

Zaštita tronamotajnog energetskeg transformatora zasnovana na faznoj komparaciji struja

A three winding power transformer protection based on the phase comparison of the currents

Jelisaveta Krstivojević*, Zoran Stojanović*, Milenko Đurić*

* Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Rezime- U radu je predstavljen novi algoritam za zaštitu tronamotajnog energetskeg transformatora od unutrašnjih kratkih spojeva. Algoritam je zasnovan na primeni digitalne fazne komparacije struja izmerenih na primarnim, sekundarnim i tercijernim priključcima energetskeg transformatora. Primenjena digitalna fazna komparacija ne računa ugao između dve struje koje se fazno porede, već koristi metod integracije proizvoda te dve struje na polovini osnovne periode signala. Da bi se realizovala selektivna zaštita u slučaju kada energetski transformator ima samo jedan od svoja tri namotaja povezan na aktivnu mrežu, a druga dva namotaja napajaju pasivne mreže, digitalnom faznom komparatoru je dodata i prekostrujna funkcija. U radu je pokazano da se primenom novog algoritma uspešno mogu detektovati unutrašnji kvarovi tronamotajnog energetskeg transformatora i obezbediti pravovremeno reagovanje zaštite. Za verifikaciju rada predloženog algoritma korišćeni su signali dobijeni računarskim simulacijama. Razvoj algoritma i rezultati testova su dati u radu.

Ključne reči- relejna zaštita, energetski transformator, digitalna fazna komparacija, detektovanje kvarova.

Abstract- This paper presents a new algorithm for three-winding transformer protection against internal short circuits. The algorithm is based on the application of the digital phase comparison of currents measured at the primary, secondary and tertiary terminals of the power transformer. The applied digital phase comparison does not calculate the angle between the two currents compared in phase, but uses the method of integration of the product of two signals within one basic semi-period of the signals. In order to provide selective protection in the case where the power transformer has only one of its three windings connected to the active network and the other two windings feeding passive networks, an overcurrent function has been added to the digital phase comparator. The paper shows that the application of the new algorithm can successfully detect the internal faults of the three-winding transformer and ensure timely tripping of protection. The signals obtained by computer

simulations were used to verify the operation of the proposed algorithm. The algorithm and test results are given in the paper.

Index Terms- power system protection, power transformer, digital phase comparison, fault discrimination.

I. UVOD

Energetski transformator (ET) je jedna od najvažnijih komponenti u elektroenergetskom sistemu. Imajući u vidu potrebu za pouzdanim radom ET-a neophodno je razviti i primeniti pouzdan sistem zaštite ET-a koji ima sposobnost da selektivno i brzo identifikuje sve unutrašnje kvarove. Diferencijalna zaštita predstavlja osnovni tip zaštite velikih ET-a od unutrašnjih kvarova [1, 2]. Najveći nedostatak diferencijalne zaštite je to što može nepotrebno reagovati pri pojavi udarne struje magnećenja i prepobudenosti ET-a. U praksi se izbegavanje nepotrebno reagovanja usled pojave udarne struje magnećenja i prepobudenosti ET-a vrši primenom blokade usled prisustva viših harmonika [1, 2]. Osim toga, zasićenje strujnih transformatora (ST-a) ima veliki uticaj na pravilan rad diferencijalne zaštite, kako tokom spoljašnjih kratkih spojeva (KS-eva), tako i tokom unutrašnjih KS-eva [3]. Da bi se obezbedio pouzdan rad diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem ST-a koristi se karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom. Međutim, primena drugog nagiba može uticati na osetljivost i brzinu reagovanja zaštite tokom unutrašnjih KS-eva. Istraživanja [4] pokazuju da u većini slučajeva nepotrebno reagovanje biva izbegnuto primenom blokade reagovanja zaštite usled prisustva viših harmonika.

U ovom radu je predstavljen novi algoritam za zaštitu tronamotajnih ET-a od unutrašnjih KS-eva koji se zasniva na faznoj komparaciji struja koje se mere na primaru, sekundaru i tercijeru ET-a. Za faznu komparaciju algoritam koristi digitalni fazni komparator [1, 5-8]. U radu je novi algoritam dodatno unapređen detektorom spoljašnjeg kvara čijom primenom se eliminiše mogućnost nepotrebno reagovanja zaštite usled pojave zasićenja ST tokom spoljašnjih KS-eva. Testiranje i verifikacija rada predloženog algoritma su izvršeni primenom signala koji su

dobijeni računarskim simulacijama. Na osnovu sprovedenih testova pokazano je da je primenom novog algoritma uspešno prepoznato prisustvo unutrašnjih KS-eva. Takođe, pokazano je da detektor spoljašnjeg kvara može prepoznati prisustvo kvara van štice zone pre nego što ST-i uđu u zasićenje i na taj način sprečiti nepotrebno reagovanje algoritma.

II. ZAŠTITA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Kvarovi u ET-u nastaju kao posledica slabljenja i oštećenja izolacije. Slabljenje i oštećenje izolacije mogu nastati kao posledica električnih i mehaničkih naprezanja. Zbog oštećenja izolacije u ET-u se javljaju unutrašnji kratki spojevi i tinjava pražnjenja. Osim unutrašnjih kratkih spojeva ET ugrožavaju i opasni pogonski uslovi kao što su: spoljašnji kratki spojevi i preopterećenja [1].

Fazna diferencijalna zaštita (FDZ) predstavlja najčešći tip zaštite svih ET-a čija je naznačena snaga veća od 8 MVA. Ova zaštita štiti ET od: međuzavoynih kratkih spojeva, kratkih spojeva između faza i jednofaznih kratkih spojeva ako je zvezdište transformatora direktno uzemljeno. Ukoliko je zvezdište ET uzemljeno preko aktivne otpornosti ili niskoomske impedanse, FDZ ne štiti ET od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva već se koristi zemljospojna zaštita [1].

A. Fazna diferencijalna zaštita

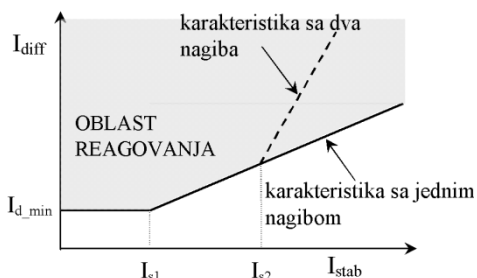
FDZ računa diferencijalnu i stabilizacionu struju i na osnovu njihovih vrednosti donosi odluku o reagovanju. Tipična karakteristika reagovanja FDZ prikazana je na Sl. 1. Diferencijalna i stabilizaciona struja, u skladu sa orijentacijom ST-a na Sl. 2, se računaju prema izrazima (1) i (2):

$$I_{diff} = |I_p + I_s + I_t| \quad (1)$$

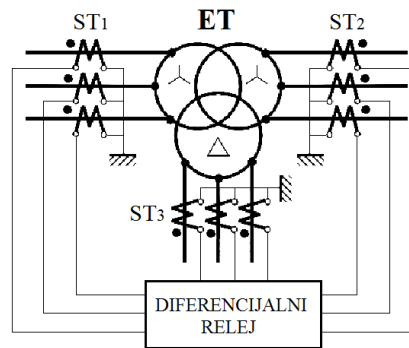
$$I_{stab} = k \cdot (|I_p| + |I_s| + |I_t|) \quad (2)$$

gde su: I_p , I_s i I_t - usaglašene struje primara, sekundara i tercijera respektivno, a k - kompenzacioni koeficijent.

FDZ predstavlja brzu i selektivnu zaštitu ET-a od unutrašnjih kratkih spojeva. Štićena zona FDZ nalazi se između (glavnih) strujnih transformatora. FDZ treba da detektuje kvarove koji se dogode unutar štice zone i pravovremeno isključi transformator sa mreže.



Sl. 1. Tipična karakteristika reagovanja diferencijalnog releja

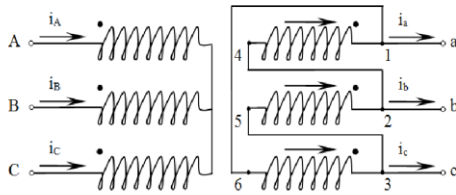


Sl. 2. Fazna diferencijalna zaštita tronamotajnog ET

Do pojave (lažne) diferencijalne struje koja nije posledica unutrašnjeg KS-a, a koja može dovesti do nepotrebnog reagovanja FDZ, dolazi usled: udarne struje magnećenja nastale prilikom uključanja neopterećenog ET-a, velike vrednosti struje magnećenja nastale usled prepobudenosti ET-a i pojave zasićenja ST-a tokom spoljašnjih KS-eva. Eliminacija nepotrebnog reagovanja tokom uključanja neopterećenog ET i prepobudenosti ET rešava se blokadom usled prisustva viših harmonika. Upotreba parnih harmonika, drugog i četvrtog, za blokiranje obezbeđuje sigurnost u radu prilikom pojave udarnih struja uključanja, dok se za blokadu nepravilnog reagovanja diferencijalne zaštite tokom prepobudenosti ET-a koristi peti harmonik [2]. Za izbegavanje nepotrebnog reagovanja zaštite zbog pojave zasićenja ST-a tokom spoljašnjih KS-eva tradicionalno se primenjuje karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom. Međutim, upotreba drugog nagiba može smanjiti osetljivost zaštite tokom detekcije unutrašnjih kvarova, dok je pravilan izbor drugog nagiba i prelomne tačke na karakteristici reagovanja dosta komplikovan, čemu dosta doprinosi i nelinearna priroda zasićenja ST-a. Takođe, istraživanja [4] pokazuju da u većini slučajeva, spoljašnjih KS-eva praćenih zasićenjem ST-a, nepotrebno reagovanje biva izbegnuto primenom blokade reagovanja zaštite usled prisustva viših harmonika dok drugi nagib nema udela u sprečavanju nepotrebnog reagovanja.

B. Usaglašavanje ulaznih signala struja za potrebe zaštite ET

Kod mikroprocesorske FDZ u odgovarajućim algoritmima obuhvataju se kompleksni koeficijent transformacije ET-a i prenosni odnosi glavnih ST-a [1]. Preslikavanje struja sa jedne na drugu stranu ET-a pomoću kompleksnog koeficijenta transformacije moguće je direktno primeniti samo u simetričnim režimima. U asimetričnim režimima moraju se prvo odrediti simetrične komponente, a zatim svaka od njih preslikati na drugu stranu transformatora, jer su koeficijenti transformacije različiti za pojedine simetrične komponente struje. Ovakav postupak je matematički zahtevan. Iz tog razloga bolje je izvršiti usaglašavanje struja na nivou trenutnih vrednosti i sa njima izračunati njihove faze. Na osnovu Sl. 3 izvedene su relacije (3)-(5) između struja na strani trougla i struja na strani zvezde za dvonamotajni ET sprege Yd1.



Sl. 3 Energetski transformator sprege Yd1 [9]

$$i_a' = i_{41} - i_{63} = \frac{m_T}{\sqrt{3}}(i_A - i_C) \quad (3)$$

$$i_b' = i_{52} - i_{41} = \frac{m_T}{\sqrt{3}}(i_B - i_A) \quad (4)$$

$$i_c' = i_{63} - i_{52} = \frac{m_T}{\sqrt{3}}(i_C - i_B) \quad (5)$$

Kada se uzmu u obzir i prenosni odnosi ST-a na primaru (m_p) i sekundaru (m_s) ET-a relacije (3)-(5) postaju (6)-(8) [9], a poređenje struja u ovom slučaju se svodi na poređenje struje i_{as} sa strujom i_{as}' , i_{bs} sa strujom i_{bs}' i i_{cs} sa strujom i_{cs}' .

$$i_{as}' = \frac{i_a'}{m_s} = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s}(i_{As} - i_{Cs}) \quad (6)$$

$$i_{bs}' = \frac{i_b'}{m_s} = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s}(i_{Bs} - i_{As}) \quad (7)$$

$$i_{cs}' = \frac{i_c'}{m_s} = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s}(i_{Cs} - i_{Bs}) \quad (8)$$

$$i_{as} = \frac{i_a}{m_s}, i_{bs} = \frac{i_b}{m_s} \text{ i } i_{cs} = \frac{i_c}{m_s} \quad (9)$$

gde su: i_{As} , i_{Bs} , i_{Cs} – sekundarne struje ST-a na primaru ET-a u fazama A, B, C, respektivno; i_{as} , i_{bs} , i_{cs} – sekundarne struje ST-a na sekundaru ET-a u fazama a, b, c, respektivno.

III. DETEKCIJA KVAROVA PRIMENOM FAZNE KOMPARACIJE STRUJA

U cilju boljeg razumevanja primene fazne komparacije za zaštitu ET, koja je primenjena u ovom radu, ukratko je opisan digitalni fazni komparator koji je predstavljen u [1] i primenjen u [5-9]. Nakon toga je objašnjen način detekcije unutrašnjih kvarova primenom fazne komparacije struja.

A. Digitalni fazni komparator

Digitalni fazni komparator koji je primenjen u ovom radu se zasniva na proračunu integrala proizvoda signala struja na intervalu dužine polovine osnovne periode signala. Normalizovana vrednost ovog integrala je dobijena njegovim deljenjem sa efektivnim vrednostima signala struja koje se fazno porede. Na taj način normalizacijom je dobijen indeks koji je korišćen kao pokazatelj faznog pomeraja između dva signala struja. Dakle, digitalna fazna komparacija dva signala (i_1) i (i_2) vrši se korišćenjem izraza (10):

$$DFK_{12}(r.j.) = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} i_1(n) \cdot i_2(n) \quad (10)$$

gde su: m broj odbiraka u osnovnoj periodi signala, $i_1(n)$ – n -ti odbirak struje i_1 , $i_2(n)$ – n -ti odbirak struje i_2 , I_{RMS1} i I_{RMS2} pokazatelji efektivnih vrednosti struja i_1 i i_2 koji se računaju primenom izraza (11).

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} (i(n))^2} \quad (11)$$

Ukoliko su struje i_1 i i_2 prostoperiodične tada je izraz (10) jednak kosinusu ugla koji predstavlja fazni pomeraj između ove dve struje:

$$\cos \varphi = DFK_{12}(r.j.) \quad (12)$$

gde je $\varphi = \angle(I_1, I_2)$.

B. Osnovni princip reagovanja

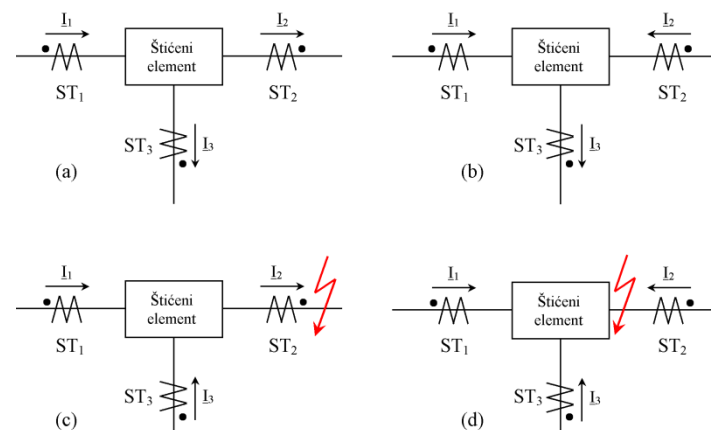
Prvo će biti analiziran monofazni tronamotajni ET sprege 0 koji je na Sl. 4 označen kao štice element. Na njegovom primarnom, sekundarnom i tercijernom kraju su priključeni strujni transformatori ST₁, ST₂ i ST₃, respektivno. U normalnim uslovima rada suma struja koja ulazi u štice zonu jednaka je sumi struja koje je napuštaju. Na Sl. 4.a prikazan je smer struja za jedan slučaj normalnih uslova rada. U štice zonu ulazi jedna struja I_1 , a napuštaju je dve I_2 i I_3 . Fazni pomeraj između parova struja je takav da su struje:

- I_1 i I_2 fazno pomerene za 180° , indeks $DFK_{12}=-1$;
- I_1 i I_3 fazno pomerene za 180° , indeks $DFK_{13}=-1$;
- I_2 i I_3 u fazi, indeks $DFK_{23}=1$.

Sl. 4.b takođe prikazuje normalne uslove rada kada u štice zonu ulaze dve struje I_1 i I_2 , a napušta je jedna struja I_3 . Fazni pomeraj između parova struja je takav da su struje:

- I_1 i I_2 u fazi, indeks $DFK_{12}=1$;
- I_1 i I_3 fazno pomerene za 180° , indeks $DFK_{13}=-1$;
- I_2 i I_3 fazno pomerene za 180° , indeks $DFK_{23}=-1$.

Neka je svaka strana ET-a povezana sa aktivnom mrežom, u slučaju da se dogodi spoljašnji kvar (Sl. 4.c), u štice zonu će ući dve struje I_1 i I_3 , a napustiće je jedna struja I_2 . Posmatrajući fazni pomeraj između svih parova struja dva para će biti fazno pomerena za 180° , a jedan par će biti u fazi, odnosno dva indeksa DFK će biti jednaka -1, a jedan 1. U slučaju pojave unutrašnjeg kvara (Sl 1.d) sve tri struje će ući u zonu zaštite, a svi parovi struja (I_1, I_2), (I_1, I_3) i (I_2 i I_3) će biti u fazi i sva tri indeksa DFK će biti jednaka 1.



Sl. 4 Smerovi struja tokom (a) i (b) normalnih uslova rada, (c) spoljašnjeg KS i (d) unutrašnjeg KS

Ukoliko se dogodi unutrašnji KS na strani ET koja je povezana sa pasivnom mrežom, tada je na toj strani ET struja koju meri ST jednaka 0. Pretpostavimo da je na Sl. 4.d sekundar ET povezan na pasivnu mrežu, a primar i tercijer na aktivne, struja koju meri ST_2 jednaka je 0. Odluka o tome da je KS unutar zone će biti doneta na osnovu toga što su struje (I_1 , I_3) u fazi. U slučaju da je primar ET povezan na aktivnu, a sekundar i tercijer napajaju pasivne mreže, tada u štice zonu struja kvara dolazi samo sa strane koja je povezana na aktivnu mrežu i kvar se može detektovati primenom prekostrujne funkcije uočavanjem da je samo jedna od tri struje, koje se dovode releju, veća od podešene granične vrednosti.

U algoritmu je usvojeno da za struju koja je manja od $0,1I_{nom}$ odgovarajuća dva pokazatelja, koji se proračunavaju na osnovu nje, se izjednačavaju sa -1. Na taj način će ti pokazatelji biti isključeni iz donošenja odluke o prisustvu unutrašnjeg kvara.

U slučaju trofaznog tronamotajnog ET proizvoljne sprege potrebno je izvršiti fazno usaglašavanje struja na primaru, sekundaru i tercijeru, i nakon toga za svaku fazu pojedinačno se može primeniti princip zaključivanja koji je gore izložen.

IV. NOVI ALGORITAM

U ovom poglavlju opisani su koraci algoritma za zaštitu tronamotajnog ET koji se bazira na faznoj komparaciji struja na primaru, sekundaru i tercijeru. Na ulaz algoritmu dovode se struje sa primara ET (i_{A-prim} , i_{B-prim} , i_{C-prim}), sekundara (i_{A-sek} , i_{B-sek} , i_{C-sek}) i tercijera (i_{A-terc} , i_{B-terc} , i_{C-terc}). Da bi algoritam mogao da korektno radi neophodno je izvršiti fazno usaglašavanje struja primara, sekundara i tercijera. Tok algoritma za jednu fazu je prikazan na Sl. 5., a koraci algoritma su:

Korak 1:

U prvom koraku vrši se A/D konverzija signala sa definisanom periodom odabiranja.

Korak 2:

U drugom koraku vrši se fazno usaglašavanje struja primara, sekundara i tercijera. Tako da se dobiju usaglašene struje i_{A1} , i_{A2} i i_{A3} . Za tronamotajni ET sprege YNyn0d1 prema relaciji (6) dobija se da su ove struje jednake:

$$i_{A1} = \frac{m_{T13} m_p}{\sqrt{3} m_t} (i_{A-prim} - i_{C-prim}) \quad (13)$$

$$i_{A2} = \frac{m_{T23} m_s}{\sqrt{3} m_t} (i_{A-sek} - i_{C-sek}) \quad (14)$$

$$i_{A3} = \frac{i_{A-terc}}{m_t} \quad (15)$$

gde su: m_{T13} – prenosni odnos ET primar - tercijer i m_{T23} – prenosni odnos ET sekundar - tercijer, m_t - prenosni odnos ST-a na tercijeru.

Odbirci prilagođenih signala se smeštaju u posebne vektore dužine $m/2$, gde je m paran broj odbiraka u jednoj periodu signala. Za svaku fazu formiraju se po tri pomoćna vektora u kojima se nalaze odbirci ulaznih signala:

$$\begin{bmatrix} i_{A1}(1) & i_{A1}(2) & \dots & i_{A1}(m/2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

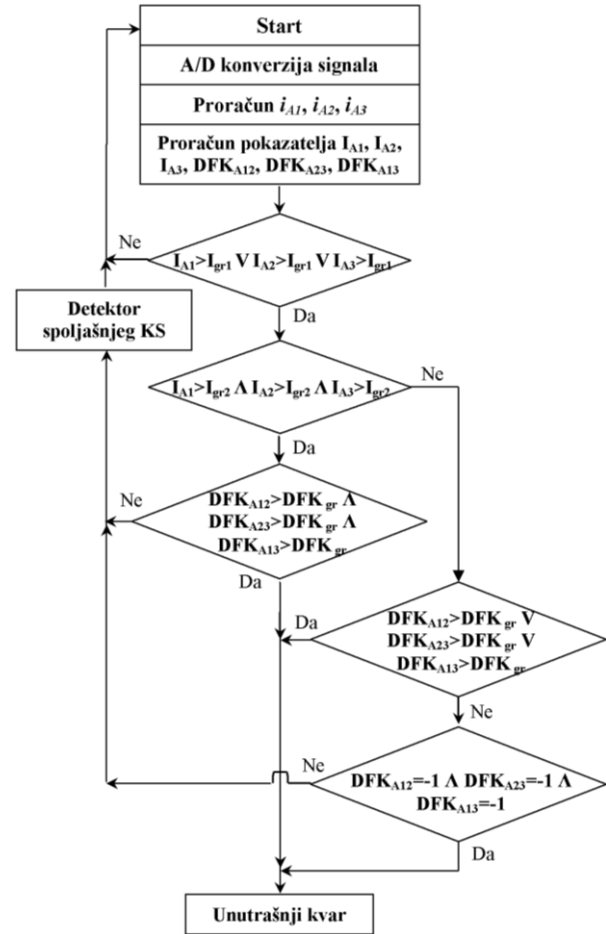
$$\begin{bmatrix} i_{A2}(1) & i_{A2}(2) & \dots & i_{A2}(m/2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{A3}(1) & i_{A3}(2) & \dots & i_{A3}(m/2) \end{bmatrix} \quad (18)$$

gde su:

$i_{A1}(n)$, $i_{A2}(n)$, $i_{A3}(n)$ – n-ti odbirak prilagođene struje primara, sekundara i tercijera transformatora respektivno.

Nakon uzimanja svakog novog odbirka izvršava se aktualizacija vektora tako što se najstariji član, sa indeksom 1 odbaci, ostalim članovima se indeksi smanje za jedan, a novi član se upiše na poslednju poziciju i dodeli mu se indeks $m/2$.



Sl. 5 Tok algoritma

Korak 3:

Vrši se proračunavanje potrebnih pokazatelja efektivnih vrednosti: I_{A1} , I_{A2} i I_{A3} , i indeksa usmerenosti: DFK_{A12} , DFK_{A23} i DFK_{A13} pomoću izraza (10) i (11).

Korak 4:

Zatim se posmatra da li je bilo koji od pokazatelja efektivnih vrednosti struja na primaru, sekundaru i tercijeru veći od definisane granične vrednosti I_{gr1} . Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na naredni korak (moguće je prisustvo kvara), u suprotnom se vraća na početak.

Granična vrednost struje I_{gr1} sa kojom se porede pokazatelji efektivnih vrednosti je podešena na 120% nominalne vrednosti odgovarajuće struje (I_{nom}) transformatora.

Korak 5:

U ovom koraku se proverava da li su svi pokazatelji efektivnih vrednosti struja na primaru, sekundaru i tercijeru veći od minimalne granične vrednosti $I_{gr2}=0,1I_{nom}$. Na ovaj način se proverava prisustvo struje na odgovarajućoj strani transformatora.

Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na naredni korak, u suprotnom prelazi na korak 7.

Korak 6:

U ovom koraku se vrši provera da li su vrednosti sva tri indeksa usmerenosti: DFK_{A12} , DFK_{A23} i DFK_{A13} veća od definisanog praga DFK_{gr} . U algoritmu koji je ovde testiran podešeno je $DFK_{gr}=-0,707$ r.j. Ako je ispunjen uslov (19) fazni pomeraj (φ) između struja i_i i i_j ($i, j=1,2,3, i \neq j$) se nalazi u sledećim granicama: $-135^\circ \sim \varphi \sim -135^\circ$, što bi ukazivalo na to da je detektovano prisustvo unutrašnjeg kvara i algoritam prelazi na korak 9. U suprotnom moguće je prisustvo spoljašnjeg kvara (poremećaja) i algoritam se vraća na početak.

$$DFK_{ij} > DFK_{gr} \quad (19)$$

Do narednih koraka algoritam će doći ukoliko je na nekoj od strana transformatora struja manja od $0,1I_{nom}$.

Korak 7:

Ako se transformator nalazi između dve aktivne i jedne pasivne mreže struja kvara dotiče sa dve strane. Tako da je za detekciju kvara potrebno/dovoljno da samo jedan od indeksa usmerenosti bude veći od granične vrednosti.

U ovom koraku se vrši provera da li je bilo koji od tri indeksa usmerenosti: DFK_{A12} , DFK_{A23} i DFK_{A13} veći od definisanog praga DFK_{gr} , što bi ukazalo na to da je detektovano prisustvo unutrašnjeg kvara. Ukoliko je uslov ispunjen algoritam prelazi na korak 9. U suprotnom prelazi na korak 8.

Korak 8:

U ovom koraku vrši se provera da li su sva tri indeksa usmerenosti: DFK_{A12} , DFK_{A23} i DFK_{A13} jednaka -1. Ovaj uslov će biti ispunjen u slučaju da su struje na dva kraja ET manje od $0,1I_{nom}$. Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na korak 9. Prepoznat je unutrašnji kvar na osnovu toga što je struja na jednoj od strana ET veća od $I_{gr1}=1,2I_{nom}$ (korak 4), a druge dve su manje od $I_{gr2}=0,1I_{nom}$ (sva tri indeksa DFK su jednaka -1). Ukoliko uslov nije ispunjen algoritam se vraća na početak.

Korak 9:

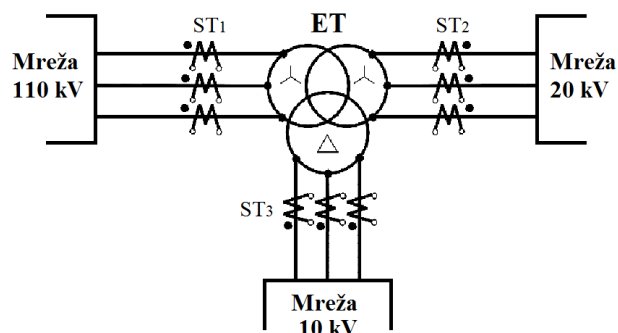
Detektovano je prisustvo unutrašnjeg kvara i aktivirana se signal za reagovanje.

Da bi se izbeglo nepotrebno reagovanje algoritma usled pojave zasićenja ST tokom spoljašnjih KS algoritam je dopunjen detektorom spoljašnjeg kvara do koga se u algoritmu dolazi nakon negativnog izlaza iz uslova u koraku 6 ili negativnog izlaza iz uslova u koraku 8. Negativni izlazi iz uslova u koraku 6 i koraku 8 ukazuju na prisustvo preopterećenja ili KS van štice zone.

Detektor spoljašnjeg kvara proverava da li su dva od tri pokazatelja efektivnih vrednosti struja na primaru, sekundaru i tercijeru veća od $I_{gr3}=1,7I_{nom}$. Ukoliko je uslov ispunjen aktivira se signal za blokadu reagovanja zaštite. U suprotnom se vraća na početak glavnog algoritma.

V. TESTIRANJE ALGORITMA I REZULTATI

Algoritam koji je predstavljen u prethodnom poglavlju je testiran signalima koji su generisani računarskim simulacijama. Model za simulaciju odgovara šemi koja je prikazana na Sl. 6. Transformator je prenosnog odnosa 110/21/10,5 kV/kV/kV, naznačene snage $S_n=31,5$ MVA, sprege YNyn0d1, zvezdište primara transformatora je direktno uzemljeno, a zvezdište sekundara je uzemljeno preko otpornika $R=40 \Omega$. Simulacijama



Sl. 6 Šema modela za simulaciju kvarova

su obuhvaćene sve vrste unutrašnjih i spoljašnjih kratkih spojeva na primaru, sekundaru i tercijeru za tri test modela:

Model 1: sve tri mreže 110kV, 20kV i 10kV su aktivne;

Model 2: dve mreže 110kV i 20kV su aktivne, a mreža 10kV je pasivna (odnosno sačinjena od pasivnih potrošača); i

Model 3: mreža 110kV je aktivna, a dve mreže 20kV i 10kV su pasivne.

Signali koji su dobijeni simulacijama su propušteni kroz model strujnog transformatora *IEEE PSRC CT SAT* koji je detaljno predstavljen u [10]. Primenom ovog modela dobijeni su signali struja tokom zasićenja ST-a, koji su dalje korišćeni za testiranje algoritama za zaštitu tronamotajnog ET.

Pomoću signala dobijenih računarskim simulacijama testiran je i upoređen rad:

1) Algoritma koji se zasniva na digitalnom faznom komparatoru koji je predstavljen u ovom radu.

2) Algoritma koji se zasniva na diferencijalnom principu. Korišćena je tipična karakteristika reagovanja (Sl. 1) sa dva nagiba gde su: $I_{d,min}=0,3$ r.j., $I_{s,1}=1$ r.j., $I_{s,2}=3$ r.j., nagibi $m_1=0,25$ i $m_2=0,5$, a diferencijalna struja i stabilizaciona su izračunate pomoću izraza (1) i (2), gde je $k=1/3$.

A. Rezultati simulacija

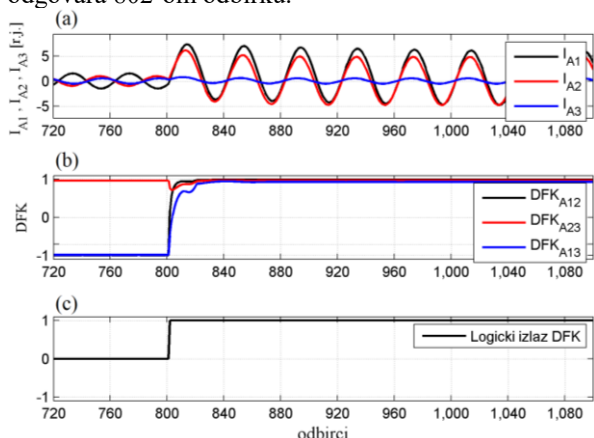
Primeri 1-3 će biti predstavljeni slikama (a) - (c). Slike (a) prikazuju talasne oblike usaglašenih struja primara (i_1), sekundara (i_2) i tercijera (i_3) u fazi koja je pogođena kvarom, slike (b) prikazuju indekse DFK_{12} , DFK_{23} i DFK_{13} , a slike (c) prikazuju odluku reagovanja novog algoritma.

Frekvencija odabiranja signala je 2 kHz. U svim primerima trenutak nastanka kvara odgovara 800-tom odbirku.

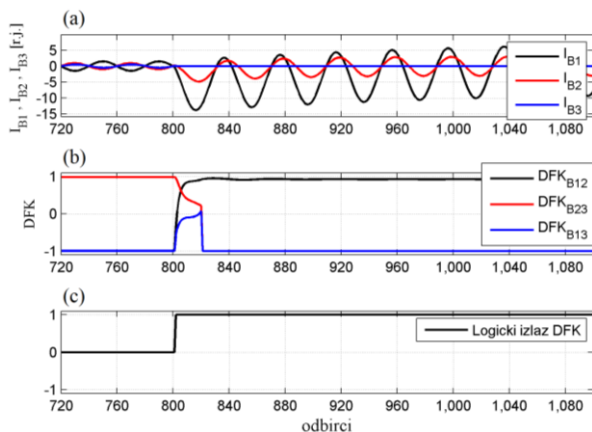
Primer 1: Mreže 110 kV, 20 kV i 10 kV su aktivne. Simuliran je unutrašnji dvofazni kratak spoj faza A i B na priključcima sekundara. Sl. 7 prikazuje rezultate za fazu A.

Primenom novog algoritma unutrašnji kvar, na osnovu rezultata za fazu A, je prepoznat nakon 1 ms od uspostavljanja KS, što na Sl. 7 odgovara 802-om odbirku.

Primer 2: Mreže 110 kV i 20 kV su aktivne, mreža 10 kV pasivna. Simuliran je unutrašnji trofazni kratak spoj na priključcima tercijera. Sl. 8 prikazuje rezultate za fazu B. Primenom novog algoritma unutrašnji kvar, na osnovu rezultata za fazu B, je prepoznat nakon 1 ms od uspostavljanja KS, što na Sl. 8 odgovara 802-om odbirku.

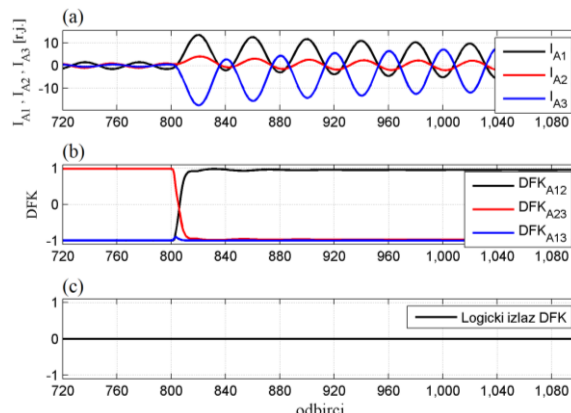


Sl. 7 Unutrašnji dvofazni kratak spoj na priključcima sekundara



Sl. 8 Unutrašnji trofazni kratak spoj na priključcima tercijera

Primer 3: Mreže 110 kV i 20 kV su aktivne, mreža 10 kV pasivna. Simuliran je spoljašnji dvofazni kratak spoj faza A i B na strani tercijera. Sl. 9 prikazuje rezultate za fazu A. Kao što je očekivano, u slučaju spoljašnjeg KS novi algoritam ne bi reagovao.

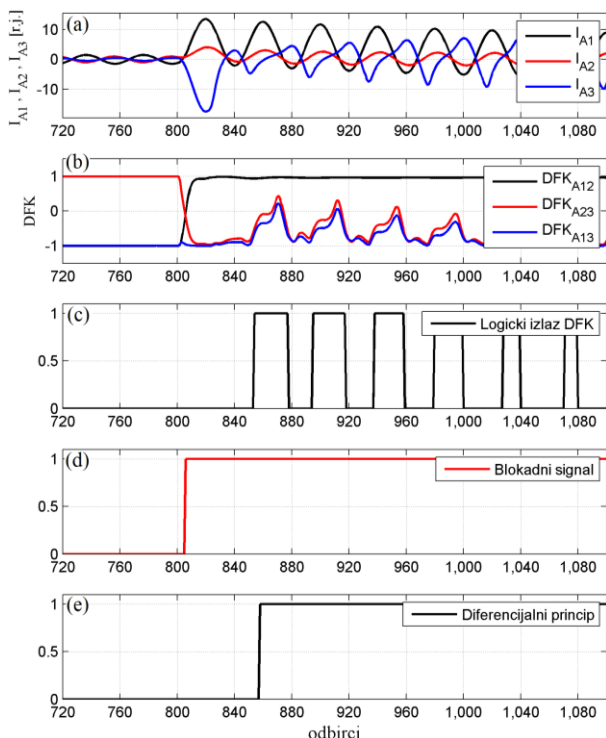


Sl. 9 Spoljašnji dvofazni kratak spoj na strani tercijera bez zasićenja ST

Primer 4: Mreže 110 kV i 20 kV su aktivne, mreža 10 kV pasivna. Simuliran je spoljašnji dvofazni kratak spoj faza A i B na strani tercijera praćen zasićenjem ST.

Na Sl. 10.a može se uočiti da je ST na tercijeru ušao u zasićenje u trenutku koji odgovara 823 odbirku, odnosno $t=11,5\text{ms}$ od uspostavljanja KS. Na Sl. 10.c i Sl. 10.e se može uočiti da bi novi algoritam (bez detektora spoljašnjeg kvara) i algoritam zasnovan na diferencijalnom principu nepotrebno reagovali 27 ms (854. odbirak) i 29 ms (858. odbirak) od uspostavljanja KS respektivno. Treba napomenuti da u ovom slučaju nije posmatrana blokada usled prisustva viših harmonika.

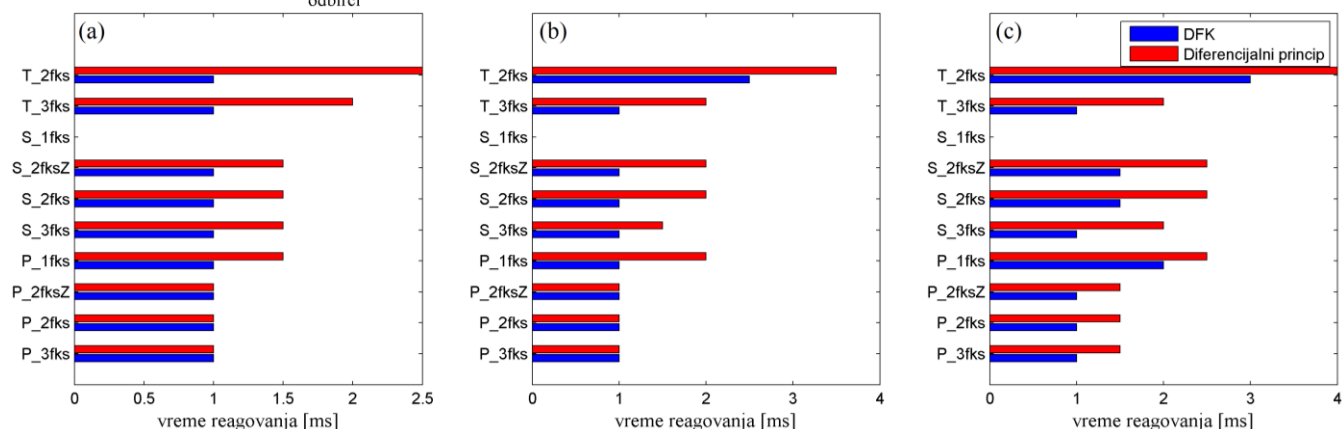
Detektor spoljašnjeg kratkog spoja, kojim je dopunjen novi algoritam, je aktivirao signal za blokiranje nepotrebnog reagovanja (Sl. 10.e) 3 ms nakon uspostavljanja KS. Može se zaključiti da bi detektor spoljašnjeg kvara prepoznao prisustvo spoljašnjeg kvara i aktivirao blokadni signal pre nego što bi ST ušao u zasićenje. Na taj način njegovom primenom nepotrebno reagovanje zaštite bi bilo sprečeno.



Sl. 10 Spoljašnji dvofazni kratak spoj na strani tercijera sa zasićenjem ST

B. Vremena reagovanja pri unutrašnjim KS

Na Sl. 11 su prikazana vremena reagovanja novog algoritma i algoritma koji se zasniva na diferencijalnom principu za sve vrste unutrašnjih KS na primaru, sekundaru i tercijeru za tri test modela. Može se uočiti da je pri svim posmatranim KS-evima novi algoritam detektovao prisustvo unutrašnjeg KS-a jednako brzo ili brže od algoritma koji se zasniva na diferencijalnom principu. Dok, oba algoritma nisu reagovala pri jednofaznom KS na sekundaru ET (S_1fks) čije je zvezdište uzemljeno preko aktivne otpornosti. ET čije je zvezdište uzemljeno preko aktivne otpornosti od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva se štiti primenom zemljospojne zaštite.



Sl. 11 Vremena reagovanja pri unutrašnjim KS-evima na primaru (P), sekundaru (S) i tercijeru (T): (a) Model 1, (b) Model 2 i (c) Model 3

VI. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen novi algoritam za zaštitu tronamotajnih ET-a od unutrašnjih kratkih spojeva koji se zasniva na primeni digitalne fazne komparacije struja koje se mere na primaru, sekundaru i tercijeru ET-a. Digitalnom faznom komparatoru je dodata i prekostrujna funkcija da bi se realizovala selektivna zaštita u slučaju kada ET ima samo jedan od svoja tri namotaja povezan na aktivnu mrežu, a druga dva namotaja napajaju pasivne mreže. Testovi su pokazali da se primenom ovog algoritma mogu prepoznati unutrašnji kratki spojevi i omogućiti pravovremeno reagovanje. Novi algoritam dopunjen detektorom spoljašnjeg kratkog spoja čijom upotrebom bi bilo sprečeno nepotrebno reagovanje zaštite tokom spoljašnjih kratkih spojeva praćenih zasićenjem ST-a.

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".

REFERENCE

- [1] M. Đurić, Z. Stojanović "Relejna zaštita", Beopres, Beograd 2014.
- [2] IEEE Standard C37.91, "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers"
- [3] Guzmán, A., Zocholl, S., Benmouyal, G., Altuve, H.: "A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection—Part I: Problem Statement", IEEE Transactions On Power Delivery, 2001, 16, (4), pp 485-491.
- [4] Stanbury, M., Djekic, Z.: 'The Impact of Current-Transformer Saturation on Transformer Differential Protection', IEEE Transactions on Power Delivery, June 2015, 30, (3), pp.1278 – 1287.

- [5] Stojanović, Z., Djurić, M.: 'The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator', *Electric Power Systems Research*, 2011, 81, pp. 377–383.
- [6] J. Krstivojević, M. Djurić: 'A New Method of Improving Transformer Restricted Earth Fault Protection', *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2014, 14; (3), pp. 41-48.
- [7] J. Krstivojević, M. Djurić, "A New Algorithm for Avoiding Maloperation of Transformer Differential Protection", *The 10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MEDPOWER 2016, Belgrade, Serbia, November 6-9, 2016*, pp. 1-6.
- [8] J. Krstivojević, M. Đurić, "Primena digitalne fazne komparacije u diferencijalnoj zaštiti energetskog transformatora", *Energija, Ekonomija, Ekologija*, br 3-4, mart 2015. ISSN: 0354-8651, str 129 – 135.
- [9] J.Krstivojević: "Digitalna zaštita energetskih transformatora od unutrašnjih kvarova", *Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet*, 2015.
- [10] 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*, 2000, 15, (1), pp. 62 – 72.

AUTHORS

First Author – Jelisaveta Krstivojević, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, j.krstivojevic@etf.rs .

Second Author – Zoran Stojanović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, stojanovic@etf.rs.

Third Author – Milenko Đurić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, mdjuric@etf.rs.

Correspondence Author – Jelisaveta Krstivojević, j.krstivojevic@etf.rs, +381113218340.