) Efektivna vrednost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje

C. Testiranje algoritama pri različitim trenucima kvara

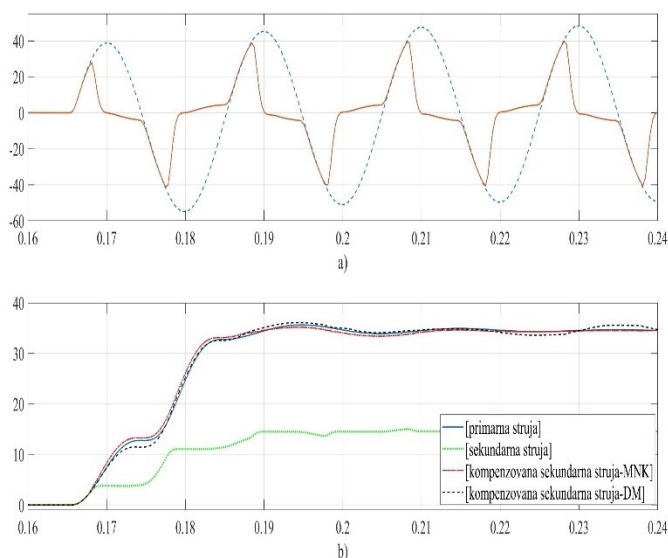
U okviru ovog poglavlja, rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST analiziran je za dva različita trenutka nastanka kvara ($t_k=0.165$ s i $t_k=0.17$ s). Cilj ovakvog testiranja jeste analiza uticaja DC komponente struje kvara na rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST.

Zasićenje ST izazvano DC komponentom struje kvara naziva se DC saturacija. Usled DC saturacije, u toku jedne osnovne periode signala nastaje jedan interval zasićenja.

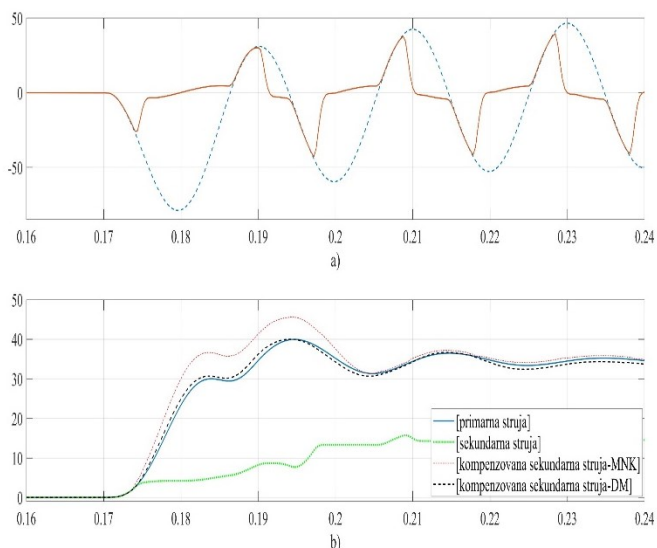
Zasićenje ST izazvano velikom amplitudom AC komponente struje naziva se AC saturacija ST. Usled AC saturacije, u toku jedne osnovne periode, javljaju se dva intervala zasićenja.

Na Slikama 8 i 9 ilustrovan je rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST u slučaju AC saturacije (Slika 8), odnosno u slučaju DC+AC saturacije (Slika 9).

Sprovedena analiza pokazuje da bez obzira na prisustvo DC komponente struje kvara, oba algoritma za kompenzaciju zasićenja ST donose značajno poboljšanje u odnosu na slučaj kada se kompenzacija zasićenja ST ne primenjuje. Međutim, analizom Slika 9, može se zaključiti da u analiziranom slučaju, efektivna vrednost struje dobijena primenom algoritma koji za estimaciju inicijalnog fluksa koristi metodu najmanjih kvadrata, sporije dostiže tačnu efektivnu vrednost struje. Uzrok tome leži u činjenici da u analiziranom slučaju, zasićenje ST nastaje veoma rano te je u periodu bez zasićenja na raspolaganju mali broj odbiraka. Iz tog razloga, primenom metode najmanjih kvadrata se ne može tačno estimirati inicijalni fluks, što se dalje odražava na tačnost estimirane efektivne vrednosti struje.



Slika 8. AC saturacija: (a) Primarna i sekundarna struja; (b) Efektivna vrednost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje



Slika 9. DC+AC saturacija: (a) Primarna i sekundarna struja; (b) Efektivna vrednost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje

IV. ZAKLJUČAK

Pojava zasićenja strujnog transformatora izaziva deformaciju sekundarne struje strujnog transformatora, što može dovesti do nepravilnosti u radu uređaja relejne zaštite. Razvojem digitalne relejne zaštite pruža se mogućnost da se primenom određenih algoritama na sekundarnu struju strujnog transformatora izvrši kompenzacija zasićenja ST.

U ovom radu analizirana je gupa algoritama za kompenzaciju zasićenja ST koja se bazira na primeni ekvivalentne šeme i

karakteristike magnećenja ST. Algoritmi su testirani u MATLAB/Simulink programskom okruženju. Analizirana je tačnost razmatranih algoritama pri različitim nivoima saturacije ST, kao i uticaj DC komponente struje kvara.

Sprovedene analize pokazuju da se razmatranim algoritimima postižu povoljni rezultati, odnosno da se njihovom primenom u velikoj meri kompenzuje zasićenje ST. U svim razmatranim slučajevima, postižu se značajno bolji rezultati u odnosu na slučaj kada se kompenzacija zasićenja ST ne primenjuje. S druge strane, sprovedena testiranja pokazuju da u pojedinim slučajevima razmatrani algoritmi ne uspevaju da potpuno kompenzuju zasićenje ST, te da je neophodno unaprediti pouzdanost ovakvih algoritama.

REFERENCE

- [1] Hong, Y.Y., Chang-Chian, P.C.: 'Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence', IET Gener. Transm. Distrib., 2008, 2, (4), pp. 566–575
- [2] Khorshadi-Zadeh, H., Sanaye-Pasand, M.: 'Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs', IEEE Trans. Power Deliv., 2006, 21, (1), pp. 73–79
- [3] Erenturk, K.: 'ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects', IEEE Trans. Power Deliv., 2009, 24, (1), pp. 195–201
- [4] El-Naggar, K., Gilany, M.: 'A discrete dynamic filter for detection and compensating CT saturation', Elect. Power Syst. Res., 2007, 77, (5-6), pp. 527–533
- [5] Li, F., Li, Y., Aggarwal, R.K.: 'Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers', IEE Proc., Gener. Transm. Distrib., 2002, 149, (4), pp. 497–503
- [6] Ji, T.Y., He, Q., Shi, M.J., et al.: 'CT saturation detection and compensation using mathematical morphology and linear regression'. 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT-Asia), Melbourne, VIC, 2016, pp.1054–1059
- [7] Kang, Y.C., Kang, S.H., Park, J.K., et al.: 'Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers', IEE Proc., Electr. Power Appl., 1996, 143, (1), pp. 41–49
- [8] Locci, N., Muscas, C.: 'A digital compensation method for improving current transformer accuracy', IEEE Trans. Power Deliv., 2000, 15, (4), pp. 1104–1109
- [9] Kang, Y.C., Lim, U.J., and Kang, S.H.: 'Compensating algorithms suitable for use with measurement type current transformers for protection', IEE Proc., Gen. Trans. Distrib., 2005, 152, (6), pp. 880–890
- [10] Hajipour, E., Vakilian, M., Sanaye-Pasand, M.: 'Current-transformer saturation compensation for transformer differential relays', IEEE Trans. Power Deliv., 2015, 30, (5), pp. 2293–2302
- [11] Lee, D.-G., Kang, S.-H., Nam, S.-R.: 'Phasor estimation algorithm based on the least square technique during ct saturation', J. Electr. Eng. Technol., 2011, 6, (4), pp. 459–465
- [12] Shi, D. Y., Buse, J., Wu, Q.H., Jiang L.: 'Fast compensation of current transformer saturation', 2010 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Europe (ISGT-Europe), Gothenburg, Sweden, October 2010, pp.1–7

AUTHORS

First Author – Nenad Belčević, dipl. inž. el. i rač, belcevic92@gmail.com.

Second Author – prof. dr Zoran Stojanović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, stojanovic@etf.bg.ac.rs.

Correspondence Author – Nenad Belčević, belcevic92@gmail.com, +38164400556