

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Jelisaveta P. Krstivojević

**DIGITALNA ZAŠTITA ENERGETSKIH  
TRANSFORMATORA OD UNUTRAŠNJIH  
KVAROVA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Jelisaveta P. Krstivojević

**DIGITAL PROTECTION OF POWER  
TRANSFORMERS AGAINST INTERNAL  
FAULTS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

## PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

### **Mentor:**

Prof. dr Milenko Đurić, redovni profesor u penziji, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

### **Mentor:**

Prof. dr Jovan Mikulović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

### **Član komisije:**

Prof. dr Dragan Tasić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu - Elektronski fakultet

### **Član komisije:**

doc. dr Zoran Stojanović, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

### **Član komisije:**

Prof. dr Zoran Lazarević, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

### **Datum odbrane:**

# DIGITALNA ZAŠTITA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA OD UNUTRAŠNJIH KVAROVA

## Rezime

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljeni su algoritmi za digitalnu zaštitu energetskih transformatora (ET-a) od unutrašnjih kvarova. Predstavljeni algoritmi za zaštitu od kratkih spojeva namotaja ET-a i za zaštitu ET-a od zemljospojeva baziraju se na primeni digitalne fazne komparacije u vremenskom domenu. Digitalni fazni komparator ne računa direktno fazni pomeraj između signala koje poredi, već proračunava integral proizvoda dva signala na intervalu dužine polovine osnovne periode signala.

Ispitana je mogućnost primene fazne komparacije primarne i sekundarne struje za detekciju unutrašnjih kratkih spojeva u ET-u. U normalnom režimu rada i tokom kvarova van zone zaštite struje primara i sekundara su u fazi, dok se u slučaju unutrašnjih kratkih spojeva pojavljuje fazni pomeraj između ove dve struje. U disertaciji je pokazano da fazni pomeraj između struja primara i sekundara tokom unutrašnjih kratkih spojeva zavisi kako od procenta kratkospojenih navojaka, tako i od parametara mreže i radnog režima koji je prethodio kvaru. Korišćenjem fazne komparacije primarne i sekundarne struje mogu se detektovati unutrašnji kratki spojevi.

Zbog postojanja opadajuće jednosmerne komponente u struji kvara algoritam je proširen digitalnim filterom opadajuće jednosmerne komponente, a zbog postojanja viših harmonika digitalnim Fourier-ovim filterom. Na ovaj način poboljšane su performanse algoritma.

Zatim je predstavljen algoritam koji koristi novi pristup u rešavanju problema nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite ET-a usled kvarova van štice zone praćenih zasićenjem ST-a. Novi pristup se zasniva na faznoj komparaciji primarne i sekundarne struje i služi za indikaciju prisustva kvara van štice zone. Prikazani rezultati potvrđuju da algoritam može da identifikuje prisustvo spoljašnjeg kvara i aktivira signal za blokadu pre nego što ST-i uđu u zasićenje. Njegovom primenom uspešno bi se moglo eliminisati nepotrebno delovanje diferencijalne zaštite i na taj način povećala njena sigurnost u radu.

U nastavku je predstavljen algoritam za zemljospojnu zaštitu energetskog transformatora koji se bazira na faznoj komparaciji sume struja na priključcima ET-a i struje neutralnog provodnika. Prikazani algoritam predstavlja novo rešenje za realizaciju zemljospojne zaštite energetskog transformatora. Primenom predstavljenog algoritma eliminisalo bi se nepotrebno reagovanje konvencionalne zemljospojne zaštite ET-a bazirane na diferencijalnom principu tokom spoljašnjih kvarova i uključenja neopterećenog ET-a praćenih zasićenjem ST-a. Algoritam koristi signale koji se ne filtriraju digitalnom Fourier-ovom transformacijom. Takođe, algoritam ne koristi blokadu po drugom harmoniku što ima prednost u brzini formiranja signala reagovanja. Prikazano je da se dodatnim usrednjavanjem vrednosti indeksa usmerenosti povećava otpornost algoritma na oscilacije indeksa koje nastaju usled zasićenja ST-a.

Svi algoritmi koji su predstavljeni u ovoj doktorskoj disertaciji su testirani pomoću signala koji su snimljeni u laboratoriji na fizičkim modelima jednofaznog i trofaznog energetskog transformatora i pomoću kompjuterski generisanih signala.

Prednost algoritma, koji su predstavljeni u ovoj doktorskoj disertaciji, za primenu u zaštiti energetskog transformatora čini njihova jednostavnost, kratko vreme odziva, pouzdanost i sigurnost u radu. Predstavljeni algoritmi se lako mogu implementirati u već postojeće jedinice za zaštitu energetskog transformatora. Zaštita energetskog transformatora najčešće obuhvata nekoliko jedinica, među kojima su diferencijalni releji i zemljospojni releji. Za rad pomenutih jedinica vrši se merenje struja na priključcima transformatora i struje neutralnog provodnika. Tako da su u već postojećim jedinicama za zaštitu ET-a, signali potrebni za rad predloženih algoritma obezbeđeni.

Na osnovu razvijenih algoritama za zaštitu energetskog transformatora kreiran je softverski alat pomoću koga su korisniku slikovito i jasno približeni principi rada tradicionalne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite ET-a, i predstavljen je rad algoritama za zaštitu koji se baziraju na faznoj komparaciji u vremenskom domenu. Softverski alat omogućava da se algoritmi za zaštitu testiraju učitavanjem realnih signala koji su snimljeni u laboratoriji ili korišćenjem signala koji su generisani kompjuterskim simulacijama. Kreirani softverski alat se može koristiti u edukativne svrhe.

**Ključne reči:** relejna zaštita, digitalni releji, zaštita energetskog transformatora, zemljospojna zaštita energetskog transformatora, fazni komparator

**Naučna oblast:** Tehničke nauke – Elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** Elektroenergetski sistemi

**UDK:** 621.3

# DIGITAL PROTECTION OF POWER TRANSFORMERS AGAINST INTERNAL FAULTS

## Abstract

Algorithms for digital protection of power transformers (PT) against internal faults have been presented in this doctoral dissertation. The presented algorithms for protection against short circuits of PT windings and for protection against ground-faults are based on time domain digital phase comparison. The digital phase comparator does not calculate the phase displacement between the signals which are being compared, but calculates the integral of the product of two signals over one basic half-period of the signals.

The possibility of applying the phase comparison of the primary and secondary currents aimed at detecting internal faults in PTs has been investigated. In normal operating regimes and during faults outside the protection zone, the primary and secondary currents are in phase, while in case of internal short-circuit faults a phase shift appears between these two currents. In this dissertation, it has been shown that the phase shift between the primary and secondary currents during internal short-circuits depends both on the percentage of the short circuited windings and the network parameters as well as operating regime prior to the fault. It is possible to detect internal short-circuit faults by utilizing the phase comparison of the primary and secondary currents.

The algorithm has been expanded by adding a digital filter for the dc component due to the existence of a decreasing dc current component in the fault current; in addition to this, the algorithm has been extended by adding the digital Fourier filter due to the existence of higher harmonics. In this way, the algorithm performance has been enhanced.

Next, the algorithm that uses a new approach to solve the problem of misoperation of the transformer differential protection due to faults outside the protected zone accompanied by current transformer (CT) saturation has been presented. The new approach is based on the phase comparison of the primary and secondary currents, and is used as indication of an external fault presence. The presented results confirm that the algorithm can identify an external fault presence and activates the blocking signal

before CTs reach saturation. Its application would successfully eliminate an unnecessary operation of the differential protection and so increase its security.

In the part that follows, an algorithm for restricted earth fault protection of power transformers has been presented based on the phase comparison of the sum of phase currents and the neutral conductor current. The presented algorithm represents a new solution for realization of restricted earth fault protection of power transformers. By applying this algorithm one would eliminate false tripping of the conventional restricted earth fault protection of PTs based on the differential principle during external faults or energization of an unladen PT accompanied by CT saturation. The algorithm utilizes the signals that are not filtered by means of the digital Fourier transform. Moreover, the new method does not make use of second harmonic blockade which results in a high speed of making trip decision. It has been shown that an additional averaging of the directional index values increases robustness of the algorithm to oscillations of the directional index caused by CT saturation.

All algorithms presented in the thesis have been tested by the laboratory recorded signals using physical models of a single-phase or three-phase PT and also by computer generated signals.

The advantage of the algorithms, which have been presented in this doctoral dissertation, in the domain of their application in PT protection lies in their simplicity, short response time, reliability and security. The presented algorithms can easily be implemented in already existing PT protection units. The PT protection usually requires several units, these being differential relays and ground fault relays. The phase currents at transformer terminals and current of the neutral conductor are measured with the aim of enabling proper function of these units. In such a way, the already existing PT protection units require signals necessary for the proposed algorithms' functionality.

On the basis of the developed PT protection algorithms a software tool has been created with the help of which the principles of operation of the traditional differential protection and restricted earth fault protection of power transformers have been brought closer to an end user in order to understand them visually and clearly. In addition to this, the performance of new protection algorithms that are based on time domain phase comparison has been presented. The software tool enables the protection algorithms to undergo testing by loading the genuine signals, recorded in the laboratory, or by means



of computer simulation generated signals. The created software tool can also be used for educational purposes.

**Keywords:** relay protection, digital relaying, power transformer protection, power transformer ground fault protection, phase comparator.

**Scientific field:** Technical science – Electrical engineering

**Specific scientific field:** Power Systems

**UDK:** 621.3

## SADRŽAJ:

1. UVOD .....	1
2. DIFERENCIJALNA ZAŠTITA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA.....	6
2.1 Stabilizovana diferencijalna zaštita .....	7
2.2 Stabilizovana diferencijalna zaštita sa blokadom usled prisustva viših harmonika	9
2.2.1 Blokiranje stabilizovane diferencijalne zaštite tokom pojave udarne struje	
magnećenja .....	10
2.2.2 Blokiranje stabilizovane diferencijalne zaštite tokom prepobuđenosti	
energetskog transformatora .....	12
2.2.3 Zaključak .....	13
3. ANALIZA MOGUĆNOSTI PRIMENE FAZNOG KOMPARATORA U ZAŠTITI	
ENERGETSKOG TRANSFORMATORA.....	14
3.1 Fazni komparator na bazi integrala proizvoda dva signala .....	14
3.2 Testiranje razvijenih algoritama .....	20
3.2.1 Kompjuterske simulacije KS-eva na namotaju ET-a .....	20
3.2.2 Fizički model ET za eksperimentalna merenja.....	21
3.3 Ideja primene fazne komparacije u zaštiti enetgetskih transformatora .....	23
3.3.1 Promena faznog pomeraja primarne i sekundarne struje tokom KS na	
namotaju ET-a .....	25
3.3.2 Vrednosti indeksa usmerenosti tokom kratkih spojeva .....	41
3.3.3 Trofazni dvonamotni energetski transformator .....	42
3.3.4 Prilagođavanje ulaznih signala struja .....	43
3.4 Kompjuterske simulacije kratkih spojeva namotaja trofaznog ET-a.....	45
3.4.1 Promena indeksa usmerenosti tokom KS-eva namotaja ET-a koji radi između	
dve aktivne mreže .....	46
3.4.1.1 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNyn0.....	47
3.4.1.2 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege Dyn11.....	53
3.4.1.3 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNd1.....	57
3.4.1.4 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNy0.....	61
3.4.1.5 Uticaj odnosa X/R unutrašnje impedanse mreže na indeks usmerenosti ....	65
3.4.1.6 Kratki spojevi između faza na priključcima ET-a.....	68

3.4.2 Promena indeksa usmerenosti tokom KS-eva namotaja ET-a koji radi između aktivne i pasivne mreže .....	70
3.4.2.1 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNyn0.....	71
3.4.2.2 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege Dyn11.....	76
3.4.2.3 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNd1.....	79
3.4.2.4 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege Yny0.....	82
3.4.2.5 Uticaj odnosa X/R unutrašnje impedanse mreže na indeks usmerenosti ....	85
3.4.2.6 Kratki spojevi između faza na priključcima ET-a.....	87
3.5 Eksperimentalna merenja .....	88
3.5.1 Merenja na monofaznom transformatoru .....	89
3.5.2 Merenja na trofaznom trostubnom transformatoru sprege YNyn .....	90
3.5.3 Merenja na trofaznom trostubnom transformatoru Dyn.....	95
3.6 Zaključak .....	99
4. UNAPREĐENJE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE TOKOM SPOLJAŠNJIH KVAROVA PRIMENOM DIGITALNOG FAZNOG KOMPARATORA .....	102
4.1 Uticaj zasićenja strujnih transformatora na zaštitu ET-a.....	104
4.1.1 Model strujnog transformatora .....	106
4.1.2 Digitalno filtriranje viših harmonika i jednosmerne komponente.....	108
4.2 Testiranje algoritama za zaštitu ET-a .....	109
4.2.1 Algoritam za blokadu nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite.....	112
4.2.2 Poređenje različitih algoritama za zaštitu ET-a.....	115
4.3 Zaključak .....	119
5. ZEMLJOSPOJNA ZAŠTITA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA .....	120
5.1 Koncept primene fazne komparacije u zemljospojnoj zaštiti.....	121
5.2 Algoritam za zemljospojnu zaštitu baziran na faznoj komparaciji u vremenskom domenu .....	124
5.2.1 Testiranje algoritma.....	127
5.2.1.1 Eksperimentalna merenja u laboratoriji.....	127
5.2.1.2 Kompjuterske simulacije .....	128
5.2.1.3 Testirani slučajevi.....	129
5.2.2 Rezultati testova .....	129
5.2.2.1 Interni i eksterni kvarovi opterećenog transformatora .....	130
5.2.2.2 Uključenje neopterećenog ET-a .....	135

5.2.3 Poboljšanje algoritma za zemljospojnu zaštitu transformatora .....	139
5.2.4 Uključenje neopterećenog transformatora u kvaru.....	142
5.2.5 Definitivni algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a.....	145
5.2.6 Izbor granične vrednosti indeksa usmerenosti.....	146
5.2.6.1 Simulacija uključenja neopterećenog energetskog transformatora .....	148
5.2.6.2 Monte Carlo simulacija neizvesnih ulaznih podataka .....	150
5.2.6.3 Testiranje algoritma.....	152
5.2.6.4 Rezultati.....	154
5.3 Zaključak .....	156
6. SOFTVERSKI ALAT ZA SIMULACIJU DIGITALNE ZAŠTITE ENERGETSKOG TRANSFORMATORA.....	158
6.1 Simulacija diferencijalne zaštite.....	159
6.2 Simulacija zemljospojne zaštite .....	164
6.3 Zaključak .....	168
7. ZAKLJUČAK .....	169
8. LITERATURA.....	172
9. NOMENKLATURA.....	178
10. BIOGRAFIJA AUTORA.....	182

### 1. UVOD

Transformator je statički aparat koji pomoću elektromagnetske indukcije pretvara jedan sistem naizmjeničnih struja u jedan ili više sistema naizmjeničnih struja iste učestanosti i obično različitih vrednosti napona i struja [1]. Energetski transformatori (ET-i) spadaju u najbrojnije električne mašine u elektroenergetskom sistemu (EES-u). Takođe, ET-i spadaju u najefikasnije električne mašine kod kojih neke jedinice na izlaz prenesu više od 99% ulazne snage.

Transformator je izuzetno bitna i skupa komponenta elektroenergetskog sistema. Veoma je bitno da transformator bude opremljen pouzdanom, sigurnom i brzom zaštitom od mogućih unutrašnjih kvarova. Prilikom odabira zaštite nekog ET-a često je moguće primeniti više zaštitnih šema. Pri odabiru najpogodnije i najefikasnije zaštitne šeme treba naći balans između brzine, osetljivosti i selektivnosti sa jedne strane i njihove isplativosti sa druge strane [2].

U opštem slučaju zaštita ET-a se može podeliti na:

- zaštitu od kvarova koji nastaju u transformatoru; i
- zaštitu od efekata kvarova koji nastaju van transformatora.

Uzroci pojave kvarova u ET-u su dosta različiti. Neki od uzroka mogu biti prevelika električna naprezanja izolacije transformatora usled atmosferskih ili pogonskih prenapona u mreži, prejak mehanička naprezanja zbog dinamičkih sila kod kratkih spojeva, ali i naponi neznatno veći od nominalnog jer doprinose bržem starenju izolacije. Sprovedena studija na osnovu ispitanih kvarova u ET-ima [3] pokazala je da od 70% do 80% ukupnih kvarova ET-a čine kvarovi koji su nastali usled oštećenja izolacije. Kod ET-a najčešći kvarovi su međuzavojni kratki spojevi ili kratki spojevi namotaja sa uzemljenim delovima ET-a, dok je pojava međufaznih kratkih spojeva ređa. Do međufaznih kratkih spojeva najčešće dolazi na priključcima izvan kazana usled spoljašnjih uticaja, dok se međufazni kratki spojevi unutar transformatora dešavaju vrlo retko.

Kvarovi na transformatoru mogu se uopšteno podeliti na:

- kratke spojeve namotaja ili izvoda iz ET-a prema uzemljenim delovima;
- međuzavojne kratke spojeve namotaja iste faze;
- međufazne kratke spojeve u ET-u ili na izvodima iz ET-a;

- kratke spojeve između namotaja primara i sekundara koji se nalaze na istom stubu; i
- oštećenja jezgra i kazana.

Osim unutrašnjih kvarova energetski transformator ugrožavaju i spoljašnji kratki spojevi i preopterećenja, kada kroz namotaje transformatora protiču struje veće od nominalnih. U slučajevima dužeg trajanja ovih struja, može doći do intenzivnog zagrevanja i oštećenja izolacije namotaja. Takođe, dosta je bitno da zaštita ET-a ne deluje nepotrebno. Za zaštitu energetskog transformatora od velikog značaja je da može da napravi razliku između unutrašnjeg kvara i spoljašnjih poremećaja koji uzrokuju nepotrebno reagovanje.

Najčešći tip zaštite ET-a od unutrašnjih kvarova predstavlja diferencijalna zaštita [4-7]. Diferencijalna zaštita predstavlja brzu i selektivnu zaštitu ET-a i obavezna je za transformatore nominalne snage preko 8 MVA. Najveći nedostatak diferencijalne zaštite je to što može nepotrebno reagovati pri pojavi udarne struje magnećenja i prepobuđenosti ET-a. Osim toga, zasićenje strujnih transformatora ima veliki uticaj na pravilan rad diferencijalne zaštite, kako tokom spoljašnjih kratkih spojeva tako i tokom unutrašnjih kratkih spojeva.

Od početka primene numeričke diferencijalne zaštite [2] velika pažnja se posvećuje razvoju metoda za razlikovanje udarne struje magnećenja i struje koja se javlja tokom kvarova unutar štice zone ET-a. Kod prvih metoda, koje su se bavile ovim pitanjem, problem je rešavan uvođenjem vremenskog odlaganja reagovanja. Ovim bi se neželjeno reagovanje diferencijalne zaštite izbeglo, dok bi u slučaju unutrašnjeg kvara transformator bio izložen kvaru nepotrebno dugo. Danas se u literaturi mogu sresti različite metode kojima se može prevazići nepovoljan uticaj struje magnećenja, a neke od njih su bazirane na: *wavelet* transformaciji [8, 9], neuralnim mrežama [10-14], fuzzy logici [15, 16], na upoređivanju snage koja ulazi i izlazi iz ET-a [17], prepoznavanju talasnog oblika struje [2, 18] i praćenju prisustva viših harmonika [19, 20].

Za eliminaciju nepotrebnog reagovanja usled pojave udarne struje magnećenja od metoda koje su nabrojane, najširu primenu u praksi našle su metode koje se baziraju na praćenju prisustva drugog i četvrtog harmonika [21].

Transformator će biti prepobuđen ukoliko dođe do povećanja napona ili pada frekvencije. Nepotrebno reagovanje diferencijalne zaštite usled pojave prepobuđenosti ET-a rešava se blokadom po petom harmoniku [21].

Još jedan nedostatak diferencijalne zaštite predstavlja neosetljivost na kratke spojeve malog broja navojaka kada je vrednost diferencijalne struje nedovoljno velika da bi zaštita reagovala. Da bi se prevazišao ovaj nedostatak u naučnoj literaturi se predlaže primena metoda koje se baziraju na neuralnim mrežama i *wavelet* transformaciji [10,11,22,23]. Zbog zahtevnosti ove metode nisu našle širu primenu u praksi. U cilju prevazilaženja neosetljivosti diferencijalne zaštite tokom KS-eva malog broja navojaka predložena je metoda koja se zasniva na diferencijalnom principu koji posmatra inverzne komponente struje kvara [24]. Ova metoda je implementirana u neke releje novijih generacija.

U ovoj doktorskoj disertaciji ispitana je mogućnost primene fazne komparacije primarne i sekundarne struje ET-a za detekciju unutrašnjih KS-eva. Poznato je da su fazno prilagođene struje primara i sekundara u fazi tokom normalnih radnih režima i tokom spoljašnjih KS-eva, dok se tokom unutrašnjih KS-eva javlja fazni pomeraj između ove dve struje. Upravo ova činjenica je poslužila kao ideja da se ispita mogućnost primene fazne komparacije u zaštiti ET-a od unutrašnjih kvarova. Pokazano je da fazni pomeraj između struja primara i sekundara tokom unutrašnjih kratkih spojeva zavisi kako od procenta kratkospojenih navojaka, tako i od parametara mreže i radnog režima koji je prethodio kvaru. Na osnovu signala koji su generisani simulacijama i koji su snimljeni u laboratoriji pokazano je da se korišćenjem fazne komparacije primarne i sekundarne struje mogu detektovati kratki spojevi namotaja ET-a. Takođe, pomoću signala koji su generisani simulacijama, za KS-eve 5% namotaja ET-a, procenjen je rad releja koji se bazira na diferencijalnom principu.

U nastavku je predstavljen algoritam koji koristi novi pristup u rešavanju problema nepotrebno reagovanja diferencijalne zaštite ET-a usled kvarova van štice zone praćenih zasićenjem ST-a. Novi pristup se zasniva na faznoj komparaciji primarne i sekundarne struje, i služi za indikaciju prisustva kvara van štice zone. Prikazani rezultati potvrđuju da algoritam može da identifikuje prisustvo spoljašnjeg kvara i aktivira signal za blokadu pre nego što ST-i uđu u zasićenje. Njegovom primenom uspešno bi se moglo eliminisati nepotrebno delovanje diferencijalne zaštite i na taj način povećala njena pouzdanost.

Kao što je već rečeno, u velikom broju slučajeva diferencijalna zaštita obezbeđuje zadovoljavajući nivo pouzdanosti i sigurnosti u radu. Međutim, ova zaštita nije dovoljno osetljiva da detektuje unutrašnji jednofazni kratak spoj ukoliko se kvar nalazi u blizini neutralne tačke transformatora ili ako je struja zemljospoja ograničena [25].

Ukoliko je zvezdište transformatora uzemljeno preko niskoomske impedanse fazna diferencijalna zaštita ne štiti ceo namotaj transformatora od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva. Da bi se prevazišao pomenuti problem koristi se zemljospojna zaštita transformatora. Ova zaštita se izvodi posebno za primarni i sekundarni namot transformatora zbog čega se u literaturi često naziva ograničenom zemljospojnom zaštitom.

Zemljospojna zaštita se najčešće realizuje korišćenjem releja koji se baziraju na diferencijalnom principu. Istorijski posmatrano, najpre je bio dostupan visoko-impedansni relej za zemljospojnu zaštitu transformatora koji se bazirao na diferencijalnom tipu. Ovakavi releji imaju određeni stepen otpornosti na zasićenja ST-a. Međutim, njihova upotreba zahteva posebnu pažnju prilikom izbora ST-a jer je potrebno da: odnos broja navojaka faznih ST-a i ST u neutralnom provodniku budu isti, karakteristike magnećenja ST-a budu približno iste i da ST-i imaju približno iste i visoke vrednosti napona na kolenu karakteristike magnećenja. Danas su u širokoj upotrebi numerički (nisko-impedansni) zemljospojni releji. Veoma važna prednost ovih releja je to što karakteristike i odnos broja navojaka faznih ST-a, kao i ST u neutralnom provodniku ne moraju biti isti. Međutim, ovaj relej je sklon nepotrebnom reagovanju ukoliko dođe do zasićenja ST-a tokom spoljašnjih kvarova ili uključenja transformatora. Rad ovog releja se može poboljšati korišćenjem neke od metoda koje posmatraju prisustvo viših harmonika [26,27], funkciju smeru [26,28,29,33,34], ili metodu adaptivne stabilizacije struje [35,36].

U ovom radu biće predstavljen algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a koji se bazira na digitalnoj faznoj komparaciji sume struja na priključcima ET-a i struje neutralnog provodnika [33,34]. Primenom ovog algoritma rad konvencionalne zemljospojne zaštite bi bio poboljšan tokom spoljašnjih kvarova i uključenja ET-a praćenih zasićenjem ST-a.

Algoritmi koji će biti predloženi u ovoj doktorskoj disertaciji se baziraju na primeni fazne komparacije u vremenskom domenu. Primenjena fazna komparacija se bazira na proračunu integrala proizvoda dva signala na intervalu dužine poluperiode signala [4,30–34].



Svi algoritmi koji su predstavljeni u ovoj doktorskoj disertaciji su testirani pomoću kompjuterskih simulacija i eksperimentalnih merenja na realnim transformatorima. Predstavljeni algoritmi se lako mogu implementirati u već postojeće jedinice za zaštitu energetskog transformatora. Imajući u vidu da zaštita energetskog transformatora najčešće obuhvata nekoliko jedinica, među kojima su diferencijalni releji i zemljospojni releji. Za rad pomenutih jedinica vrši se merenje faznih struja na priključcima transformatora i struje neutralnog provodnika. Tako da su u već postojećim jedinicama za zaštitu ET-a, obezbeđeni signali potrebni za rad algoritama koji su predloženi.

Na osnovu razvijenih algoritama za zaštitu energetskog transformatora kreiran je softverski alat pomoću koga su korisniku:

- slikovito i jasno približeni principi rada tradicionalne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite, i
- slikovito i jasno predstavljeni principi rada zaštite od KS-eva namotaja i zemljospojne zaštite koje se baziraju na faznoj komparaciji u vremenskom domenu.

Softverski alat omogućava da se algoritmi za zaštitu testiraju učitavanjem realnih signala koji su snimljeni u laboratoriji ili korišćenjem signala koji su generisani kompjuterskim simulacijama. Kreirani softverski alat se može koristiti u edukativne svrhe.

### **Ciljevi istraživanja:**

Na osnovu pregleda postojećih rešenja za zaštitu ET-a mogu se postaviti osnovni ciljevi ove doktorske disertacije:

- razvoj novih i poboljšanje postojećih algoritma za zaštitu ET-a,
- primena fazne komparacije primarne i sekundarne struje u zaštiti ET-a,
- eliminacija nepotrebnog reagovanja tokom spoljašnjih kratkih spojeva usled zasićenja strujnih transformatora,
- primena digitalnog faznog komparatora u zemljospojnoj zaštiti ET-a,
- pouzdan i siguran rad zemljospojne zaštite pri spoljašnjim kvarovima pri pojavi zasićenja strujnih transformatora,
- pouzdan i siguran rad zemljospojne zaštite tokom uključenja neopterećenog ET-a pri pojavi zasićenja strujnih transformatora,
- postizanje kratkog vremena odziva.

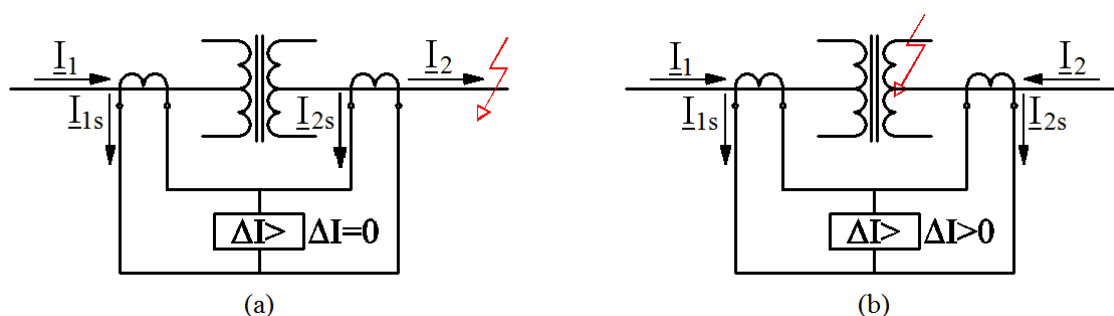
## 2. DIFERENCIJALNA ZAŠTITA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Diferencijalna zaštita je prvi put primenjena krajem 19. veka i bila je jedan od prvih sistema zaštite koji se koristio [5]. Danas ona predstavlja najčešći tip zaštite transformatora. Obavezna je za transformatore nominalne snage preko 8 MVA.

Diferencijalna zaštita predstavlja brzu i selektivnu zaštitu ET-a od unutrašnjih kratkih spojeva. Princip rada diferencijalne zaštite se zasniva na izračunavanju sume svih struja koje ulaze i koje izlaze iz štice zone. Zaštita za proračun diferencijalne struje koristi struje koje mere strujni transformatori na priključcima transformatora. Štićena zona energetskog transformatora definisana je položajem strujnih transformatora. Ako posmatramo idealan energetski transformator i ako pretpostavimo da su strujni transformatori na njegovim krajevima idealni, u uslovima rada kada nije prisutan kvar unutar štice zone, struja koja ulazi u štice zonu jednaka je struji koja je napušta (Sl. 2.1.a), odnosno diferencijalna struja je jednaka nuli. Dok diferencijalna struja veća od nule ukazuje na prisustvo kvara unutar štice zone (Sl. 2.1.b). U praksi, diferencijalna struja za normalne uslove rada transformatora je uvek veća od nule. Jedan od razloga je struja magnećenja koja stvara razliku između primarne i sekundarne struje transformatora.

Releji koji se koriste u diferencijalnoj zaštiti su [6, 21]:

1. Stabilizovani diferencijalni relej;
2. Stabilizovani diferencijalni relej sa mogućnošću blokade usled prisustva viših harmonika.



Sl. 2.1 Tipični način povezivanja diferencijalnog releja za zaštitu ET-a

### 2.1 Stabilizovana diferencijalna zaštita

Stabilizovani diferencijalni releji porede diferencijalnu struju sa stabilizacionom. Diferencijalna struja se može izračunati kao:

$$I_{dif} = |\underline{I}_1 - \underline{I}_2|, \quad (2.1)$$

gde su:  $\underline{I}_1$  i  $\underline{I}_2$  vektori struja koje se mere na primarnim i sekundarnim priključcima ET-a (prilagođeni po fazi i amplitudi).

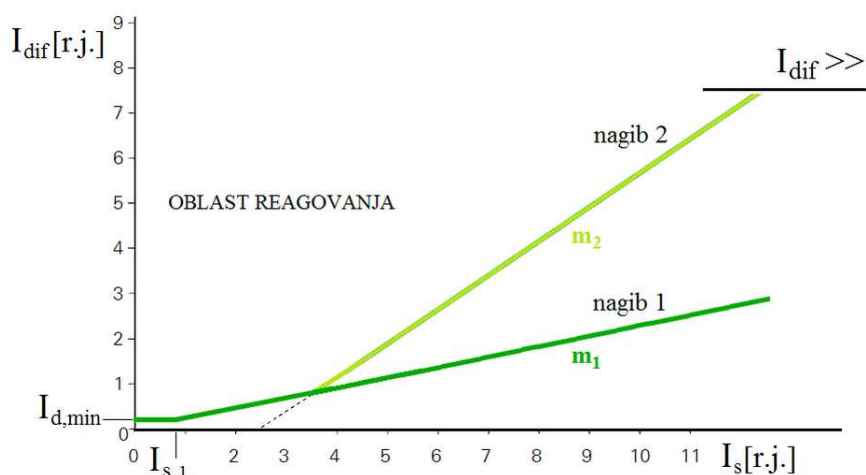
Stabilizaciona struja se izračunava pomoću izraza (2.2), gde se za faktor  $k$  često uzima vrednost 1 ili 0.5.

$$I_s = k|\underline{I}_1 + \underline{I}_2| \quad (2.2)$$

Ovde treba napomenuti da postoji više pristupa prilikom proračuna diferencijalne i stabilizacione struje. U relejima poslednjih generacija se najčešće mogu sustesti dve kombinacije. Prva, gde zaštita koristi osnovne (50 Hz) harmonike diferencijalne i stabilizacione struje, i druga gde zaštita koristi osnovni (50 Hz) harmonik diferencijalne i nefiltriranu stabilizacionu struju.

Na Sl. 2.2 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 ( $m_1$ ). Vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje na karakteristici su izražene u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu struju ET-a ( $I_{baz}=I_{nT}$ ). Oblast reagovanja se nalazi iznad karakteristike reagovanja. Ukoliko karakteristika reagovanja ima samo jedan nagib ( $m_1$ ) i ukoliko linija sa nagibom polazi iz prelomne tačke ( $I_{s,1}$ ,  $I_{d,min}$ ), uslov reagovanja se može izraziti relacijom (2.3).

$$\begin{cases} I_{dif} \geq I_{d,min} & , \quad za \quad I_s \leq I_{s,1} \\ I_{dif} \geq m_1(I_s - I_{s,1}) + I_{d,min} & , \quad za \quad I_s > I_{s,1} \end{cases} \quad (2.3)$$



Sl. 2.2 Karakteristika reagovanja stabilizovanog diferencijalnog releja

U slučaju prisustva spoljašnjeg kvara diferencijalni releji rade korektno dokle god strujni transformatori verno preslikavaju primarnu struju na sekundar. Ako bi jedan od strujnih transformatora ušao u zasićenje, ili ako bi nivo zasićenja strujnih transformatora bio različit, pojavljuje se lažna diferencijalna struja koja može dovesti do nepotrebnog reagovanja zaštite. Karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom [20] bi trebala da poveća sigurnost rada releja pri većim zasićenjima ST-ra. Na Sl. 2.2 ova karakteristika je predstavljena nagibima  $m_1$  i  $m_2$ .

Na karakteristici reagovanja treba uočiti još jedan deo označen sa ( $I_{dif} \gg$ ). Dodavanjem ove prekostrujne funkcije obezbeđuje se da zaštita reaguje kada je diferencijalna struja veća od neke podešene vrednosti ( $I_{dif,max}$ ) bez obzira na vrednost stabilizacione struje. Tipična vrednost na koju se podešava ovaj prekostrujni element je ( $I_{dif,max}=20$  r.j.), dok se u praksi često može sresti da ( $I_{dif,max}$ ) bude podešeno i na manje vrednosti.

Mogući razlozi za pojavu diferencijalne struje ("lažne"), koja nije posledica unutrašnjeg kratkog spoja su:

- Promenljiv prenosni odnos regulacionog ET-a;
- Udarna struja magnećenja nastala usled uključenja ET-a, isključenja bliskog spoljašnjeg kvara ili uključenja drugog ET-a sa kojim posmatrani ET radi redno ili je vezan na istim sabirnicama;
- Velike vrednosti struje magnećenja usled prepobuđenosti ET-a i

- Pojava zasićenja strujnih transformatora.

Tipične vrednosti koje se koriste prilikom podešavanja minimalne diferencijalne struje, na Sl. 2.2 označena sa ( $I_{d,min}$ ), za ET-e sa konstantnim prenosnim odnosom ( $m_T = \text{const}$ ) su oko 30%  $I_{nT}$ . Ovakvim podešavanjem izbegava se lažno reagovanje releja usled struja magnećenja. Kod regulacionih ET-a zbog promenljivog prenosnog odnosa ( $m_T \neq \text{const}$ ), koji stvara struju debalansa, minimalna diferencijalna struja ( $I_{d,min}$ ) se podešava na (35% - 40%)  $I_{nT}$ .

Veoma složen problem za stabilizovanu diferencijalnu zaštitu ET-a predstavlja da napravi razliku između unutrašnjeg kvara i: udarne struje magnećenja ili prepobuđenosti ET-a. Ovaj problem se prevazilazi upotrebom stabilizovanih diferencijalnih releja sa mogućnošću blokade usled prisustva viših harmonika.

Takođe, do pojave "lažne" diferencijalne struje može doći usled zasićenja jednog od strujnih transformatora ili različitog nivoa zasićenja strujnih transformatora na priključcima ET-a tokom spoljašnjih kratkih spojeva ili dužeg rada ET-a u preopterećenju. Kao što je već pomenuto, ovaj problem se prevazilazi upotrebom karakteristike reagovanja sa dvostrukim nagibom. Međutim, skorija istraživanja [37] skreću pažnju na to da ukoliko se koristi blokada reagovanja usled prisustva viših harmonika, tada tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem ST-a, nepravilno reagovanje biva izbegnuto delovanjem blokade. Dok drugi nagib nema ili ima mnogo manje udela u sprečavanju nepravilnog reagovanja diferencijalnog releja, o čemu će biti više reči u glavi 4.

### **2.2 Stabilizovana diferencijalna zaštita sa blokadom usled prisustva viših harmonika**

Blokiranjem rada diferencijalnog releja na osnovu prisustva viših harmonika obezbeđuje se sigurnost u radu releja tokom pojave udarne struje magnećenja i prepobuđenosti energetskog transformatora.

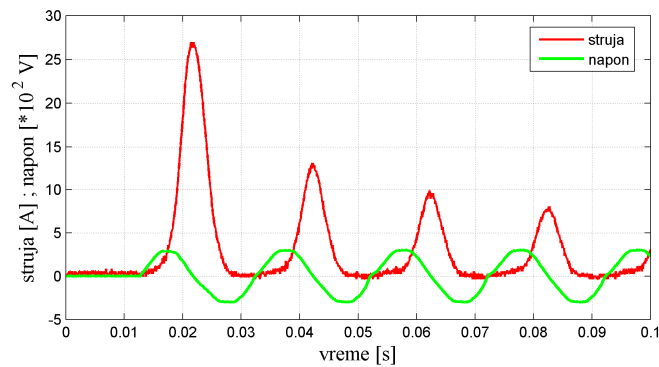
### 2.2.1 Blokiranje stabilizovane diferencijalne zaštite tokom pojave udarne struje magnećenja

Svaka veća i iznenadna promena napona na priključcima transformatora može izazvati uslove rada koje karakteriše velika distorzija struje magnećenja. Iako se najčešće udarna struja magnećenja u energetskim transformatorima povezuje sa uključenjem neopterećenog transformatora, ona može biti uzrokovana i: pojavom spoljašnjeg kvara, promenom napona nakon otklanjanja spoljašnjeg kvara, promenom vrste spoljašnjeg kvara (na primer prelaskom jednofaznog kvara na dvofazni) ili nakon uključenja drugog neopterećenog transformatora sa kojim posmatrani transformator radi u paraleli. Kada se posmatra pojava udarne struje magnećenja od svih nabrojanih uzroka za njeno nastajanje inicijalno magnećenje izazvano uključenjem transformatora u praznom hodu smatra se najtežim slučajem [7].

Inicijalna magnetizacija tokom uključenja se smatra veoma značajnim tranzijentnim procesom u transformatoru. Kada se transformator isključi sa napajanja struja magnećenja pada na nulu, dok fluks prati histerezisnu petlju jezgra. Ovo ima za posledicu pojavu određenog remanentnog fluksa u jezgru. Kada se transformator ponovo priključi na sinusoidalni napon, fluks postaje takođe sinusoidalan ali uvećan za vrednost remanentnog fluksa, koji može da iznosi i više od 80% nominalnog fluksa. Ovaj razlog može dovesti do pomeranja iznad kolena na karakteristici fluks-struja rezultujući velike vrhove i tešku distorziju struje magnećenja [38, 39].

Oblik, vrednosti i trajanje udarne struje magnećenja zavise od više faktora među njima su: parametri transformatora, remanentni fluks i trenutak uključenja, odnosno početna faza napona u trenutku uključenja. Na Sl. 2.3 je prikazan tipičan talasni oblik struje magnećenja koji je snimljen u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. U nastavku su date neke karakteristike koje služe za prepoznavanje udarne struje magnećenja [18,21,39]:

- udarna struja magnećenja sadrži znatan nivo viših harmonika (posebno drugog harmonika),
- udarna struja magnećenja sadrži opadajuću jednosmernu komponentu,
- u toku svake periode postoji vremenski interval tokom koga je vrednost struje jako mala (jednaka ili skoro jednaka nuli).



Sl. 2.3 Talasni oblik struje i napona tokom uključenja ET snimljen u laboratoriji

Kod trofaznog transformatora struje uključenja merene u pojedinim fazama se značajno razlikuju zbog sledećih razloga:

- fazni stav napona napajanja je različit u različitim fazama pri uključenju ET-a i
- može da se desi da samo neki od stubova transformatora budu u zasićenju.

Da bi se izbeglo nepoželjno reagovanje stabilizovane diferencijalne zaštite usled pojave udarne struje magnecenja najčešće se koristi blokada releja usled prisustva drugog harmonika. Mana ovog pristupa je što se i pri unutrašnjim kratkim spojevima namotaja transformatora u signalima može pojaviti značajan nivo drugog harmonika [8, 11, 16]. Tada primena samo metode blokiranja usled drugog harmonika može transformator nepotrebno dugo izložiti kvaru. Takođe, kod transformatora novih generacija kod kojih je magnetno jezgro izrađeno od amorfnih materijala sa malim gubicima, udarne struje uključenja imaju velike vrednosti amplituda sa znatno nižim nivoom drugog harmonika. Upotreba parnih harmonika, drugog i četvrtog, za blokiranje obezbeđuje sigurnost u radu prilikom pojave udarnih struja uključenja koje sadrže veoma nizak nivo drugog harmonika [21]. Različiti proizvođači releja preporučuju različite pragove pri kojima se blokira delovanje diferencijalne zaštite. Donji prag za blokadu drugog harmonika se kreće od 15%, pa naviše.

Treba napomenuti da su u upotrebi i tehnike bazirane na prepoznavanju talasnog oblika struje [2,18,21,40]. Ove tehnike predstavljaju još jednu alternativu za razlikovanje unutrašnjeg kvara od uključenja. Njima se na dosta jednostavan način sa velikom pouzdanošću može identifikovati struja uključenja. Međutim, loša osobina ovih metoda je to što ne uspevaju da identifikuju prepobuđenost transformatora.

### 2.2.2 Blokiranje stabilizovane diferencijalne zaštite tokom prepobudenosti energetskog transformatora

U normalnom radnom režimu fluks u jezgru ET-a ( $\Phi$ ) je direktno proporcionalan naponu na koji je transformator priključen i obrnuto proporcionalan frekvenciji napona (2.4).

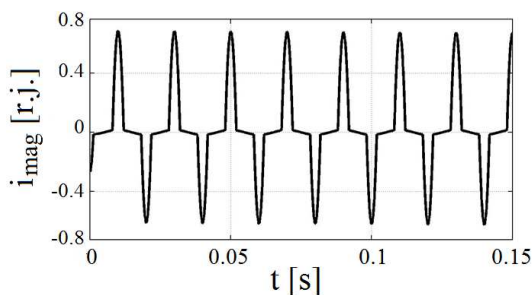
$$\Phi = c \cdot \frac{U}{f}, \quad (2.4)$$

gde su:  $c$  – konstanta koja zavisi od parametara ET-a,  $U$  – efektivna vrednost napona i  $f$  – frekvencija napona.

Transformator će biti prepobuđen ukoliko dođe do povećanja napona ili pada frekvencije. Do ovog radnog stanja najčešće može doći u elektranama ili prenosnom sistemu. Nagli gubitak opterećenja može izložiti blok transformator većim naponima od nominalnih. Do ovoga može doći prilikom startovanja generatora ili isključenja bloka generator-transformator, kada je generator pobuđen do nominalnog napona dok je njegova brzina manja od nominalne vrednosti. Ukoliko dođe do zasićenja blok transformatora povećaće se struja magnećenja koja može zagrejati jezgro i oštetiti transformator.

Prepobudenost izaziva povećanje struje magnećenja, pregrevanje, buku i vibracije. Ozbiljno prepobuđen transformator treba isključiti da bi se izbegla šteta na transformatoru. Pomoću diferencijalne zaštite je teško odrediti nivo prepobudenosti koji transformator može tolerisati. U praksi je predviđena ( $U/f$ ) zaštita od prepobudenosti transformatora.

Prepobudenost karakteriše prisustvo neparnih harmonika u struji magnećenja (Sl. 2.4). Najizraženije je prisustvo trećeg i petog harmonika. Pošto se treći harmonik zatvara u namotaju spregnutom u trougao, a može se pojaviti i iz drugih razloga, za blokadu nepravilnog reagovanja diferencijalne zaštite koristi se peti harmonik.



Sl. 2.4 Tipičan talasni oblik struje magnećenja prepobudenog ET



Danas kod nekih zaštita kod kojih se primenjuje blokada po petom harmoniku može postojati i opcija da se pri određenom nivou petog harmonika primenjuje deblokada. Tako kada nivo petog harmonika pređe određenu vrednost diferencijalnoj zaštiti se dozvoljava da reaguje. Orijentaciono, deblokada se aktivira kada nivo petog harmonika pređe 50%. Da bi vrednosti za deblokadu bile korektno izabrane neophodno je poznavati karakteristiku magnećenja transformatora.

### 2.2.3 Zaključak

Blokiranje diferencijalnog releja na osnovu prisustva viših harmonika obezbeđuje sigurnost u radu releja tokom pojave udarne struje magnećenja i prepobuđenosti ET-a. Međutim, struja koja se dovodi na ulaz releju može sadržati više harmonike koji nastaju usled zasićenja strujnih transformatora. Tada tokom unutrašnjih kvarova praćenih zasićenjem strujnih transformatora usled prisustva viših harmonika blokada može odložiti pravovremeno reagovanje ili u ekstremnim slučajevima reagovanje može izostati. Tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem strujnih transformatora dolazi do pojave "lažne" diferencijalne struje. Da bi se osigurao pouzdan rad tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem ST-a tradicionalno se koristi karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom. Skorija istraživanja skreću pažnju na to da ukoliko se rad diferencijalnog releja blokira usled prisustva viših harmonika, nepravilno reagovanje tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem strujnih transformatora se izbegava blokadom po višim harmonicima. Dok drugi nagib nema ili ima mnogo manje udela u sprečavanju nepotrebnog reagovanja diferencijalnog releja.

Mana blokade po višim harmonicima je i to što metode pomoću kojih se određuje nivo harmonika unose kašnjenje u delovanje zaštite, pa je preporuka IEEE standarda da se blokada po višim harmonicima kombinuje sa tehnikama koje se baziraju na prepoznavanju talasnog oblika struje.

### **3. ANALIZA MOGUĆNOSTI PRIMENE FAZNOG KOMPARATORA U ZAŠTITI ENERGETSKOG TRANSFORMATORA**

U ovoj glavi su prikazani rezultati istraživanja mogućnosti primene fazne komparacije struja na primaru i sekundaru energetskog transformatora za detekciju kratkih spojeva namotaja energetskog transformatora (ET-a). Fazni komparator koji će biti korišćen ne određuje direktno vrednost ugla već proračunava indeks usmerenosti.

Struje na priključcima ET-a, fazno prilagođene, tokom normalnog radnog režima ili tokom spoljašnjih kratkih spojeva su u fazi, dok se tokom unutrašnjih kratkih spojeva između ove dve struje pojavljuje fazni pomeraj. Upravo ova činjenica je dala ideju da se posmatranjem faznog pomeraja struja na priključcima ET-a mogu detektovati unutrašnji kratki spojevi u ET-u.

U ovoj glavi prvo će biti predstavljen princip digitalne fazne komparacije, a zatim će biti ispitano koje vrednosti indeks usmerenosti može imati tokom KS-eva namotaja ET-a u zavisnosti od položaja ET-a u sistemu, broja navojaka koji su zahvaćeni KS-em, opterećenja ET-a pre kvara, smera snage kroz ET i parametara mreže. Nakon toga će za različite sprege trofaznog ET-a biti pokazano koje vrednosti ima indeks usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih navojaka. Za sve posmatrane sprege analizirani su kratki spojevi na primarnom i sekundarnom namotaju za različita opterećenja ET-a.

Signali koji su korišćeni tokom analize koja je prikazana u ovom poglavlju generisani su pomoću kompjuterski simuliranih kvarova i pomoću laboratorijskih snimaka kvarova.

#### **3.1 Fazni komparator na bazi integrala proizvoda dva signala**

Fazna komparacija napona i struja se bazira na proračunu integrala trenutne snage signala na intervalu dužine polovine osnovne periode signala. Ovaj metod fazne komparacije je predstavljen u [4] i primenjen u [30 - 34]. Da bi se bolje razumela primena ovog načina fazne komparacije ovde će ukratko biti napravljen pregled osobina koje su od interesa za razumevanje pokazatelja koji će biti posmatrani. Treba

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora napomenuti da je primenom ovog načina fazne komparacije računat fazni pomeraj između signala struja. Tako da se u tom slučaju fazna komparacija svodi na proračun integrala proizvoda signala struja na intervalu dužine polovine osnovne periode signala.

Digitalna fazna komparacija dva signala ( $i_{s1}$ ) i ( $i_{s2}$ ) vrši se pomoću formule:

$$DFK_{s1-s2} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} i_{s1}(t) \cdot i_{s2}(t) dt \quad (3.1)$$

Ako predstavimo izraz (3.1) u diskretnom obliku dobićemo:

$$DFK_{s1-s2} = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} i_{s1}(n) \cdot i_{s2}(n) \quad (3.2)$$

gde su:

$m$  – paran broj odbiraka u periodu ( $T$ ) signala;

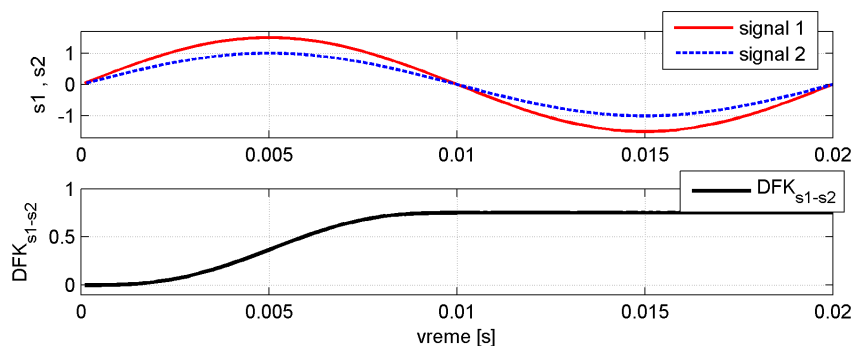
$DFK_{s1-s2}$  - integral proizvoda dva signala računat na intervalu dužine poluperiode;

$i_{s1}(n)$  – n-ti odbirak signala  $i_{s1}$ ;

$i_{s2}(n)$  – n-ti odbirak signala  $i_{s2}$ .

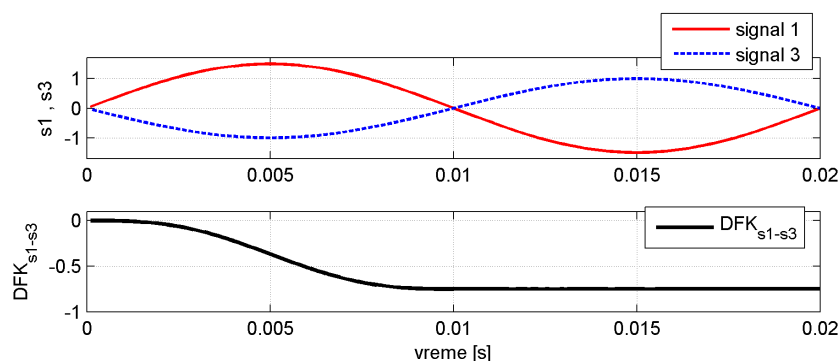
Na Sl. 3.1 su prikazani talasni oblici dva signala ( $i_{s1}$  i  $i_{s2}$ ) u fazi, a Sl. 3.2 prikazuje slučaj kada su signali ( $i_{s1}$  i  $i_{s3}$ ) fazno pomereni za  $180^\circ$  (3.3). U prvom primeru, kada su signali u fazi, integral proizvoda dva signala računat na intervalu dužine poluperiode je pozitivan. Kada su signali u protiv fazi integral proizvoda dva signala na intervalu dužine poluperiode je negativan.

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= 1,5 \cdot \sin(\omega t) \quad [r.j.] \\ i_{s2}(t) &= 1 \cdot \sin(\omega t) \quad [r.j.] \\ i_{s3}(t) &= 1 \cdot \sin(\omega t + \pi) = -i_{s2}(t) \quad [r.j.] \end{aligned} \quad (3.3)$$



Sl. 3.1 Talasni oblici dva signala u fazi i integral njihovog proizvoda na intervalu  $T/2$

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.2 Talasni oblici dva signala fazno pomerena za  $180^\circ$  i integral njihovog proizvoda na intervalu  $T/2$

Znak integrala proizvoda dva signala računat na intervalu dužine poluperiode zavisi od međusobnog faznog pomeraja signala. Ukoliko je fazni pomeraj između signala u opsegu  $270^\circ < \varphi < 90^\circ$  integral proizvoda ta dva signala je pozitivan, a ukoliko je u opsegu  $90^\circ < \varphi < 270^\circ$  integral je negativan.

Numerička vrednost izraza (3.2) zavisi kako od međusobnog faznog pomeraja signala, tako i od efektivne vrednosti signala. Integral ima maksimalnu vrednost kada su signali u fazi ili protiv fazi. Kada se govori o vrednosti integrala proizvoda dva signala treba imati u vidu da on može biti jednak nuli ukoliko je fazni pomeraj između signala koji se porede  $90^\circ$  ili  $-90^\circ$ , ili ako je neki od signala jednak nuli. Izraz (3.2) podeljen efektivnim vrednostima signala  $i_{s1}$  i  $i_{s2}$ , u opštem slučaju analogan je *faktoru snage* ta dva signala, a za prostoperiodične signale jednak je kosinusu ugla koji predstavlja fazni pomeraj između  $i_{s1}$  i  $i_{s2}$ .

Po definiciji efektivna vrednost signala se proračunava na periodu signala pomoću sledećeg izraza:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t)^2 dt} . \quad (3.4)$$

Za potrebe algoritma proračun efektivnih vrednosti signala  $i_{s1}$  i  $i_{s2}$  pogodno je izvršiti pomoću neke od metoda koje proračunavaju efektivnu vrednost signala na intervalu jednakom polovini periode signala. Za prostoperiodične signale može se koristiti metoda srednje vrednosti (3.5), koja koristi jednostavne matematičke operacije. U ovoj doktorskoj disertaciji za estimaciju efektivne vrednosti signala korišćen je *pokazatelj*

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora efektivne vrednosti računat na polovini periode signala (3.6). Iako računanje kvadratnog korena zauzima više procesorskog vremena, na strani primene izraza (3.6) prilikom normalizacije izraza (3.2) su monotona konvergencija rezultata, kao i samo vreme konvergencije. Takođe, uočeno je u nekim situacijama (što će biti pokazano u poglavlju 3.5.1) da je dobijena normalizovana vrednost veća od 1 r.j., kada su za normalizaciju korišćene efektivne vrednosti proračunate primenom metode srednje vrednosti, što nije bio slučaj kada je za normalizaciju korišćen izraz (3.6).

$$I_{eff} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{2}{T} \int_t^{t+T} |i(t)| dt \approx \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{m/2} |i(n)| T_{od} = \frac{\pi}{\sqrt{2}m} \sum_{n=1}^{m/2} |i(n)| \quad (3.5)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} i(t)^2 dt} \approx \sqrt{\frac{2}{T} \sum_{n=1}^{m/2} i(n)^2 T_{od}} = \sqrt{\frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} i(n)^2} \quad (3.6)$$

Dakle, indeks koji će služiti za kao pokazatelj faznog pomeraja između dva signala predstavlja normalizovanu vrednost izraza (3.2):

$$DFK_{s1-s2}(r.j.) = \frac{DFK_{s1-s2}}{I_{s1-eff} \cdot I_{s2-eff}} = \frac{\sum_{n=1}^{m/2} i_{s1}(n) \cdot i_{s2}(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{m/2} i_{s1}(n)^2 \cdot \sum_{n=1}^{m/2} i_{s2}(n)^2}} \quad (3.7)$$

Za prostoperiodične signale važi:

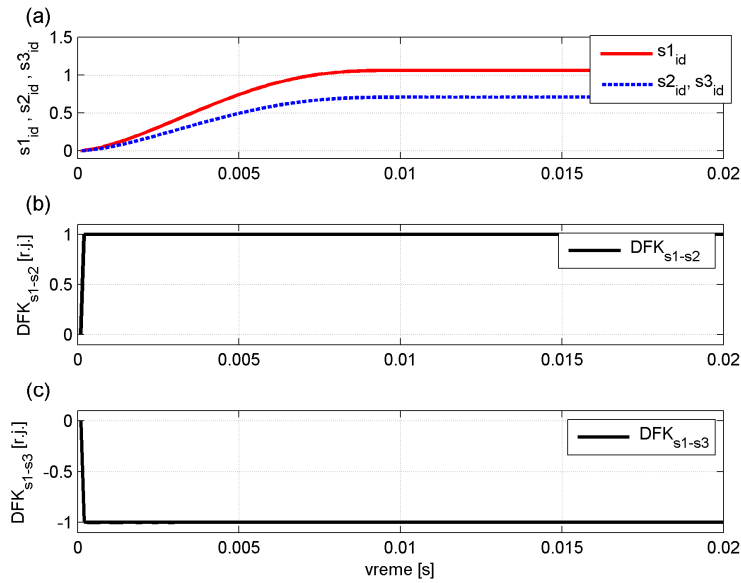
$$DFK_{s1-s2}(r.j.) = \cos \varphi \quad (3.8)$$

gde je:

$$\varphi = \angle(\underline{I}_{s1}, \underline{I}_{s2}) \quad (3.9)$$

Na Sl. 3.3 prikazani su pokazatelji efektivnih vrednosti signala sa Sl. 3.1 i Sl. 3.2 dobijeni pomoću izraza (3.6), kao i normalizovana vrednost integrala proizvoda posmatranih signala data izrazom (3.7). Na slici se može uočiti da normalizovana vrednost integrala monotono i izuzetno brzo konvergira ka krajnjoj vrednosti.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.3 a) Pokazatelji efektivnih vrednosti signala, i indeks usmerenosti kada su signali (b) u fazi i (c) u protiv fazi

#### Filtar opadajuće jednosmerne komponente

Prisustvo opadajuće jednosmerne komponente u signalima može nepovoljno uticati na tačnost proračuna integrala proizvoda dva signala na intervalu dužine polovine osnovne periode signala. Ovde će ukratko biti opisan princip rada i osobine digitalnog filtra opadajuće jednosmerne komponente predstavljenog u [41]. Predloženi filter je izabran da upotpuni algoritam za zaštitu ET-a, jer zahteva samo nekoliko računskih operacija, dok je kašnjenje koje unosi jednako periodi odabiranja. Od ulaznog signala, koji sadrži opadajuću jednosmernu komponentu, formira se pomoćni signal koji je ne sadrži, na sledeći način [42]:

$$s_{filt-dc}(n) = s(n) - s(n-1), \quad (3.10)$$

gde su:

$s_{filt-dc}(n)$  – n-ti odbirak filtriranog signala,

$s(n)$  – n-ti odbirak signala  $s$  u trenutku  $t$ ,

$s(n-1)$  – (n-1)-i odbirak signala  $s$  u trenutku  $(t-T_{od})$ ,

$T_{od}$  – perioda odabiranja ( $T_{od}=T/m$ ).

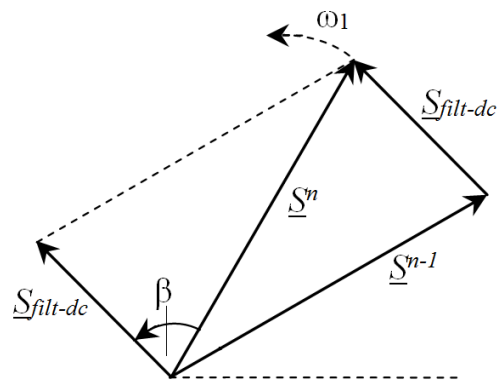
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Signal  $s_{filt-dc}$  predstavlja priraštaj fazora signala  $s$  između dva trenutka odabiranja. Zbog toga filter jednosmerne komponente signala unosi pozitivan fazni pomjeraj ( $\beta$ ) u signal  $s_{filt-dc}$ , koji zavisi od periode odabiranja  $T_{od}$ , odnosno od broja odbiraka  $m$ . Fazori signala pre i posle filtriranja ( $\underline{S}$  i  $\underline{S}_{filt-dc}$ ) su prikazani na Sl. 3.4. Amplituda osnovnog harmonika pomoćnog signala  $s_{filt-dc}$  takođe zavisi od broja odbiraka  $m$ . Veza između amplituda osnovnih harmonika signala  $s$  i  $s_{filt-dc}$  je data izrazom (3.11).

$$\frac{S_1}{S_{filt-dc-1}} = \frac{1}{2 \cdot \sin(\pi/m)}, \quad (3.11)$$

gde su:

$S_1$  i  $S_{filt-dc-1}$  – osnovni harmonici signala  $s$  i  $s_{filt-dc}$ , respektivno.



Sl. 3.4 Fazori signala pre i posle filtriranja [42]

Pošto se svi ulazni signali prvo propuštaju kroz opisani filter to fazni pomeraj između ulaznog i pomoćnog signala neće uneti grešku u algoritam za faznu komparaciju. Nedostatak ovog filtra je što filtriranje nije isto za sve vremenske konstante opadajuće jednosmerne komponente. Predstavljeni filter bolje eliminiše opadajuće jednosmerne komponente sa većom vremenskom konstantom, jer je njihova promena manja na vremenskom intervalu između dva susedna odbirka. Još jedan nedostatak ovog digitalnog filtra jednosmerne komponente predstavlja to što uzrokuje pojačanje svih komponenti čija je frekvencija viša od frekvencije osnovnog harmonika. Pojačanje viših harmonika nema uticaja ukoliko se koristi Fourier-ov filter, pošto on eliminiše sve više harmonike signala [42].

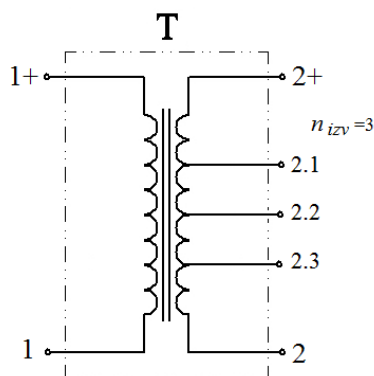
#### 3.2 Testiranje razvijenih algoritama

Algoritmi koji su razvijeni u ovoj doktorskoj disertaciji testirani su pomoću kompjuterski generisanih signala i pomoću laboratorijskih snimaka kvarova.

##### 3.2.1 Kompjuterske simulacije KS-eva na namotaju ET-a

Većina blokova za simulaciju rada ET-a, koji su dostupni u programskim paketima razvijeni su tako da daju ekvivalent ET-a sa spoljašnjim priključcima. Međutim, da bi se simulirao unutrašnji kratak spoj, potrebno je da budu dostupni izvodi na namotaju ET-a, a ne samo na njegovim priključcima. U literaturi se mogu pronaći različita rešenja pomoću kojih se može izvršiti simulacija unutrašnjih kvarova ET-a [43-47].

U ovoj doktorskoj disertaciji kompjuterske simulacije KS-eva na namotaju ET-a su izvršene pomoću programskog paketa MATLAB – Simulink. U modelu za simulaciju korišćen je blok monofaznog ET-a kome se može zadati proizvoljan broj izvoda na namotaju (Sl. 3.5). Nakon zadavanja željenog broja izvoda na namotaju ( $n_{izv}$ ), program automatski raspoređuje izvode tako da namotaj bude podeljen na ( $n_{izv}+1$ ) jednakih delova.

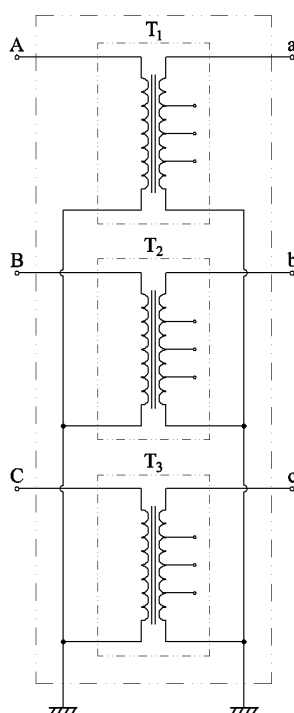


Sl. 3.5 Skica monofaznog ET sa tri izvoda na sekundarnom namotaju

Pošto u Simulink biblioteci ne postoji blok trofaznog trostubnog ET-a sa dostupnim izvodima na namotaju, tokom simulacija KS-eva na trofaznom ET-u, trofazni ET je formiran povezivanjem tri monofazne jedinice (Sl. 3.6).



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.6 Skica povezivanja tri monofazna ET – sprega YNyn

#### 3.2.2 Fizički model ET za eksperimentalna merenja

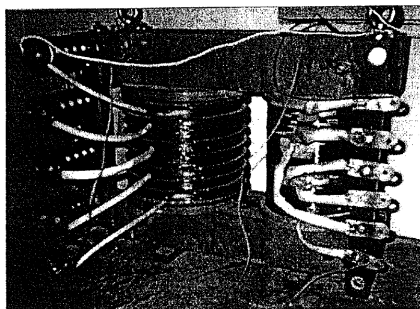
Na osnovu raspoložive opreme u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, eksperimentalna merenja su sprovedena na monofaznom i trofaznom trostubnom transformatoru.

##### **Eksperimentalna merenja na dvostubnom monofaznom transformatoru**

Fizički model monofaznog transformatora prikazan je na Sl. 3.7. To je transformator prenosnog odnosa transformacije  $5.78 \text{ kV}/0.22 \text{ kV}$ . Visokonaponski namot je valjkastog tipa i ima  $N_1$  navojaka. Na njemu su izvedeni izvodi na  $0.2N_1$ ,  $0.5N_1$  i  $0.8N_1$  navojaka. Niskonaponski namotaj je, takođe, valjkastog tipa sa  $N_2$  navojaka.

Merenja na monofaznom ET su izvršena pomoću dvokanalnog osciloskopa Hameg.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskeg transformatora

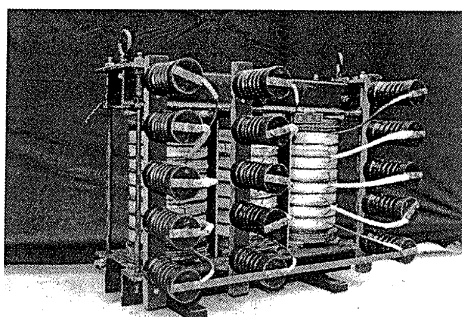


Sl. 3.7 Fotografija fizičkog modela monofaznog transformatora

#### **Eksperimentalna merenja na trofaznom trostubnom transformatoru**

Fizički model trofaznog transformatora, koji je korišćen tokom ispitivanja, je konstruisan sa valjkastim namotajima koncentrično stavljenim oko jezgara. Neposredno uz jezgro stavljen je namotaj niskog napona, a koncentrično oko njega nalazi se namotaj visokog napona. Na visokonaponskom namotaju su izvedeni izvodi na  $0.25N_1$ ,  $0.5N_1$  i  $0.75N_1$  navojaka. Namotaj niskog napona je valjkastog tipa sa tri žice u paraleli. Transformator ima trostubno magnetno jezgro. Sprega ovog ET-a je Yy.

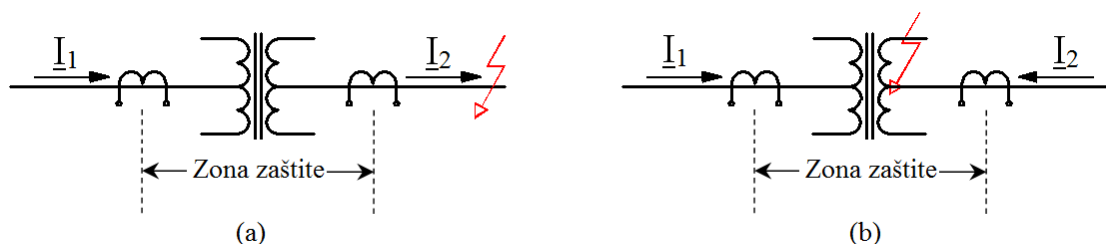
Odabiranje i snimanje signala tokom merenja na trofaznom ET-u je izvršeno korišćenjem sistema za akviziciju podataka NI USB-6008 i NI USB-6009, u zavisnosti od toga koji je sistem bio raspoloživ u trenutku merenja.



Sl. 3.8 Fotografija fizičkog modela trofaznog transformatora

#### 3.3 Ideja primene fazne komparacije u zaštiti enetgetskih transformatora

U ovom poglavlju biće predstavljena ideja primene fazne komparacije za detekciju KS-eva namotaja ET-a. Prvo je posmatran monofazni ET, čiji je sprežni broj 0. U normalnim uslovima rada fazni pomeraj između struja koje protiču kroz primarne i sekundarne namotaje transformatora jednak  $0^\circ$ . Normalizovan integral proizvoda primarne i sekundarne struje predstavljen izrazom (3.7) tada je jednak 1 r.j. Kada se dogodi kvar van šticiene zone (Sl. 3.9.a) struja kvara će idući ka mestu kvara u šticienu zonu ući na strani transformatora koja je suprotna u odnosu na kvar i izaći na strani koja je bliža kvaru. U ovom slučaju struje na primaru i sekundaru transformatora su u fazi. Tada integral proizvoda struja (3.2) ima pozitivnu vrednost, odnosno njegova normalizovana vrednost je jednaka 1 r.j.



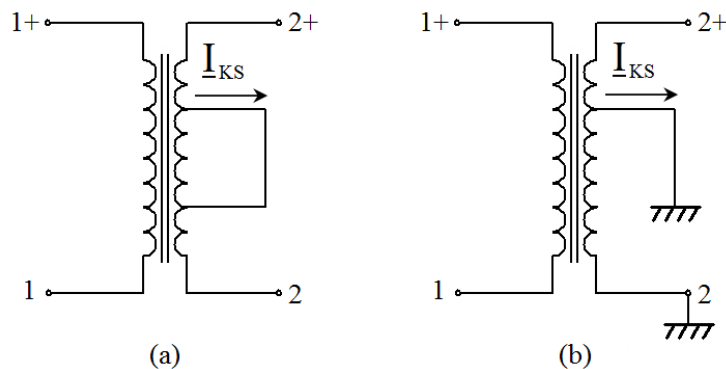
Sl. 3.9 Šema za analizu (a) spoljašnjeg kvara i (b) unutrašnjeg kvara jednofaznog dvonamotnog transformatora

Ako se dogodi KS 100% namotaja ET-a koji radi između dve mreže struja kvara će idući ka mestu kvara na obe strane transformatora ući u šticienu zonu transformatora (Sl. 3.9.b). Tada će struje koje mere strujni transformatori biti približno fazno pomerene za  $180^\circ$ . Integral proizvoda struja će imati negativnu vrednost, a njegova normalizovana vrednost biće približno jednaka (-1 r.j.).

Ako bi KS zahvatio 100% namotaja transformatora koji radi između aktivne i pasivne mreže, nakon uspostavljanja kvara vrednost struje koju meri strujni transformator koji je bliži pasivnoj mreži bi bila bliska ili jednaka nuli. Tada bi i odgovarajući integral proizvoda struja koje mere strujni transformatori bio jednak nuli.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Kada dođe do unutrašnjeg KS-a gde KS nije zahvatio 100% namotaja (Sl. 3.10) situacija je složenija. U slučaju kada je mali broj navojaka kratko spojen u kratkospojenim navojcima struja kvara će imati velike vrednosti. Dok zbog velikog odnosa transformacije između celog namotaja i kratkospojenih navojaka, vrednosti struja na priključcima primara i sekundara, koje mere strujni transformatori, neće mnogo odstupati u odnosu na vrednosti pre pojave kvara. Međutim, u odnosu na normalni radni režim pre kvara, nakon kvara doći će do pojave faznog pomeraja između struja primara i sekundara. Tradicionalna stabilizovana diferencijalna zaštita može biti neosetljiva na KS-eve malog broja navojaka, kada je vrednost diferencijalne struje nedovoljno velika da bi zaštita reagovala [24]. Minimalna vrednost diferencijalne struje se tipično podešava na 30% do 40%  $I_{nT}$ . KS-eve namotaja ET-a tokom kojih bi diferencijalna struja bila ispod ove granice diferencijalna zaštita ne bi mogla da detektuje. Ova neosetljivost bi mogla da se prevaziđe nadgledanjem faznog pomeraja primarne i sekundarne struje.



Sl. 3.10 Jednofazni dvonamotajni ET sa (a) međuzavojnim KS; (b) zmljospojem

### 3.3.1 Promena faznog pomeraja primarne i sekundarne struje tokom KS na namotaju ET-a

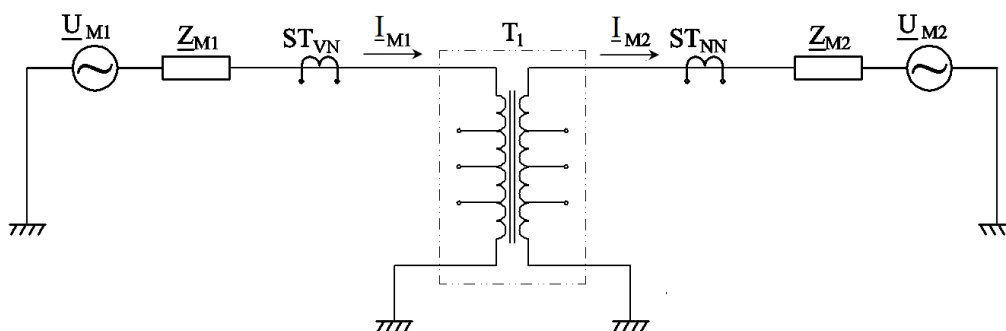
Kada se posmatra fazni pomeraj između struja na primaru i sekundaru tokom KS-a namotaja ET-a, potrebno je razlikovati dva slučaja:

- Kada ET radi između dve aktivne mreže. Tada se očekuje da fazni pomeraj između struja na priključcima ET-a može biti između  $0^\circ$  i  $180^\circ$ .
- Kada ET radi između aktivne i pasivne mreže. Tada se očekuje da fazni pomeraj između struja na priključcima ET-a može biti između  $0^\circ$  i  $90^\circ$ .

U ovom poglavlju će biti ispitano kako na fazni pomeraj između struja primara i sekundara tokom kvara utiče: procenat KS-enih navojaka, opterećenje ET-a pre kvara, smer snage kroz ET, vrednosti parametara mreža i potrošača.

#### (1) Energetski transformator između dve aktivne mreže.

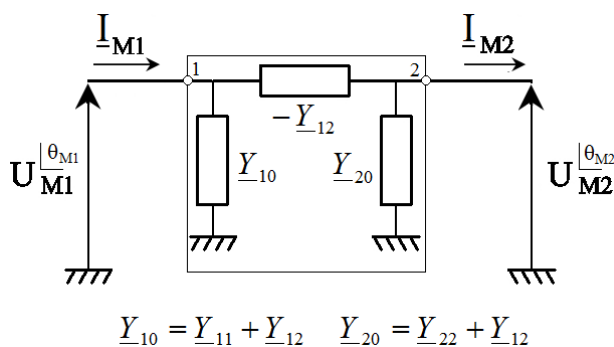
Poćićemo od jednofazne mreže prikazane na Sl. 3.11. Transformator se nalazi između dve aktivne mreže. Mreže su predstavljene jednofaznim naponskim izvorima (110kV) i impedansama. Usvojeno je da su impedanse mreža čisto induktivne ( $Z_{M1}=j2\pi fL_{M1}$  i  $Z_{M2}=j2\pi fL_{M2}$ ). Parametri ET-a:  $S_{nT}=25/3 \text{ MVA} \approx 8,83 \text{ MVA}$ ,  $m_T=110\text{kV}/110\text{kV}$ ,  $x_t=0,1 \text{ r.j.}$ ,  $r_\mu \rightarrow \infty$ ,  $x_\mu \rightarrow \infty$ , a otpornost namotaja transformatora je jednaka nuli  $r_t=0$ .



Sl. 3.11 Šema veza elemenata za simulaciju KS namotaja ET-a između dve mreže

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Da bismo pokazali kako se menja fazni pomeraj primarne ( $\underline{I}_{M1}$ ) i sekundarne ( $\underline{I}_{M2}$ ) struje tokom KS-a na namotaju ET-a, najpre ćemo elemente između naponskih izvora (Sl. 3.11) predstaviti preko Y parametara četvorokrajnika (kojima se definiše veza struja i napona). Na osnovu metode napona čvorova, za šemu na Sl. 3.12, može se napisati relacija (3.12). Za elemente matrice  $[Y]$  važi:  $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$ . Admitanse koje figurišu u  $\pi$  – šemi ( $\underline{Y}_{10}$ ,  $\underline{Y}_{20}$ ,  $-\underline{Y}_{12}$ ) izračunavaju se pomoću elemenata matrice  $[Y]$  prema relaciji (3.14).



Sl. 3.12 Ekvivalentna  $\pi$  – šema elemenata između naponskih izvora

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{M1} \\ -\underline{I}_{M2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Y}_{12} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{M1} \\ \underline{U}_{M2} \end{bmatrix}, \text{ ili skraćeno:} \quad (3.12)$$

$$[I] = [Y][U] \quad (3.13)$$

$$\underline{Y}_{10} = \underline{Y}_{11} + \underline{Y}_{12}, \quad \underline{Y}_{20} = \underline{Y}_{22} + \underline{Y}_{12}, \quad -\underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{21} \quad (3.14)$$

Admitanse ( $\underline{Y}_{10}$ ,  $\underline{Y}_{20}$ ,  $-\underline{Y}_{12}$ ) su dobijene pomoću simulacija koje su sprovedene pomoću programa MATLAB – Simulink. Ulazni podaci simulacije su parametri elemenata koji čine mrežu na (Sl. 3.11), zatim naponi  $\underline{U}_{M1} = U_{M1} \angle \theta_{M1}$  i  $\underline{U}_{M2} = U_{M2} \angle \theta_{M2}$ , a izlazni podaci su struje:  $\underline{I}_{M1} = I_{M1} \angle \phi_{M1}$  i  $\underline{I}_{M2} = I_{M2} \angle \phi_{M2}$ . Na osnovu zadatih vrednosti napona i vrednosti struja dobijenih simulacijama pomoću relacije (3.12) izračunate su vrednosti matrice admitansi  $[Y]$ .

Najpre ćemo objasniti kako su dobijeni elementi matrice admitansi  $[Y]$  za KS 25% primarnih navojaka ET-a. Ako su naponi i struje poznati izraz (3.12) se sastoji od dve relacije i u opštem slučaju ima četiri nepoznate ( $\underline{Y}_{11}$ ,  $\underline{Y}_{12}$ ,  $\underline{Y}_{21}$  i  $\underline{Y}_{22}$ ). Pretpostavimo da

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora  
matrica admitansi pri KS-u 25% primarnih navojaka ET-a ne zavisi od radnog režima koji je prethodio kvaru. Da bismo izračunali admitanse ( $\underline{Y}_{11}$ ,  $\underline{Y}_{12}$ ,  $\underline{Y}_{21}$  i  $\underline{Y}_{22}$ ), potrebno je uraditi dve simulacije, za dva različita radna režima koji su prethodili KS-u :

1) ulazni podaci su:  $U_{M1}^{(1)}$ ,  $\theta_{M1}^{(1)}$ ,  $U_{M2}^{(1)}$ ,  $\theta_{M2}^{(1)}$ , i izlazni podaci:  $I_{M1}^{(1)}$ ,  $\phi_{M1}^{(1)}$ ,  $I_{M2}^{(1)}$ ,  $\phi_{M2}^{(1)}$ .

2) ulazni podaci su:  $U_{M1}^{(2)}$ ,  $\theta_{M1}^{(2)}$ ,  $U_{M2}^{(2)}$ ,  $\theta_{M2}^{(2)}$ , i izlazni podaci:  $I_{M1}^{(2)}$ ,  $\phi_{M1}^{(2)}$ ,  $I_{M2}^{(2)}$ ,  $\phi_{M2}^{(2)}$ .

Zatim je relacija (3.12) napisana na sledeći način (3.15) i admitanse ( $\underline{Y}_{11}$ ,  $\underline{Y}_{12}$ ,  $\underline{Y}_{21}$  i  $\underline{Y}_{22}$ ) izračunate pomoću (3.17).

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{M1}^{(1)} \\ -\underline{I}_{M2}^{(1)} \\ \underline{I}_{M1}^{(2)} \\ -\underline{I}_{M2}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{M1}^{(1)} & \underline{U}_{M2}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{U}_{M1}^{(1)} & \underline{U}_{M2}^{(1)} \\ \underline{U}_{M1}^{(2)} & \underline{U}_{M2}^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{U}_{M1}^{(2)} & \underline{U}_{M2}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} \\ -\underline{Y}_{12} \\ -\underline{Y}_{21} \\ \underline{Y}_{22} \end{bmatrix}, \text{ ili skraćeno:} \quad (3.15)$$

$$[\underline{I}]_{sim} = [\underline{U}]_{sim} [\underline{Y}]_{sim} \quad (3.16)$$

$$[\underline{Y}]_{sim} = [\underline{U}]_{sim}^{-1} [\underline{I}]_{sim} \quad (3.17)$$

Kao prva provera sprovedenog proračuna u svim primerima dobijeno je da je  $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$ . Zatim, sprovedena je kontrolna simulacija 3), za treći radni režim pre nastanka kvara, sa ulaznim podacima:  $U_{M1}^{(3)}$ ,  $\theta_{M1}^{(3)}$ ,  $U_{M2}^{(3)}$ ,  $\theta_{M2}^{(3)}$ , i dobijeni su izlazni podaci:  $I_{M1}^{(3)}$ ,  $\phi_{M1}^{(3)}$ ,  $I_{M2}^{(3)}$ ,  $\phi_{M2}^{(3)}$ . Paralelno tome, sproveden je i proračun struja  $\underline{I}_{M1}^{(3)}$  i  $\underline{I}_{M2}^{(3)}$  pomoću izraza (3.12), u koji su zamenjene dobijene admitanse ( $\underline{Y}_{11}$ ,  $\underline{Y}_{12}$ ,  $\underline{Y}_{21}$  i  $\underline{Y}_{22}$ ) i zadati naponi  $\underline{U}_{M1}^{(3)}$  i  $\underline{U}_{M2}^{(3)}$ . Vrednosti simulacije i proračuna su se u svim primerima poklopili.

Dalje su formirane matrice admitansi [Y] za:

- 1) normalne uslove rada,
- 2) KS 25% primarnog namotaja ET-a,
- 3) KS 25% sekundarnog namotaja ET-a,
- 4) KS 50% primarnog namotaja ET-a,
- 5) KS 50% sekundarnog namotaja ET-a,
- 6) KS 75% primarnog namotaja ET-a,
- 7) KS 75% sekundarnog namotaja ET-a,
- 8) KS 100% primarnog namotaja ET-a i

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

9) KS 100% sekundarnog namotaja ET-a.

Za sve slučajeve 1) – 9) pomoću formiranih Y matrica izračunate su odgovarajuće impedanse i nacrtane  $\pi$  – šeme na Sl. 3.13 i Sl. 3.14.,

gde su:

$\underline{Z}_{12}^{(p)}$ ,  $\underline{Z}_{10}^{(p)}$ ,  $\underline{Z}_{20}^{(p)}$  - impedanse u ekvivalentnoj  $\pi$  – šemi za KS na primarnom namotaju ET-a, a

$\underline{Z}_{12}^{(s)}$ ,  $\underline{Z}_{10}^{(s)}$ ,  $\underline{Z}_{20}^{(s)}$  su impedanse u ekvivalentnoj  $\pi$  – šemi za KS na sekundarnom namotaju ET-a.

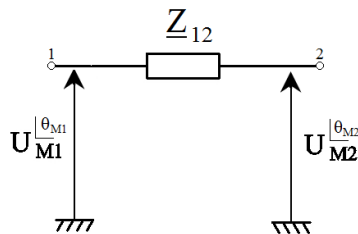
**Ekvivalentne  $\pi$ -šeme:**

**1) Bez kratkog spoja**

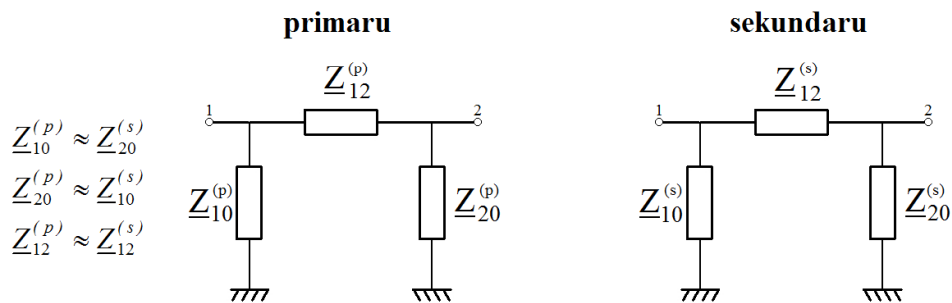
$$\underline{Z}_{12} = 56,5\Omega$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_T + \underline{Z}_{M2}$$

$$\underline{Z}_{M2} = j4\Omega, \underline{Z}_T = j48,5\Omega, \underline{Z}_{M1} = j4\Omega$$



**2) - 7) 25%, 50% i 75% KS namotaja ET na:**



Procenat KS navojaka na:	primaru			sekundaru		
	$\underline{Z}_{10}^{(p)}$ [ $\Omega$ ]	$\underline{Z}_{12}^{(p)}$ [ $\Omega$ ]	$\underline{Z}_{20}^{(p)}$ [ $\Omega$ ]	$\underline{Z}_{10}^{(s)}$ [ $\Omega$ ]	$\underline{Z}_{12}^{(s)}$ [ $\Omega$ ]	$\underline{Z}_{20}^{(s)}$ [ $\Omega$ ]
<b>25%</b>	$j 82,3$	$j 59,4$	$j 1083,5$	$j 1081,5$	$j 59,4$	$j 82,3$
<b>50%</b>	$j 30,11$	$j 65,16$	$j 395,71$	$j 395,22$	$j 65,17$	$j 30,11$
<b>75%</b>	$j 12,7$	$j 82,6$	$j 166,2$	$j 166,5$	$j 82,5$	$j 12,7$

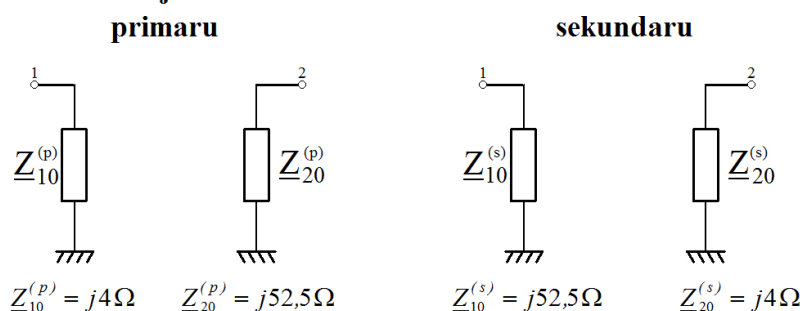
Sl. 3.13. Ekvivalentne  $\pi$  – šeme za slučajeve 1) – 7)



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

**Ekvivalentne  $\pi$ -šeme:**

**8) - 9) 100% KS namotaja ET na:**



Sl. 3.14. Ekvivalentne  $\pi$  – šeme za slučajeve 8) i 9)

Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti sledeće:

- Za normalne uslove rada otočne impedanse su beskonačno velike, a redna impedansa:  $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_T + \underline{Z}_{M2}$ ;
- Za posmatranu mrežu, gde je  $\underline{Z}_{M1} = \underline{Z}_{M2}$ , ako se uporede  $\pi$  – šeme za KS 25% primarnih sa KS 25% sekundarnih navojaka vidi se da su:
  - a) impedanse redne grane tokom KS na primaru ( $\underline{Z}_{12}^{(p)}$ ) i sekundaru ( $\underline{Z}_{12}^{(s)}$ ) približno jednake  $\underline{Z}_{12}^{(p)} \approx \underline{Z}_{12}^{(s)}$ ,
  - b) Tokom KS namotaja na primaru impedansa na "strani" kratkog spoja ( $\underline{Z}_{10}^{(p)}$ ) je manja od impedanse na "suprotnoj strani" u odnosu na kratak spoj ( $\underline{Z}_{20}^{(p)}$ ):  $\underline{Z}_{10}^{(p)} < \underline{Z}_{20}^{(p)}$ .
  - c) Tokom KS namotaja na sekundaru impedansa na "strani" kratkog spoja ( $\underline{Z}_{20}^{(s)}$ ) je manja od impedanse na "suprotnoj strani" u odnosu na kratak spoj ( $\underline{Z}_{10}^{(s)}$ ):  $\underline{Z}_{20}^{(s)} < \underline{Z}_{10}^{(s)}$ .
  - d) Takođe, bitno je uočiti da su za KS-eve namotaja na primaru i sekundaru impedanse u  $\pi$  – šemama na "stranama" kratkog spoja približno jednake ( $\underline{Z}_{10}^{(p)} \approx \underline{Z}_{20}^{(s)}$ ) i da su impedanse na "suprotnim stranama" u odnosu na kratak spoj približno jednake ( $\underline{Z}_{20}^{(p)} \approx \underline{Z}_{10}^{(s)}$ ).

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

- Razmatrani su još KS koji su zahvatili 50%, 75% i 100% primarnih i sekundarnih namotaja. Na Sl. 3.13 i Sl. 3.14 se može videti da za sve razmatrane KS-eve važe zaključci a) –d).
- Sa porastom procenta kratkospojenih navojaka vrednosti impedanse redne grane rastu, dok vrednosti impedansi otočnih grana opadaju.

U nastavku će biti analiziran fazni pomeraj primarne ( $\underline{I}_{M1}$ ) i sekundarne ( $\underline{I}_{M2}$ ) struje tokom KS-eva namotaja ET-a u zavisnosti od: 1) opterećenja ET-a, 2) procenta KS-enih navojaka, 3) smera snage kroz ET i 4) vrednosti impedansi mreža 1 i 2. Tokom analize korišćena je mreža na Sl. 3.11.

**Primer 1:** Simuliran je kratak spoj 25% namotaja ET-a na strani mreže 2 (sekundar ET -a) sa sledećim ulaznim podacima:  $U_{M1}=1,02U_n$  ,  $U_{M2}=U_n$ ,  $\theta_{M1} = \theta_{M2} = 0^\circ$ ,  $\underline{Z}_{M1}=\underline{Z}_{M2}=j4\Omega$ .

Na Sl. 3.15 je nacrtana odgovarajuća zamenska šema. U skladu sa označenim smerovima snaga, mogu se napisati sledeće relacije:

$$P_1 = \frac{U_{M1}U_{M2}}{X_{12}} \sin \theta_{12}, \quad (3.18)$$

$$Q_1 = U_{M1}^2 \left( \frac{1}{X_{10}} + \frac{1}{X_{12}} \right) - \frac{U_{M1}U_{M2}}{X_{12}} \cos \theta_{12} \quad (3.19)$$

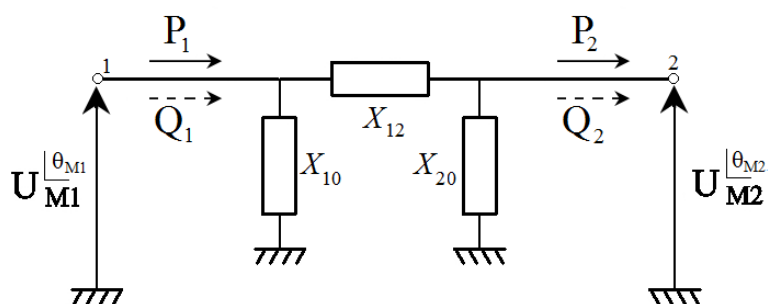
$$P_2 = -\frac{U_{M1}U_{M2}}{X_{12}} \sin \theta_{21} = \frac{U_{M1}U_{M2}}{X_{12}} \sin \theta_{12} = P_1 \quad (3.20)$$

$$Q_2 = -U_{M2}^2 \left( \frac{1}{X_{20}} + \frac{1}{X_{12}} \right) + \frac{U_{M1}U_{M2}}{X_{12}} \cos \theta_{12}, \quad (3.21)$$

gde su:

$P_1$  i  $Q_1$  – aktivna i reaktivna snaga koje daje mreža 1,  $P_2$  i  $Q_2$  – aktivna i reaktivna snaga koje prima mreža 2, a ugao  $\theta_{12} = \theta_{M1} - \theta_{M2}$ .

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

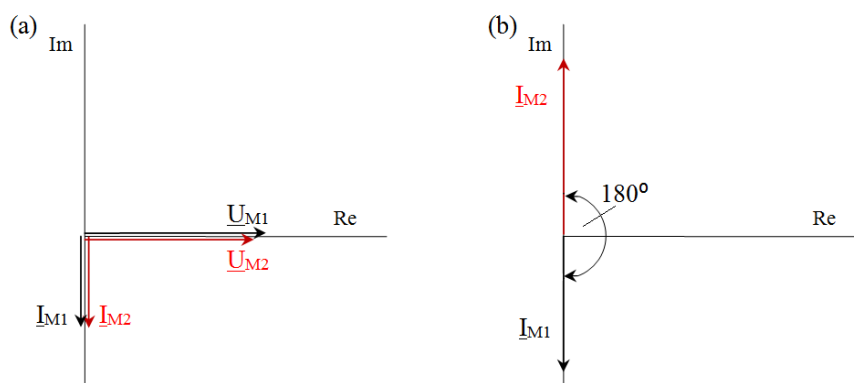


Sl. 3.15 Ekvivalentna  $\pi$  – šema za KS 25% sekundarnih navojaka

$$(X_{10}=1081,5 \Omega, X_{12}=59,4 \Omega, X_{20}=82,3 \Omega)$$

Za period pre kvara fazorski dijagram struja i napona je prikazan na Sl. 3.16.a. Uglovi napona su  $\theta_{M1} = \theta_{M2} = 0^\circ$ . Aktivna snaga (P) je približno jednaka nuli. Reaktivna snaga se prenosi iz mreže 1 u mrežu 2. Uglovi fazora struje su  $\phi_{M1} = \phi_{M2} = -90^\circ$  u skladu sa definisanim smerovima (mreža 1 daje reaktivnu, mreža 2 prima reaktivnu snagu). Nakon uspostavljanja kvara obe mreže daju reaktivne snage čije vrednosti su veće u odnosu na period pre kvara. Na osnovu dobijenih rezultata simulacije nacrtan je fazorski dijagram struja na Sl. 3.16.b. Može se uočiti da je nakon uspostavljanja kvara fazni pomeraj između struja na primaru i sekundaru ET-a jednak  $180^\circ$ .

*Napomena:* Fazorski dijagrami dati u ovom poglavlju nisu crtani u razmeri. Cilj prikazivanja fazorskih dijagrama je da se prikažu fazni pomeraji između struja  $\underline{I}_{M1}$  i  $\underline{I}_{M2}$ .



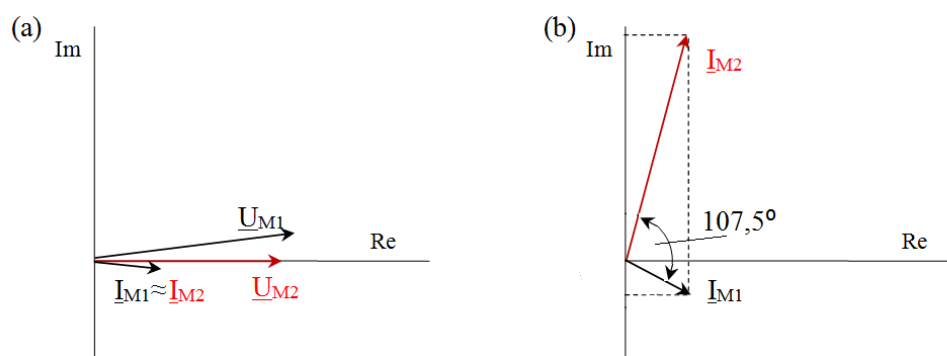
Sl. 3.16 Fazorski dijagram: (a) napona i struja pre kvara i (b) struja nakon kvara

$$\text{za } U_{M1}=1,02U_n, U_{M2}=U_n, \theta_{M1} = \theta_{M2} = 0^\circ$$

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

**Primer 2:** Simuliran je kratak spoj 25% namotaja ET-a na strani mreže 2 (sekundar ET-a) sa sledećim ulaznim podacima:  $U_{M1}=1,02U_n$ ,  $U_{M2}=U_n$ ,  $\theta_{M1} = 7^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$ ,  $Z_{M1}=Z_{M2}=j4\Omega$ .

Aktivna snaga ( $P\approx 8,87\text{MW}$ ) i reaktivna snaga se prenose iz mreže 1 u mrežu 2. Na osnovu dobijenih rezultata simulacije skiciran je fazorski dijagram za period pre kvara na Sl. 3.17.a. Fazori napona su međusobno pomereni za  $7^\circ$ , dok je fazni stav struja  $\phi_{M1} \approx \phi_{M2} \approx -5.7^\circ$ . Nakon uspostavljanja kratkog spoja aktivna snaga koju daje mreža 1 se smanjila. Dok obe mreže daju reaktivne snage koje su veće u odnosu na period pre kvara. Na Sl. 3.17.b nacrtan je fazorski dijagram struja nakon uspostavljanja kvara. Može se uočiti da je nakon uspostavljanja kvara fazni pomeraj između struja na primaru i sekundaru ET-a jednak  $107,5^\circ$ .



Sl. 3.17 Fazorski dijagram: (a) napona i struja pre kvara i (b) struja nakon kvara za  $U_{M1}=1,02U_n$ ,  $U_{M2}=U_n$ ,  $\theta_{M1} = 7^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$

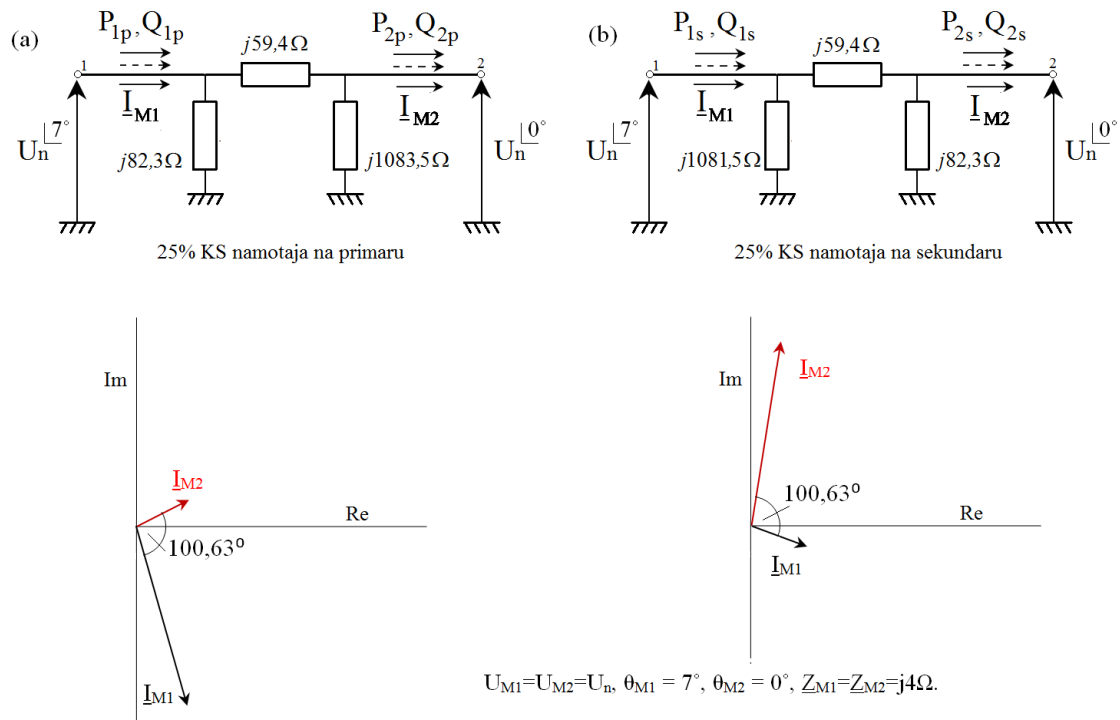
Prethodna dva primera pokazuju da kada je aktivno opterećenje ET-a pre kvara veće tada je, nakon uspostavljanja KS-a, fazni pomeraj između struja na njegovim priključcima manji.

**Primer 3:** U ovom primeru proveren je fazni pomeraj struja tokom KS-eva namotaja ET-a za različite smerove aktivne snage. Posmatrani su sledeći slučajevi:

- 1) kada se aktivna snaga ( $P\approx 8,87\text{MW}$ ) prenosi iz mreže 1 u mrežu 2. Ulazni podaci simulacije su:  $U_{M1}=U_{M2}=U_n$ ,  $\theta_{M1} = 7^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$ ,  $Z_{M1}=Z_{M2}=j4\Omega$ .
- 2) kada se aktivna snaga ( $P\approx 8,87\text{MW}$ ) prenosi iz mreže 2 u mrežu 1. Ulazni podaci simulacije su:  $U_{M1}=U_{M2}=U_n$ ,  $\theta_{M1} = 0^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 7^\circ$ ,  $Z_{M1}=Z_{M2}=j4\Omega$ .

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Za slučaj 1) kada se aktivna snaga prenosi iz mreže 1 u mrežu 2 nacrtan je fazorski dijagram struja nakon KS-a 25% primarnog namotaja (Sl. 3.18.a) i nakon KS-a 25% sekundarnog namotaja (Sl. 3.18.b). Na slikama se može uočiti da su (apsolutni) fazni pomeraji između  $\underline{I}_{M1}$  i  $\underline{I}_{M2}$  tokom oba KS-a isti. Takođe, to se može zaključiti i na osnovu izraza (3.18)-(3.21). Kada su moduli napona  $U_{M1}$  i  $U_{M2}$  jednaki, tokom KS-eva istog procenta navojaka na primaru i sekundaru: aktivne snage su jednake ( $P_{1p} = P_{2p} = P_{1s} = P_{2s}$ ), reaktivne snage koje daju mreže koje su na "stranama" kvara su jednake ( $|Q_{1p}| = |Q_{2s}|$ ) i reaktivne snage koje daju mreže koje su na "suprotnim stranama" u odnosu na kvar su jednake ( $|Q_{2p}| = |Q_{1s}|$ ). Iz toga sledi da su i fazni pomeraji tokom KS-eva istog procenta navojaka na primaru i sekundaru isti.



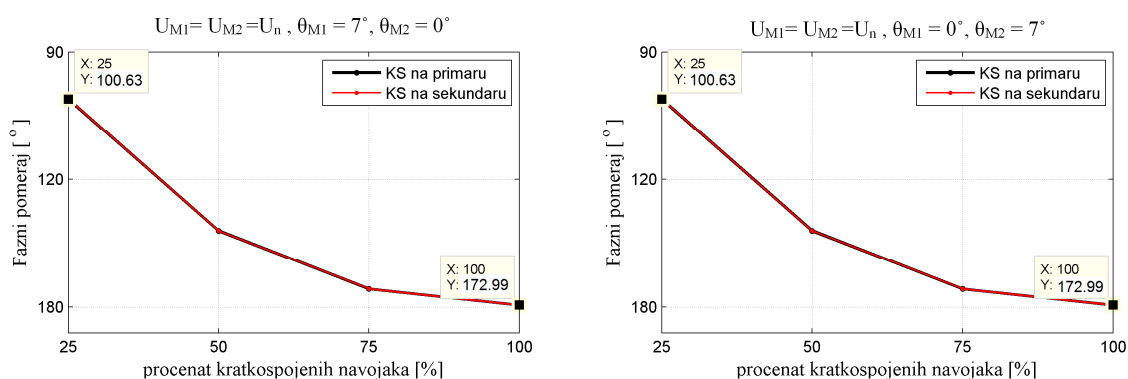
Sl. 3.18 Fazorski dijagram struja nakon KS-a 25%: (a) primarnog namotaja i (b) sekundarnog namotaja

Sl. 3.19.a prikazuje fazne pomeraje koji su dobijeni tokom simulacije KS-eva na 25%, 50%, 75% i 100% primarnog i sekundarnog namotaja, kada je smer aktivne snage bio od mreže 1 do mreže 2, a Sl. 3.19.b kada je smer aktivne snage bio od mreže 2 do

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora mreže 1. Fazni pomeraji ( $\varphi$ ) koji su prikazani na slici estimirani su pomoću digitalnog faznog komparatora:

$$\varphi = \arccos(DFK(r.j.)) , \quad (3.22)$$

Sa slika se može uočiti da su u posmatranom primeru fazni pomeraji pri istom procentu KS-enih navojaka isti bez obzira na smer aktivne snage kroz ET. Takođe, na Sl. 3.19 može se uočiti da sa porastom KS-enih navojaka fazni pomeraj između struja raste. Razlog za to je taj što sa povećanjem broja KS-enih navojaka reaktivne snage koje daju mreže 1 i 2 rastu. Dok se u posmatranim primerima, sa povećanjem KS-enih navojaka aktivna snaga koju daje mreža 1, i prima mreža 2, smanjuje.

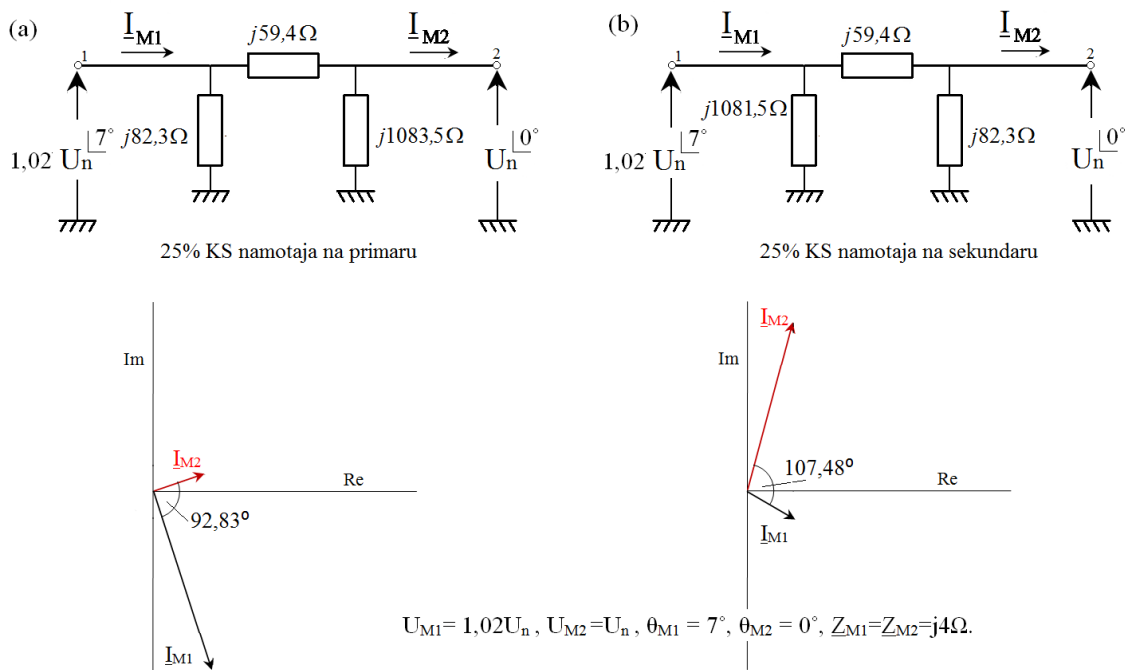


Sl. 3.19 Promena faznog pomeraja u zavisnosti od broja KS-enih navojaka kada je smer aktivne snage: (a) od mreže 1 do mreže 2 i (b) od mreže 2 do mreže 1

**Primer 4:** U ovom primeru proveren je uticaj smera reaktivne snage na fazni pomeraj tokom KS-a na namotaju ET-a. Posmatrani su sledeći slučajevi:

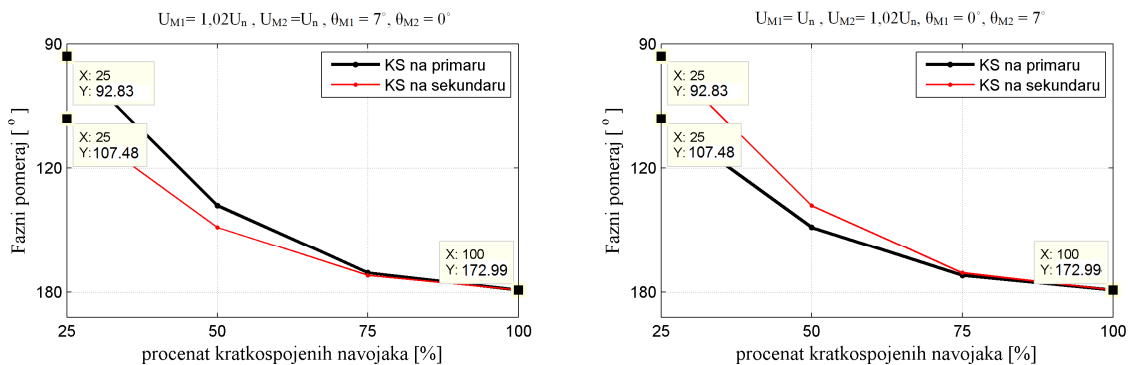
- 1) kada se aktivna snaga ( $P \approx 8,87 \text{ MW}$ ) i reaktivna snaga prenose iz mreže 1 u mrežu 2. Ulazni podaci simulacije su:  $U_{M1} = 1,02U_n$ ,  $U_{M2} = U_n$ ,  $\theta_{M1} = 7^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$ ,  $Z_{M1} = Z_{M2} = j4\Omega$ .
  - 2) kada se aktivna snaga ( $P \approx 8,87 \text{ MW}$ ) i reaktivna snaga prenose iz mreže 2 u mrežu 1. Ulazni podaci simulacije su:  $U_{M1} = U_n$ ,  $U_{M2} = 1,02U_n$ ,  $\theta_{M1} = 0^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 7^\circ$ ,  $Z_{M1} = Z_{M2} = j4\Omega$ .
- Za slučaj 1) kada se aktivna snaga i reaktivna snaga prenose iz mreže 1 u mrežu 2, na osnovu dobijenih rezultata simulacije, skiciran je fazorski dijagram struja nakon KS-a 25% na primarnom (Sl. 3.20.a) i KS-a 25% sekundarnom (Sl. 3.20.b) namotaju ET-a. Može se uočiti da kada je KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa većim modulom napona fazni pomeraj  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  je manji u odnosu na fazni pomeraj kada je KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa manjim modulom napona.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.20 Fazorski dijagram struja nakon 25% KS namotaja ET na: (a) primaru i (b) sekundaru, za  $U_{M1} = 1,02U_n$ ,  $U_{M2} = U_n$ ,  $\theta_{M1} = 7^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$

Sl. 3.21.a prikazuje fazne pomeraje koji su dobijeni tokom simulacija KS-eva na 25%, 50%, 75% i 100% primarnog i sekundarnog namotaja, kada je smer aktivne snage i reaktivne snage bio od mreže 1 do mreže 2, a Sl. 3.21.b kada je smer aktivne snage i reaktivne snage bio od mreže 2 do mreže 1. Fazni pomeraji su estimirani pomoću digitalnog faznog komparatora (3.22).



Sl. 3.21 Promena faznog pomeraja u zavisnosti od broja KS navojaka kada je smer aktivne snage i reaktivne snage: (a) od mreže 1 do mreže 2 i (b) od mreže 2 do mreže 1

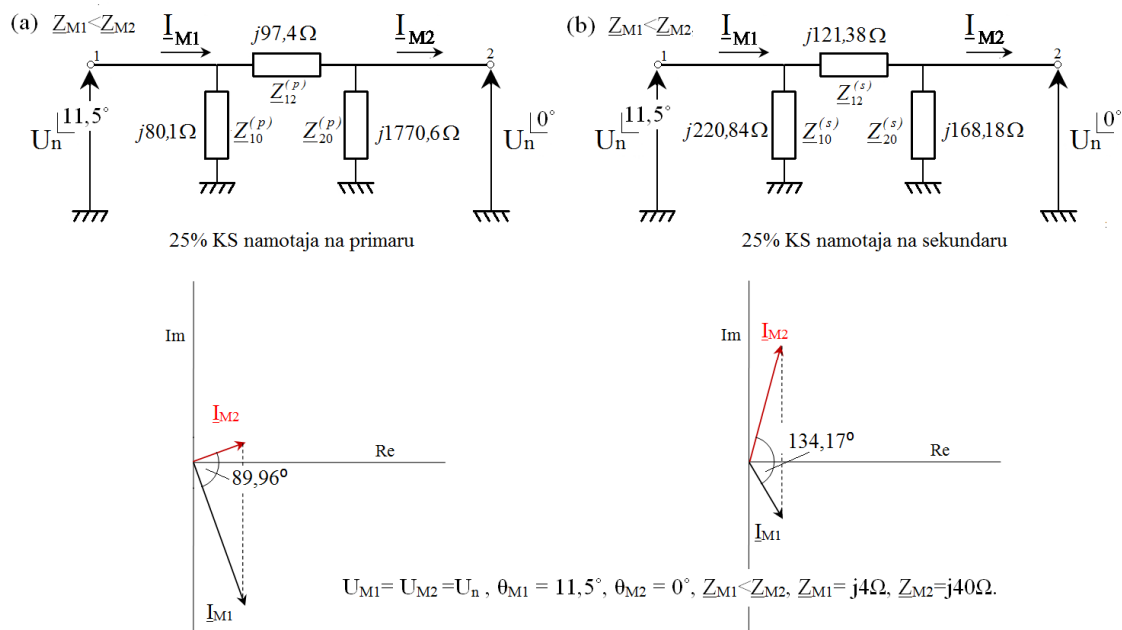
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

**Primer 5:** U ovom primeru posmatrano je kako različite impedanse mreža utiču na fazni pomeraj primarne i sekundarne struje tokom KS-eva navojaka ET-a. Posmatrani su sledeći slučajevi:

1) kada se aktivna snaga ( $P \approx 8,87\text{MW}$ ) prenosi iz mreže 1 u mrežu 2. Ulazni podaci simulacije su:  $U_{M1} = U_{M2} = U_n$ ,  $\theta_{M1} = 11,5^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$ ,  $Z_{M1} < Z_{M2}$ ,  $Z_{M1} = j4\Omega$ ,  $Z_{M2} = j40\Omega$ .

2) kada se aktivna snaga ( $P \approx 8,87\text{MW}$ ) prenosi iz mreže 2 u mrežu 1. Ulazni podaci simulacije su:  $U_{M1} = U_{M2} = U_n$ ,  $\theta_{M1} = 0^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 11,5^\circ$ ,  $Z_{M1} < Z_{M2}$ ,  $Z_{M1} = j4\Omega$ ,  $Z_{M2} = j40\Omega$ .

Za slučaj 1) kada se aktivna snaga prenosi iz mreže 1 u mrežu 2, na osnovu dobijenih rezultata simulacija, skiciran je fazorski dijagram struja nakon KS-a 25% primarnog (Sl. 3.22.a) i KS-a 25% sekundarnog (Sl. 3.22.b) namotaja ET-a. Za razliku od slučaja kada je  $Z_{M1} = Z_{M2}$ , sada za  $Z_{M1} < Z_{M2}$  kada se uporede  $\pi$ -šeme za KS-eve primarnih i sekundarnih namotaja sve impedanse imaju različite vrednosti. Ono što i dalje važi jeste da su impedanse na "strani" kvara ( $Z_{10}^{(p)}$  i  $Z_{20}^{(s)}$ ) manje u odnosu na impedanse na "suprotnoj strani" u odnosu na kvar: ( $Z_{20}^{(p)}$  i  $Z_{10}^{(s)}$ ):  $Z_{10}^{(p)} < Z_{20}^{(p)}$  i  $Z_{20}^{(s)} < Z_{10}^{(s)}$ .



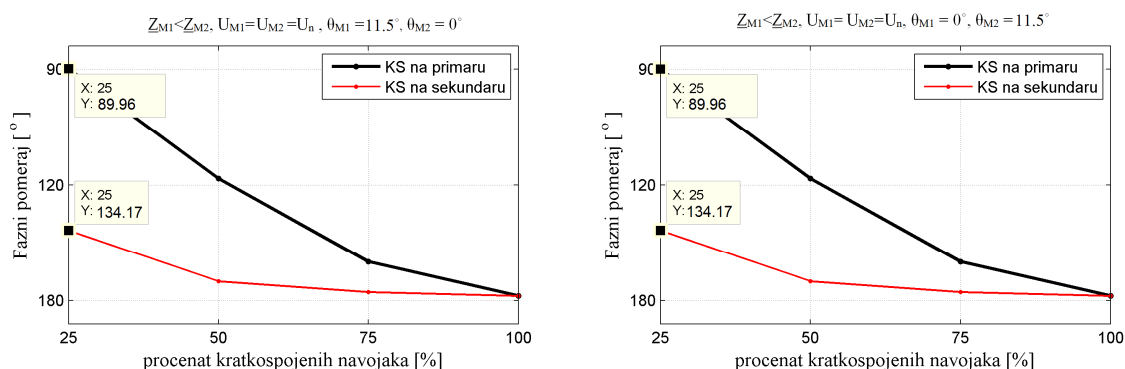
Sl. 3.22 Fazorski dijagram struja nakon 25% KS namotaja ET na: (a) primaru i

(b) sekundaru, za  $U_{M1} = U_{M2} = U_n$ ,  $\theta_{M1} = 11,5^\circ$ ,  $\theta_{M2} = 0^\circ$ ,  $Z_{M1} < Z_{M2}$



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Nakon uspostavljanja KS-a može se uočiti da ukoliko su različite impedanse mreža između kojih se nalazi ET, kada se dogodi KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa manjom impedansom ( $Z_{M1}$ ) fazni pomeraj između  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  je manji u odnosu na fazni pomeraj kada je KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa većom impedansom ( $Z_{M2}$ ). Pomoću digitalnog faznog komparatora estimirani su fazni pomeraji između  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  koji su dobijeni tokom simulacija KS-eva na 25%, 50%, 75% i 100% primarnog i sekundarnog namotaja, kada se aktivna snaga prenosi od mreže 1 do mreže 2 (Sl. 3.23.a) i od mreže 2 do mreže 1 (Sl. 3.23.b).



Sl. 3.23 Promena faznog pomeraja u zavisnosti od broja KS-enih navojaka za  $Z_{M1} < Z_{M2}$  kada je smer aktivne snage: (a) od mreže 1 do mreže 2 i (b) od mreže 2 do mreže 1

Na osnovu prikazanih primera mogu se izvesti sledeća zapažanja:

- 1) Za veća aktivna opterećenja ET-a pre nastanka kvara, fazni pomeraj između primarne ( $I_{M1}$ ) i sekundarne ( $I_{M2}$ ) struje nakon nastanka KS je manji.
- 2) Kada je KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa većim modulom napona fazni pomeraj između  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  je manji u odnosu na fazni pomeraj kada je KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa manjim modulom napona.
- 3) Ukoliko su impedanse mreža između kojih se nalazi ET različite, kada se dogodi KS na namotaju ET-a koji je bliži mreži sa manjom impedansom fazni pomeraj između  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  je manji u odnosu na fazni pomeraj kada je KS na namotaju ET koji je bliži mreži sa većom impedansom.

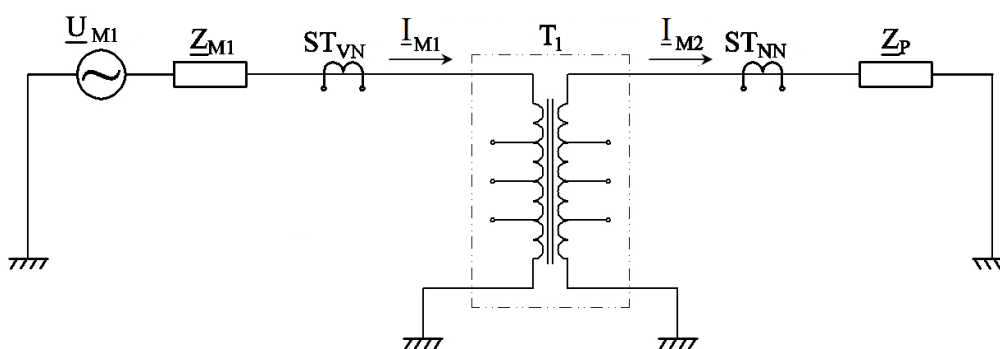
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

U analiziranim primerima zanemarene su aktivne otpornosti svih elemenata u posmatranoj mreži. Zapažanja 1) – 3) koja su data važe i ako bi se aktivne otpornosti elemenata uzele u obzir. Otpornosti elemenata imaju uticaja na opadanje jednosmerne komponente u struji kvara. Međutim, pre nego što se izvrši digitalna fazna komparacija signala, nad signalima se najpre izvrši digitalno filtriranje opadajuće jednosmerne komponente, tako da ona nema značajnijeg uticaja na digitalni fazni komparator koji je korišćen.

#### (2) Energetski transformator između aktivne i pasivne mreže.

Ovde će biti provereno kako se menja fazni pomeraj primarne i sekundarne struje tokom KS-eva namotaja ET-a koji se nalazi između aktivne i pasivne mreže.

Posmatraćemo jednofaznu mrežu prikazanu na Sl. 3.24. Mreža je predstavljena jednofaznim naponskim izvorom ( $110\text{kV}$ ,  $\theta_{M1} = 0^\circ$ ) i impedansom. Usvojeno je da je impedansa mreže čisto induktivna ( $Z_{M1} = j2\pi f L_{M1} = j4\Omega$ ). Parametri ET-a:  $S_{nT} = 25/3 \text{ MVA}$ ,  $m_T = 110\text{kV}/110\text{kV}$ ,  $x_t = 0,1 \text{ r.j.}$ ,  $r_\mu \rightarrow \infty$ ,  $x_\mu \rightarrow \infty$ , a otpornost namotaja transformatora je jednaka nuli  $r_t = 0$ . Potrošač je predstavljen impedansom  $Z_p$ . U nastavku će biti proverena promena faznog pomeraja između  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  tokom KS-eva namotaja ET-a za dva granična slučaja: (a) kada transformator napaja čisto aktivan potrošač ( $Z_p = R$ ) i (b) kada napaja čisto induktivan potrošač ( $Z_p = j2\pi f L_p$ ). U oba slučaja je impedansa potrošača zadata indirektno zadavanjem snage potrošača i u oba slučaja je prividna snaga potrošača zadata da bude jednaka prividnoj nominalnoj snazi ET-a ( $S_p = S_{nT}$ ).



Sl. 3.24 Šema veza elemenata za simulaciju KS namotaja ET između aktivne mreže i potrošača

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

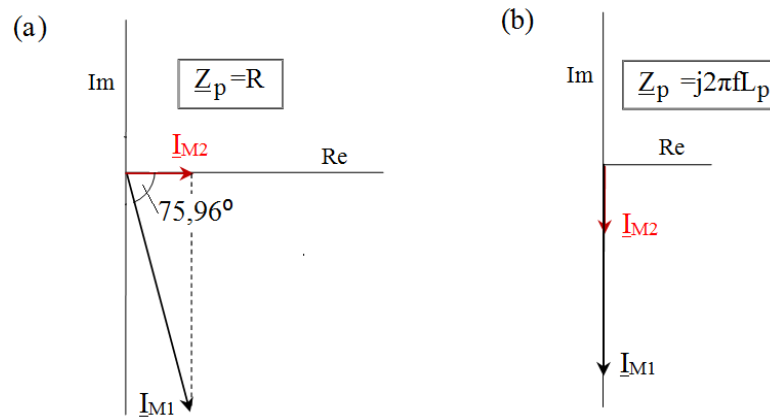
Na osnovu dobijenih rezultata simulacija skicirani su fazorski dijagrami struja nakon uspostavljanja: KS-a 25% navojaka primarnog namotaja kada je  $Z_p=R$  (Sl. 3.25.a) i KS -a 25% navojaka primarnog namotaja kada je  $Z_p=j2\pi fL_p$  (Sl. 3.25.b). U slučaju kada je  $Z_p=R$  na Sl. 3.25.a može se uočiti da struja na sekundaru ET-a ( $I_{M2}$ ) ima samo aktivnu komponentu, dok struja primara ( $I_{M1}$ ) ima aktivnu i reaktivnu komponentu.

Ako bi isti ET bio opterećen impedansom  $Z_{p2}=R_2$  za koju važi ( $R_2<R$ ) tada bi nakon kvara aktivna komponenta struja bila manja, dok bi reaktivna komponenta struje kvara ( $I_{M1}$ ) bila približno ista. Na osnovu toga može zaključiti da je fazni pomeraj između primarne i sekundarne struje tokom KS-eva navojaka ET-a veći kada je aktivno opterećenje ET-a manje.

Na Sl. 3.26.a prikazani su fazni pomeraji tokom KS-eva 25%, 50% i 75% navojaka primara i sekundara kada je opterećenje ET-a čisto aktivno. Za KS 100% navojaka struja na sekundaru ( $I_{M2}$ ) je približno jednaka nuli, pa u tom slučaju nije moguće izvršiti faznu komparaciju. Na slici se vidi da sa porastom broja KS-enih navojaka fazni pomeraj raste. Razlog za to je što je pri većem broju KS-enih navojaka aktivna komponenta struje kvara sve manja, a reaktivna komponenta struje kvara sve veća.

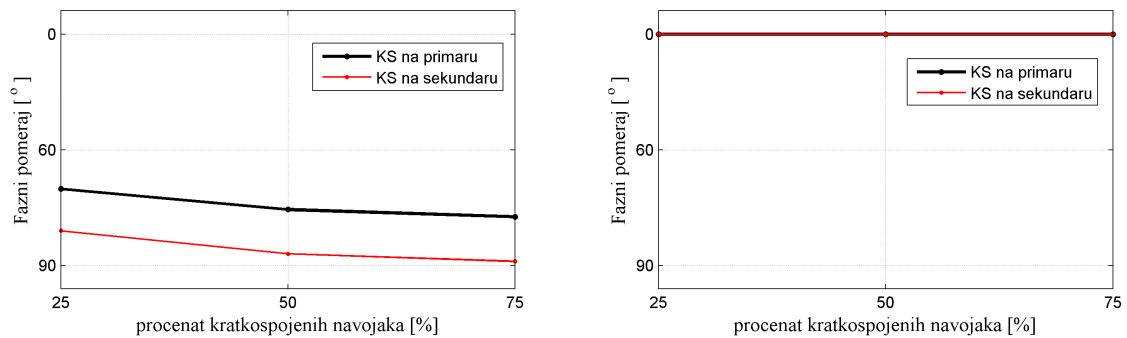
Kada je na sekundar ET-a priključen čisto induktivan potrošač ( $Z_p=j2\pi fL_p$ ) i fazni stav napona  $\underline{U}_{M1}$  je  $\theta_{M1}=0^\circ$ , fazni stavovi struja na primaru i sekundaru ET su  $\phi_{M1}=\phi_{M2}=-90^\circ$ . Nakon uspostavljanja KS-a pojavljuje se veća reaktivna komponenta struje  $I_{M1}$ , dok je reaktivna komponenta struje  $I_{M2}$  manja. Nakon uspostavljanja KS-a struje  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  menjaju vrednosti, ali im fazni stavovi ostaju isti kao pre kvara  $\phi_{M1} = \phi_{M2} = -90^\circ$ , što je prikazano na Sl. 3.25.b. Na sledećoj Sl. 3.26.b prikazani su fazni pomeraji u zavisnosti od broja KS-enih navojaka ET-a. Može se zapaziti da kada je ET opterećen čisto induktivnim potrošačem pri KS-u različitog broja navojaka ET-a struje  $I_{M1}$  i  $I_{M2}$  ostaju u fazi.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.25 Fazorski dijagram struja nakon 25% KS na primarnom namoraju za:

(a)  $Z_p = R$  i (b)  $Z_p = j2\pi f L_p$



Sl. 3.26 Promena faznog pomeraja u zavisnosti od broja KS navojaka primara i

sekundara za: (a)  $Z_p = R$  i (b)  $Z_p = j2\pi f L_p$

Iz prethodnog izlaganja za posmatrane granične slučajeve treba istaći sledeće:

- 1) Kada ET napaja aktivan potrošač tokom KS-eva, koji nisu zahvatili 100% namotaja ET-a, pojavljuje se fazni pomeraj između struja  $\underline{I}_{M1}$  i  $\underline{I}_{M2}$ .
- 2) Kada ET napaja induktivan potrošač tokom KS-eva namotaja ET-a struje  $\underline{I}_{M1}$  i  $\underline{I}_{M2}$  ostaju u fazi.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.3.2 Vrednosti indeksa usmerenosti tokom kratkih spojeva

U dosadašnjem izlaganju predstavljena je ideja primene fazne komparacije za detekciju KS-eva ET-a. Razmotreno je kako broj KS-enih navojaka, opterećenje ET-a, smer snage i parametri mreža utiču na međusobni fazni pomeraj struja na priključcima ET-a tokom KS-eva. Pošto se u ovoj doktorskoj disertaciji kao pokazatelj faznog pomeraja koristi indeks usmerenosti  $DFK(r.j.)$ , ovde će biti napravljen pregled vrednosti koje ima indeks usmerenosti u normalnim uslovima rada i tokom KS-eva van i unutar štićene zone ET-a, kada se:

##### (1) Energetski transformator nalazi između dve aktivne mreže.

- Indeks usmerenosti u normalnim uslovima rada:  $DFK \approx 1 r.j.$  Fazni pomeraj između struja primara i sekundara približno je jednak  $0^\circ$ .
- Indeks usmerenosti tokom KS-eva van štićene zone transformatora:  $DFK \approx 1 r.j.$  Fazni pomeraj između struja primara i sekundara približno je jednak  $0^\circ$ .
- Indeks usmerenosti tokom KS-eva unutar štićene zone transformatora:  $DFK \in [-1, 1) r.j.$  Fazni pomeraj između struja primara i sekundara je između  $0^\circ$  i  $180^\circ$ . Kada je 100% namotaja kratko spojeno  $DFK \approx -1 r.j.$ , odnosno fazni pomeraj između struja primara i sekundara je približno jednak  $180^\circ$ .

##### (2) Energetski transformator nalazi između aktivne i pasivne mreže.

- Indeks usmerenosti u normalnim uslovima rada jednak je:  $DFK \approx 1 r.j.$  Fazni pomeraj između struja primara i sekundara približno je jednak  $0^\circ$ .
- Indeks usmerenosti tokom KS-eva van štićene zone transformatora:  $DFK \approx 1 r.j.$  Fazni pomeraj između struja primara i sekundara približno je jednak  $0^\circ$ .
- Indeks usmerenosti tokom KS-eva unutar štićene zone transformatora:  $DFK \in (0, 1) r.j.$  Fazni pomeraj između struja primara i sekundara je između  $0^\circ$  i  $90^\circ$ .

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Može se uočiti da u oba slučaja, bez obzira na položaj ET-a u mreži, tokom normalnih radnih uslova ET-a i tokom KS-eva van štice zone indeks usmerenosti ima vrednost 1 r.j. Kvarove van štice zone karakteriše to da kroz namotaje transformatora protiču struje koje mogu biti znatno veće od nominalnih. Da bi mogla da se napravi razlika između normalnih radnih uslova i stanja prisustva kvara van štice zone transformatora, mogu se dodatno posmatrati vrednosti struja na primaru i sekundaru transformatora. Pokazatelji efektivnih vrednosti struja se već računaju zbog proračuna indeksa usmerenosti, tako da bi ovaj dodatni uslov koristio već proračunate vrednosti. Informacija da su obe efektivne vrednosti struja veće od unapred definisane granične vrednosti i da je indeks usmerenosti blizak vrednosti 1 r.j., ukazivala bi na to da je prisutan spoljašnji kvar.

#### **3.3.3 Trofazni dvonamotni energetski transformator**

Digitalni fazni komparator (DFK) može se primeniti i na trofazni ET tako što bi se primenio na svaku fazu pojedinačno. Da bi fazna komparacija mogla korektno da se obavi potrebno je fazno usaglašavanje struja, dok usaglašavanje po amplitudi nije neophodno. Ukoliko bi DFK bio dopuna faznoj diferencijalnoj zaštiti, koja zahteva da struje budu usaglašene po amplitudi i fazi, potreban uslov za njegov rad je ispunjen i pre njegove implementacije.

Za svaku fazu pojedinačno, fazno poređenje (prilagođenih) struja se obavlja pomoću izraza (3.7), a praćenje pokazatelja efektivnih vrednosti struja na primaru i sekundaru primenom izraza (3.6). Tokom analiziranja ponašanja indeksa usmerenosti treba uvažiti činjenicu da namotaji trofaznog transformatora mogu biti spregnuti u zvezdu ili trougao. Kada su fazni namotaji ET-a spregnuti u trougao, linijska struja koja se meri na priključcima ET-a jednaka je razlici dve fazne struje.

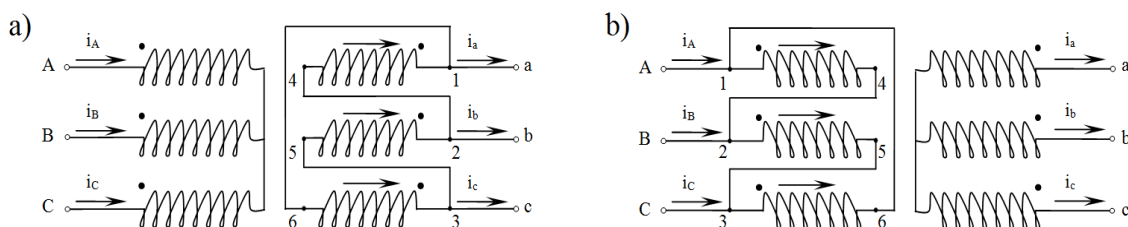
Ako su fazni namotaji spregnuti u trougao, kada se dogodi KS na jednom namotaju, posmatranjem struja na priključcima, na strani trougla primetiće se promena vrednosti dve struje u odnosu na normalni režim rada pre kvara.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Takođe, ukoliko je ET sprege trougao – zvezda, a KS namotaja ET-a se dogodi na faznom namotaju spregnutom u zvezdu, ponovo će dve struje na priključcima namotaja spregnutog u trougao promeniti vrednosti u odnosu na normalni režim pre kvara.

#### 3.3.4 Prilagodavanje ulaznih signala struja

Princip rada diferencijalne zaštite je sadržan u poređenju dve struje iste faze. Mikroprocesorska fazna diferencijalna zaštita (FDZ) u određenim algoritmima obuhvata kompleksni koeficijent transformacije ET-a i prenosne odnose glavnih strujnih transformatora. Preslikavanje struja sa jedne na drugu stranu ET-a pomoću kompleksnog koeficijenta transformacije moguće je direktno sprovesti 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, pa je pogodnije izvršiti usaglašavanje struja na nivou trenutnih vrednosti [4]. Na Sl. 3.27 su prikazani transformatori sprege Yd1 i Dy11. Za ove dve sprege, sa slike se lako mogu izvesti relacije između struja na strani trougla i struja na strani zvezde (3.23). U relacijama su struje na strani trougla izražene preko struja na strani zvezde.



Sl. 3.27 Transformator sprege (a) Yd1 i (b) Dy11

(a) Yd1

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

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

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

(b) Dy11

$$i_A' = \frac{1}{\sqrt{3}m_T} (i_a - i_c)$$

$$i_B' = \frac{1}{\sqrt{3}m_T} (i_b - i_a)$$

$$i_C' = \frac{1}{\sqrt{3}m_T} (i_c - i_b)$$

(3.23)

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Prilikom usaglašavanja struja koje se dovode na ulaz releju, treba uzeti u obzir i prenosne odnose strujnih transformatora na primaru ( $m_p$ ) i sekundaru ( $m_s$ ) ET-a.

Odnosno, sa primara i sekundara ET-a na ulaz releju se dovode struje:

$$i_{As} = \frac{i_A}{m_p}, \quad i_{Bs} = \frac{i_B}{m_p}, \quad i_{Cs} = \frac{i_C}{m_p} \quad (3.24)$$

$$i_{as} = \frac{i_a}{m_s}, \quad i_{bs} = \frac{i_b}{m_s}, \quad i_{cs} = \frac{i_c}{m_s}, \quad (3.25)$$

gde su:

$i_{As}, i_{Bs}, i_{Cs}$  – sekundarne struje strujnih transformatora na primaru ET-a u fazama A, B, C, respektivno;

$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  - sekundarne struje strujnih transformatora na sekundaru ET-a u fazama a, b, c, respektivno.

Kada se izrazi (3.23) napišu pomoću struja koje se dovode na ulaz releju dobijaju se relacije (3.26). U Tab. 3.1 su date kombinacije struja koje se koriste za nekoliko različitih sprega ET-a.

(a) Yd1

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

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

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

(b) Dy11

$$i_{As}' = \frac{i_A'}{m_p} = \frac{m_s}{\sqrt{3} m_T m_p} (i_{as} - i_{cs})$$

$$i_{Bs}' = \frac{i_B'}{m_p} = \frac{m_s}{\sqrt{3} m_T m_p} (i_{bs} - i_{as})$$

$$i_{Cs}' = \frac{i_C'}{m_p} = \frac{m_s}{\sqrt{3} m_T m_p} (i_{cs} - i_{bs})$$

(3.26)



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Tab. 3.1 Poređenje struja za različite sprege energetskog transformatora

Sprega ET	Faza A	Faza B	Faza C
	<i>poredi se <math>i_{as}</math> sa</i>	<i>poredi se <math>i_{bs}</math> sa</i>	<i>poredi se <math>i_{cs}</math> sa</i>
<b>Yy0</b>	$i_{as}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$	$i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$	$i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$
<b>Yy6</b>	$i_{as}' = -\frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$	$i_{bs}' = -\frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$	$i_{cs}' = -\frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$
<b>Yd1</b>	$i_{as}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{As} - i_{Cs})$	$i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Bs} - i_{As})$	$i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Cs} - i_{Bs})$
<b>Yd5</b>	$i_{as}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Bs} - i_{As})$	$i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Cs} - i_{Bs})$	$i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{As} - i_{Cs})$
<b>Yd11</b>	$i_{as}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{As} - i_{Bs})$	$i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Bs} - i_{Cs})$	$i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Cs} - i_{As})$
<b>Dd0</b>	$i_{as}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$	$i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$	$i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$
<b>Dd6</b>	$i_{as}' = -\frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$	$i_{bs}' = -\frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$	$i_{cs}' = -\frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$
	<i>poredi se <math>i_{As}</math> sa</i>	<i>poredi se <math>i_{Bs}</math> sa</i>	<i>poredi se <math>i_{Cs}</math> sa</i>
<b>Dy5</b>	$i_{As}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{cs} - i_{as})$	$i_{Bs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{as} - i_{bs})$	$i_{Cs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{bs} - i_{cs})$
<b>Dy11</b>	$i_{As}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{as} - i_{cs})$	$i_{Bs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{bs} - i_{as})$	$i_{Cs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{cs} - i_{bs})$

#### 3.4 Kompjuterske simulacije kratkih spojeva namotaja trofaznog ET-a

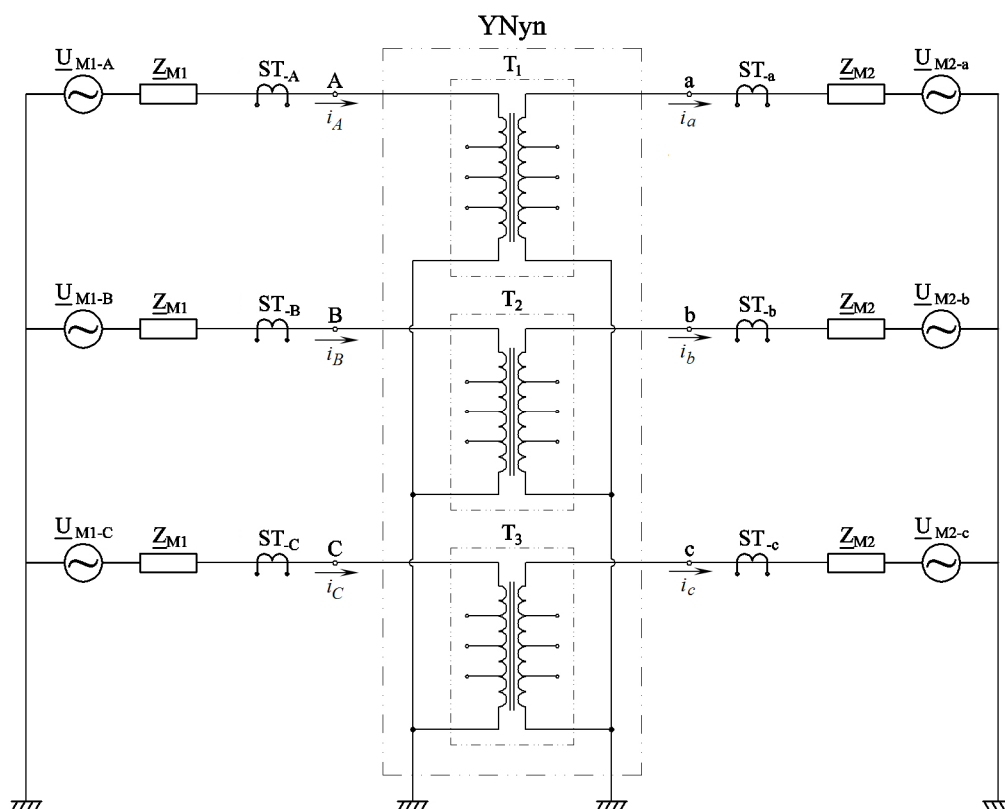
U ovom poglavlju su prikazani rezultati simulacija KS-eva namotaja trofaznog ET-a. Za potrebe simulacija formirana je trofazna mreža sa realnim parametrima, a trofazni ET je formiran povezivanjem tri monofazna ET-a. Cilj je bio da se pokaže kako se za različite sprege trofaznog ET-a tokom KS-eva namotaja menjaju struje na primaru i sekundaru, i kako se menja njihov međusobni fazni pomeraj. Kao pokazatelj faznog pomeraja korišćen je indeks usmerenosti (3.7), dok su vrednosti struja posmatrane preko pokazatelja efektivnih vrednosti (3.6). Promene pokazatelja tokom KS-eva namotaja ET-a su posmatrane za ET koji radi između dve aktivne mreže i ET koji radi između aktivne i pasivne mreže.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.1 Promena indeksa usmerenosti tokom KS-eva namotaja ET-a koji radi između dve aktivne mreže

Kompjuterske simulacije KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a izvršene su pomoću programskog paketa MATLAB – Simulink. U simulacijama trofazni transformator je formiran povezivanjem tri monofazna transformatora T1, T2 i T3. U nastavku oznaka (ET) će se odnositi na trofazni energetski transformator. Posmatrane su sledeće sprege ET-a: YNyn, Dyn, YNd i YNy. Šema na osnovu koje je formiran Simulink model za simulaciju KS-eva namotaja ET-a sprege YNyn0 prikazana je na Sl. 3.28. Parametri elemenata koji figurišu u modelu za simulaciju su:

mreža 1:  $U_{nM1}=110$  kV,  $S_{ksM1}=4500$  MVA,  $X/R=7$ ; mreža 2:  $U_{nM2}=110$  kV,  $S_{ksM2}=750$  MVA,  $X/R=6,5$ ; energetski transformator:  $m_T=110$  kV/110 kV,  $S_{nt}=25$  MVA,  $r_t=0.006$  r.j.,  $x_t=0.11$  r.j. i  $i_0=0,5\%$ .



Sl. 3.28 Veza elemenata u modelu za simulaciju – ET sprege YNyn0 između dve aktivne mreže

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

U nastavku su prikazani rezultati simuliranih KS-eva koji su zahvatili 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% i 100% namotaja ET-a. Za primar je usvojena strana ET-a do mreže 1, a za sekundar strana do mreže 2. Na grafikonima vrednost koja odgovara 0% kratkospojenih navojaka dobijena je simulacijom rada ET -a bez kvara. Da bi se bolje uočila promena pokazatelja efektivnih vrednosti struja pri KS-evima manjeg procenta navojaka, na grafikonima su prikazane vrednosti od 5% do 50% KS-enih navojaka. Tokom svih simulacija koje su prikazane u okviru ovog poglavlja strujni transformatori su verno preslikavali primarne struje na sekundar. Broj odbiraka u periodu signala je jednak  $m=40$ .

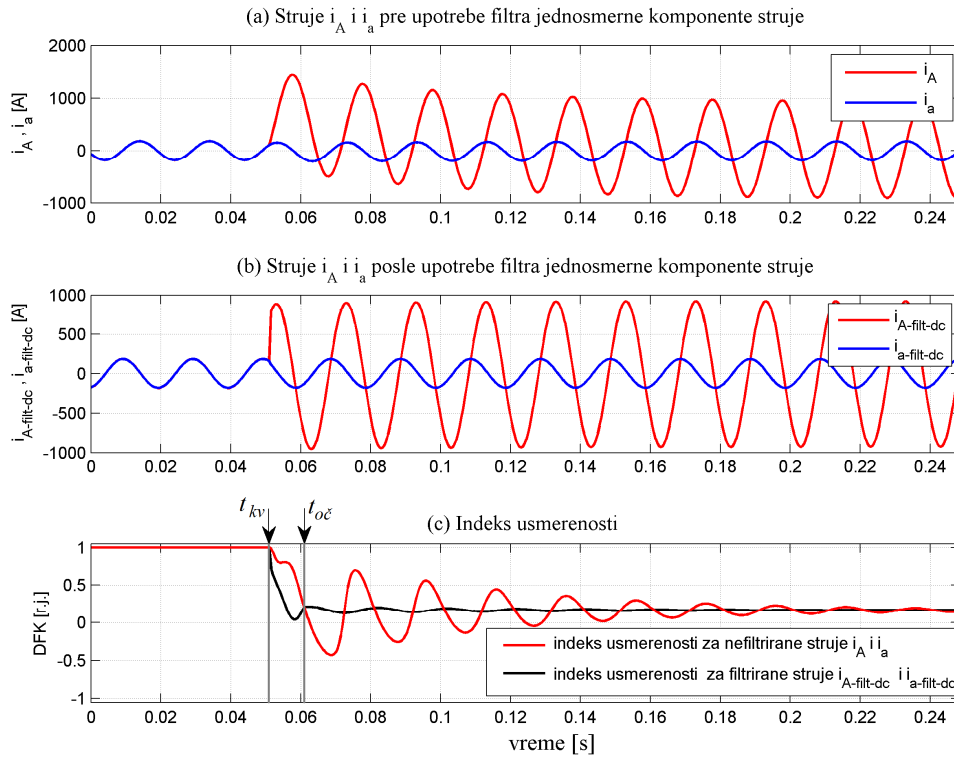
#### **3.4.1.1 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNyn0**

Kao što je već rečeno, blok šema Simulink modela koji je korišćen za simulacije KS-eva na namotaju ET-a sprege YNyn0 odgovara šemi na Sl. 3.28. Kratki spojevi su generisani na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1.

Na Sl. 3.29.a prikazani su talasni oblici struja  $i_A$  i  $i_a$  pre i nakon KS-a 20% namotaja na primaru transformatora T1. Pre nastanka KS-a opterećenje transformatora je bilo nominalno, a faktor snage opterećenja približno jednak 0,98. Na slici se može uočiti prisustvo opadajuće jednosmerne komponente u struji  $i_A$  nakon nastanka kvara. Nakon upotrebe filtra opadajuće jednosmerne komponente talasni oblici filtriranih struja  $i_{A-filt-dc}$  i  $i_{a-filt-dc}$  su prikazani na Sl. 3.29.b. Indeksi usmerenosti izračunati pomoću nefiltriranih i filtriranih struja prikazani su na Sl. 3.29.c. U svim primerima prikazanim u ovom poglavlju pre proračuna indeksa i pokazatelja izvršeno je filtriranje opadajuće jednosmerne komponente.

Indeks usmerenosti i pokazatelji efektivnih vrednosti proračunavaju na intervalu jednakom 10 ms. U svim primerima koji slede vrednosti indeksa i struja prikazane na slikama su očitane 10 ms po uspostavljanju kvara. Na Sl. 3.29.c. trenutak kvara je označen sa  $t_{kv}$ , a trenutak 10 ms nakon kvara sa  $t_{oc}$ . Na slici se može videti da se i nakon upotrebe filtra jednosmerne komponente primećuju oscilacije vrednosti indeksa usmerenosti koje se vremenom prigušuju. Pokazalo se da u svim primerima, datim u poglavlju 3.4, očitane vrednosti nisu odstupile više od  $\pm 8\%$  u odnosu na vrednost nakon iščezavanja oscilacija.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.29 Talasni oblici struja  $i_A$  i  $i_a$ : (a) pre i (b) posle filtriranja jednosmerne komponente i (c) indeks usmerenosti

U nastavku su prikazani rezultati simulacija KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1 za različita opterećenja ET-a pre nastanka kvara:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99. Tokom simulacija smerovi aktivne snage i reaktivne snage su bili od mreže 1 ka mreži 2.

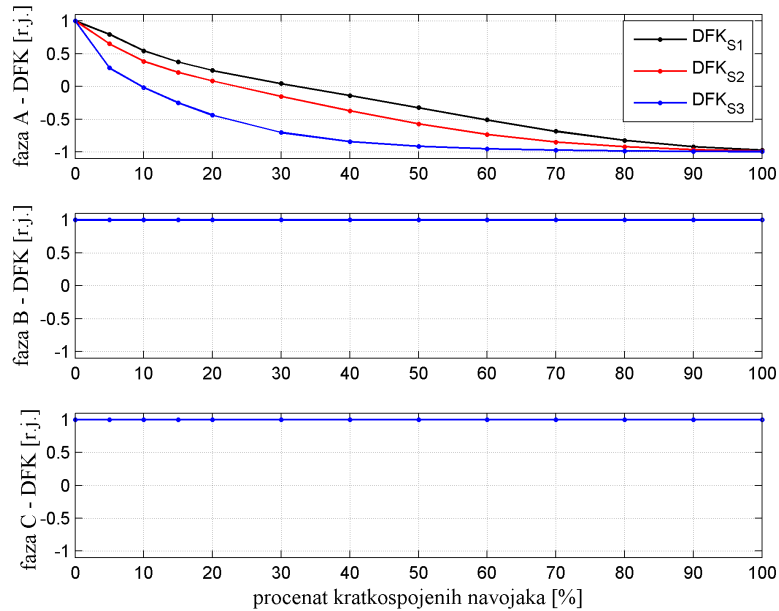
Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu YNyn0 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje  $i_{as}$  i izračunate struje  $i'_{as} = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$ ;
- 2) struje  $i_{bs}$  i izračunate struje  $i'_{bs} = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$ ;
- 3) struje  $i_{cs}$  i izračunate struje  $i'_{cs} = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$ .

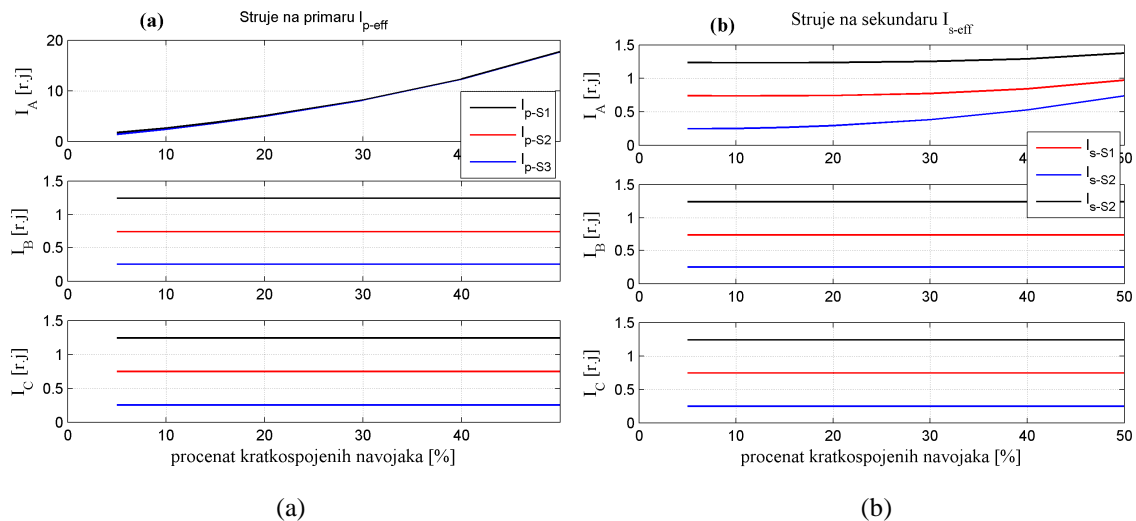
#### 3.4.1.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege YNyn0

Sl. 3.30 prikazuje promene indeksa usmerenosti, u sve tri faze, u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka primarnog namotaja transformatora T1. Na Sl. 3.31

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora prikazane su promene pokazatelja efektivnih vrednosti struja izmerenih na primarnim i sekundarnim priključcima trofaznog ET-a. Vrednosti struja su izražene u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu struju ET-a. U Tab. 3.2 su date vrednosti indeksa usmerenosti u fazi sa kvarom za 5% KS-enih navojaka.



Sl. 3.30 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 - ET: YNyn0

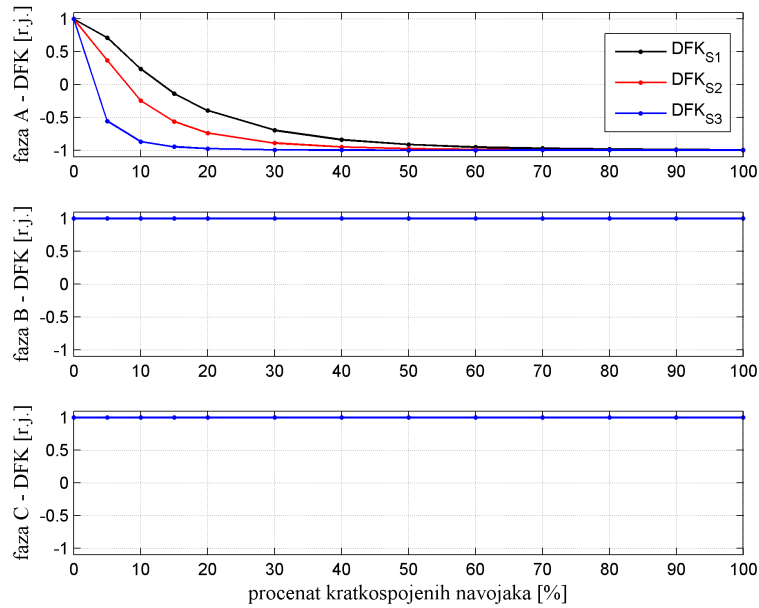


Sl. 3.31 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET: YNyn0

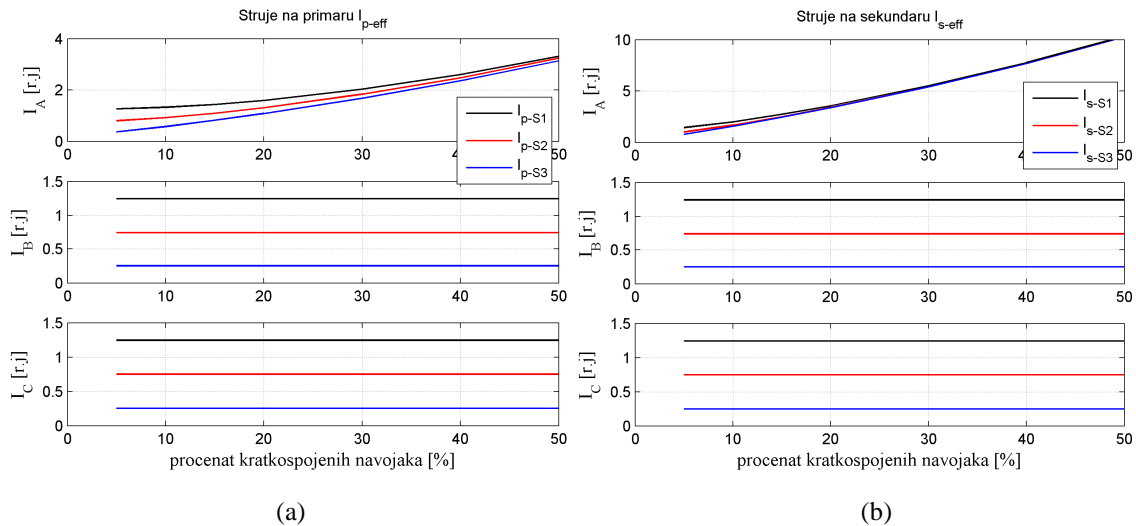
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.1.1.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege YNyn0

Sl. 3.32 prikazuje promene indeksa usmerenosti u sve tri faze, u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka sekundarnog namotaja transformatora T1. Sl. 3.33 prikazuje promene pokazatelja efektivnih vrednosti struja izmerenih na primarnim i sekundarnim priključcima trofaznog ET-a.



Sl. 3.32 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1 - ET: YNyn0



Sl. 3.33 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET: YNyn0

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Može se uočiti da kod sprege YNyn pri kratkim spojevima namotaja transformatora T1 indeks usmerenosti menja vrednosti u fazi koja je pogođena kvarom, dok u zdravim fazama indeks ostaje jednak 1 r.j. Vidi se i da vrednosti pokazatelja efektivnih vrednosti primarnih i sekundarnih struja sa porastom kratkospojenih navojaka rastu u fazi sa kvarom.

Promene indeksa usmerenosti, odnosno faznog pomeraja, tokom KS-eva prikazane na Sl. 3.30 i Sl. 3.32 potvrđuju zapažanja data za monofazni ET u poglavlju 3.3.1. Dakle, vidi se da pri većem procentu KS-enih navojaka fazni pomeraj primarne i sekundarne struje je veći. Kada je opterećenje ET-a pre kvara veće, fazni pomeraj primarne i sekundarne struje pri istom procentu KS-enih namotaja je manji. U primeru koji se ovde posmatra mreža 1 je jača od mreže 2, odnosno unutrašnja impedansa mreže 1 je manja od impedanse mreže 2. Takođe, moduo napona mreže 1 je veći od modula napona mreže 2. Sl. 3.30 i Sl. 3.32 pokazuju da je pri KS-u namotaja primara, fazni pomeraj manji nego pri istom procentu KS-enih navojaka na sekundaru T1, što takođe, potvrđuje zapažanje iz poglavlja 3.3.1. Sa Sl. 3.30 i Sl. 3.32 se može očitati da pri KS-u 5% navojaka indeksi usmerenosti u fazi sa kvarom imaju vrednosti date u Tab. 3.2.

Tab. 3.2 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege YNyn0

S		1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>
KS na primaru	faza A - DFK [r.j.]	0,795	0,6497	0,28
KS na sekundaru		0,7166	0,3703	-0,558

Provereno je kako bi se relej koji radi na diferencijalnom principu ponašao tokom KS-a 5% navojaka. Korišćena je karakteristika reagovanja sa jednim nagibom (Sl. 2.2), gde su:  $I_{dif}$  – komponenta osnovne frekvencije diferencijalne struje,  $I_s$  – komponenta osnovne frekvencije stabilizacione struje,  $I_{d,min}=0,3$  r.j. ,  $I_{s,I}=1$  r.j., nagib  $m=0,2$  i vrednost  $k=0,5$  u relaciji (2.2). Smatrano je da bi relej detektovao KS ako izračunate vrednosti  $(I_s, I_{dif})$  zadovoljavaju uslov reagovanja diferencijalnog releja (2.3). Rezultati su prikazani u Tab. 3.3. Ukoliko je uslov reagovanja releja zadovoljen u tabeli u polju *reagovanje* je upisana 1, u suprotnom upisana je 0. Na osnovu dobijenih rezultata vidi se

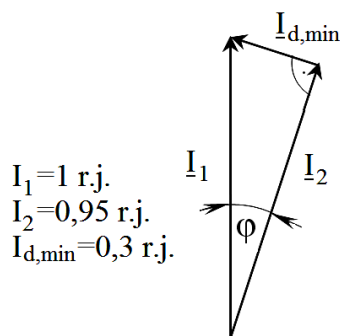
3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora da bi relej baziran na diferencijalnom principu reagovao u svim posmatranim slučajevima. Uslov reagovanja u svim slučajevima je bio zadovoljen u okviru 10 ms.

Tab. 3.3 Testiranje releja koji radi na diferencijalnom principu - ET sprege YNyn0

S	5% KS na primaru			5% KS na sekundaru		
	1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>	1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>
reagovanje faza A	1	1	1	1	1	1

Zatim je posmatrano kako bi se tokom KS 5% navojaka ponašao relej koji koristi digitalni fazni komparator. Podešavanjem minimalne diferencijalne struje na  $I_{d,min}=0,3$  r.j. izbegava se lažno reagovanje diferencijalne zaštite zbog struja debalansa. Da bi analogno tome bila izabrana granična vrednost indeksa usmerenosti, pretpostavljeno je da je primarna struja jednaka 1 r.j., a minimalna diferencijalna struja 0,3 r.j. Najveći ugao između vektora primarne ( $I_1$ ) i sekundarne struje ( $I_2$ ) ćemo dobiti ako vektor ( $I_{d,min}$ ) zaklapa prav ugao sa vektorom  $I_2$  (Sl. 3.34). U tom slučaju fazni pomeraj između struja primara i sekundara iznosi  $\varphi=17,458^\circ$ . Na osnovu toga graničnu vrednost indeksa usmerenosti ( $DFK_{gr}$ ) možemo podesiti tako da bude zadovoljen uslov:

$$DFK_{gr}(r.j.) \leq DFK_{max}(r.j.) = \cos(17,458^\circ) = 0,954. \quad (3.27)$$



Sl. 3.34 Izbor granične vrednosti indeksa usmerenosti

Ispitan je rad releja koji koristi digitalni fazni komparator, a uslov za reagovanje je ispunjen ako je indeks usmerenosti manji ili jednak 0,954 r.j. Na osnovu vrednosti indeksa koje su dobijene za KS 5% navojaka (Tab. 3.2) vidi se da je u svim slučajevima



3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora indeks usmerenosti bio manji od 0,954 r.j., što ukazuje na to da bi relej koji koristi digitalni fazni komparator u svim posmatranim slučajevima prepoznao prisustvo KS-a.

### 3.4.1.2 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege Dyn11

Šema na osnovu koje je formiran Simulink model za simulaciju KS-eva namotaja ET-a sprege Dyn11 prikazana je na Sl. 3.35. KS-evi su simulirani na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1 za različita opterećenja ET-a pre nastanka kvara:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99. Tokom simulacija smerovi aktivne snage i reaktivne snage su bili od mreže 1 ka mreži 2. Na narednim slikama su sve vrednosti pokazatelja očitane 10 ms po uspostavljanju kvara.

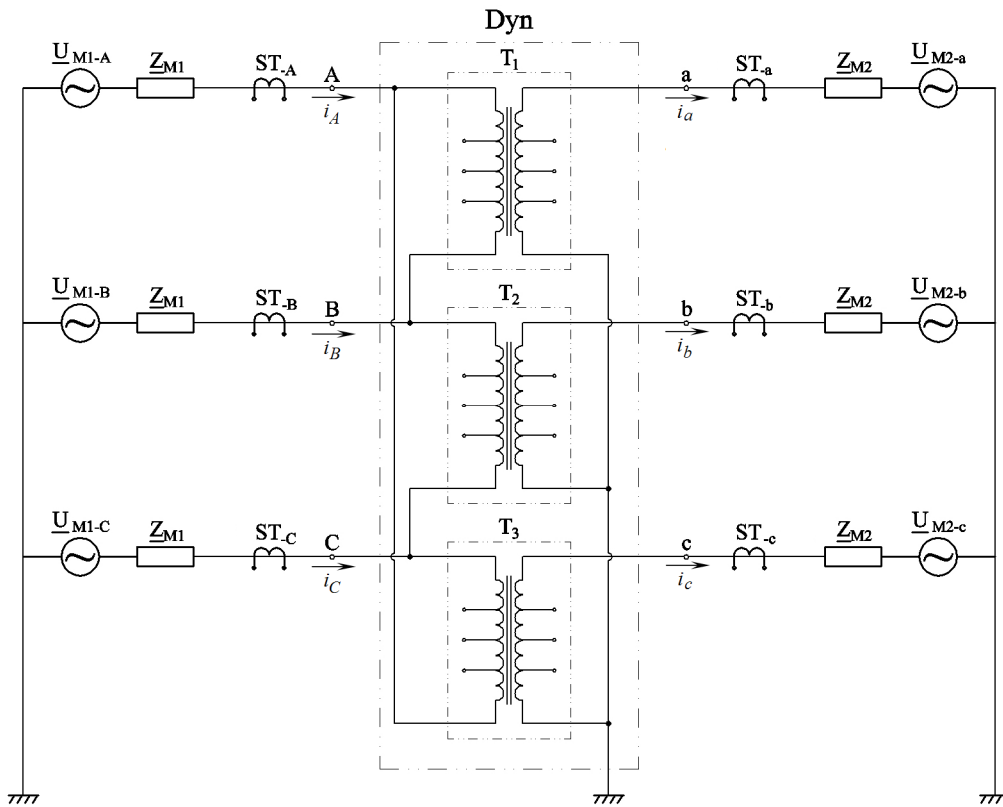
Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu Dyn11 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje na strani trougla  $i_{As}$  i izračunate struje  $i_{As}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{as} - i_{cs})$ ;
- 2) struje na strani trougla  $i_{Bs}$  i izračunate struje  $i_{Bs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{bs} - i_{as})$ ;
- 3) struje na strani trougla  $i_{Cs}$  i izračunate struje  $i_{Cs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{cs} - i_{bs})$ .

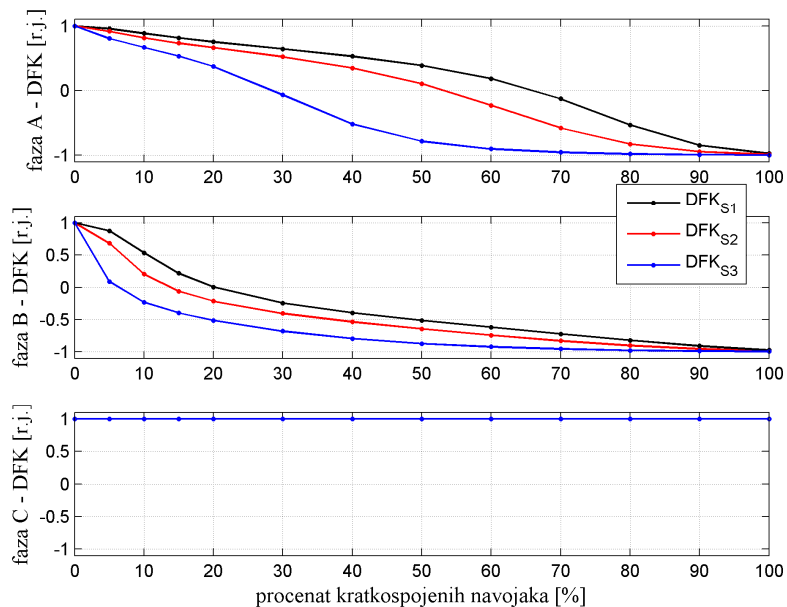
#### 3.4.1.2.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege Dyn11

Sl. 3.36 prikazuje promene indeksa usmerenosti u sve tri faze u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka primarnog namotaja transformatora T1. Sl. 3.37 prikazuje promenu pokazatelja efektivnih vrednosti struja primara i fazno prilagođenih struja sekundara trofaznog ET-a. Jasno se uočava promena efektivnih vrednosti struja i indeksa usmerenosti u fazama A i B, dok u fazi C vrednosti ostaju nepromenjene. Iz ugla detekcije kvara na osnovu posmatranja indeksa usmerenosti, očigledno je da bi algoritam baziran na faznoj komparaciji najpre detektovao kvar pomoću indeksa usmerenosti u fazi B.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

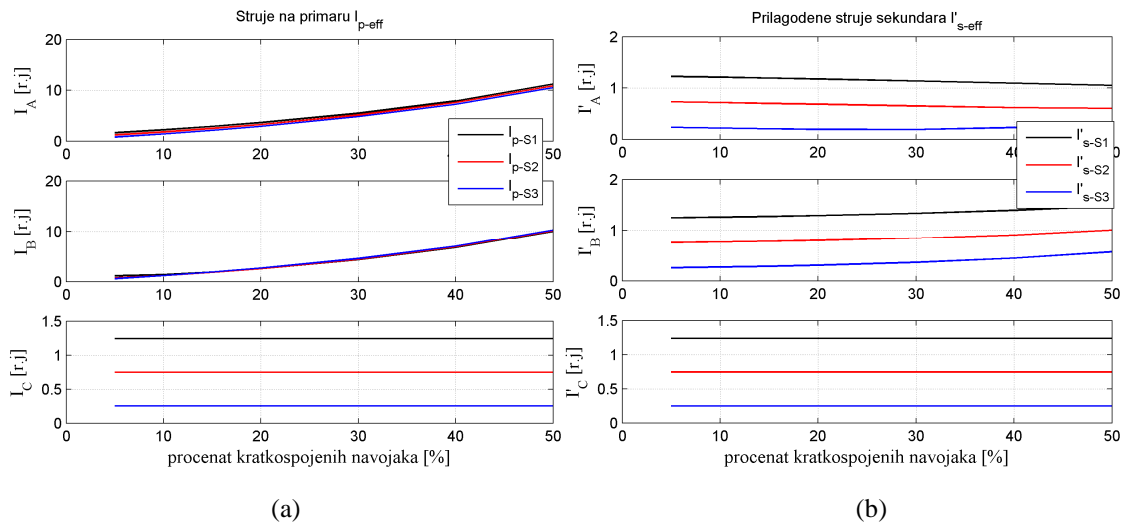


Sl. 3.35 Veza elemenata u modelu za simulaciju – ET sprege Dyn11 između dve aktivne mreže



Sl. 3.36 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 - ET: Dyn11

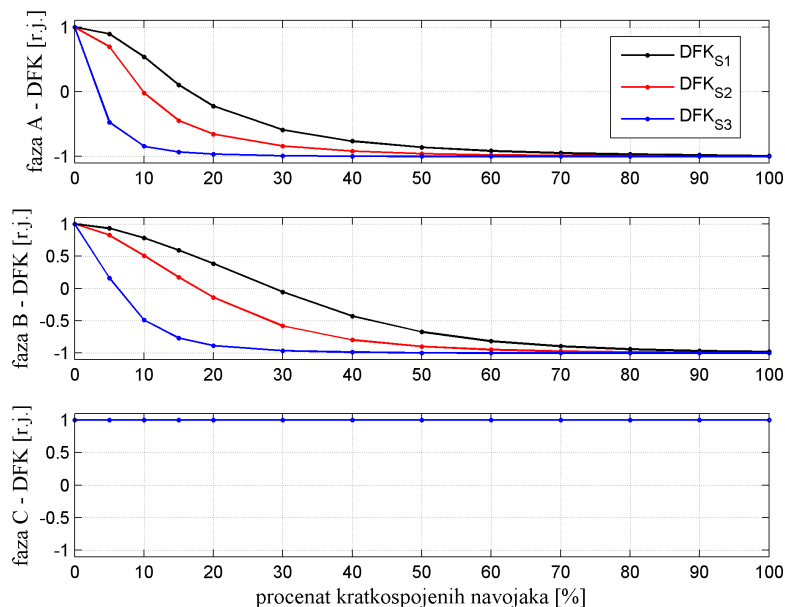
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.37 Pokazatelji efektivnih vrednosti (a) struja primara i (b) prilagođenih struja sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET: Dyn11

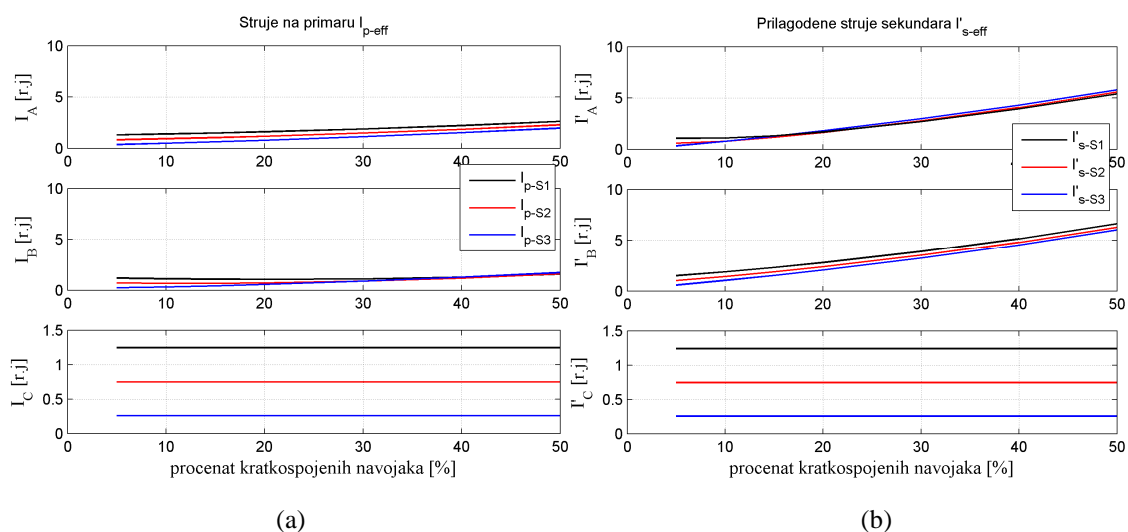
#### 3.4.1.2.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege Dyn11

Na Sl. 3.38 je prikazana promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka sekundarnog namotaja transformatora T1. Sl. 3.39 prikazuje promenu pokazatelja efektivnih vrednosti struja primara i fazno prilagođenih struja sekundara trofaznog ET-a.



Sl. 3.38 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1 - ET: Dyn11

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.39 Pokazatelji efektivnih vrednosti (a) struja primara i (b) prilagođenih struja sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET: Dyn11

Sa Sl. 3.36 i Sl. 3.38 se može očitati da pri KS-u 5% navojaka indeks usmerenosti u izabranim fazama ima vrednosti koje su prikazane u Tab. 3.4. Može se zapaziti i da vrednosti pokazatelja efektivnih vrednosti primarnih i prilagođenih sekundarnih struja sa porastom kratkospojenih navojaka u fazama A i B rastu.

Tab. 3.4 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege Dyn11

S		$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
KS na primaru	faza B - DFK [r.j.]	0,8746	0,6818	0,0898
KS na sekundaru	faza A - DFK [r.j.]	0,8951	0,6962	-0,4724

Ovde je takođe procenjen rad releja koji radi na diferencijalnom principu i releja koji koristi digitalni fazni komparator tokom KS-a 5% navojaka. Karakteristika reagovanja releja koji radi na diferencijalnom principu i uslov reagovanja releja koji se bazira na DFK su dati u poglavlju 3.4.1.1.2.

Rezultati reagovanja releja koji radi na diferencijalnom principu su prikazani u Tab. 3.5. Pošto se za sprege Dyn11 vrednosti struja menjaju u fazama A i B, prikazano je reagovanje releja za obe faze. Diferencijalni relej bi prepoznao prisustvo svih posmartanih KS-a 5% navojaka na primaru i u fazi A, i u fazi B. U slučaju KS-a 5%

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora navojaka na sekundaru za  $S=1,25S_{nT}$  diferencijalni relej u fazi B ne bi prepoznao KS, dok bi diferencijalni relej u fazi A prepoznao KS. Tako da bi u ovom slučaju KS bio detektovan na osnovu promene struja u fazi A. U svim posmatranim slučajevima uslov reagovanja je bio zadovoljen u okviru 10 ms.

Tab. 3.5 Testiranje releja koji radi na diferencijalnom principu - ET sprege Dyn11

S	5% KS na primaru			5% KS na sekundaru		
	1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>	1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>
reagovanje faza A	1	1	1	1	1	1
reagovanje faza B	1	1	1	0	1	1

Na osnovu vrednosti indeksa koje su dobijene za KS 5% navojaka (Tab. 3.4) vidi se da je u svim slučajevima indeks usmerenosti bio manji od granične vrednosti 0,954 r.j., uslov (3.27), što ukazuje na to da bi relej koji koristi digitalni fazni komparator u svim posmatranim slučajevima prepoznao prisustvo KS-a.

### 3.4.1.3 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNd1

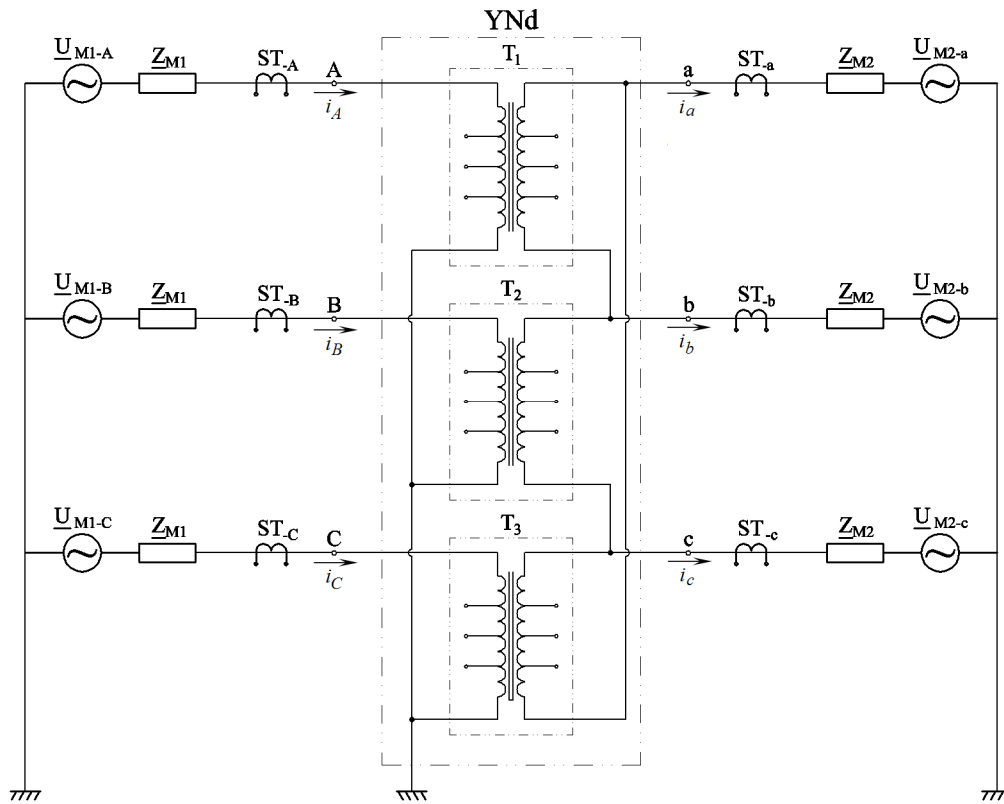
Šema na osnovu koje je formiran Simulink model pomoću koga su simulirani KS-evi na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a sprege YNd1 prikazana je na Sl. 3.40. KS-evi su simulirani na transformatoru T1. Opterećenja ET-a pre nastanka kvara:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99. Tokom simulacija smerovi aktivne snage i reaktivne snage su bili od mreže 1 ka mreži 2. Na narednim slikama su sve vrednosti pokazatelja očitane 10 ms po uspostavljanju kvara.

Iz Tab. 3.1 se vidi da se za sprege YNd1 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje na strani trougla  $i_{as}$  i izračunate struje  $i_{as}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{As} - i_{Cs})$ ;
- 2) struje na strani trougla  $i_{bs}$  i izračunate struje  $i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3}m_s} (i_{Bs} - i_{As})$ ;

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

3) struje na strani trougla  $i_{cs}$  i izračunate struje  $i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s} (i_{Cs} - i_{Bs})$ .

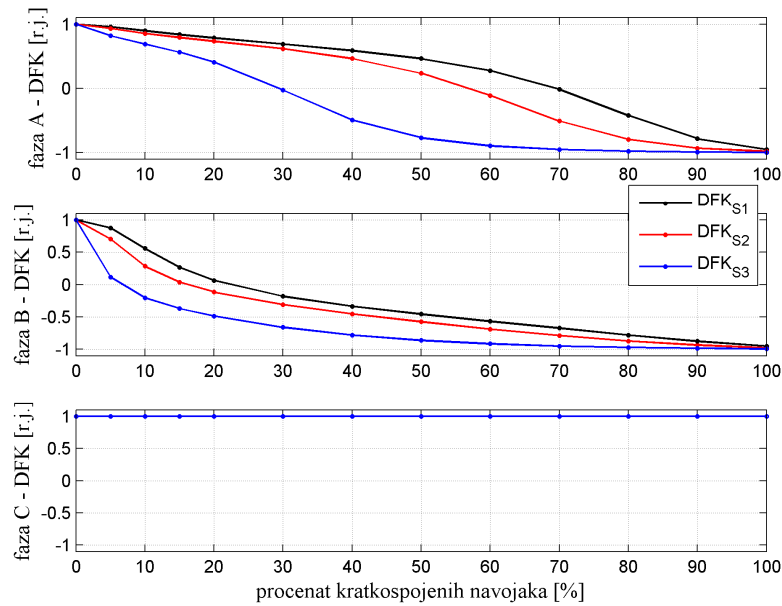


Sl. 3.40 Veza elemenata u modelu za simulaciju – ET sprege YNd1 između dve aktivne mreže

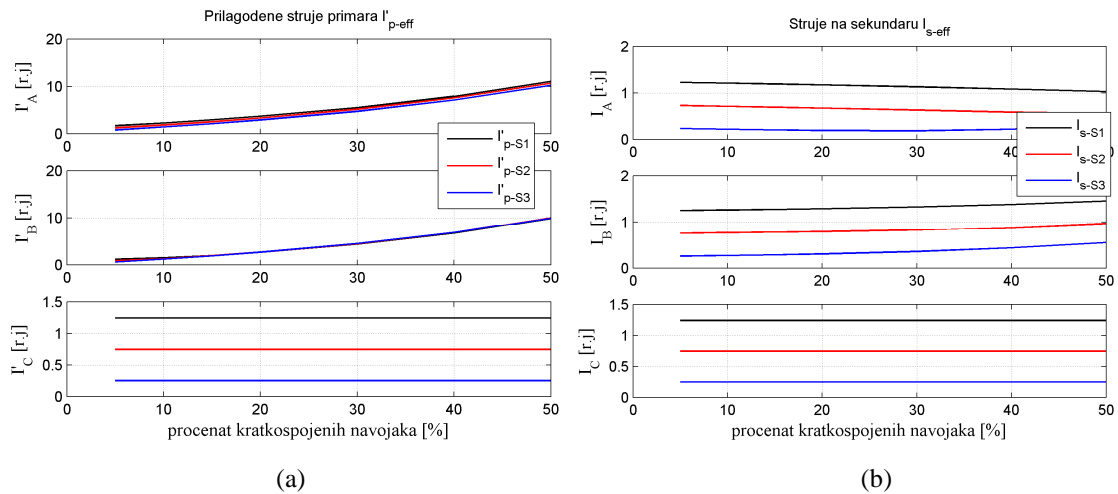
#### 3.4.1.3.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege YNd1

Na Sl. 3.41 i Sl. 3.42 su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti fazno prilagođenih struja primara i struja sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka primarnog namotaja transformatora T1. Očigledno je da je sa aspekta detekcije kvarova pogodnije je posmatrati indeks usmerenosti u fazi B.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.41 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 - ET: YNd1

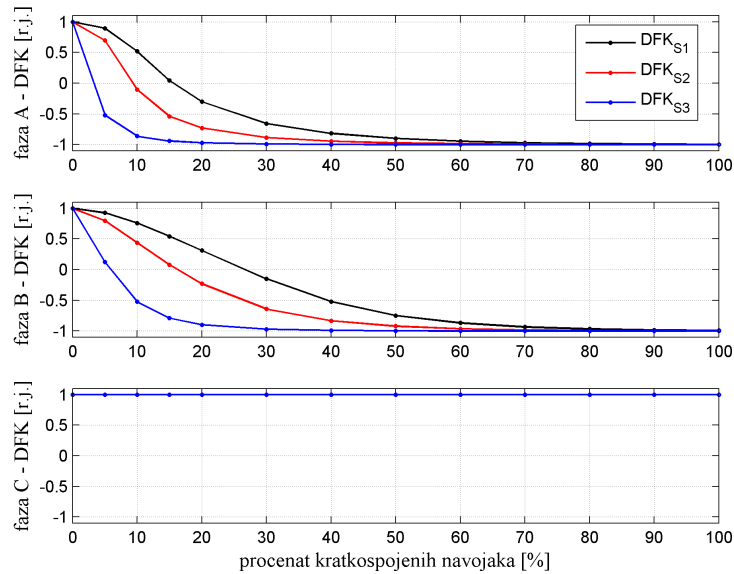


Sl. 3.42 Pokazatelj efektivnih vrednosti (a) prilagođenih struja primara i (b) struja sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET: YNd1

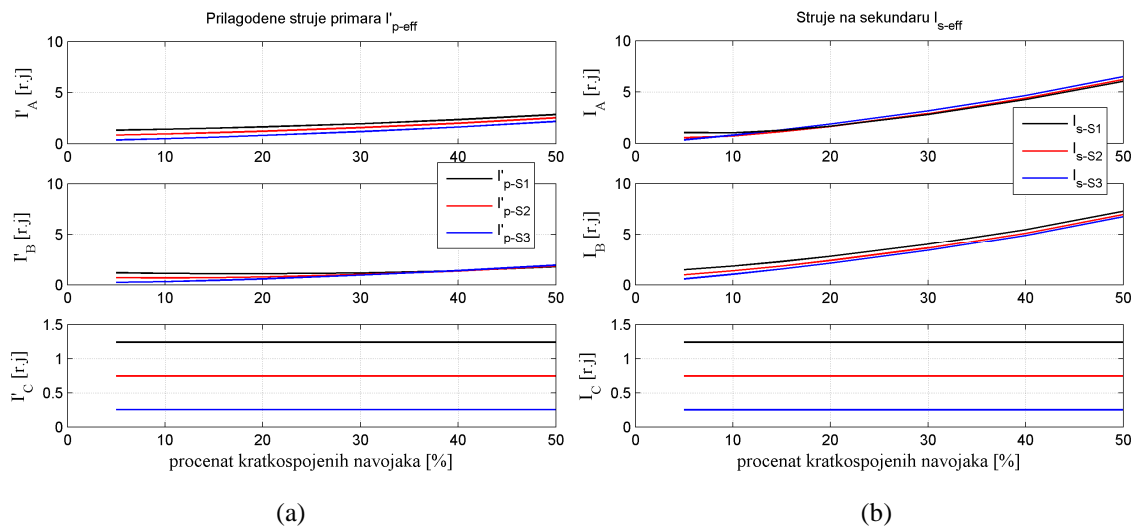
#### 3.4.1.3.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege YNd1

Na Sl. 3.43 i Sl. 3.44 su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti fazno prilagođenih struja primara i struja sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka sekundarnog namotaja transformatora T1. Može se uočiti promena efektivnih vrednosti struja i indeksa usmerenosti u fazama A i B, dok u fazi C vrednosti ostaju nepromenjene. Sa porastom procenta KS-enih navojaka

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora vrednosti indeksa usmerenosti brže opadaju u fazi A, pa bi algoritam baziran na faznoj komparaciji najpre detektovao kvar pomoću indeksa usmerenosti u fazi A.



Sl. 3.43 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1 - ET: YNd1



Sl. 3.44 Pokazatelji efektivnih vrednosti (a) prilagođenih struja primara i (b) struja sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET: YNd1

Sa Sl. 3.41 i Sl. 3.43 se može očitati da pri KS-evima 5% navojaka indeksi usmerenosti u izabranim fazama imaju vrednosti koje su prikazane u Tab. 3.6. Može se zapaziti i da vrednosti pokazatelja efektivnih vrednosti prilagođenih primarnih i sekundarnih struja sa porastom kratkospojenih navojaka u fazama A i B rastu.



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Tab. 3.6 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET spregu YNd1

S		$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
KS na primaru	faza B - DFK [r.j.]	0,87	0,703	0,117
KS na sekundaru	faza A - DFK [r.j.]	0,896	0,698	-0,52

Rezultati ispitivanja rada diferencijalnog releja, čija je karakteristika data u poglavlju 3.4.1.1.2, dati su u Tab. 3.7. Pošto se za spregu YNd1 vrednosti struja menjaju u fazama A i B, prikazano je *reagovanje* releja za obe faze. Diferencijalni relej bi prepoznao sve posmatrane KS-eve 5% navojaka na primaru i u fazi A, i u fazi B. U slučaju KS 5% navojaka na sekundaru za  $S=1,25S_{nT}$  diferencijalni relej je prepoznao kvar u fazi A, a u fazi B nije. U tom slučaju kvar bi bio detektovan na osnovu promene struja u fazi A. U svim posmatranim slučajevima uslov reagovanja je bio zadovoljen u okviru 10 ms.

Posmatran je rad digitalnog faznog komparatora čiji je uslov reagovanja zadovoljen kada je indeks usmerenosti  $DFK(r.j.) \leq 0,954$ . Na osnovu vrednosti indeksa usmerenosti koje su prikazane u Tab. 3.6 vidi se da bi digitalni fazni komparator u svim posmatranim slučajevima prepoznao prisustvo KS-eva.

Tab. 3.7 Testiranje releja koji radi na diferencijalnom principu - ET spregu YNd1

S	5% KS na primaru			5% KS na sekundaru		
	$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$	$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
reagovanje faza A	1	1	1	1	1	1
reagovanje faza B	1	1	1	0	1	1

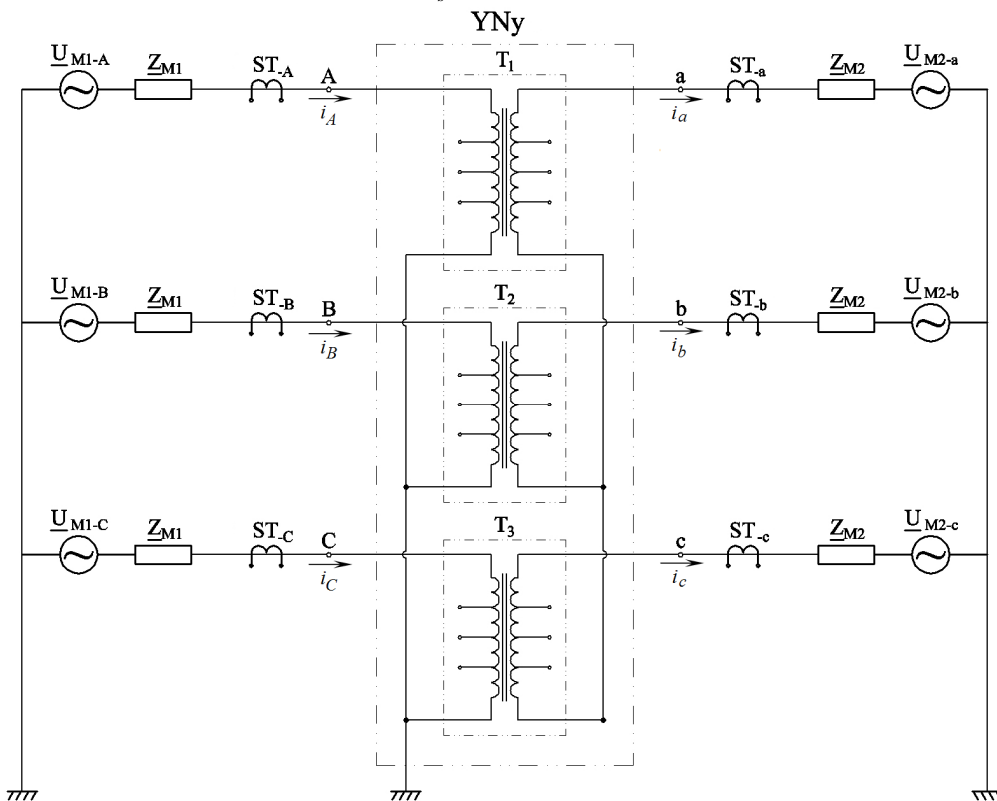
#### 3.4.1.4 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a spregu YNy0

Šema na osnovu koje je formiran Simulink model za simulaciju KS-eva namotaja ET-a spregu YNy0 prikazana je na Sl. 3.45. KS-evi su simulirani na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1 za različita opterećenja ET-a pre nastanka kvara:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99. Tokom simulacija smerovi aktivne snage i reaktivne snage su bili od

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora mreže 1 ka mreži 2. Na narednim slikama su sve vrednosti pokazatelja očitane 10 ms po uspostavljanju kvara.

Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu YNy0 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje  $i_{as}$  i izračunate struje  $i'_{as} = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$ ;
- 2) struje  $i_{bs}$  i izračunate struje  $i'_{bs} = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$  i
- 3) struje  $i_{cs}$  i izračunate struje  $i'_{cs} = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$ .

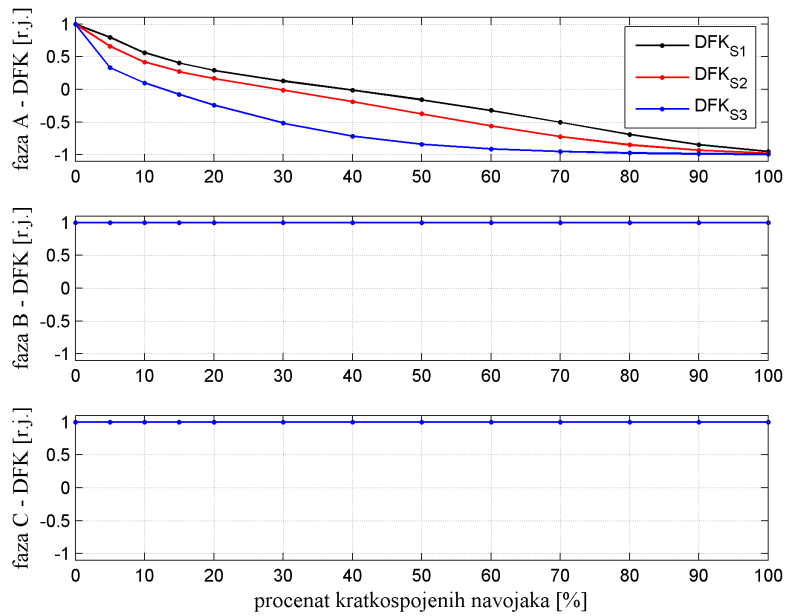


Sl. 3.45 Veza elemenata u modelu za simulaciju – ET sprege YNy0 između dve aktivne mreže

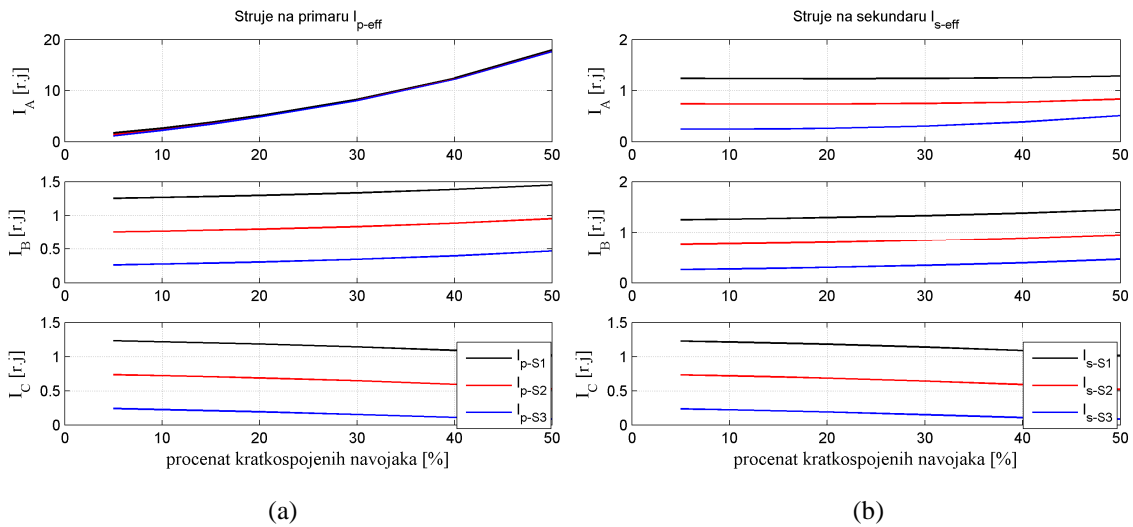
#### 3.4.1.4.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege YNy0

Na Sl. 3.46 i Sl. 3.47 su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja primara i sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka primarnog namotaja transformatora T1.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.46 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 - ET: YNy0

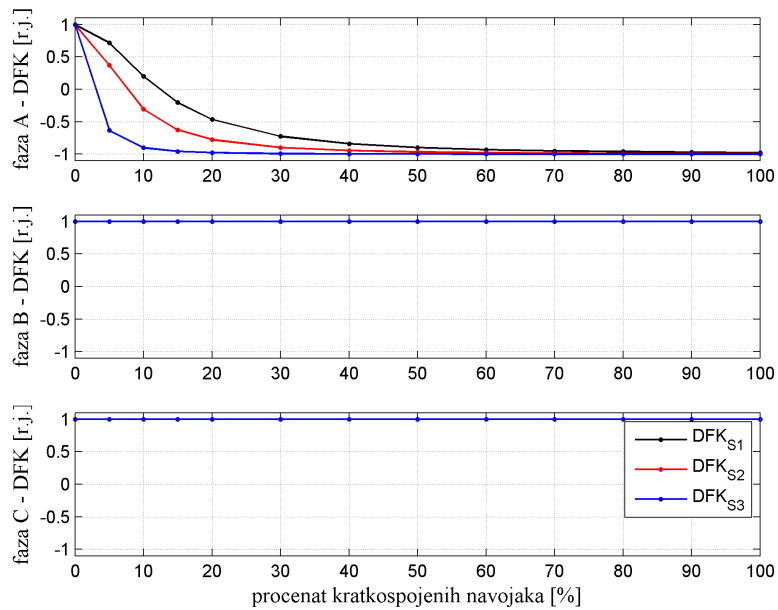


Sl. 3.47 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET: YNy0

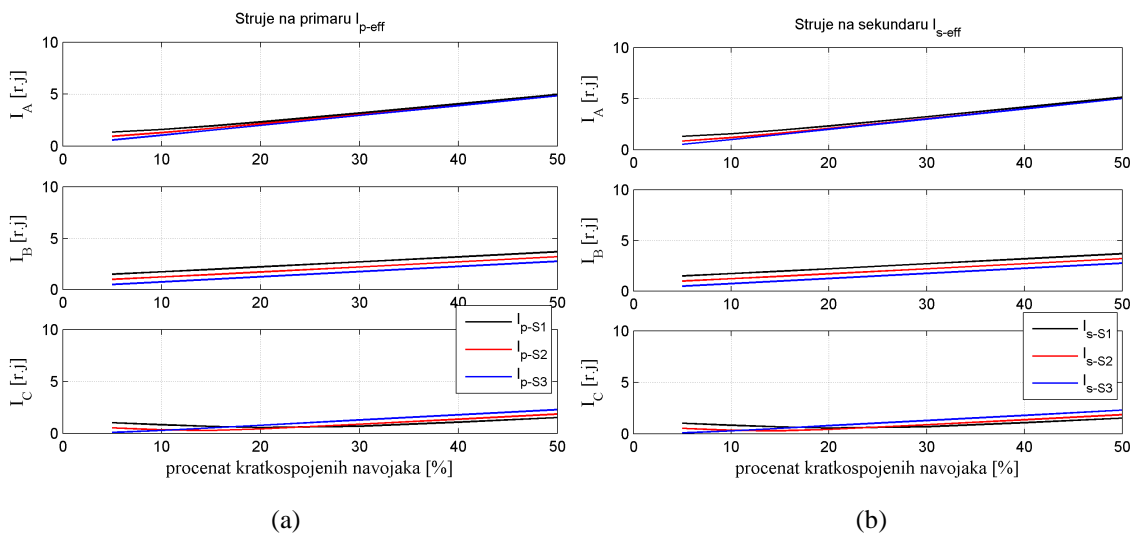
#### 3.4.1.4.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege YNy0

Sl. 3.48 prikazuje promenu pokazatelja usmerenosti u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka sekundarnog namotaja transformatora T1. Sl. 3.49 prikazuje promenu vrednosti pokazatelja efektivnih vrednosti struja izmerenih na primarnim i sekundarnim priključcima trofaznog ET-a sprege YNy0.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.48 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1 - ET: YNy0



Sl. 3.49 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET: YNy0

Kod sprege YNy može se uočiti promena vrednosti indeksa usmerenosti u fazi koja je pogođena kvarom, dok u zdravim fazama indeks ostaje jednak 1 r.j. Ovde se može primetiti da struje u sve tri faze menjaju vrednosti, ali da je fazni pomeraj između struja primara i sekundara prisutan samo u fazi sa kvarom. Sa Sl. 3.46 i Sl. 3.48 se može

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora očitati da pri KS-u 5% navojaka indeks usmerenosti u fazi sa kvarom ima sledeće vrednosti:

Tab. 3.8 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege YNy0

S		$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
KS na primaru	faza A - DFK [r.j.]	0,798	0,659	0,332
KS na sekundaru		0,718	0,372	-0,634

Rezultati ispitivanja rada diferencijalnog releja, čija je karakteristika opisana u poglavlju 3.4.1.1.2, dati su u Tab. 3.9. Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da bi relej baziran na diferencijalnom principu reagovao u svim posmatranim slučajevima. Uslov reagovanja u svim slučajevima je bio zadovoljen u okviru 10 ms.

Na osnovu vrednosti indeksa usmerenosti koje su prikazane u Tab. 3.8 vidi se da je svim analiziranim primerima tokom KS-eva 5% namotaja na primaru i sekundaru bio zadovoljen uslov (3.27), odnosno  $DFK(r.j.) \leq 0,954$ . Digitalni fazni komparator u svim posmatranim slučajevima je detektovao prisustvo KS-eva.

Tab. 3.9 Testiranje releja koji radi na diferencijalnom principu - ET sprege YNy0

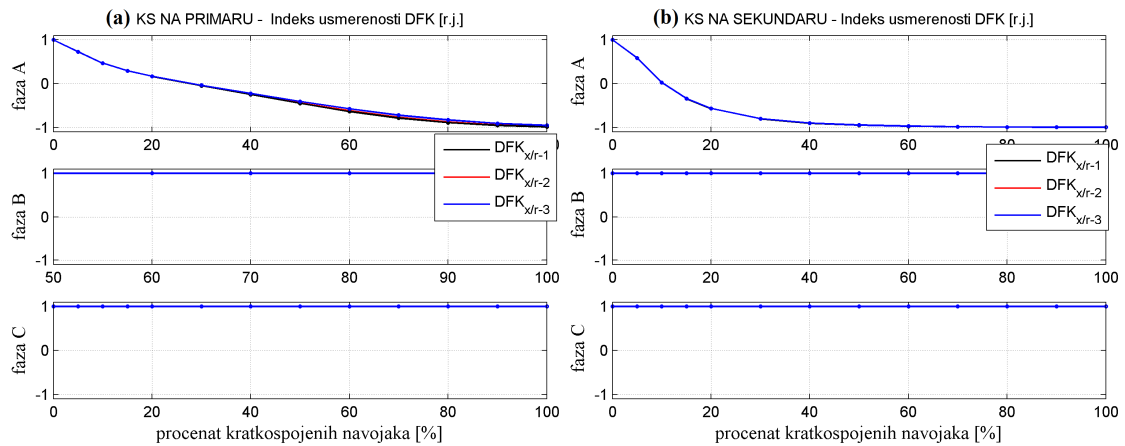
S	5% KS na primaru			5% KS na sekundaru		
	$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$	$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
reagovanje faza A	1	1	1	1	1	1

### 3.4.1.5 Uticaj odnosa X/R unutrašnje impedanse mreže na indeks usmerenosti

Ovde je proveren uticaj različitih odnosa X/R unutrašnje impedanse na indeks usmerenosti. Tokom analize korišćen je ET sprege YNyn0 i šema na Sl. 3.28.

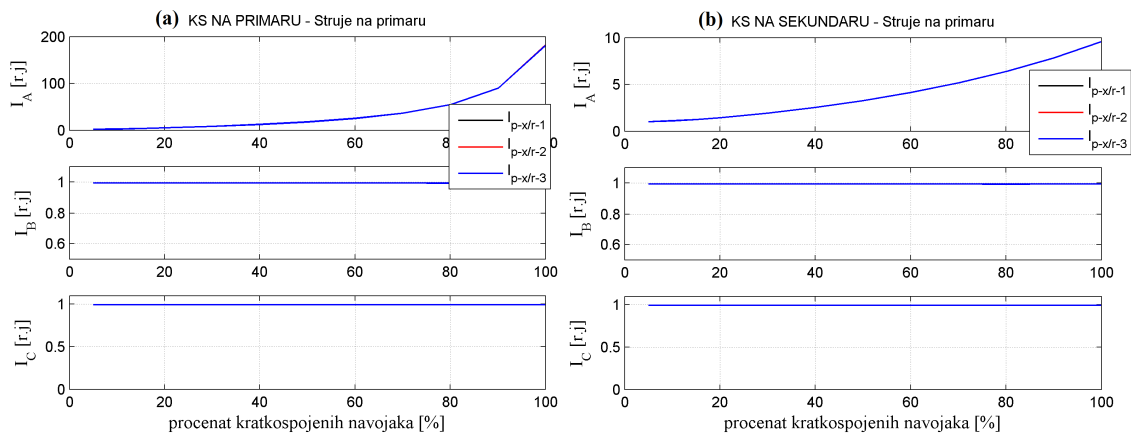
U modelu za simulaciju mreža je predstavljena blokom koji je realizovan kao trofazni naponski izvor sa unutrašnjom (R-L) impedansom. Tri naponska izvora su povezana u zvezdu. Vrednost unutrašnje impedanse se zadaje indirektno pomoću snage kratkog spoja i odnosa X/R. Najpre su za mrežu 1 zadate različite vrednosti odnosa X/R:  $(X/R)_1=10$ ;  $(X/R)_2=7$  i  $(X/R)_3=4$ . U analiziranoj mreži parametri svih ostalih elemenata

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora su ostali nepromenjeni (poglavlje 3.4.1) i opterećenje ET-a pre kvara je tokom svih simulacija bilo približno jednako nominalnom. Na Sl. 3.50 su prikazani indeksi usmerenosti, a na Sl. 3.51 i Sl. 3.52 promena pokazatelja efektivnih vrednosti struja na primarnim i sekundarnim priključcima ET, tokom KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a. Može se uočiti da pri različitim vrednostima X/R indeks usmerenosti i pokazatelji efektivnih vrednosti praktično ostaju nepromenjeni.



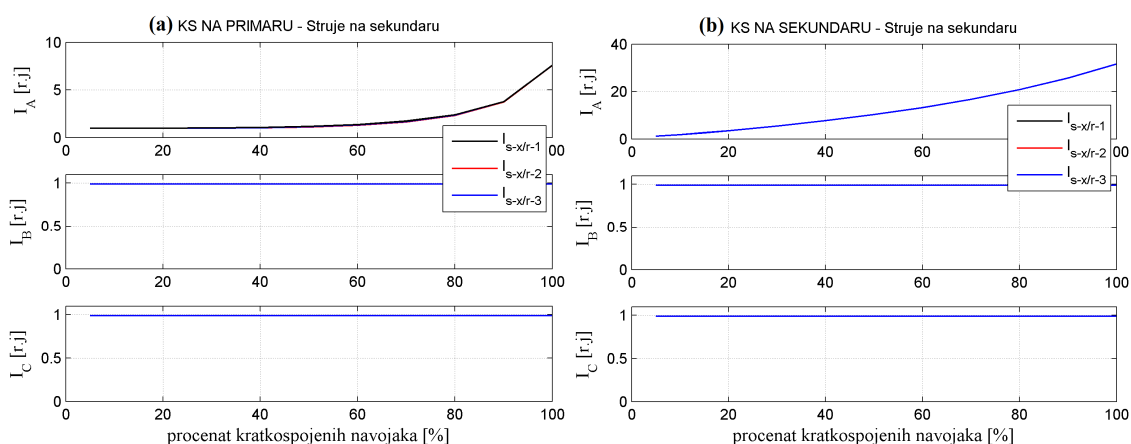
Sl. 3.50 Indeks usmerenosti za različite odnose X/R mreže 1 tokom KS-eva na:

(a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju



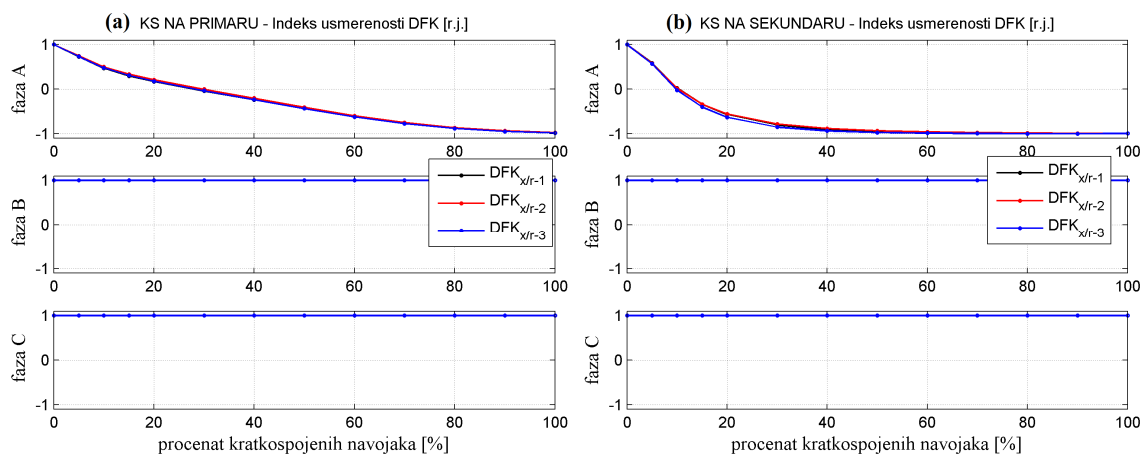
Sl. 3.51 Pokazatelji efektivnih vrednosti primarne struje za različite odnose X/R mreže 1 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



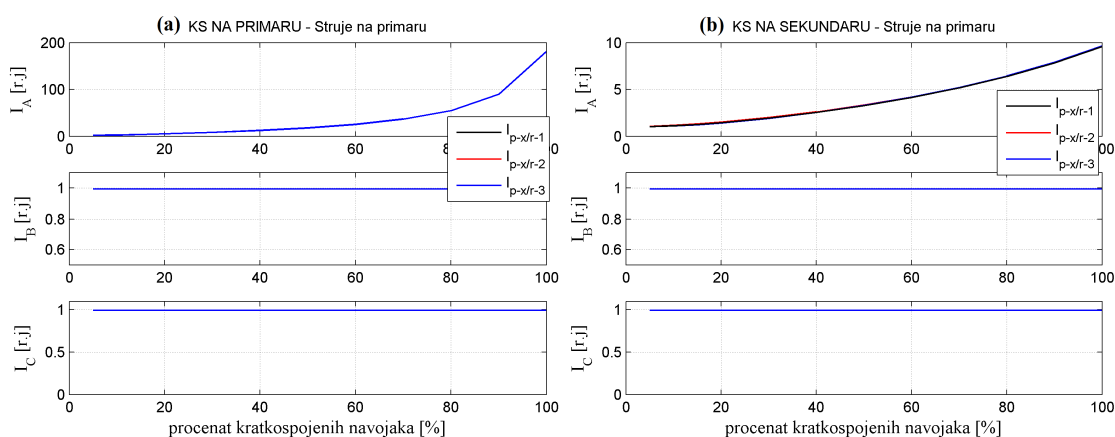
Sl. 3.52 Pokazatelji efektivnih vrednosti sekundarne struje za različite odnose X/R mreže 1 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju

Zatim je proveren uticaj različitog odnosa X/R mreže 2 na indeks usmerenosti menjanjem vrednosti ovog odnosa na sledeći način:  $(X/R)_1=10$ ;  $(X/R)_2=7$  i  $(X/R)_3=4$ . Parametri svih ostalih elemenata u mreži za simulaciju su ostali kao u poglavlju 3.4.1. Na osnovu Sl. 3.53 - Sl. 3.55, i u ovom slučaju se može zaključiti da promena odnosa X/R mreže 2 nema značajnijeg uticaja na promenu vrednosti indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja.

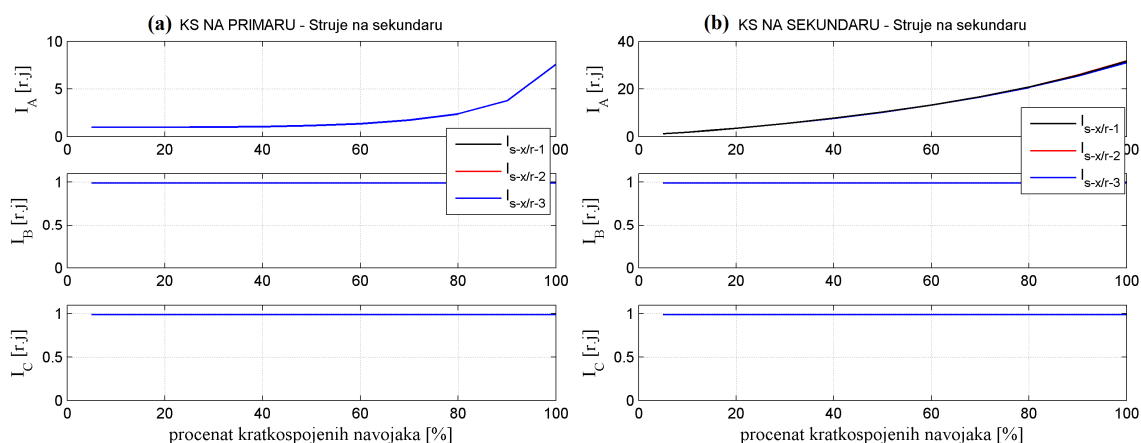


Sl. 3.53 Indeks usmerenosti za različite odnose X/R mreže 2 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.54 Pokazatelji efektivnih vrednosti primarne struje za različite odnose X/R mreže 2 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju



Sl. 3.55 Pokazatelji efektivnih vrednosti sekundarne struje za različite odnose X/R mreže 2 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju

#### 3.4.1.6 Kratki spojevi između faza na priključcima ET-a

Zbog spoljašnjih uticaja međufazni KS-evi ET-a se najčešće dešavaju na izvodima izvan kazana transformatora. Ovde će biti prikazani rezultati dobijeni simulacijama KS-eva na priključcima ET-a sprege YNyn0, koji radi između dve aktivne mreže Sl. 3.28. Trofazni ET je formiran povezivanjem tri monofazne jedinice  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$ . Osim kvarova na priključcima ET-a simulirani su i KS-evi van štićene zone ET-a. Tokom svih simulacija posmatrane su vrednosti indeksa usmerenosti, a pokazatelji efektivnih vrednosti struja na priključcima ET-a su upoređeni sa graničnom vrednošću koja je bila podešena na  $I_{gr}=1,2I_{nT}$ . Tab. 3.10 i Tab. 3.11 prikazuju rezultate dobijene 10 ms nakon nastanka kvara unutar i van štićene zone energetskog transformatora.



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Tab. 3.10 Pokazatelji usmerenosti za kvarove unutar štice zone

			3fks	2fks (faze A i B)	2fks+z (faze A i B)	1fks (faza A)
indeks	faza A	DFK [r.j.]	-1	-1	-1	-1
	faza B	DFK [r.j.]	-1	-1	-1	1
	faza C	DFK [r.j.]	-1	1	1	1
rms pokazatelji	faza A	$I_A$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
		$I_a$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
	faza B	$I_B$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
		$I_b$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
	faza C	$I_C$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.
		$I_c$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.

\*Oznake u Tab: "neprom." – indeks nije promenio vrednost nakon pojave kvara;  
 $>I_{gr}$  – rms pokazatelj je veći od definisane granične vrednosti.

Tab. 3.11 Pokazatelji usmerenosti za kvarove van štice zone

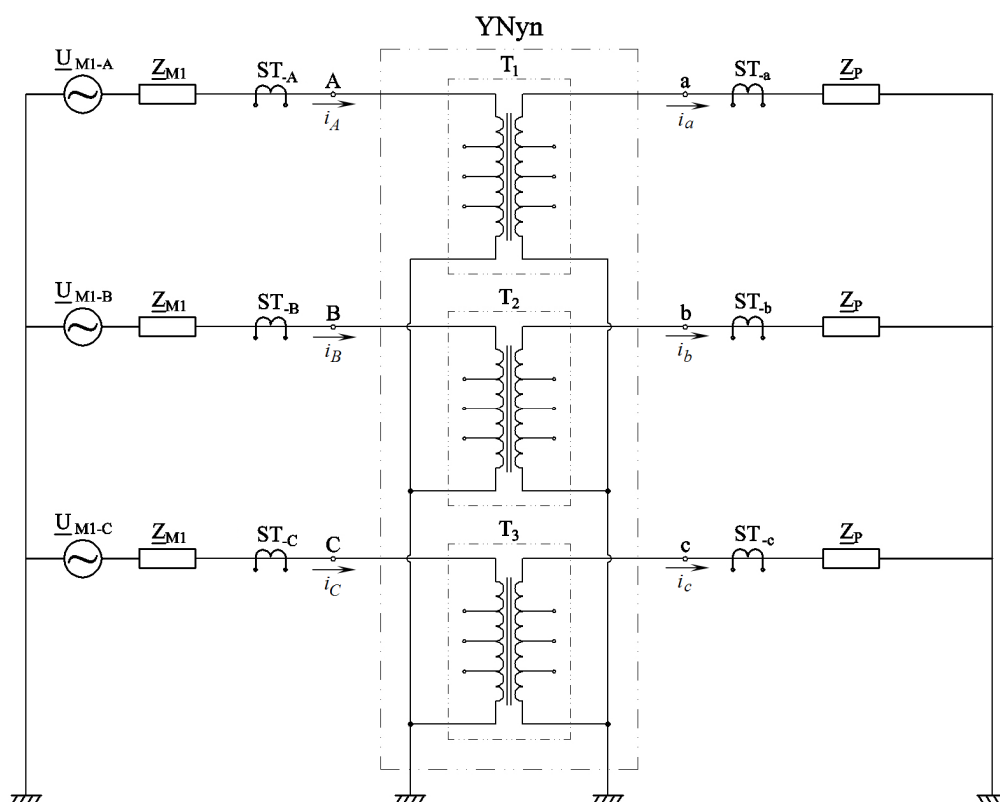
			3fks	2fks (faze A i B)	2fks+z (faze A i B)	1fks (faza A)
indeks	faza A	DFK [r.j.]	1	1	1	1
	faza B	DFK [r.j.]	1	1	1	1
	faza C	DFK [r.j.]	1	1	1	1
rms pokazatelji	faza A	$I_A$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
		$I_a$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
	faza B	$I_B$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
		$I_b$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
	faza C	$I_C$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.
		$I_c$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da bi upotrebom digitalnog faznog komparatora (DFK) jasno mogli da se prepoznaju svi kvarovi na priključcima ET-a. Takođe, tokom spoljašnjih kvarova upotreba DFK-a kombinovanog sa prekostrujnim elementom jasno ukazuje na prisustvo KS-eva van štice zone ET-a. Tokom spoljašnjih KS u fazi sa kvarom indeks usmerenosti ima vrednost jednaku 1 r.j., a pokazatelji efektivnih vrednosti su veći od podešene granične vrednosti.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2 Promena indeksa usmerenosti tokom KS-eva namotaja ET-a koji radi između aktivne i pasivne mreže

Kompjuterske simulacije KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a koji radi između aktivne i pasivne mreže izvršene su pomoću programskog paketa MATLAB – Simulink. U simulacijama trofazni transformator je formiran povezivanjem tri monofazna transformatora T1, T2 i T3. U nastavku oznaka (ET) će se odnositi na trofazni energetski transformator. Posmatrane su sledeće sprege ET-a: YNyn, Dyn, YNd i YNy. Šema na osnovu koje je formiran Simulink model za simulaciju KS-eva namotaja ET-a sprege YNyn0 prikazana je na Sl. 3.56. Parametri elemenata koji figurišu u modelu za simulaciju su: mreža 1:  $U_{nM1}=110$  kV,  $S_{ksM1}=4500$  MVA,  $X/R=7$ ; trofazni potrošač: spregnut u uzemljenu zvezdu,  $U_n=110$  kV, zadaje se preko snaga ( $P_p$  i  $Q_p$ ); energetski transformator:  $m_T=110$  kV/110 kV,  $S_{nt}=25$  MVA,  $r_t=0.006$  r.j.,  $x_t=0.11$  r.j. i  $i_0=0,5\%$ .



Sl. 3.56 Veza elemenata u modelu za simulaciju — ET sprege YNyn0 između aktivne mreže i potrošača

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

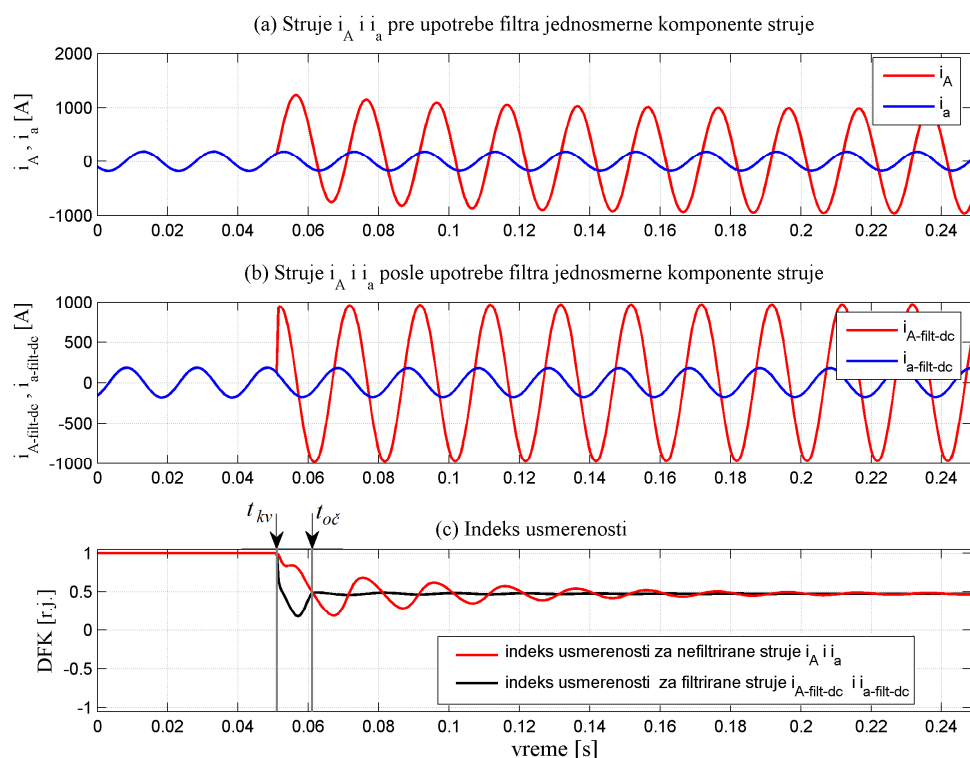
U nastavku su prikazani rezultati izvršenih simulacija kratkih spojeva koji su zahvatili 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% i 100% namotaja ET-a. Pošto je  $m_T=1$  za primar je usvojena strana ET-a do mreže 1, a za sekundar strana do potrošača. Na grafikonima vrednost koja odgovara 0% kratkospojenih navojaka dobijena je simulacijom rada ET -a bez kvara. Da bi se bolje uočila promena pokazatelja efektivnih vrednosti struja pri KS-evima manjeg procenta navojaka, na grafikonima su prikazane vrednosti struja od 5% do 50% KS-enih navojaka. Tokom svih simulacija koje su prikazane u okviru ovog poglavlja strujni transformatori su verno preslikavali primarne struje na sekundar. Broj odbiraka u periodi signala je jednak  $m=40$ .

#### **3.4.2.1 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNyn0**

Kratki spojevi su generisani na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1. Na Sl. 3.57.a prikazani su talasni oblici struja  $i_A$  i  $i_a$  pre i nakon KS-a 20% namotaja na primaru transformatora T1. Pre nastanka KS-a opterećenje transformatora je bilo nominalno, a faktor snage opterećenja približno jednak 0,99. Nakon nastanka kvara u struji  $i_A$  uočava se prisustvo opadajuće jednosmerne komponente. Nakon filtriranja opadajuće jednosmerne komponente talasni oblici filtriranih struja  $i_{A-filt-dc}$  i  $i_{a-filt-dc}$  su prikazani na Sl. 3.57.b. Indeksi usmerenosti izračunati pomoću nefiltriranih i filtriranih struja prikazani su na Sl. 3.57.c.

Kao što je rečeno u poglavlju 3.4.1.1.1, u svim primerima koji će biti prikazani pre proračuna indeksa i pokazatelja izvršeno je filtriranje opadajuće jednosmerne komponente. Takođe, u svim primerima koji slede vrednosti indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti su očitane 10 ms po uspostavljanju kvara. Na Sl. 3.57.c. trenutak kvara je označen sa  $t_{kv}$ , a trenutak 10 ms nakon kvara sa  $t_{o\check{c}}$ . I ovde posle upotrebe filtra jednosmerne komponente uočljive su blage oscilacije vrednosti indeksa usmerenosti koje vremenom iščezavaju. Pokazalo se da u svim primerima koji slede očitane vrednosti nisu odstupile više od  $\pm 8\%$  u odnosu na vrednost nakon iščezavanja oscilacija.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.57 Talasni oblici struja  $i_A$  i  $i_a$ : (a) pre i (b) posle filtriranja jednosmerne komponente i (c) indeks usmerenosti

U nastavku su prikazani rezultati simulacija KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1 za različita opterećenja ET-a pre nastanka kvara. Snaga potrošača ( $P_p$ ,  $Q_p$ ) je zadata tako da transformator bude opterećen sa:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99.

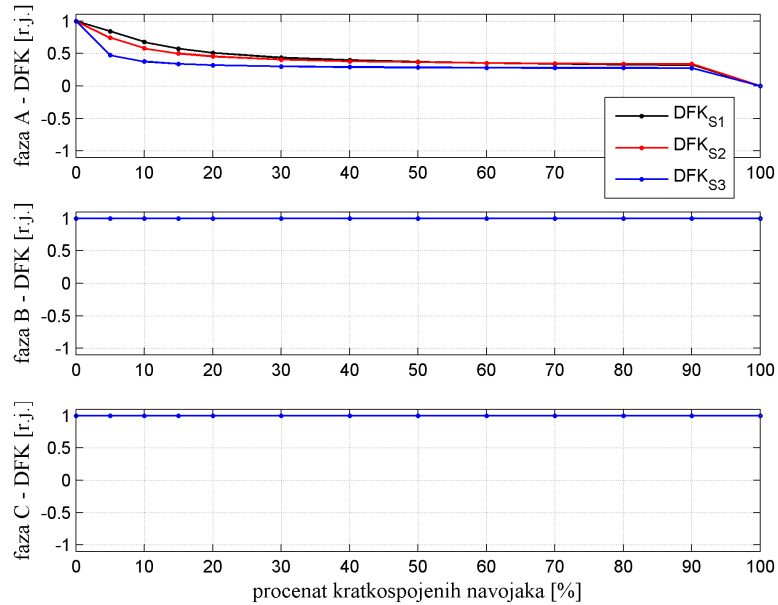
Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu YNyn0 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje  $i_{as}$  i izračunate struje  $i_{as}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$ ;
- 2) struje  $i_{bs}$  i izračunate struje  $i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}$ ;
- 3) struje  $i_{cs}$  i izračunate struje  $i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}$ .

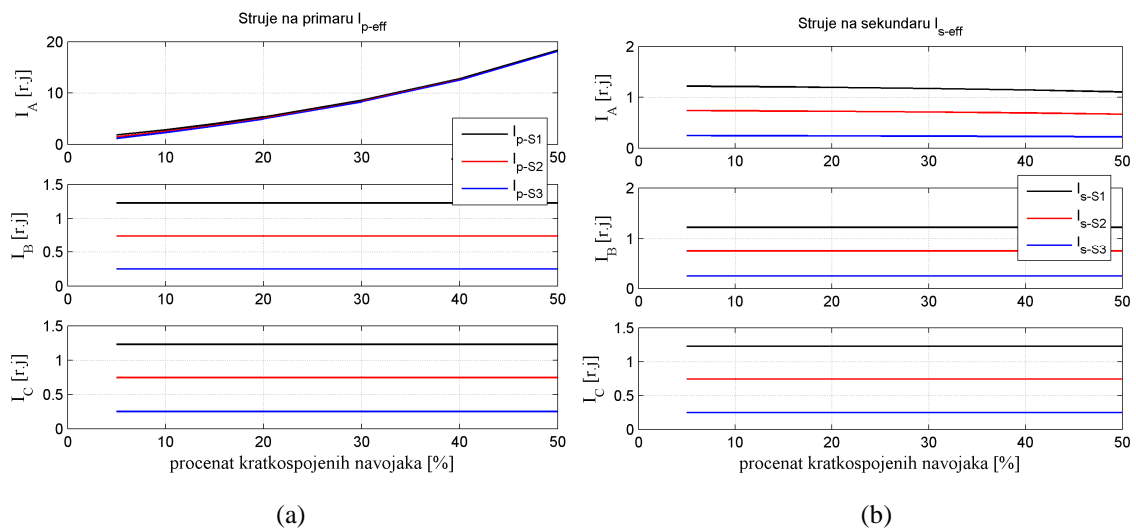
#### 3.4.2.1.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege YNyn0

Na Sl. 3.58 i Sl. 3.59 su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja primara i sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora navojaka primarnog namotaja transformatora T1. U Tab. 3.12 su date vrednosti indeksa usmerenosti u fazi sa kvarom za KS 5% navojaka.



Sl. 3.58 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 – ET sprege YNyn0 radi između aktivne i pasivne mreže

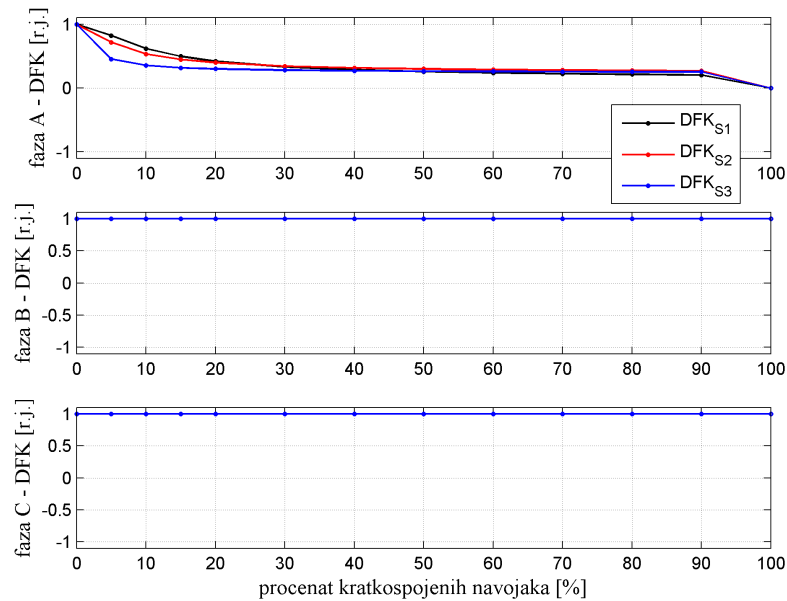


Sl. 3.59 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET sprege YNyn0 radi između aktivne i pasivne mreže

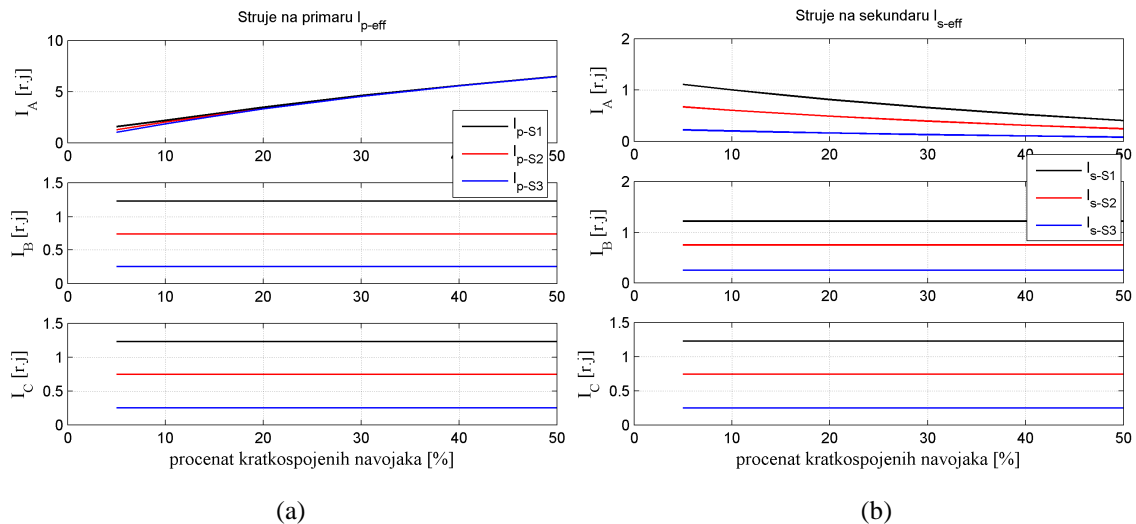
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.1.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege YNyn0

Sl. 3.60 prikazuje promenu indeksa usmerenosti, a Sl. 3.61 prikazuje promene pokazatelja efektivnih vrednosti struja izmerenih na primarnim i sekundarnim priključcima trofaznog ET-a u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka transformatora T1.



Sl. 3.60 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1– ET sprege YNyn0 radi između aktivne i pasivne mreže



Sl. 3.61 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET sprege YNyn0 radi između aktivne i pasivne mreže

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Može se uočiti da sa porastom kratkospojenih navojaka vrednost indeksa usmerenosti opada. Takođe, može se uočiti indeks usmerenosti ima vrednosti između 0 r.j. i 1 r.j., gde vrednost 0 r.j. odgovara KS-u 100% navojaka, a vrednost 1 r.j. normalnom režimu rada kada je 0% navojaka kratko spojeno. Kada posmatramo promenu pokazatelja efektivnih vrednosti struja, jasno se uočava da struja u fazi sa kvarom na primarnoj strani ET-a raste sa porastom broja kratkospojenih navojaka, dok struja na sekundarnoj strani transformatora opada. Isto tako, vidi se da kada je opterećenje ET-a pre kvara veće, indeks usmerenosti pri istom procentu KS-enih namotaja je veći. Sve prethodno navedeno je u skladu sa zaključcima datim u poglavlju 3.3.1. Sa Sl. 3.58 i Sl. 3.60 se može očitati da pri KS-evima 5% navojaka indeksi usmerenosti u fazi sa kvarom imaju sledeće vrednosti:

Tab. 3.12 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege YNyn0

S		1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>
KS na primaru	faza A - DFK [r.j.]	0,8436	0,7426	0,4737
KS na sekundaru		0,8211	0,7174	0,4558

Posmatran je rad digitalnog faznog komparatora čiji je uslov reagovanja zadovoljen kada je  $DFK(r.j.) \leq 0,954$ , uslov (3.27). Na osnovu vrednosti koje su prikazane u Tab. 3.12 vidi se da bi digitalni fazni komparator u svim posmatranim slučajevima detektovao KS.

Provereno je kako bi se relej koji radi na diferencijalnom principu ponašao tokom KS-a 5% navojaka. Korišćena je karakteristika reagovanja sa jednim nagibom (Sl. 2.2), gde su:  $I_{dif}$  – komponenta osnovne frekvencije diferencijalne struje,  $I_s$  – komponenta osnovne frekvencije stabilizacione struje,  $I_{d,min}=0,3$  r.j. ,  $I_{s,I}=1$  r.j., nagib  $m=0,2$  i vrednost  $k=0,5$  u relaciji (2.2). Smatrano je da bi relej detektovao KS ako izračunate vrednosti  $(I_s, I_{dif})$  zadovoljavaju uslov reagovanja diferencijalnog releja (2.3).

Opisani diferencijalni relej bi prepoznao prisustvo KS-a 5% navojaka na primaru i sekundaru u svim posmatranim slučajevima.

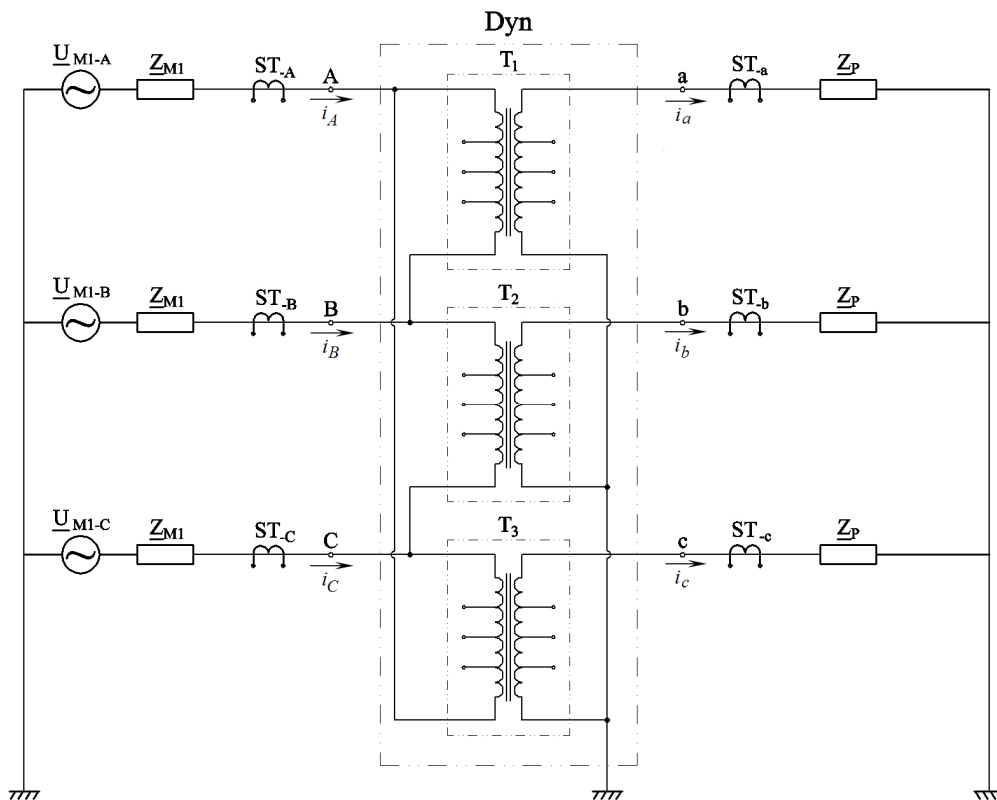
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.2 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege Dyn11

Na Sl. 3.62 je prikazana veza elemenata u modelu za simulaciju KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a sprege Dyn11. Posmatrani su pokazatelji usmerenosti za tri različita opterećenja transformatora pre nastanka kvara. Snaga potrošača ( $P_p$ ,  $Q_p$ ) je zadata tako da transformator bude opterećen sa:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET se kretao od 0,95 do 0,99.

Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu Dyn11 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje na strani trougla  $i_{As}$  i izračunate struje  $i_{As}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{as} - i_{cs})$ ;
- 2) struje na strani trougla  $i_{Bs}$  i izračunate struje  $i_{Bs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{bs} - i_{as})$ ;
- 3) struje na strani trougla  $i_{Cs}$  i izračunate struje  $i_{Cs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_T m_p} (i_{cs} - i_{bs})$ .



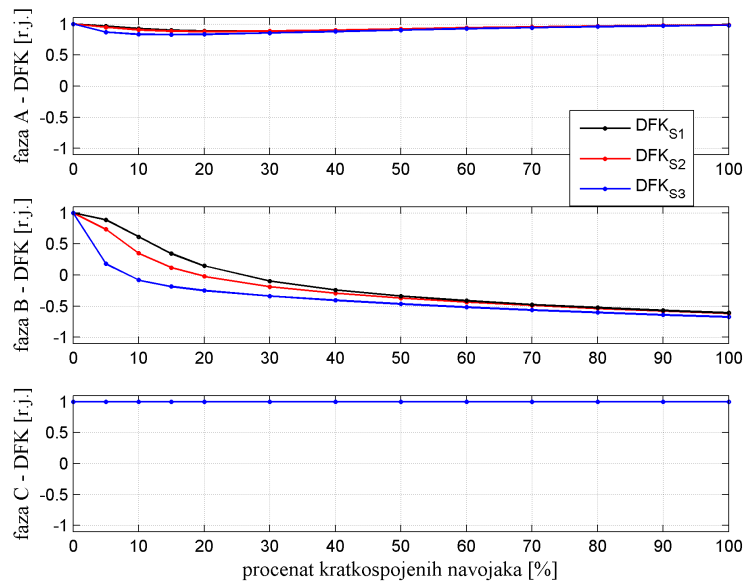
Sl. 3.62 Veza elemenata u modelu za simulaciju — ET sprege Dyn11 između aktivne mreže i potrošača



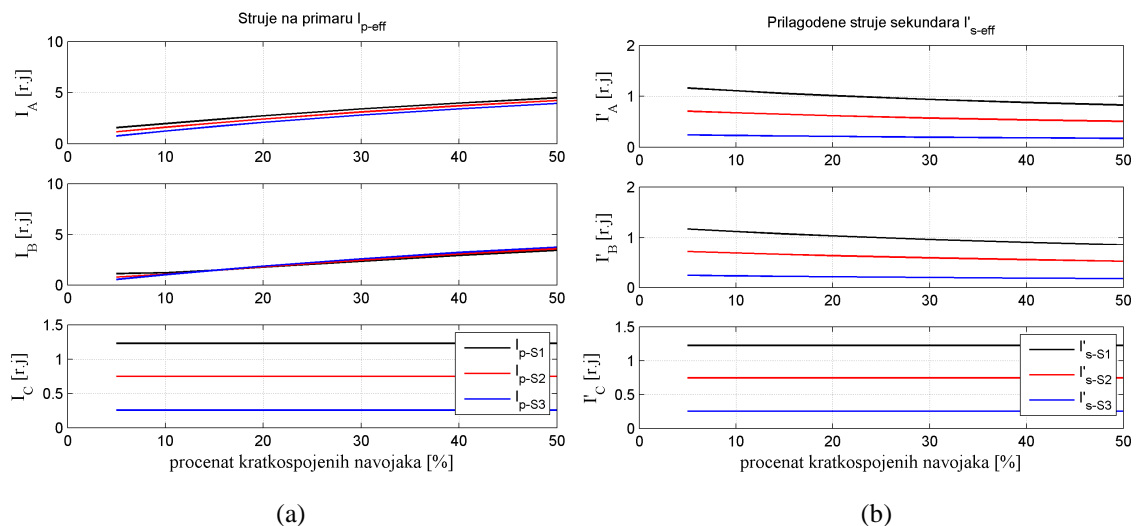
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.2.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege Dyn11

Simulirani su kratki spojevi na primarnom namotaju transformatora T1. Primarni namotaj ET-a je spregnut u trougao, pa se na Sl. 3.63 i Sl. 3.64 može uočiti promena indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja primara i prilagođenih struja sekundara u fazama A i B, dok u fazi C indeks i pokazatelji ne menjaju vrednosti. Iz ugla detekcije kvara, jasno se vidi da je najpogodnije posmatrati indeks usmerenosti u fazi B.



Sl. 3.63 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 – ET sprege Dyn radi između aktivne i pasivne mreže

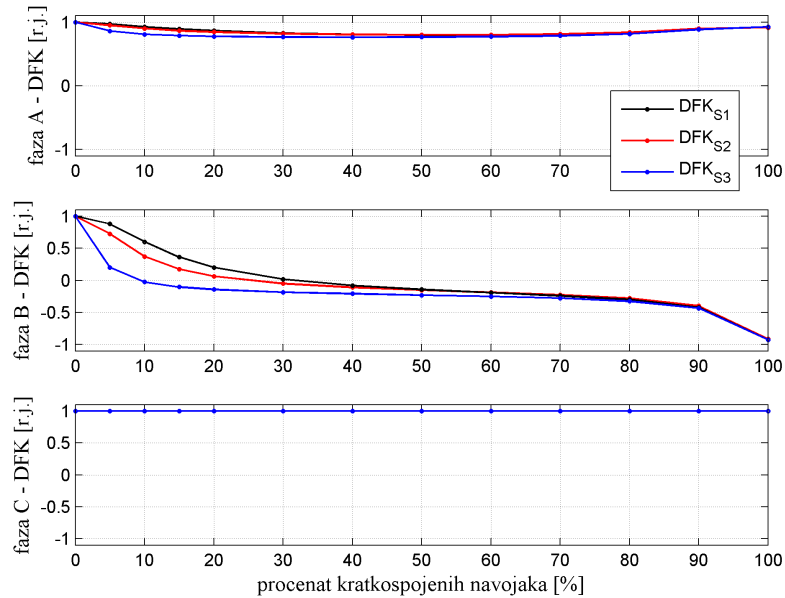


Sl. 3.64 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET sprege Dyn11 radi između aktivne i pasivne mreže

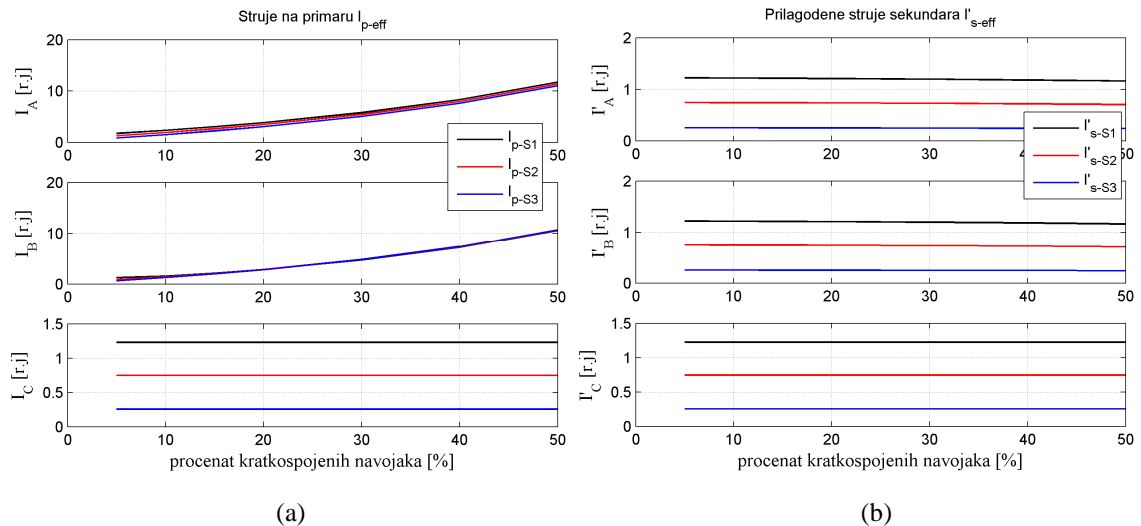
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege Dyn11

Na Sl. 3.65 i Sl. 3.66 je prikazana promena indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti fazno prilagođenih struja primara i sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih sekundarnih namotaja transformatora T1.



Sl. 3.65 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1– ET sprege Dyn radi između aktivne i pasivne mreže



Sl. 3.66 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET sprege Dyn11 radi između aktivne i pasivne mreže

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Kada ET sprege Dyn11 radi između aktivne i pasivne mreže indeks usmerenosti u jednoj od faza može imati vrednosti koje su negativne. Pokazatelji efektivnih vrednosti struja na strani ET-a koja je bliža mreži će rasti, dok će prilagođeni pokazatelji struja na strani potrošača opadati sa porastom broja KS-enih navojaka. Sa Sl. 3.63 i Sl. 3.65 se može očitati da pri KS-evima 5% navojaka indeksi usmerenosti u izabranim fazama imaju vrednosti date u Tab. 3.13. Posmatrane su faze u kojima je fazni pomeraj između primarne i prilagođene sekundarne struje bio najveći.

Tab. 3.13 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege Dyn11

S		1,25S <sub>nT</sub>	0,75S <sub>nT</sub>	0,25S <sub>nT</sub>
KS na primaru	faza B - DFK [r.j.]	0,8782	0,7261	0,2
KS na sekundaru	faza A - DFK [r.j.]	0,8903	0,7345	0,18

Relej baziran na digitalnom faznom komparatoru, čiji je uslov reagovanja zadovoljen ako je indeks usmerenosti:  $DFK(r.j.) \leq 0,954$ , uslov (3.27), reagovao bi u svim posmatranim slučajevima KS-eva 5% navojaka ET-a sprege Dyn11.

Za KS-eve 5% navojaka ET-a sprege Dyn11 je ispitan rad diferencijalnog releja, čija je karakteristika data u poglavlju 3.4.2.2.2. Opisani diferencijalni relej bi prepoznao prisustvo KS-a 5% navojaka na primaru i sekundaru u svim posmatranim slučajevima.

#### 3.4.2.3 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege YNd1

Veza elemenata u modelu za simulaciju KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a sprege YNd1 prikazana je na Sl. 3.67. KS-evi su simulirani na transformatoru T1. Snaga potrošača ( $P_p$ ,  $Q_p$ ) je zadata tako da transformator bude opterećen sa:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99.

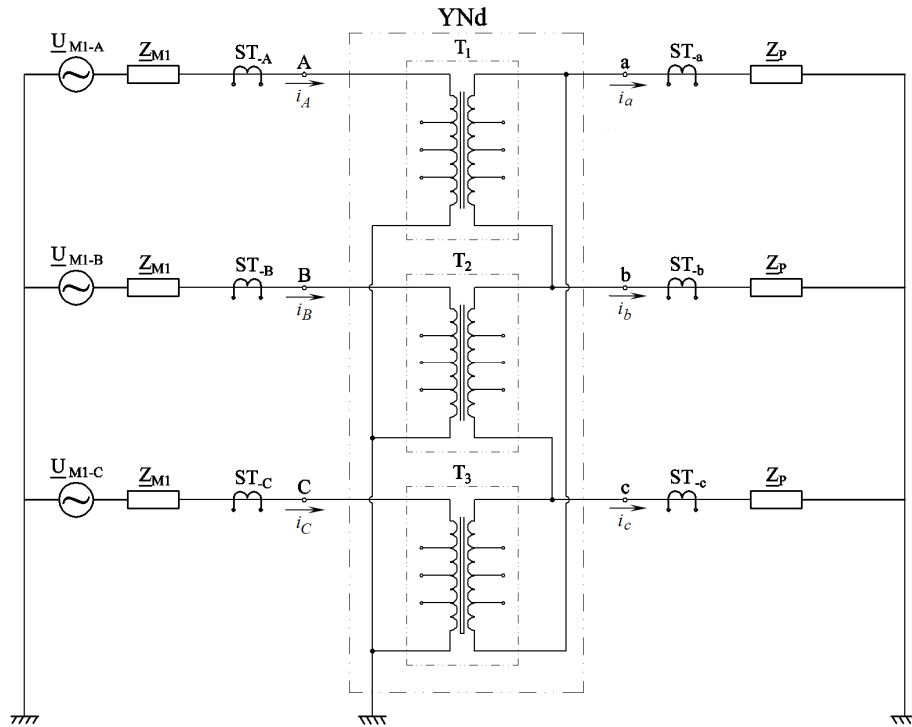
Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu YNd1 vrši digitalna fazna komparacija:

- 1) struje na strani trougla  $i_{as}$  i izračunate struje  $i_{as}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s} (i_{As} - i_{Cs})$ ;
- 2) struje na strani trougla  $i_{bs}$  i izračunate struje  $i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s} (i_{Bs} - i_{As})$ ;
- 3) struje na strani trougla  $i_{cs}$  i izračunate struje  $i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s} (i_{Cs} - i_{Bs})$ .

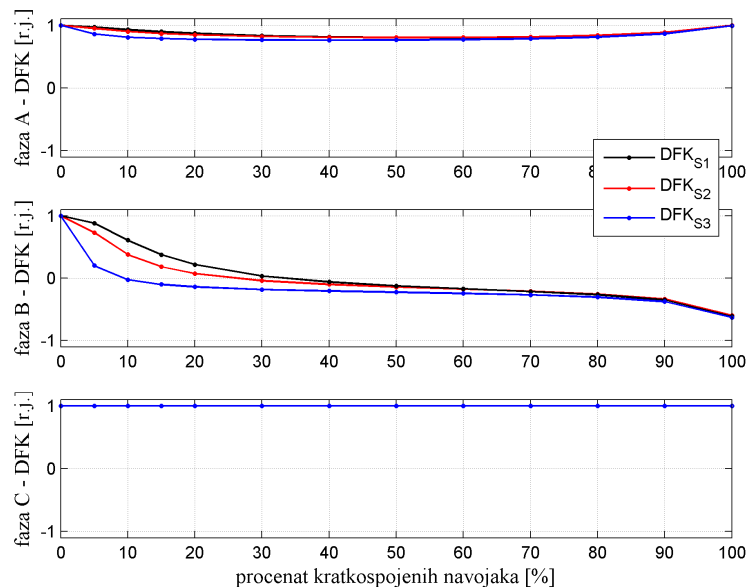
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.3.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege YNd1

Na Sl. 3.68 i Sl. 3.69 su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti fazno prilagođenih struja primara i sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka primarnog namotaja transformatora T1.

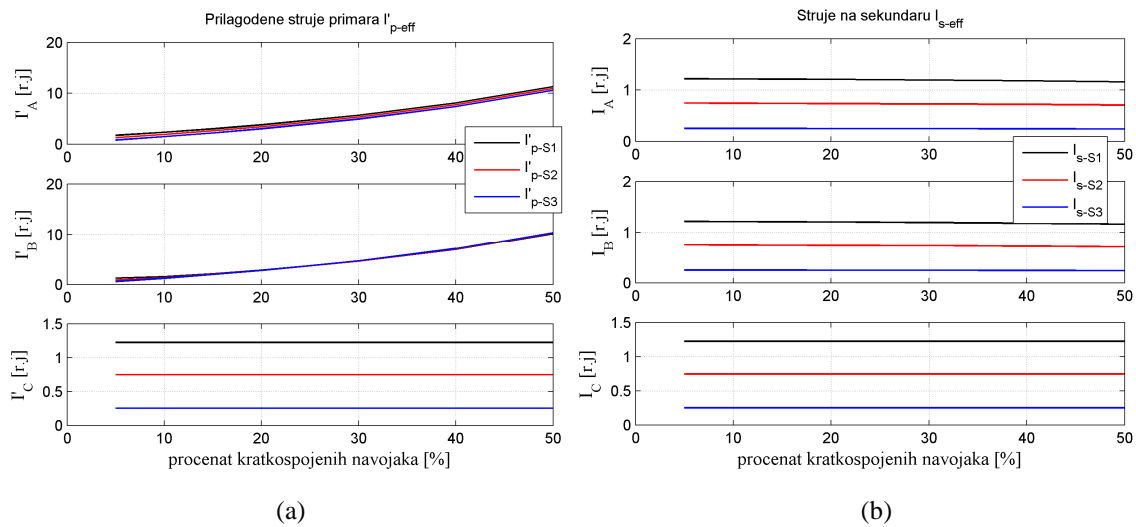


Sl. 3.67 Veza elemenata u modelu za simulaciju – ET sprege YNd1 između aktivne mreže i potrošača



Sl. 3.68 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1 – ET sprege YNd1 radi između aktivne i pasivne mreže

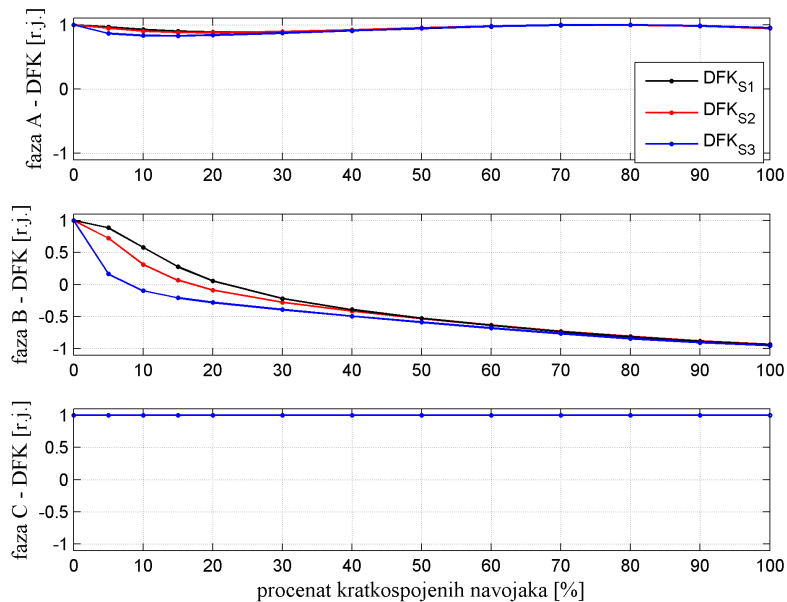
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.69 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET sprege YNd1 radi između aktivne i pasivne mreže

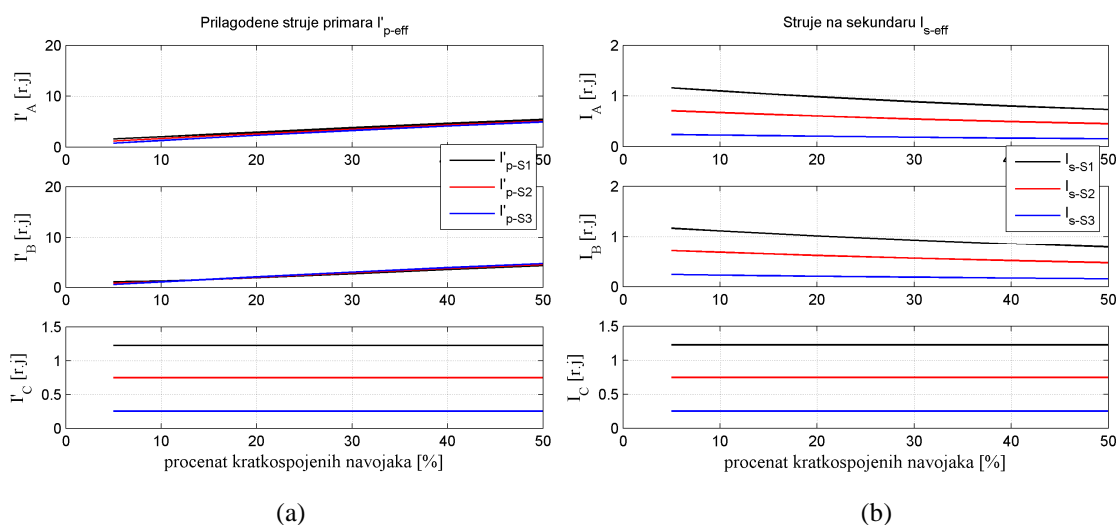
#### 3.4.2.3.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege YNd1

Sl. 3.70 prikazuje promene pokazatelja usmerenosti, a Sl. 3.71 prikazuje promene pokazatelja efektivnih vrednosti prilagođenih struja primara i struja sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka sekundarnog namotaja transformatora T1.



Sl. 3.70 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1– ET sprege YNd1 radi između aktivne i pasivne mreže

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.71 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET sprege YNd1 radi između aktivne i pasivne mreže

Tab. 3.14 prikazuje vrednosti indeksa usmerenosti za fazu B kod KS-eva na primarnom namotaju i za fazu A kod KS-eva na sekundarnom namotaju. U svim posmatranim slučajevima je zadovoljen uslov reagovanja releja koji koristi digitalni fazni komparator:  $DFK(r.j.) \leq 0,954$ , uslov (3.27).

Za KS-eve 5% navojaka ET-a sprege YNd1 je ispitan rad diferencijalnog releja, čija je karakteristika data u poglavlju 3.4.2.2.2. Opisani diferencijalni relej bi prepoznao prisustvo KS-a 5% navojaka na primaru i sekundaru u svim posmatranim slučajevima.

Tab. 3.14 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege YNd1

S		$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
KS na primaru	faza B - DFK [r.j.]	0,88	0,73	0,2
KS na sekundaru	faza A - DFK [r.j.]	0,885	0,723	0,165

#### 3.4.2.4 Rezultati simulacija kratkih spojeva na namotaju ET-a sprege Yny0

Veza elemenata u modelu za simulaciju KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju ET-a sprege YNy0 odgovara šemi koja je prikazana na Sl. 3.56. Jedina razlika u odnosu na ovu šemu je u tome što je zvezdište ET-a na sekundaru izolovano. Snaga potrošača ( $P_p$ ,  $Q_p$ ) je zadata tako da transformator bude opterećen sa:  $S_1=1,25S_{nT}$ ,  $S_2=0,75S_{nT}$  i  $S_3=0,25S_{nT}$ . Faktor snage opterećenja ET-a se kretao od 0,96 do 0,99.

Iz Tab. 3.1 se vidi da se za spregu YNyn0 vrši digitalna fazna komparacija:

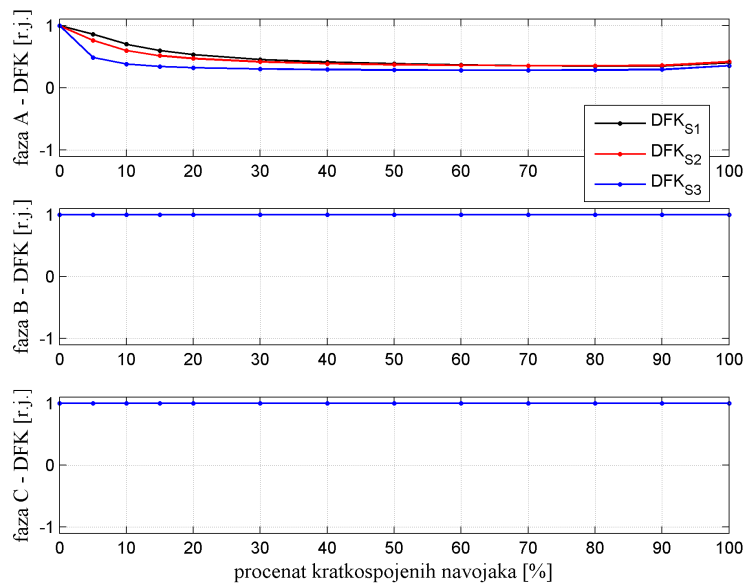
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

1) struje  $i_{as}$  i izračunate struje  $i_{as}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{As}$ ; 2) struje  $i_{bs}$  i izračunate struje

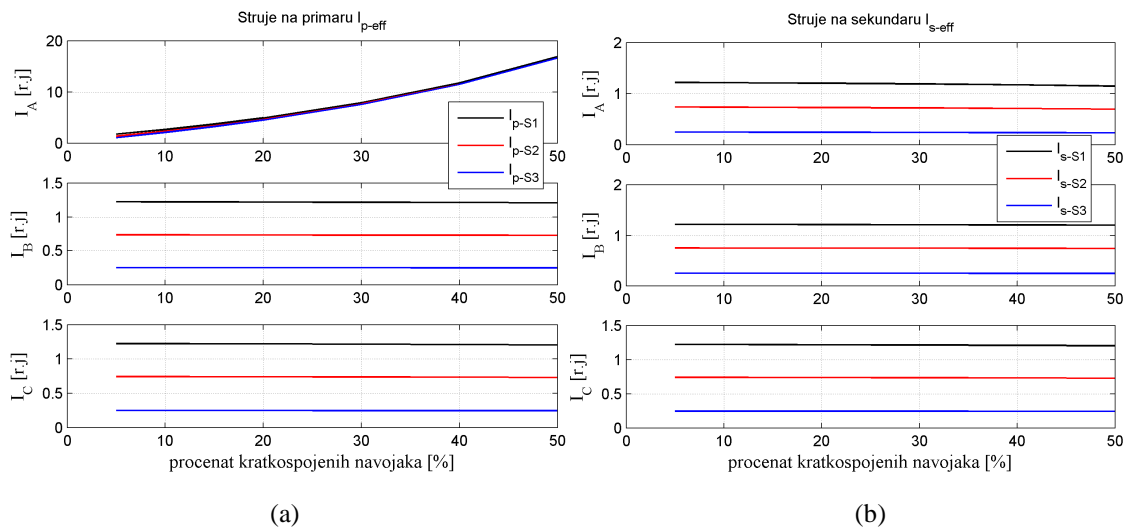
$$i_{bs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Bs}; \text{ i 3) struje } i_{cs} \text{ i izračunate struje } i_{cs}' = \frac{m_T m_p}{m_s} i_{Cs}.$$

#### 3.4.2.4.1 Kvarovi na primarnom namotaju ET-a sprege Yny0

Na Sl. 3.72 i Sl. 3.73 su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja primara i sekundara u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka primarnog namotaja transformatora T1.



Sl. 3.72 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih primarnih navojaka T1- ET sprege YNy0 radi između aktivne i pasivne mreže

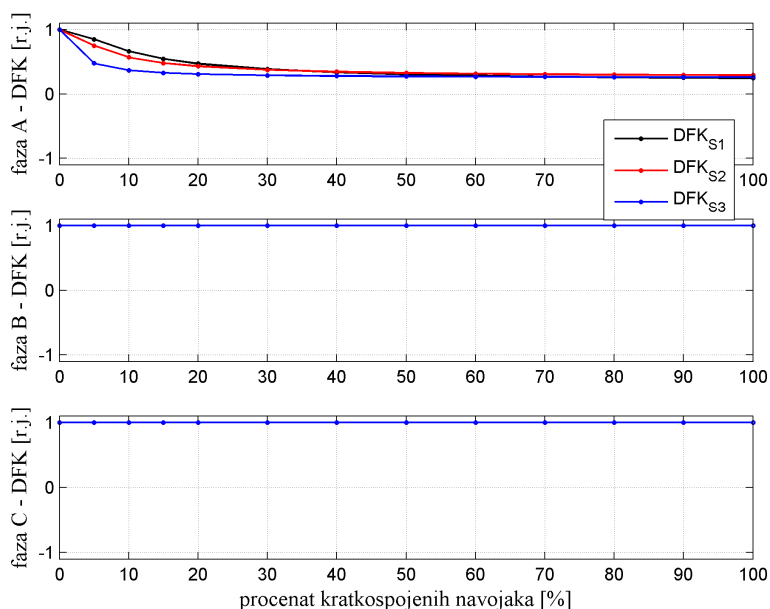


Sl. 3.73 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve primarnog namotaja T1 - ET sprege YNy0 radi između aktivne i pasivne mreže

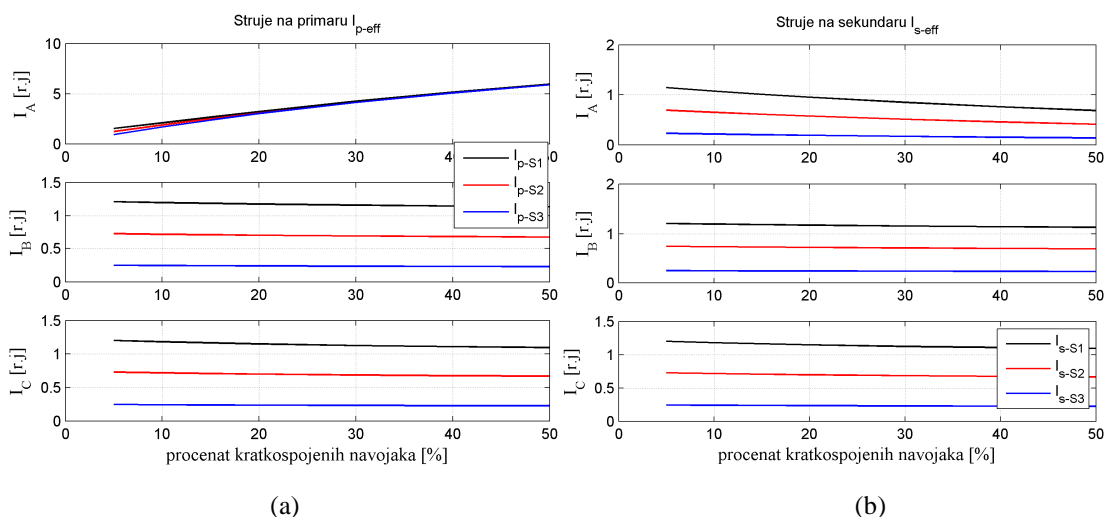
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.4.2 Kvarovi na sekundarnom namotaju ET-a sprege Yny0

Sl. 3.74 prikazuje promenu pokazatelja usmerenosti, a Sl. 3.75 prikazuje pokazatelje efektivnih vrednosti primarnih i sekundarnih struja u zavisnosti od procenta kratkospojenih navojaka sekundarnog namotaja transformatora T1.



Sl. 3.74 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih sekundarnih navojaka T1- ET sprege YNy0 radi između aktivne i pasivne mreže



Sl. 3.75 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja (a) primara i (b) sekundara za KS-eve sekundarnog namotaja T1 - ET sprege YNy0 radi između aktivne i pasivne mreže



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Iz prikazanih zavisnosti indeksa usmerenosti od procenta KS navojaka, može se uočiti da indeks usmerenosti menja vrednosti u fazi koja je pogođena kvarom, dok u zdravim fazama indeks ostaje jednak 1 r.j.

Kao i u svim prethodnim primerima, za isti broj KS-enih navojaka kada je pre kvara opterećenje ET-a bilo veće indeks usmerenosti je veći, odnosno odgovarajući fazni pomeraj između struja primara i sekundara je manji. Sa Sl. 3.72 i Sl. 3.74 su očitani indeksi usmerenosti u fazi sa kvarom, pri KS-u 5% navojaka i dati u Tab. 3.15. U svim posmatranim slučajevima digitalni fazni komparator bi detektovao prisustvo kvara:  $DFK(r.j.) \leq 0,954$ , uslov (3.27).

Za KS-eve 5% navojaka ET-a sprege Yny0 je ispitan rad diferencijalnog releja, čija je karakteristika data u poglavlju 3.4.2.2.2. Opisani diferencijalni relej bi prepoznao prisustvo KS-a 5% navojaka na primaru i sekundaru u svim posmatranim slučajevima.

Tab. 3.15 Vrednosti indeksa usmerenosti za KS 5% navojaka – ET sprege YNyn0

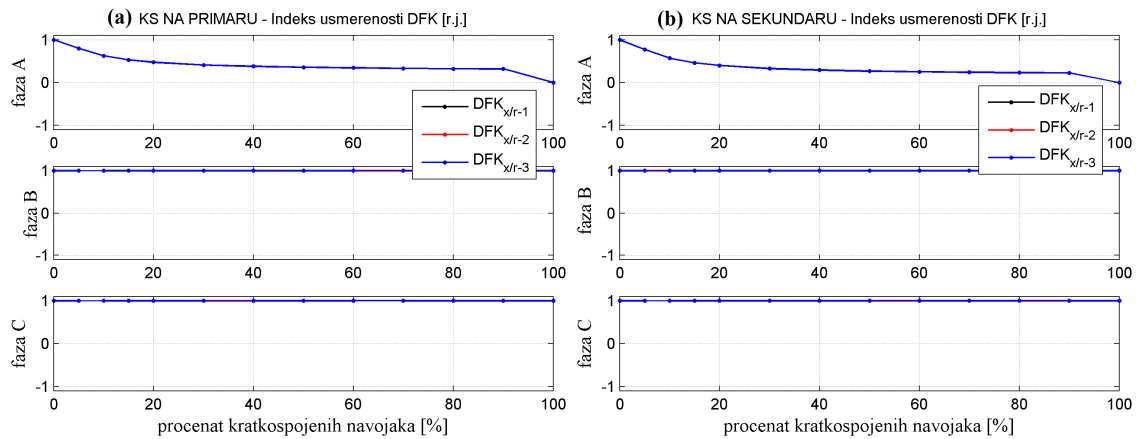
S		$1,25S_{nT}$	$0,75S_{nT}$	$0,25S_{nT}$
KS na primaru	faza A - DFK [r.j.]	0,862	0,764	0,488
KS na sekundaru		0,821	0,717	0,456

#### 3.4.2.5 Uticaj odnosa X/R unutrašnje impedanse mreže na indeks usmerenosti

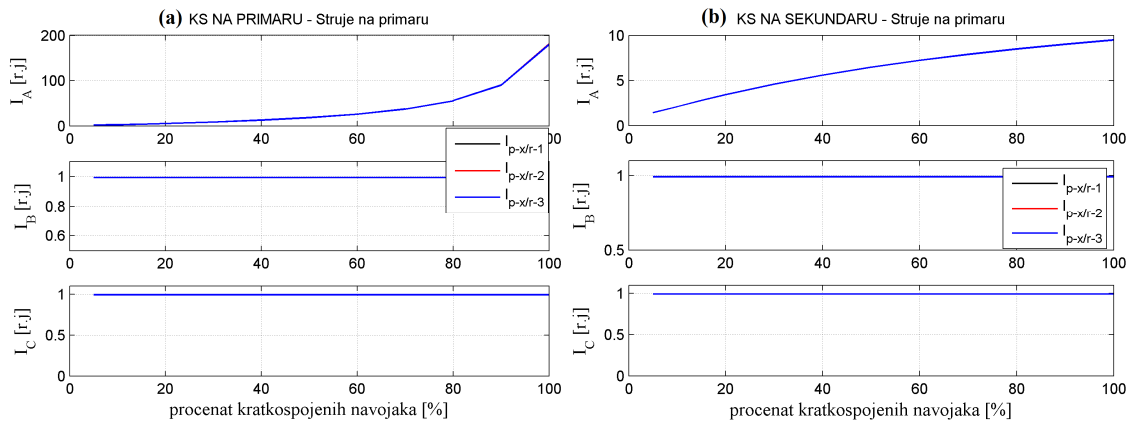
Ovde je proveren uticaj različitih odnosa X/R unutrašnje impedanse mreže na indeks usmerenosti tokom KS-eva ET-a. Tokom analize korišćen je ET sprege YNyn0 i šema na Sl. 3.56. Zadate su različite vrednosti odnosa X/R:  $(X/R)_1=10$ ;  $(X/R)_2=7$  i  $(X/R)_3=4$ , a parametri svih ostalih elemenata su ostali nepromenjeni i opterećenje ET-a pre kvara je tokom svih simulacija bilo približno jednako nominalnom.

Na Sl. 3.76 je prikazana promena indeksa usmerenosti, a na Sl. 3.77 i Sl. 3.78 pokazatelji efektivnih vrednosti struja primara i sekundara tokom KS-eva na ET-u. Vidi se da pri različitim odnosima X/R indeks usmerenosti i pokazatelji efektivnih vrednosti struja ostaju nepromenjeni tokom svih KS-eva na primarnom i sekundarnom namotaju transformatora T1.

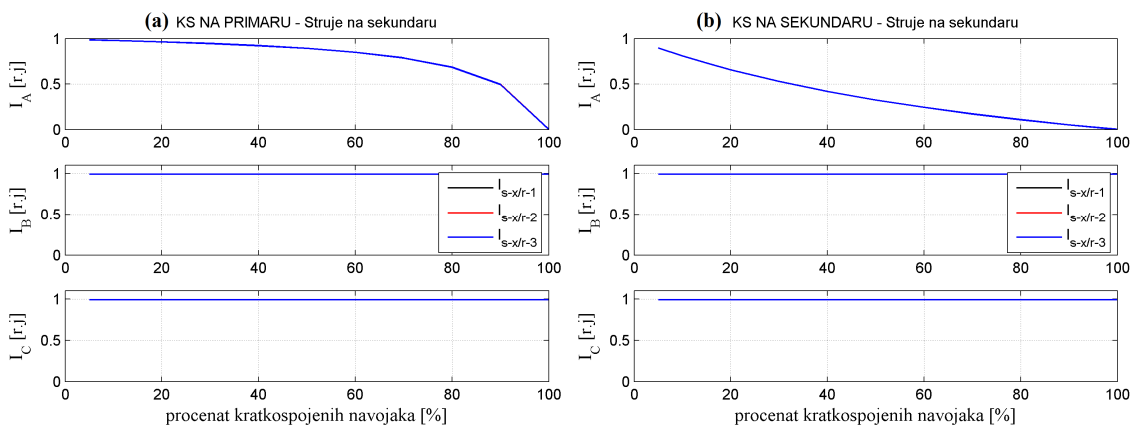
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.76 Indeks usmerenosti za različite odnose X/R mreže 1 tokom KS-eva na:  
(a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju



Sl. 3.77 Pokazatelji efektivnih vrednosti primarne struje za različite odnose X/R mreže 1 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju



Sl. 3.78 Pokazatelji efektivnih vrednosti sekundarne struje za različite odnose X/R mreže 1 tokom KS-eva na: (a) primarnom i (b) sekundarnom namotaju

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.4.2.6 Kratki spojevi između faza na priključcima ET-a

Ovde su prikazani rezultati dobijeni simulacijama KS-eva na priključcima ET-a sprege YNyn0, koji radi između aktivne i pasivne mreže Sl. 3.56. Osim kvarova na priključcima ET-a simulirani su i KS-evi van štíčene zone ET-a. Tokom svih simulacija posmatrane su vrednosti indeksa usmerenosti, a pokazatelji efektivnih vrednosti struja na priključcima ET-a su upoređeni sa graničnom vrednošću koja je bila podešena na  $I_{nT} = 1,2I_{nT}$ . Tab. 3.16 i Tab. 3.17 prikazuju rezultate dobijene 10 ms nakon nastanka kvara unutar i van štíčene zone energetskog transformatora.

Na osnovu prikazanih rezultata vidi se da bi primenom DFK mogao da se detektuje samo dvofazni kratak spoj (2fks). Tokom ostalih KS-eva (3fks, 2fks+z i 1fks) indeks usmerenosti jednak je 0 r.j. Za sve kratke spojeve, osim za dvofazni kratak spoj, struje na strani potrošača su približno jednake 0. Diferencijalna zaštita bi detektovala sve posmatrane KS-eve. Isto tako, prekostrujni relej na osnovu primarnih struja bi prepoznao sve kvarove.

Tab. 3.16 Pokazatelji usmerenosti za kvarove unutar štíčene zone

			3fks	2fks (faze A i B)	2fks+z (faze A i B)	1fks (faza A)
indeks	faza A	DFK [r.j]	0	$\approx 1$	0	0
	faza B	DFK [r.j]	0	$\approx -1$	0	1
	faza C	DFK [r.j]	0	1	1	1
rms pokazatelji	faza A	$I_A$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
		$I_a$	0	$<I_{gr}$	0	0
	faza B	$I_B$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
		$I_b$	0	$<I_{gr}$	0	neprom.
	faza C	$I_C$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.
		$I_c$	0	neprom.	neprom.	neprom.

\*Oznake u Tab: "neprom." – indeks nije promenio vrednost nakon pojave kvara;

$>I_{gr}$  – rms pokazatelj je veći od definisane granične vrednosti;

$<I_{gr}$  – rms pokazatelj je manji od definisane granične vrednosti.

Tokom spoljašnjih kvarova upotreba DFK-a kombinovanog sa prekostrujnim elementom jasno ukazuje na prisustvo KS-eva van štíčene zone ET-a. Tokom

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora spoljašnjih KS u fazi sa kvarom indeks usmerenosti ima vrednost jednaku 1 r.j., a pokazatelji efektivnih vrednosti su veći od podešene granične vrednosti.

Tab. 3.17 Pokazatelji usmerenosti za kvarove van štice zone

			3fks	2fks (faze A i B)	2fks+z (faze A i B)	1fks (faza A)
indeks	faza A	DFK [r.j]	1	1	1	1
	faza B	DFK [r.j]	1	1	1	1
	faza C	DFK [r.j]	1	1	1	1
rms pokazatelji	faza A	$I_A$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
		$I_a$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$
	faza B	$I_B$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
		$I_b$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	$>I_{gr}$	neprom.
	faza C	$I_C$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.
		$I_c$	$>I_{gr}$	neprom.	neprom.	neprom.

### 3.5 Eksperimentalna merenja

Merenja u laboratoriji su sprovedena na fizičkim modelima monofaznog ET-a i trofaznog trostubnog ET-a, koji su opisani u poglavlju 3.2.

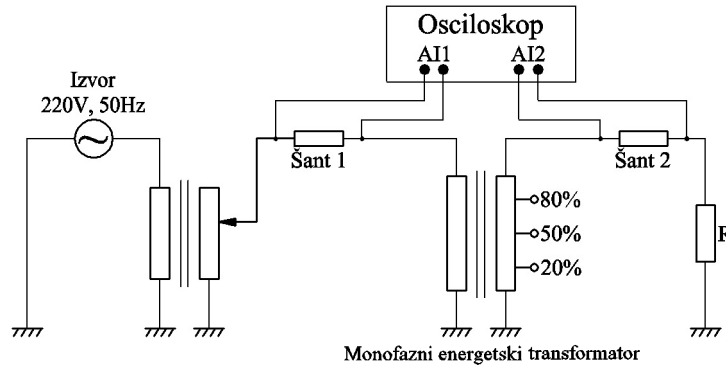
Procedura ispitivanja:

- Sproveden je niz merenja u laboratoriji sa ciljem da se dobiju signali kojima bi algoritam bio testiran. Na Sl. 3.79, Sl. 3.81 i Sl. 3.89 su prikazane šeme veza za laboratorijska merenja.
- Merenja na monofaznom ET-u su izvršena pomoću dvokanalnog osciloskopa Hameg, dok je odabiranje i snimanje signala tokom merenja na trofaznom ET-u izvršeno pomoću sledećih sistema za akviziciju podataka: NI USB-6008 (8 analognih ulaza,  $10 \cdot 10^3$  odbiraka/sec) i NI USB-6009 (8 analognih ulaza,  $48 \cdot 10^3$  odbiraka/sec), u zavisnosti od toga koji je sistem bio raspoloživ u trenutku merenja.
- Pomoću snimljenih odbiraka signala testiran je rad predloženog algoritma.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

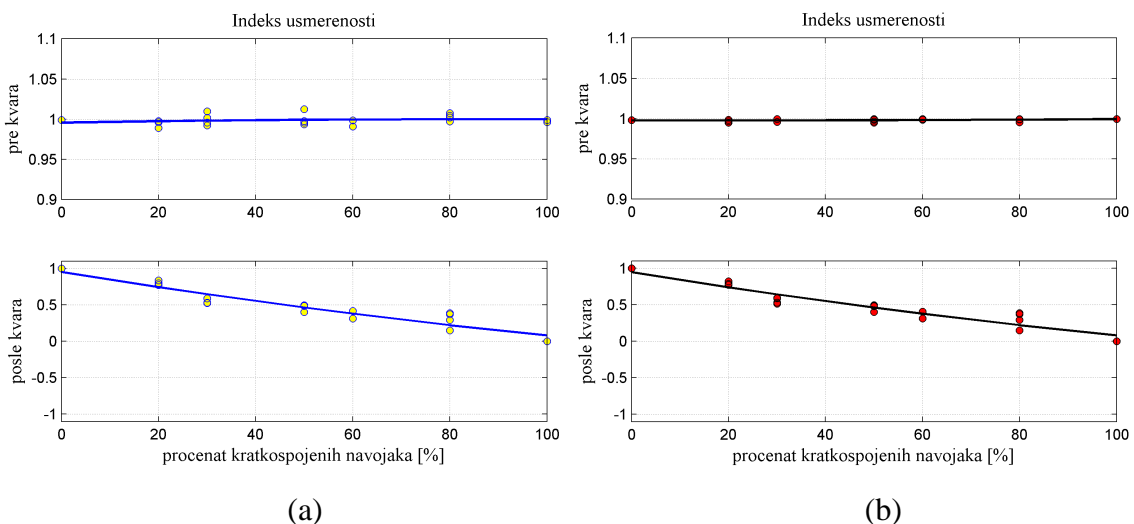
#### 3.5.1 Merenja na monofaznom transformatoru

Šema veza elemenata koji su korišćeni tokom merenja na monofaznom ET-u prikazana je na Sl. 3.79.



Sl. 3.79 Šema veza za laboratorijska merenja na monofaznom ET-u

Monofazni ET, prenosnog odnosa  $m_T=5780\text{ V}/220\text{ V}$ , napajan je sa NN strane naizmeničnim naponom 10 V. Na VN strani pravljene su kratki spojevi na izvodima koji se nalaze na  $0,2N_1$ ,  $0,5N_1$ ,  $0,8N_1$  navojaka. Na VN strani vezan je čisto aktivan potrošač  $R=3\text{ k}\Omega$ . Pomoću ovog ET-a, kombinacijom dostupnih izvoda, analizirani su kratki spojevi koji su zahvatili 20%, 30%, 50%, 60%, 80% i 100% namotaja ET-a. Na Sl. 3.80 su prikazani indeksi usmerenosti očitani jednu periodu pre kvara i 10 ms nakon generisanja kvara. Slika prikazuje proračunate vrednosti indeksa pomoću

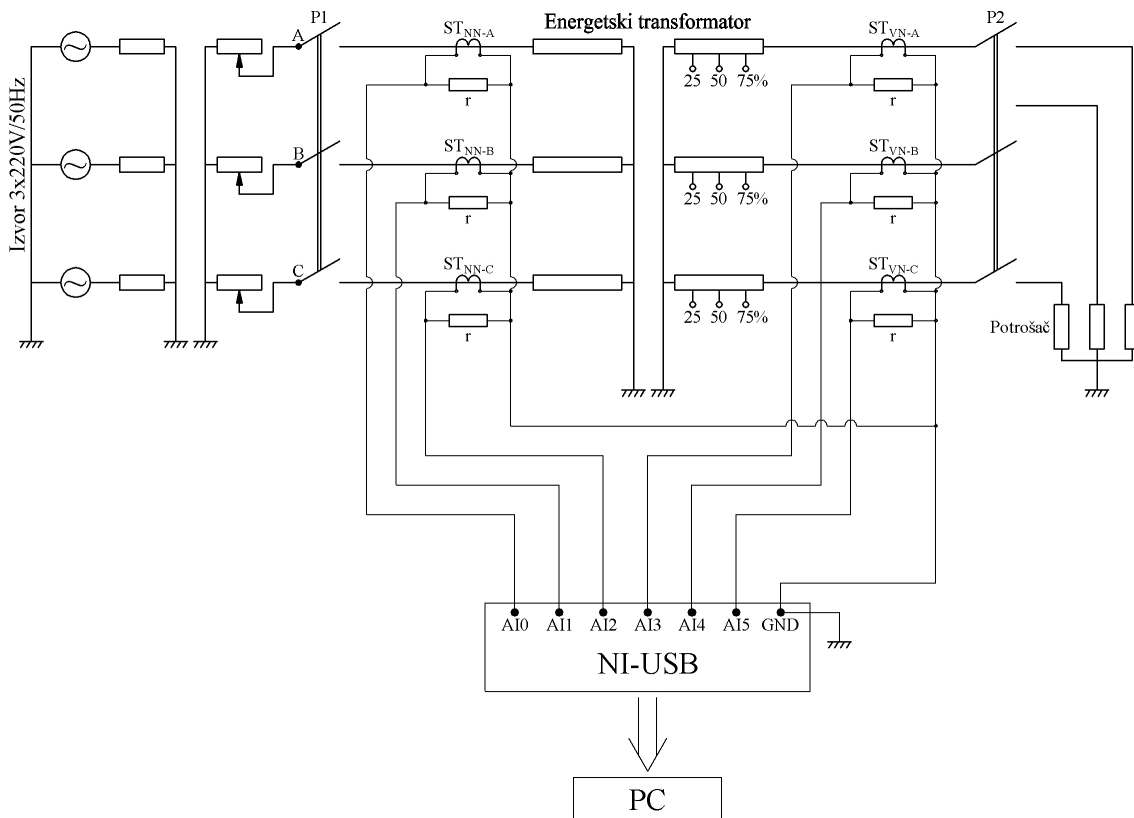


Sl. 3.80 Indeksi usmerenosti proračunati upotrebom: (a) metode srednje vrednosti i (b) efektivne vrednosti računane na  $T/2$

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora efektivnih vrednosti signala dobijenih metodom srednje vrednosti (3.5) i pomoću efektivnih vrednosti izračunatih na polovini periode (3.6). Na slici se jasno uočava da su neke vrednosti indeksa pre nastanka kvara veće od 1, kada je za normalizaciju korišćena metoda srednje vrednosti, dok to nije bio slučaj kada je korišćen izraz (3.6). Na slici se može videti da se nakon nastanka kvara dobijaju gotovo identične vrednosti upotrebom ova dva izraza. Uočava se da je vrednost indeksa pre nastanka kvara jednaka 1 r.j., a da se tokom KS-eva namotaja menja u intervalu  $[0,1)$  r.j, odnosno  $0 \leq DFK(r.j.) < 1$ .

### 3.5.2 Merenja na trofaznom trostubnom transformatoru sprege YNyn

Šema veza koja je korišćena tokom merenja na trofaznom ET-u prikazana je na Sl. 3.81. Fizički model ET-a koji je korišćen u laboratoriji je prenosnog odnosa  $m_T=5780 \text{ V}/220 \text{ V}$ . ET je napajan sa sekundarne (NN) strane, a na izvodima primarnog namotaja su generisani KS-evi. Na primaru je bio vezan pretežno aktivan trofazni



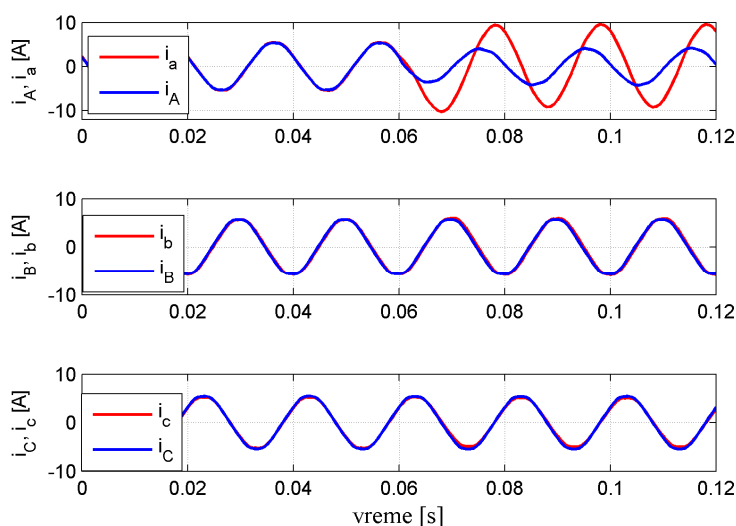
Sl. 3.81 Šema veza za laboratorijska merenja na trofaznom ET-u sprege YNyn

potrošač (sijalice sa užarenim vlaknom) snage  $3 \times 120 \text{ W}$ . Tokom merenja P1 i P2 su bili zatvoreni. Trofazni ET ima izvode na  $0,25N_1$ ,  $0,5N_1$  i  $0,75N_1$  navojaka. Tako da su

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora pomoću ovog ET-a, svim kombinacijama dostupnih izvoda, razmatrani kratki spojevi 25%, 50% , 75% i 100% namotaja.

### ***Kratki spojevi na namotaju faze A***

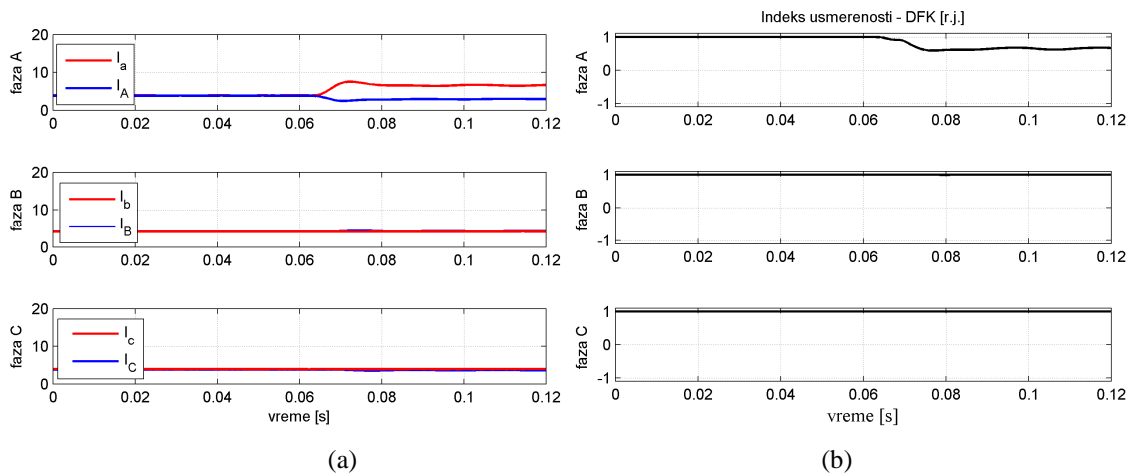
Na Sl. 3.82 prikazani su talasni oblici struja na VN i NN strani u fazama A, B i C za KS 50% namotaja faze A. Vrednosti struja su svedene na NN nivo sa kog je ET napajan. Sl. 3.83 prikazuje proračunate vrednosti pokazatelja efektivnih vrednosti struja i indekse usmerenosti za faze A, B i C. Nakon kvara vide se promene pokazatelja efektivnih vrednosti i indeksa usmerenosti u fazi sa kvarom. Vrednost indeksa usmerenosti nakon nastanka kvara u fazi sa kvarom je manji od 1 r.j.



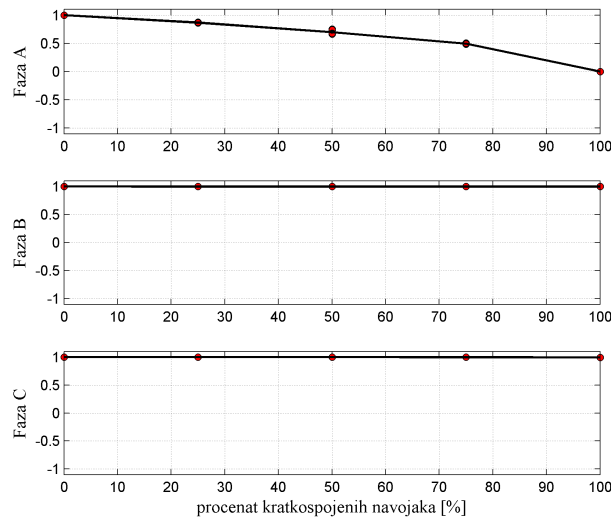
Sl. 3.82 Talasni oblici struja pre i nakon KS 50% namotaja faze A – ET sprege YNyn

U nastavku su prikazane zavisnosti indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti od procenta KS-enih navojaka faze A (Sl. 3.84 i Sl. 3.85) i faze B (Sl. 3.86 i Sl. 3.87). Kratki spojevi su generisani za sve kombinacije dostupnih izvoda na VN namotaju. Na osnovu izmerenih signala struja i proračunatih vrednosti pokazatelja vidi se da indeksi u fazi sa kvarom imaju vrednosti u intervalu [0,1) r.j. u zavisnosti od broja KS-enih navojaka, gde 0 r.j. odgovara KS 100% namotaja. U fazi koja nije pogođena kvarom indeksi su sve vreme bili jednaki 1 r.j. Pokazatelj efektivne vrednosti struje u fazi sa kvarom na NN strani raste, a na VN strani na kojoj je potrošač opada sa porastom broja KS-enih navojaka.

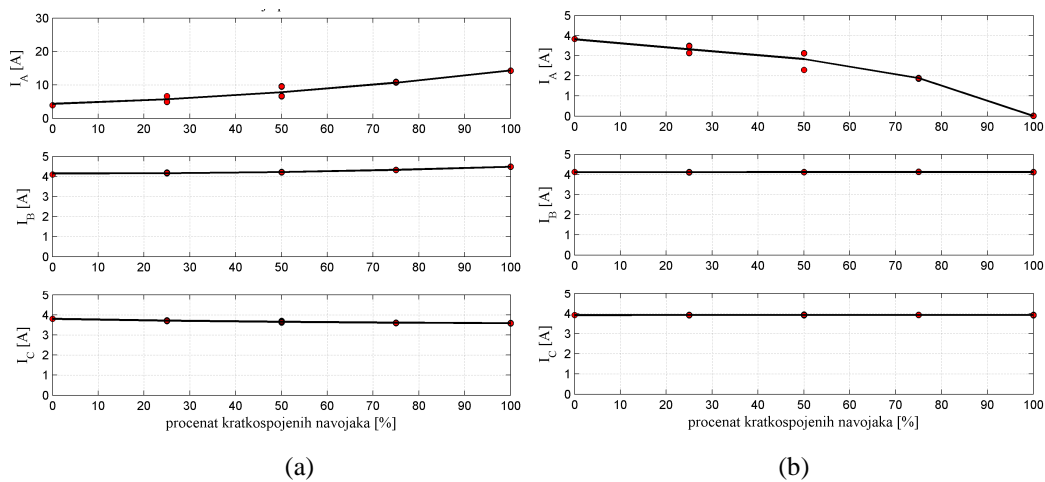
### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.83 (a) Pokazatelji efektivnih vrednosti struja i (b) indeksi usmerenosti pre i nakon KS 50% VN namotaja faze A – ET sprege YNyn



Sl. 3.84 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih navojaka VN namotaja faze A - ET: YNyn

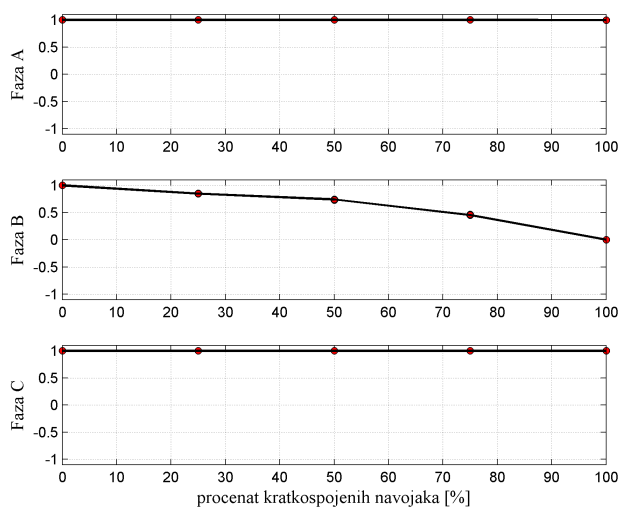


Sl. 3.85 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja na: (a) NN strani i (b) VN strani za KS-eve navojaka VN namotaja faze A - ET: YNyn

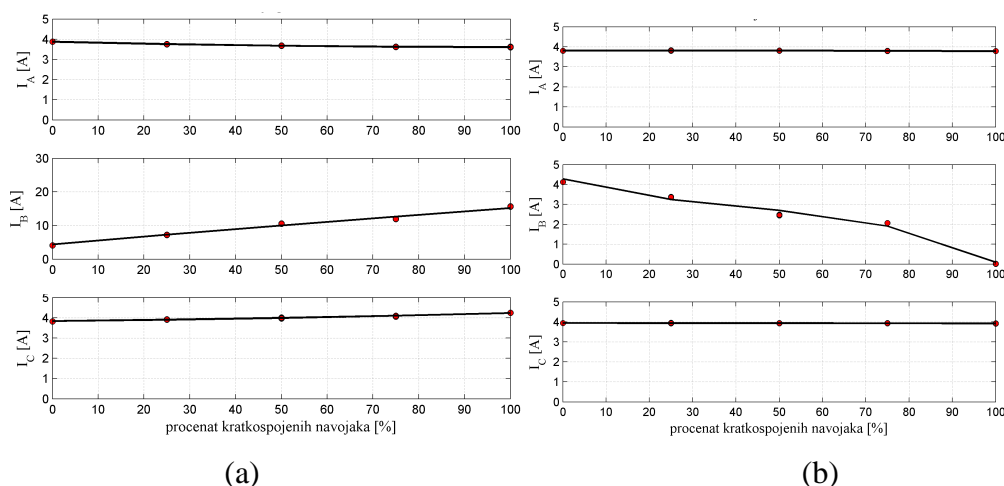


### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### Kratki spojevi na namotaju faze B



Sl. 3.86 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih navojaka VN namotaja faze B - ET: YNyn



Sl. 3.87 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja na: (a) NN strani i (b) VN strani za KS-eve navojaka VN namotaja faze B - ET: YNyn

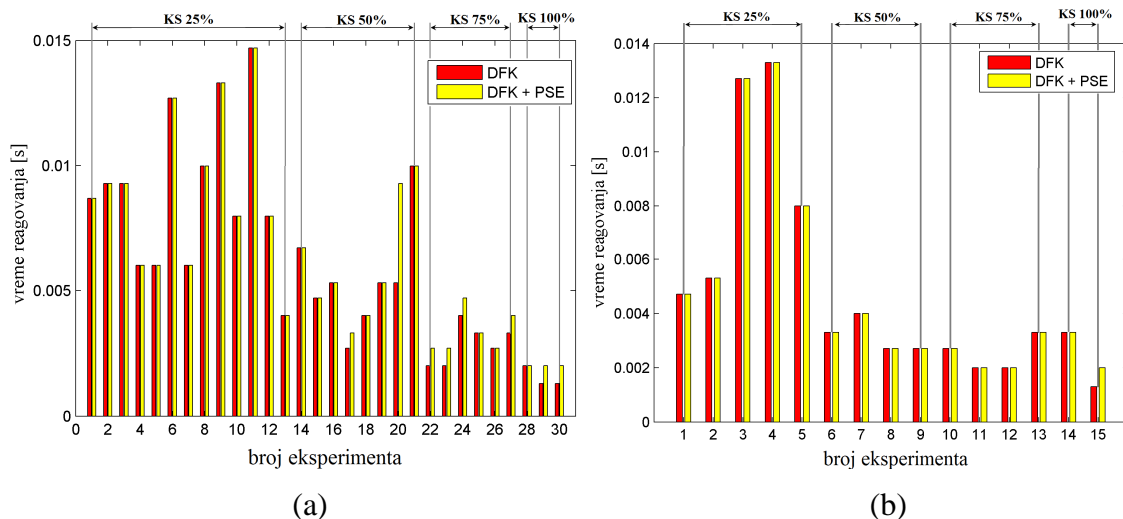
Pomoću snimljenih signala testirano je vreme reagovanja dva releja:

1. relej koji koristi digitalni fazni komparator (DFK), a uslov za reagovanje je ispunjen ako je indeks usmerenosti manji od 0,9 r.j. ( $DFK(r.j.) < 0,9$ ). Ovdje treba napomenuti da je korišćen strožiji uslov reagovanja od uslova (3.27).
2. relej za čije reagovanje treba da budu ispunjena dva uslova: da vrednost indeksa usmerenosti bude manja od 0,9 r.j. ( $DFK(r.j.) < 0,9$ ) i da efektivna vrednost bilo koje od struja na priključcima bude veća od podešene granične vrednosti

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

( $I_{NN} > I_{gr-NN} \vee I_{VN} > I_{gr-VN}$ ). Tokom svih eksperimenata ET je bio napajan trofaznim naponom  $3 \times 10V$ . U prekostrujnom elementu (PSE) granične vrednosti struja na NN i VN strani ( $I_{gr-NN}$  i  $I_{gr-VN}$ ) su podešene tako da budu jednake 120% vrednosti koja je izmerena u režimu rada (bez kvara) kada je ET napajan sa NN strane trofaznim naponom  $3 \times 10V$  (50 Hz).

Posmatrani su KS-evi svih kombinacija izvoda VN namotaja faze A. Sl. 3.88.a prikazuje vremena reagovanja za 30 različitih eksperimenata. Vremena reagovanja za KS-eve namotaja faze A za relej (1) kreću se od 1,3 ms do 14,7 ms, a za relej (2) od 2 ms do 14,7 ms. Vremena reagovanja za KS-eve svih kombinacija izvoda namotaja faze B prikazana su na Sl. 3.88.b. Za relej (1) vremena reagovanja su od 1,3 ms do 13,3 ms, a za relej (2) od 2 ms do 13,3 ms. Na slikama se može uočiti da je sa porastom procenta kratkospojenih navojaka vreme reagovanja kraće. Razlog za to je što sa porastom KS-enih navojaka indeksu usmerenosti se smanjuju vrednosti. Po uspostavljanju KS-a indeks od 1 r.j. konvergira ka sledećoj vrednosti koja zavisi od broja KS-enih navojaka. Kada indeks konvergira ka manjoj vrednosti, tada brže ulazi u zonu reagovanja. Isto tako, sa KS-em većeg broja navojaka efektivna vrednost struje na NN strani se povećava. Kada struja nakon kvara teži većoj vrednosti tada brže postaje veća od podešene granične vrednosti. Ovde treba imati i u vidu da vreme reagovanja zavisi od podešenog praga reagovanja.



Sl. 3.88 Vremena reagovanja releja (1) DFK i (2) DFK + PSE  
za KS-eve na namotaju faze: (a) A i (b) B

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### 3.5.3 Merenja na trofaznom trostubnom transformatoru Dyn

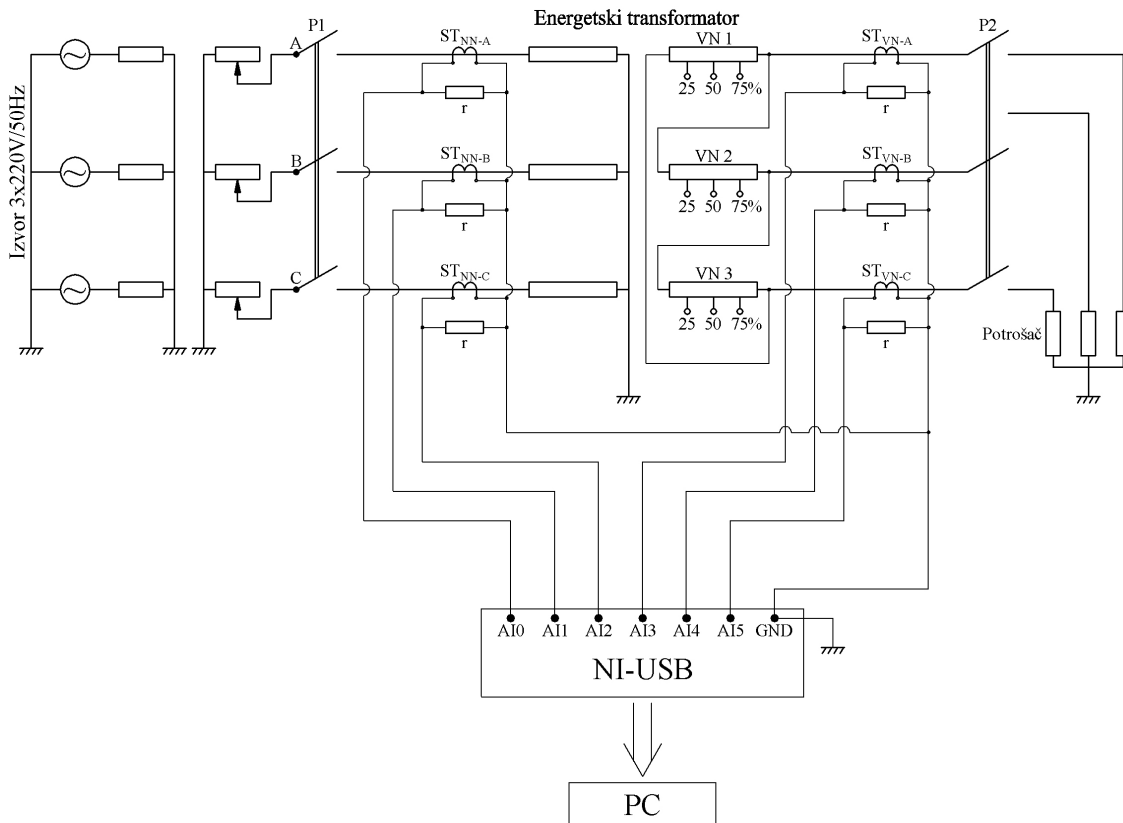
Fizički model trofaznog ET-a je sprege Yy, međutim VN namotaj je moguće povezati u trougao. Nakon povezivanja VN namotaja u trougao dobijen je ET sprege Dyn (Sl. 3.89), a zatim su na namotajima VN 1 i VN 2 generisani kratki spojevi.

Neka se na VN strani na sekundarima strujnih transformatora  $ST_{VN-A}$ ,  $ST_{VN-B}$  i  $ST_{VN-C}$  mere struje  $i_{As}$ ,  $i_{Bs}$  i  $i_{Cs}$ , respektivno, a na NN strani na sekundarima strujnih transformatora  $ST_{NN-A}$ ,  $ST_{NN-B}$  i  $ST_{NN-C}$  struje  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  i  $i_{cs}$ , respektivno.

Digitalni fazni komparator poredi sledeće struje:

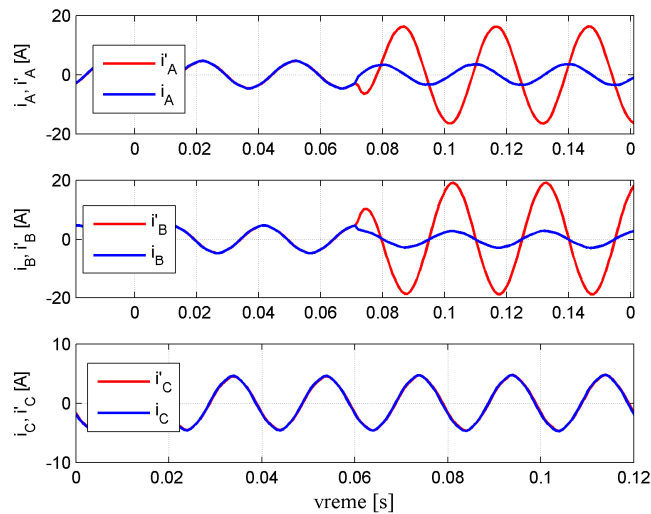
- 1) struje na strani trougla  $i_{As}$  i izračunate struje  $i_{As}' = \frac{m_s}{\sqrt{3m_T m_p}}(i_{as} - i_{bs})$ ;
- 2) struje na strani trougla  $i_{Bs}$  i izračunate struje  $i_{Bs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3m_T m_p}}(i_{bs} - i_{cs})$ ;
- 3) struje na strani trougla  $i_{Cs}$  i izračunate struje  $i_{Cs}' = \frac{m_s}{\sqrt{3m_T m_p}}(i_{cs} - i_{as})$ .

Na Sl. 3.90 su prikazani talasni oblici fazno prilagođenih struja, a na Sl. 3.91 njihovi pokazatelji efektivnih vrednosti i indeks usmerenosti u fazama A, B i C, pre i nakon kratkog spajanja 50% namotaja VN 2.

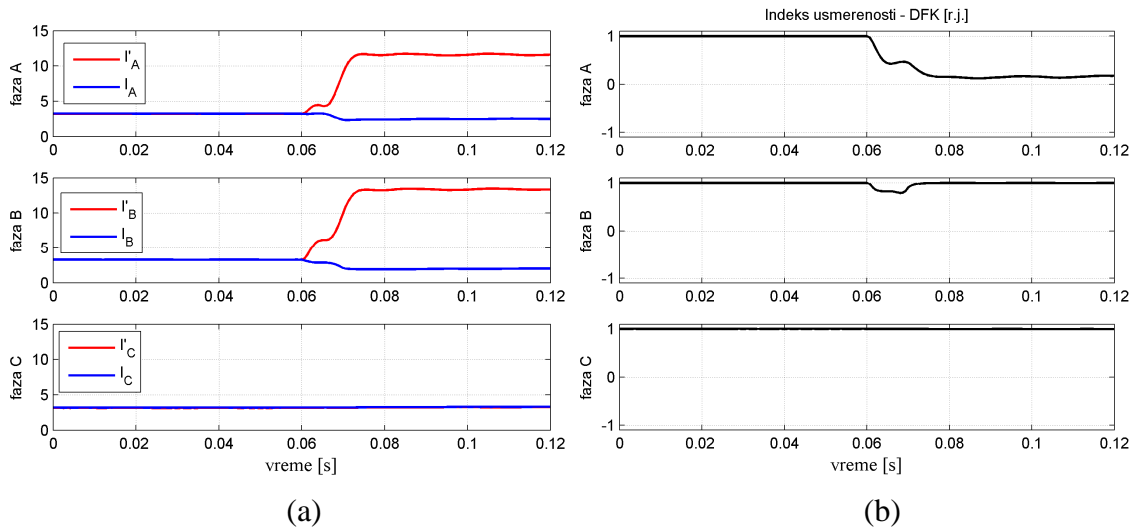


Sl. 3.89 Šema veza za laboratorijska merenja na trofaznom ET-u sprege Dyn

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora



Sl. 3.90 Talasni oblici struja pre i nakon KS 50% namotaja VN 2– ET sprege Dyn

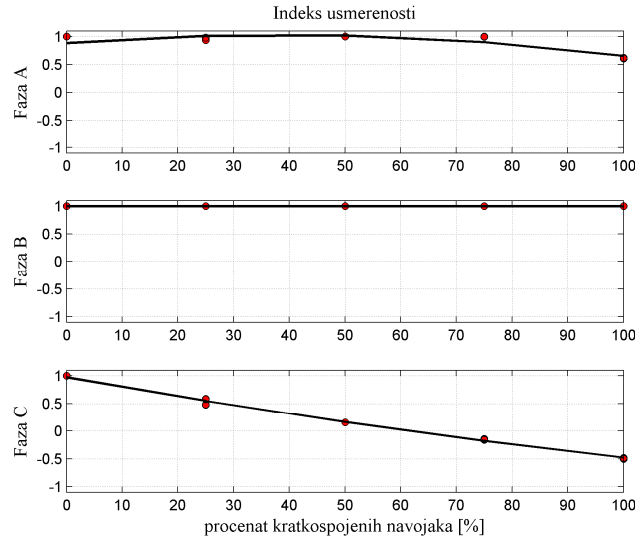


Sl. 3.91 (a) Pokazatelji efektivnih vrednosti struja i (b) indeksi usmerenosti pre i nakon KS 50% namotaja VN 2– ET sprege Dyn

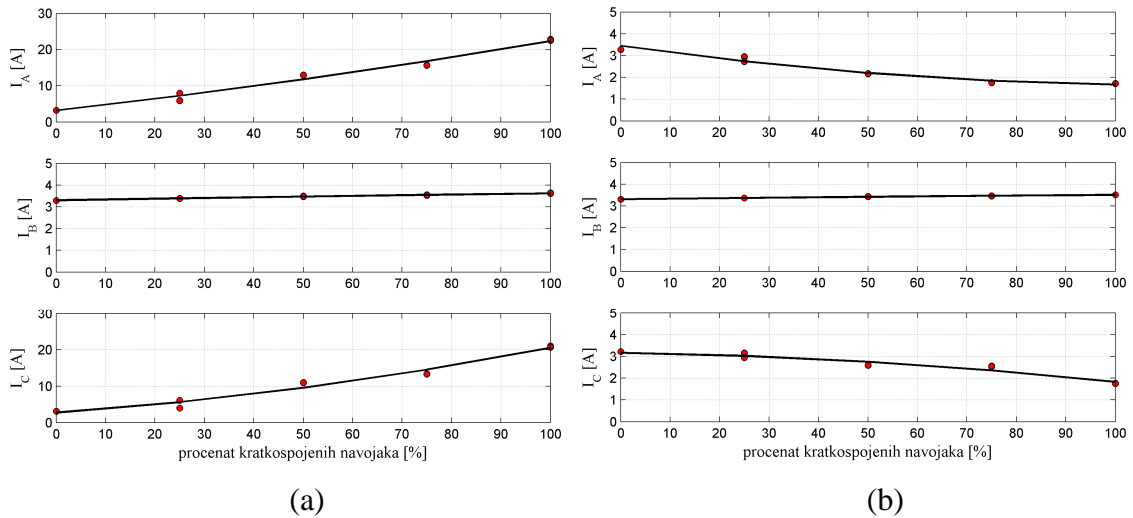
U nastavku su prikazane promene indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja u zavisnosti od procenta KS navojaka faze A (Sl. 3.92 i Sl. 3.93) i u zavisnosti od procenta KS navojaka faze B (Sl. 3.94 i Sl. 3.95). Sa prikazanih slika nakon KS-a u dve faze se može uočiti promena vrednosti indeksa i efektivnih vrednosti struja na VN strani i prilagođenih struja na NN strani. Za detekciju KS-a na namotaju VN 1 povoljnije je posmatrati indeks u fazi C, a na namotaju VN 2 indeks u fazi A.

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### Kratki spojevi na namotaju VN I



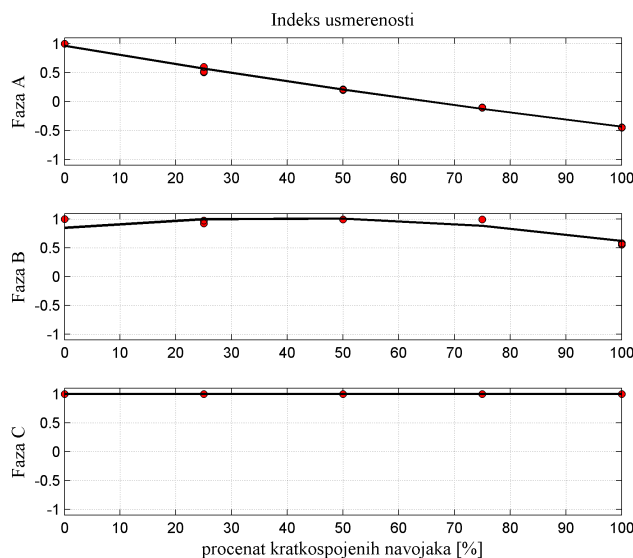
Sl. 3.92 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih navojaka namotaja VN I - ET: Dyn



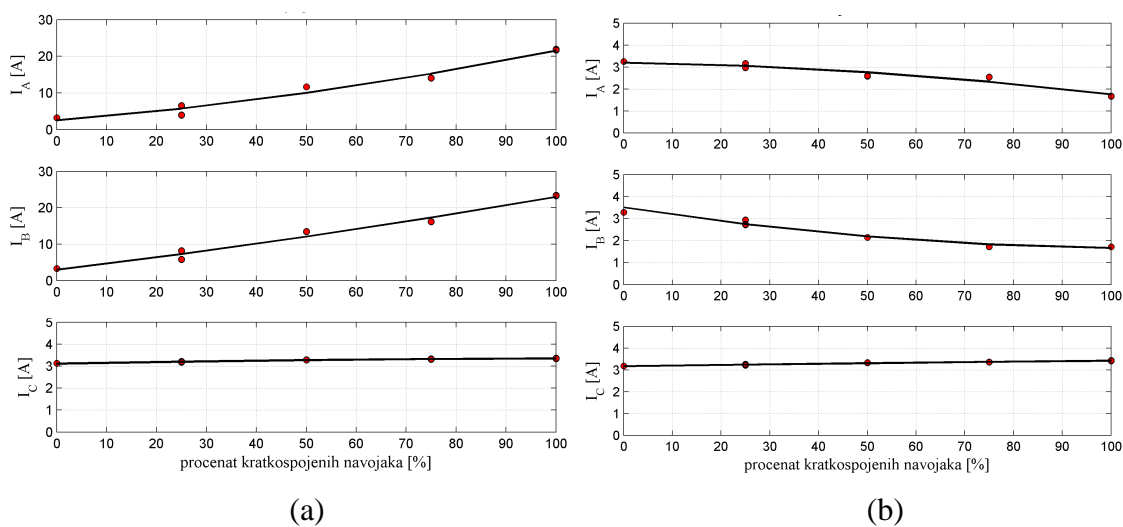
Sl. 3.93 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja na: (a) NN strani i (b) VN strani za KS navojaka namotaja VN I - ET: Dyn

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

#### Kratki spojevi na namotaju VN 2



Sl. 3.94 Promena indeksa usmerenosti u zavisnosti od procenta KS-enih navojaka namotaja VN 2 - ET: Dyn

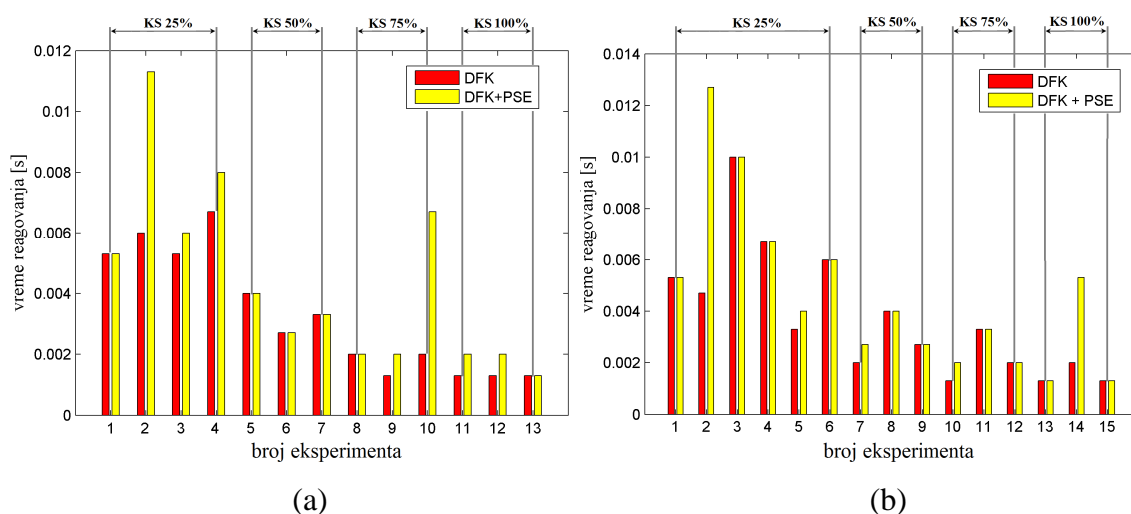


Sl. 3.95 Pokazatelji efektivnih vrednosti struja na: (a) NN strani i (b) VN strani za KS navojaka namotaja VN 2 - ET: Dyn

Pomoću snimljenih signala, i u slučaju sprege Dyn, testirano je za koje vreme bi reagovali releji opisani u prethodnom poglavlju: relej (1), koji koristi digitalni fazni komparator (DFK), i relej (2), koji koristi DFK i prekostrujni element (PSE). Sl. 3.96. prikazuje dobijena vremena reagovanja za KS-eve na namotaju VN 1 i VN 2. Vremena

3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora reagovanja za KS-eve namotaja *VN 1*, na osnovu pokazatelja u fazi C, za relej (1) su od 1,3 ms do 6,7 ms, a za relej (2) od 1,3 ms do 11,3 ms. Vremena reagovanja za KS-eve namotaja *VN 2*, na osnovu pokazatelja u fazi A, za relej (1) su od 1,3 ms do 10 ms, a za relej (2) od 1,3 ms do 12,7 ms.

Na slikama se može uočiti da je za veći procenat kratkospojenih navojaka vreme reagovanja kraće, ovde treba imati i u vidu to da vreme reagovanja zavisi od podešenog praga reagovanja.



Sl. 3.96 Vremena reagovanja releja (1) i (2) za KS na namotaju (a) *VN 1* i (b) *VN 2*

### 3.6 Zaključak

U ovoj glavi ispitana je mogućnost primene fazne komparacije primarne i sekundarne struje u zaštiti ET-a. Za estimaciju faznog pomeraja koristi se digitalni fazni komparator koji se bazira na proračunu integrala proizvoda dva signala na intervalu dužine poluperiode signala. Na ovaj način ne određuje se direktno vrednost ugla, već se proračunava indeks usmerenosti.

Na osnovu kompjuterski generisanih signala i signala dobijenih merenjima u laboratoriji pokazano je da je tokom normalnih radnih režima i kvarova van štice zone ET-a, fazni pomeraj između primarne i sekundarne ( $\varphi$ ) struje približno jednak  $0^\circ$ , kao i da je tokom KS-eva na namotaju ET-a fazni pomeraj ( $\varphi$ ) veći od  $0^\circ$ .

### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

U zavisnosti od položaja ET-a u sistemu tokom analize promene faznog pomeraja ( $\varphi$ ) za vreme KS-eva namotaja ET-a posebno su posmatrana dva slučaja. Kada se ET nalazi između dve aktivne mreže fazni pomeraj ( $\varphi$ ) se menja u opsegu  $0^\circ$  i  $180^\circ$ , dok će tokom KS-eva na namotaju ET-a koji se nalazi između aktivne mreže i potrošača fazni pomeraj ( $\varphi$ ) biti između  $0^\circ$  i  $90^\circ$ .

Pokazano je da vrednost faznog pomeraja ( $\varphi$ ) zavisi od procenta namotaja koji su KS-eni, radnog režima koji je prethodio kvaru i parametara mreže i potrošača između kojih radi ET. Zatim je za različite sprege trofaznog ET-a proveren fazni pomeraj ( $\varphi$ ) i promene efektivnih vrednosti struja na priključcima ET-a u zavisnosti od procenta KS-enih navojaka. Za sve posmatrane sprege analizirani su kratki spojevi na primarnom i sekundarnom namotaju za različita opterećenja ET-a. Tokom analize korišćena je mreža sa realnim parametrima. Pokazano je da kod sprege zvezda – zvezda tokom kratkog spoja navojaka promena faznog pomeraja ( $\varphi$ ) se uočava u jednoj fazi (fazi sa kvarom). Upoređivanjem fazno prilagođenih struja za raznoimene sprege zvezda – trougao tokom KS-a promena faznog pomeraja ( $\varphi$ ) se uočava u dve faze.

Pomoću signala koji su generisani simulacijama i signala koji su snimljeni u laboratoriji pokazano je da se primenom fazne komparacije struja na primarnim i sekundarnim priključcima energetskog transformatora mogu detektovati kratki spojevi namotaja. Na osnovu rezultata simulacija, za svaku posmatranu spregu za KS-eve 5% namotaja procenjen je rad releja koji se bazira na diferencijalnom principu i releja koji koristi digitalni fazni komparator. U svim razmatranim primerima oba releja bi detektovala KS-eve.

Osnovni nedostatak primene fazne komparacije primarne i sekundarne struje u zaštiti ET-a je to što algoritam baziran na faznoj komparaciji ne bi mogao da prepozna KS-eve u ET-u kada on radi u praznom hodu. Kad ET radi u praznom hodu struje na strani koja je u praznom hodu su jednake nuli, pa je tada nemoguće primeniti faznu komparaciju. Tako da je očigledno da zaštita od unutrašnjih KS-eva bazirana na faznoj komparaciji ne može da radi samostalno.



### 3. Analiza mogućnosti primene faznog komparatora u zaštiti energetskog transformatora

Pošto bi fazni komparator služio kao dodatni kriterijum za rad diferencijalne zaštite, blokada nepotrebnog reagovanja tokom prepobuđenosti ET-a ili pojave udarne struje magnećenja bi bila ostvarena, već postojećom, blokadom po višim harmonicima.

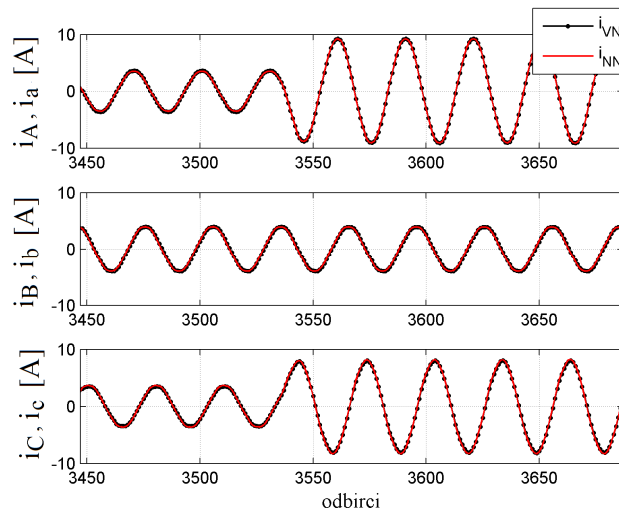
Da bi se poboljšala osetljivost diferencijalne zaštite tokom uključanja neopterećenog ET-a sa malim brojem KS-enih navojaka, može se izvršiti prepodešenje diferencijalne zaštite na sledeći način. Nakon iščezavanja prelaznog procesa izazvanog uključanjem, usled malog broja KS-enih navojaka diferencijalna struja može biti manja od minimalne podešene diferencijalne struje  $I_{d,min}$ , pa diferencijalni relej ne bi reagovao. Tokom uključanja ET-a u praznom hodu struje na jednoj strani su jednake nuli. Podešenje diferencijalne zaštite može biti modifikovano tako da kada se detektuje da su struje na jednoj strani jednake nuli, tada minimalna vrednost diferencijalne struje  $I_{d,min}$  može biti prepodešena na neku manju vrednost. Prilikom izbora nove vrednosti  $I_{d,min}$  treba voditi računa da ona bude veća od vrednosti struje praznog hoda ET-a koji se štiti.

Buduća istraživanja bi mogla da budu usmerena u pravcu provere rada diferencijalne zaštite sa predloženim prepodešenjem i izbor nove vrednosti minimalne diferencijalne struje  $I_{d,min}$  koja bi bila podešena kada ET radi u praznom hodu.

#### 4. UNAPREĐENJE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE TOKOM SPOLJAŠNJIH KVAROVA PRIMENOM DIGITALNOG FAZNOG KOMPARATORA

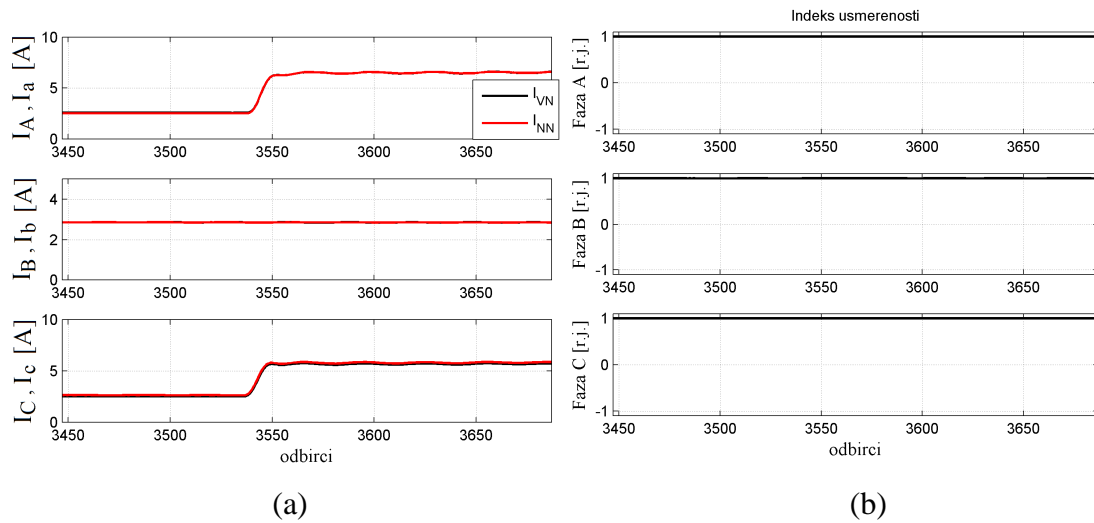
U prethodnoj glavi je pokazano da tokom kratkih spojeva unutar štice zone, bilo da se ET nalazi između dve aktivne ili između aktivne i pasivne mreže, indeks usmerenosti ima vrednost manju od 1 r.j., dok u toku normalnog radnog režima ET-a ili pri pojavi spoljašnjih kvarova ovaj indeks ima vrednost jednaku 1 r.j. Takođe, ovde treba napomenuti da tokom analize u prethodnoj glavi zasićenje ST-a nije uzimano u obzir. Ovde će odmah biti prikazani talasni oblici struja snimljenih u laboratoriji tokom spoljašnjeg kratkog spoja faza A i C na strani potrošača. Šema veza koja je korišćena tokom ovog eksperimenta prikazana je na Sl. 3.81.

Na Sl. 4.1.a) su prikazani talasni oblici struja, snimljeni u laboratoriji, pre i nakon spoljašnjeg dvofaznog kratkog spoja faza A i C. Transformator je napajan sa NN strane naizmeničnim naponom  $3 \times 5 \text{ V}$  (50 Hz). Sprega transformatora je YNyn. Broj odbiraka u osnovnoj periodi signala  $m=30$ . Vrednosti struja na slikama su svedene na NN nivo. Sl. 4.2.a) prikazuje pokazatelje efektivnih vrednosti struja izraz (3.6), a Sl. 4.2.b) indekse usmerenosti za faze A, B i C (3.7).



Sl. 4.1 (a) Talasni oblik struja pre i nakon spoljašnjeg dvofaznog KS faza A i C

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK



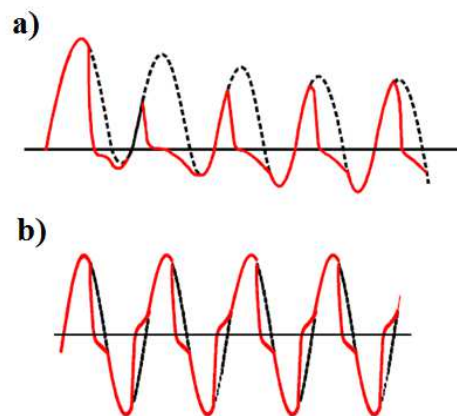
Sl. 4.2 (a) Pokazatelji efektivnih vrednosti struja; (b) Indeksi usmerenosti

Na slikama je izdvojen deo koji prikazuje talasne oblike struja i pokazatelje tri periode pre i pet perioda nakon nastanka kvara. Ono što je zanimljivo uočiti jeste da pri pojavi spoljašnjeg kvara indeks usmerenosti ostaje na vrednosti 1 r.j. koju je imao i u režimu pre kvara. Kvarove van štíčene zone karakteriše to da u fazi koja je pogođena kvarom kroz namotaje transformatora protiču struje veće od nominalnih. Duži rad u ovom režimu može dovesti do intenzivnog zagrevanja i oštećenja izolacije namotaja. Dakle, pri spoljašnjim kratkim spojevima indeks usmerenosti jednak je 1 r.j., a pokazatelji efektivnih vrednosti struja imaju veće vrednosti u odnosu na režim pre kvara. Kombinacijom indeksa usmerenosti sa prekostrujnim elementom, odnosno dodavanjem poređenja pokazatelja efektivnih vrednosti struja sa nekom graničnom vrednosti mogli bi se detektovati nenormalni radni režimi van ET-a.

U nastavku će biti provereno da li detektovanje spoljašnjeg poremećaja primenom fazne komparacije primarne i sekundarne struje ET-a može da pomogne u eliminaciji neželjenog reagovanja releja zbog zasićenja strujnih transformatora tokom spoljašnjih kvarova. Ukoliko su pravilno odabrani, strujni transformatori (ST-i) bi trebali korektno da preslikavaju primarnu struju određeno vreme nakon nastanka kvara, pre nego što uđu u zasićenje. Minimalno vreme do ulaska ST-a u zasićenje bi trebalo da se kreće od 5 do 10 ms. Tokom tog vremena digitalni fazni komparator kombinovan sa prekostrujnom funkcijom bi mogao dati informaciju da je prisutan spoljašnji KS i na taj način sprečiti neželjeno reagovanje zaštite.

#### 4.1 Uticaj zasićenja strujnih transformatora na zaštitu ET-a

Zasićenje strujnih transformatora dovodi do nekorektnog preslikavanja primarne struje na sekundar, što može biti uzrok nepravilnog donošenja odluke reagovanja releja. Pojava zasićenja ST-a ima dvostruki efekat na diferencijalnu zaštitu, odnosno na zaštitu koja poredi struje na priključcima ET-a. Prvo, tokom spoljašnjeg kvara zasićenje može uzrokovati pojavu lažne diferencijalne struje i nepotrebno reagovanje zaštite. Drugo, kod unutrašnjih kvarova harmonici koji se pojavljuju usled zasićenja ST-a mogu odložiti delovanje diferencijalnih releja čiji rad se blokira usled prisustva viših harmonika.



Sl. 4.3 Talasni oblik sekundarne struje ST usled zasićenja a) opadajućom jednosmernom i naizmeničnom komponentom u primarnoj struji b) naizmeničnom komponentom u primarnoj struji

Ponašanje strujnih transformatora zavisi od njihovih karakteristika. U nastavku su izdvojene neke od bitnih karakteristika zasićenja ST-a [18]:

- 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-a. Tada sekundarna struja ST-a može sadržati opadajuću jednosmernu komponentu, parne i neparne harmonike (Sl. 4.3.a).

---

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

---

– Nakon iščezavanja opadajuće jednosmerne komponente ostaje zasićenje usled naizmenične komponente struje koje karakteriše prisustvo neparnih harmonika u sekundarnoj struji (Sl. 4.3.b).

Kao što je rečeno u glavi 2, da bi se osigurao pouzdan rad tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem ST-a tradicionalno se koristi karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom. Međutim, skorija istraživanja [37] skreću pažnju na to da ukoliko se rad diferencijalnog releja blokira usled prisustva viših harmonika, sigurnost od nepravilnog reagovanja tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem ST-a je upravo obezbeđena blokadom po višim harmonicima. Na osnovu prikazanih primera pokazano je da je tokom spoljašnjih kvarova sa zasićenjem ST-a relej bio blokiran zbog prisustva viših harmonika, dok drugi nagib nije imao udela u sprečavanju nepotrebnog reagovanja. S druge strane, upotrebom drugog nagiba može se smanjiti osetljivost tokom detekcije unutrašnjih kvarova. Treba imati u vidu i da je pravilan izbor drugog nagiba i prelomne tačke na karakteristici dosta komplikovan, čemu dosta doprinosi i nelinearna priroda zasićenja ST-a. U [37] je istaknuto da se u praksi često, usled nepostojanja adekvatnih uputstava, izbor drugog nagiba vrši tako da rad releja u odnosu na spoljašnje kvarove sa zasićenjem bude sigurniji nego što je potrebno. Ovo ima za posledicu to da tokom nekih unutrašnjih kvarova osetljivost i brzina mogu biti smanjeni.

Istraživanja i rezultati testova koje smo sproveli, i koji će biti prikazani u ovom poglavlju, pokazuju da bi u većini slučajeva blokada po višim harmonicima sprečila nepotrebno reagovanje zaštite. Međutim, postojali su slučajevi tokom kojih nivo harmonika nije bio dovoljno visok da bi blokada bila aktivirana, dok je diferencijalna struja bila dovoljno velika da izazove reagovanje diferencijalnog releja. Biće pokazano da se upotrebom algoritma baziranog na digitalnom faznom komparatoru ovaj nedostatak može otkloniti.

Prilikom analize rada diferencijalne zaštite ET-a i uticaja zasićenja ST-a u literaturi se izdvajaju dva pristupa. Prvi, ističe i oslanja se na to da do zasićenja neće doći ukoliko su ST-i pravilno odabrani i ukazuje na literaturu i uputstva za pravilan izbor ST-a. Dok drugi pristup, predlaže metode za prepoznavanje zasićenja. Ove metode uglavnom koriste komplikovane i/ili procesorski zahtevne proračune. Širu primenu su pronašle metode koje se baziraju na prisustvu viših harmonika u struji kvara ili metode

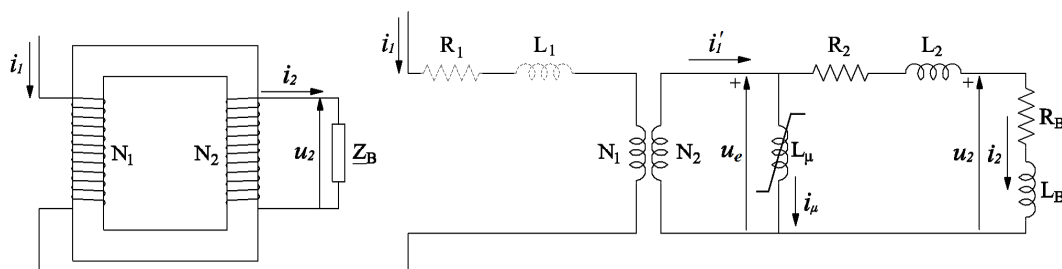
#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

koje određuju dužinu vremenskog intervala koji je protekao između pojave kvara i pojave diferencijalne struje [48,49]. Da bi se što preciznije odredila ova dva vremenska trenutka koriste se različite metode i tehnike, a najzastupljenija je primena *wavelet* metoda [48].

Imajući u vidu da usled bilo kakavog nedostatka ST-a, bilo da je loše odabran ili da je usled starenja izgubio karakteristike, može doći do njegovog nepravilnog rada tokom kvara, jasno je da tokom analize rada neke zaštitne funkcije treba uvažiti i ispitati uticaj zasićenja ST-a. Pojava zasićenja ST-a će rezultirati distorzijom sekundarne struje i pojavom viših harmonika, a u slučaju spoljašnjih kvarova i pojavom (lažne) diferencijalne struje. U nastavku će biti pokazano kako zasićenje ST-a utiče na diferencijalnu zaštitu ET-a tokom spoljašnjih i unutrašnjih KS-eva, i biće predložen novi algoritam koji se bazira na digitalnoj faznoj komparaciji. Upotrebom novog algoritma se može sprečiti nepotrebno reagovanje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih KS-eva praćenih zasićenjem ST-a.

##### 4.1.1 Model strujnog transformatora

Na Sl. 4.4 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,  $\underline{Z}_B$  je impedansa potrošača u sekundarnom kolu. Impedansa  $\underline{Z}_B$  obuhvata povezne vodove u sekundarnom kolu ST-a i sve uređaje koji su priključeni na posmatrani sekundarni namotaj [50].



Sl. 4.4 Strujni transformator i ekvivalentno kolo strujnog transformatora

Za simulaciju rada strujnih transformatora korišćen je model ST-a formiran na osnovu teorije objavljene uz *CT SAT Calculator* koji je preuzet iz publikacija *IEEE Power*

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

*System Relay Committee*. Cilj upotrebe ovog modela je da se dobiju signali struje tokom zasićenja ST-a, kojima će dalje biti testirano ponašanje algoritama za zaštitu ET-a. Potrebno je napomenuti da ovaj doktorat nema za cilj ispitivanje tačnosti korišćenog modela ST. Svi teorijski detalji u vezi sa modelom objavljeni su u [51, 52]. U nastavku je u kratkim crtama dato objašnjenje za upotrebu ovog modela.

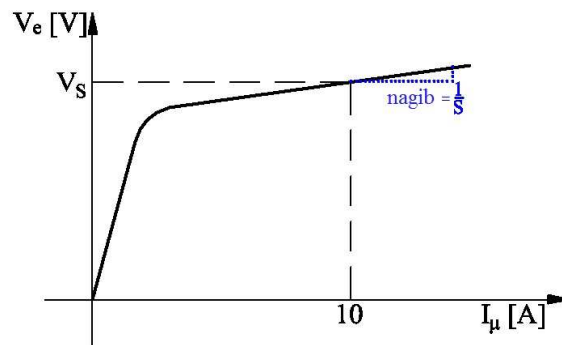
Da bi se pomoću ovog modela simulirao rad ST-a najpre je potrebno izabrati karakteristiku magnećenja. Karakteristika magnećenja za konkretan ST bi trebala da se dobije od proizvođača. Takođe, tipične karakteristike magnećenja se mogu pronaći u [53]. Nakon izbora odgovarajuće karakteristike magnećenja 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 (Sl. 4.5). Dalje, da bi mogla da se izvrši simulacija potrebno je znati sledeće vrednosti:

$R_2$  – otpornost sekundarnog namotaja strujnog transformatora;

$L_2$  – induktivnost rasipanja sekundarnog namotaja strujnog transformatora;

$R_B$  – otpornost potrošača;

$L_B$  – induktivnost potrošača.



Sl. 4.5 Određivanje parametara  $V_s$  i  $S$  za krivu magnećenja u modelu ST

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

$$i_\mu = A \cdot \text{sgn}(\lambda) \cdot |\lambda|^S, \quad (4.1)$$

$$A = \frac{10\omega^S}{(\sqrt{2}V_s)^S} \left( \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^{2S}(\omega t) dt} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

gde su:  $\lambda$  – fluks u jezgru ST-a, a koeficijent  $A$  – se može izračunati za svaku krivu magnećenja u zavisnosti od  $\omega=2\pi f$ , nagiba  $S$  i napona  $V_s$ .

---

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

---

Za kolo prikazano na Sl. 4.4 važi sledeća relacija:

$$u_e - (R_2 + R_B) \cdot (i_1' - i_\mu) - (L_2 + L_B) \cdot \frac{d}{dt} (i_1' - i_\mu) = 0 \quad (4.3)$$

gde su:

$u_e$  trenutna vrednost pobudnog napona ( $u_e = d\lambda/dt$ ),

$i_\mu$  trenutna vrednost struje magnećenja,

$i_1'$  trenutna vrednost primarne struje transformisane na sekundar.

Ako se usvoji da je  $N_1=1$  i  $N_2=N$  tada je:  $i_1' = i_1/N$ .

Ako se u relaciji (4.3) pretpostavi da je  $L_2=0$  i ako važi:

$$\frac{di_\mu}{dt} = \frac{di_\mu}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.4)$$

$$\frac{di_\mu}{d\lambda} = A \cdot S \cdot |\lambda|^{s-1} \quad (4.5)$$

Relacija (4.3) postaje:

$$\frac{d\lambda}{dt} \left[ 1 + L_B \cdot A \cdot S \cdot |\lambda|^{s-1} \right] = -(R_2 + R_B) \cdot i_\mu + (R_2 + R_B) \frac{i_1}{N} + L_B \frac{1}{N} \frac{di_1}{dt} \quad (4.6)$$

Vrednost struje na sekundaru ST-a se dobija pomoću izraza:

$$i_2 = i_1' - i_\mu \quad (4.7)$$

Korišćenjem krive magnećenja koja je korišćena u ovom modelu nije moguće eksplicitno zadati remanentni fluks, jer pri struji magnećenja jednakoj nuli fluks ne može biti različit od nule. Međutim, remanentni fluks se može aproksimirati tako što se pretpostavi da početna struja magnećenja nije jednaka nuli, već ima neku malu vrednost [52].

##### 4.1.2 Digitalno filtriranje viših harmonika i jednosmerne komponente

Imajući u vidu da kada su ST-i u zasićenju sekundarne struje sadrže više harmonike i jednosmernu komponentu, ovde će biti upoređeno ponašanje digitalnog faznog komparatora koji koristi filtrirane signale u odnosu na onaj koji koristi nefiltrirane signale. Ako se koristi filtriranje signala, u algoritmu nakon A/D konverzije signala bila bi izvršena diskretna Fourier-ova transformacija (DFT), zatim bi signali bili



#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

prilagođeni po amplitudi i fazi, i nakon toga propušteni kroz digitalni fazni komparator. Danas je gotovo u svim zaštitnim uređajima implementirano filtriranje signala DFT-om, a i sami algoritmi diferencijalne zaštite ET-a pored 50 Hz komponente diferencijalne i stabilizacione struje [21]. Za digitalno filtriranje je korišćen kosinusni Fourier-ov red, a dalje u algoritmu je korišćena kosinusna komponenta signala (4.8). Kosinusna komponenta signala je u fazi sa originalnim signalom [4].

$$i_s(m) = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m i_s(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (4.8)$$

gde je  $i_s(m)$  -  $m$ -ti kosinusni odbirak signala struje.

Matematički proces izračunavanja kosinusne komponente u algoritmu se može uprostiti uvođenjem vektora koji sadrži unapred izračunate vrednosti kosinusa. Na taj način se proces proračuna svodi na manje množenja i sabiranja. Vektor kosinusa za prvi harmonik signala je:

$$[COS] = \frac{2}{m} \cdot \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{m}\right), \cos\left(2 \frac{2\pi}{m}\right), \dots, \cos\left((m-1) \frac{2\pi}{m}\right), 1 \right]. \quad (4.9)$$

#### 4.2 Testiranje algoritama za zaštitu ET-a

Ovde će biti upoređen rad diferencijalne zaštite ET-a i zaštite koja se bazira na posmatranju indeksa usmerenosti tokom kvarova unutar i van štice zone ET-a koji su praćeni zasićenjem ST-a.

Na Sl. 3.28 je prikazan model mreže pomoću koga su kompjuterskim simulacijama generisani potrebni signali. Trofazni transformator 110 kV/110 kV je sprege YNyn, parametri elemenata mreže dati su u poglavlju 3.4.1. Pomoću ovog modela simulirani su jednofazni kratki spojevi van štice zone na primarnoj strani, levo od strujnog transformatora ST<sub>A</sub>, i jednofazni kratki spojevi unutar štice zone na sekundarnim priključcima ET-a. U cilju dobijanja struja kvara koje imaju različitu opadajuću jednosmernu komponentu izvršeno je više simulacija sa različitim vremenskim trenutcima nastajanja kvara. Nakon izvršenih simulacija, dobijeni signali su propušteni kroz model ST-a koji je opisan u poglavlju 4.1.1. Na taj način dobijene su struje na sekundarima ST-a kojima je testiran rad algoritama za zaštitu ET-a.

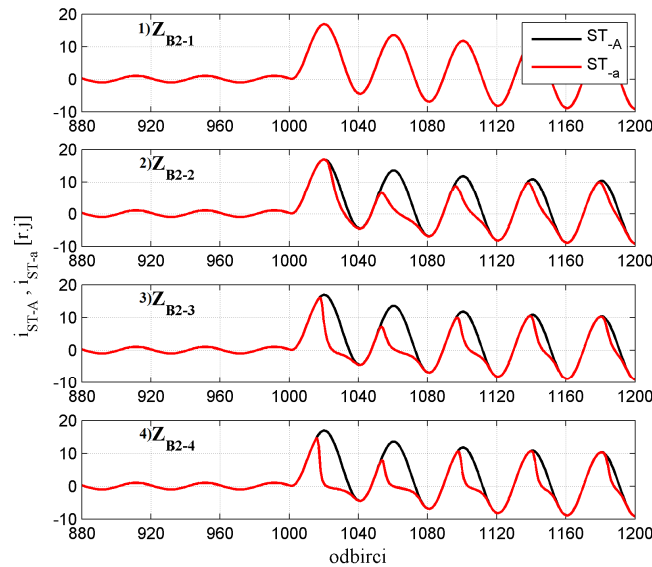
Ponašanje strujnih transformatora zavisi kako od njihovih karakteristika tako i od njihovog opterećenja [54]. Tokom svih simulacija strujni transformator  $ST_A$  na strani primara ET-a je verno preslikavao struju na svoj sekundar, dok je strujni transformator  $ST_a$  na strani sekundara ET-a izabran tako da mu karakteristika bude lošija nego što bi trebalo. U cilju dobijanja različitih nivoa zasićenja na sekundaru  $ST_a$  dodatno su menjane vrednosti opterećenja  $\underline{Z}_{B2}$ . Simulirano je 5 kvarova unutar i 5 kvarova van štícene zone, a za svaki od kvarova rad  $ST_a$  je simuliran po četiri puta sa različitim opterećenjem u sekundarnom kolu (4.10). Dakle, iz ugla testiranih algoritama ukupno je posmatrano 40 različitih slučajeva. Tokom svih simulacija rada  $ST_a$  kada je opterećenje  $\underline{Z}_{B2}$  bilo jednako nominalnom,  $ST_a$  je korektno preslikavao primarnu struju na sekundar. Tokom simulacija sa većim impedansama  $\underline{Z}_{B2}$  u sekundarnom kolu  $ST_a$  je ulazio u zasićenje.

$$\underline{Z}_{B2-1} = \underline{Z}_{B2n}, \underline{Z}_{B2-2} = 2 \cdot \underline{Z}_{B2n}, \underline{Z}_{B2-3} = 3 \cdot \underline{Z}_{B2n}, \underline{Z}_{B2-4} = 4 \cdot \underline{Z}_{B2n}, \quad (4.10)$$

gde je  $\underline{Z}_{B2n}$  – nominalno opterećenje sekundarnog kola strujnog transformatora  $ST_a$ .

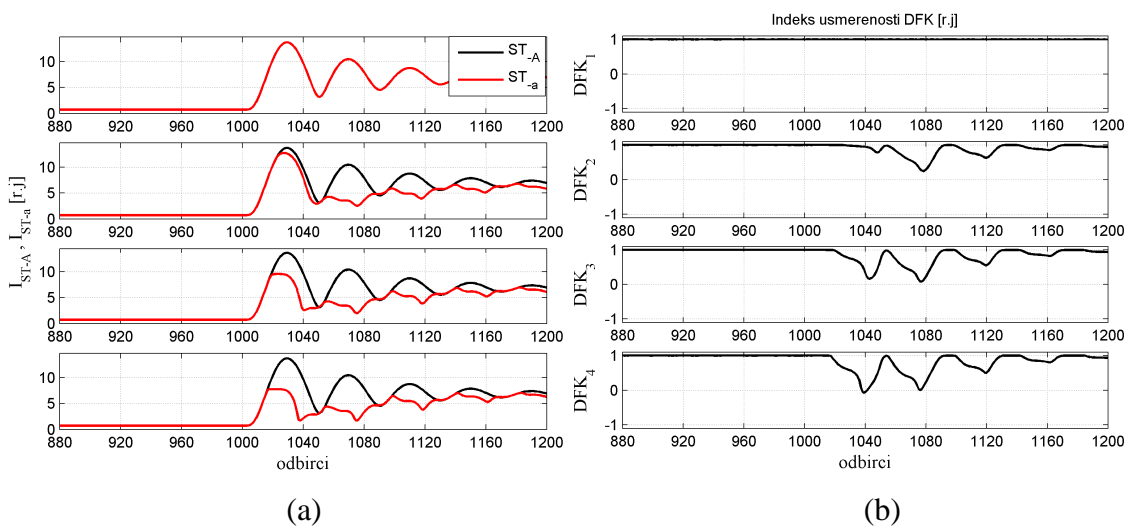
Sl. 4.6 prikazuje talasne oblike sekundarnih struja strujnih transformatora u fazi sa kvarom za jedan slučaj spoljašnjeg KS-a i različita opterećenja sekundara  $ST_a$  (4.10). Broj odbiraka u periodu osnovnog signala je  $m=40$ . Trenutak kvara za primere prikazane na slici odgovara 1000–tom odbirku. Vidi se da struja sekundara  $ST_a$  ulazi u zasićenje kada je impedansa  $\underline{Z}_B$  različita od nominalne, i to posmatrajući slike 2) - 4) za 11 ms, 9 ms i 8 ms od trenutka nastanka kvara, respektivno.

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

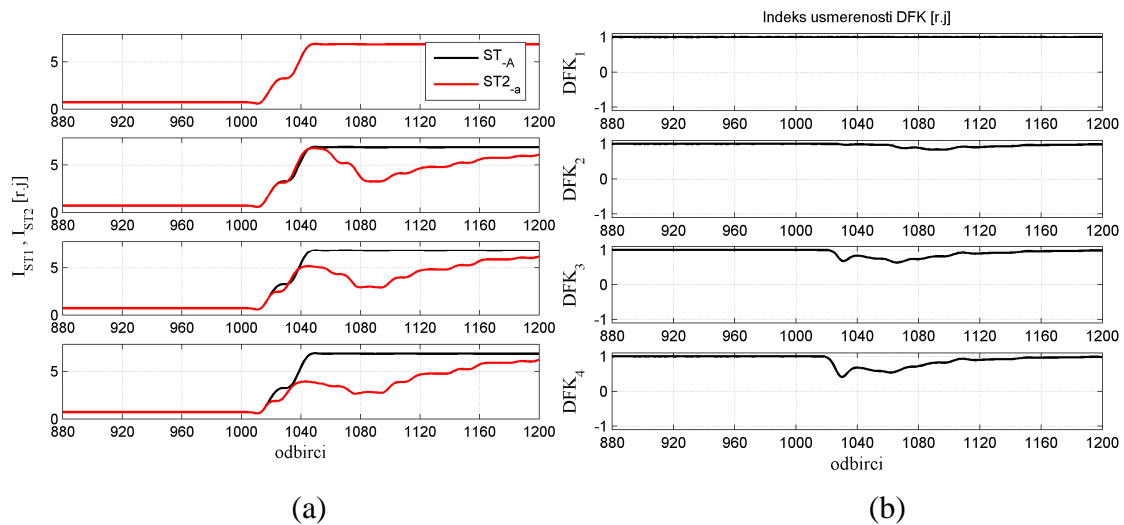


Sl. 4.6 Talasni oblici sekundarnih struja ST-a za različita opterećenja ST-a u fazi sa kvarom

Sl. 4.7 i Sl. 4.8 pod (a) prikazuju efektivne vrednosti struja i indekse usmerenosti kada su korišćeni nefiltrirani signali i kada su korišćeni signali filtrirani DFT-om, a na slikama (b) su dati indeksi usmerenosti. Jasno se uočava da vrednost indeksa usmerenosti izračunata pomoću nefiltriranih signala osciluje u periodu kada je prisutno zasićenje  $ST_{-a}$ , kao i da indeks usmerenosti izračunat pomoću filtriranih signala daje dosta stabilniju vrednost. Tako da ćemo u nastavku za potrebe digitalne fazne komparacije koristiti signale filtrirane DFT-om.



Sl. 4.7 (a) Efektivne vrednosti struja i (b) indeksi usmerenosti kada su signali nefiltrirani



Sl. 4.8 (a) Efektivne vrednosti struja i (b) indeksi usmerenosti kada su signali filtrirani

#### 4.2.1 Algoritam za blokadu nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite

Rezultati predstavljeni u predhodnom poglavlju ukazuju na to da bi se upotrebom DFK-a moglo izbeći nepotrebno reagovanje diferencijalne zaštite. Ovde će biti prikazan algoritam koji bi mogao da se koristi kao dodatni kriterijum diferencijalne zaštite, a čija funkcija bi bila da se izbegne nepotrebno reagovanje pri spoljašnjim kratkim spojevima. Koraci algoritma čija je blok šema prikazana na Sl. 4.12 su:

Korak 1:

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

Korak 2:

- Nakon uzimanja svakog novog odbirka, kontinuirano se proračunava kosinusna Fourier-ova komponenta (4.8).

Korak 3:

- Zatim se proračunate vrednosti kosinusne Fourier-ove komponente smeštaju u posebne vektore dužine  $m/2$ , gde je  $m$  paran broj odbiraka u jednoj periodi signala.

Na taj način za svaku fazu formiraju se po dva pomoćna vektora:

$$[i_p(1) \ i_p(2) \ i_p(3) \ \dots \ i_p(m/2-1) \ i_p(m/2)] \quad (4.11)$$

---

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

---

$$[i_s(1) \ i_s(2) \ i_s(3) \ \dots \ i_s(m/2-1) \ i_s(m/2)] \quad (4.12)$$

gde su:

$i_p(n)$  – n-ti kosinusni odbirak struje na primarnoj strani transformatora;

$i_s(n)$  – n-ti kosinusni odbirak struje na sekundarnoj strani transformatora.

Nakon proračuna nove vrednosti kosinusne Fourier-ove izvršava se aktualizacija vektora tako što se najstariji član, sa indeksom 1 odbaci, ostali članovi se "pomere" za jednu poziciju ulevo, indeksi im se smanje za jedan, a nova vrednost se upiše na poslednju poziciju i dodeli joj se indeks  $m/2$ .

Nakon toga vrši se proračunavanje potrebnih pokazatelja efektivnih vrednosti  $I_p$  i  $I_s$ , i indeksa usmerenosti  $DFK(r.j.)$  pomoću izraza (3.6) i (3.7).

Korak 4:

- Zatim se posmatra da li su pokazatelji efektivnih vrednosti struja na primaru i sekundaru veći od definisane granične vrednosti. Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na naredni korak, u suprotnom se vraća na početak. Granična vrednost struje sa kojom se porede pokazatelji efektivnih vrednosti je podešena na 120% nominalne vrednosti struje transformatora.

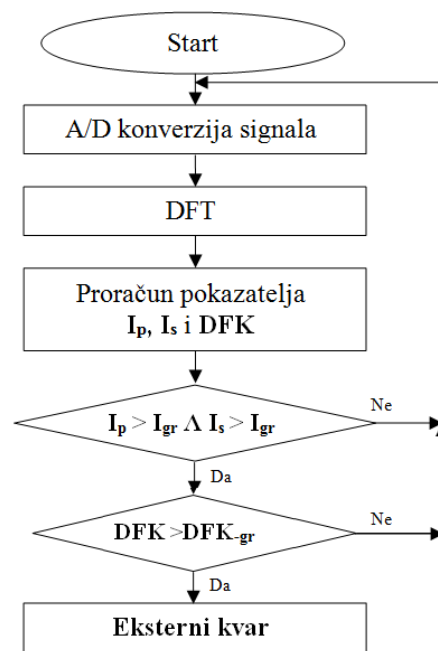
Korak 5:

- U ovom koraku se posmatra da li je vrednost indeksa usmerenosti  $DFK(r.j.)$  veća od definisanog praga  $DFK_{gr}$ .

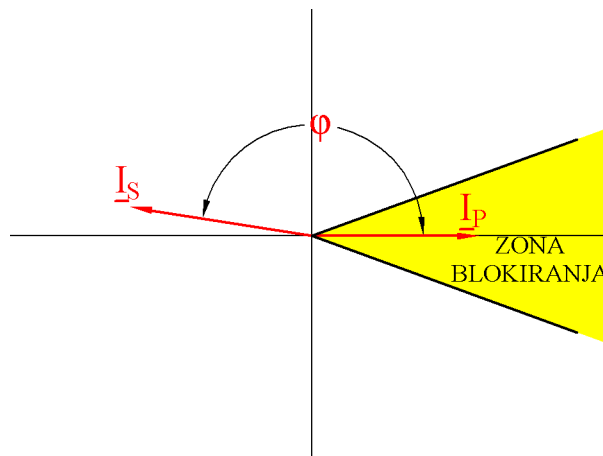
U algoritmu koji je ovde testiran podešeno je  $DFK_{gr} = 0,94$  r.j. Ako je ispunjen uslov (4.13), odnosno ako je indeks usmerenosti veći od podešene granične vrednosti, fazni pomeraj ( $\varphi$ ) između struja primara i sekundara se nalazi u sledećim granicama:  $340^\circ < \varphi < 20^\circ$  (Sl. 4.10). Ovo bi ukazivalo na to da je moguće prisustvo spoljašnjeg kvara i signal za blokiranje bi bio aktiviran, u suprotnom algoritam se vraća na početak.

$$DFK > DFK_{gr} \quad (4.13)$$

Na osnovu rezultata dobijenih simulacijama u okviru glave 3, iz Tab. 3.2 se može očitati da su vrednosti indeksa usmerenosti, kada je opterećenje ET-a sprege YNyn pre kvara bilo nominalno, za KS 5% navojaka na primaru i sekundaru jednake 0,73 i 0,5862, respektivno, a za opterećenje ET-a od  $1,25S_{nT}$  ovi indeksi iznose 0,795 i 0,7166. Tako da je granična vrednost indeksa izabrana na strani sigurnosti.



Sl. 4.9 Blok šema algoritma za prepoznavanje eksternog kvara

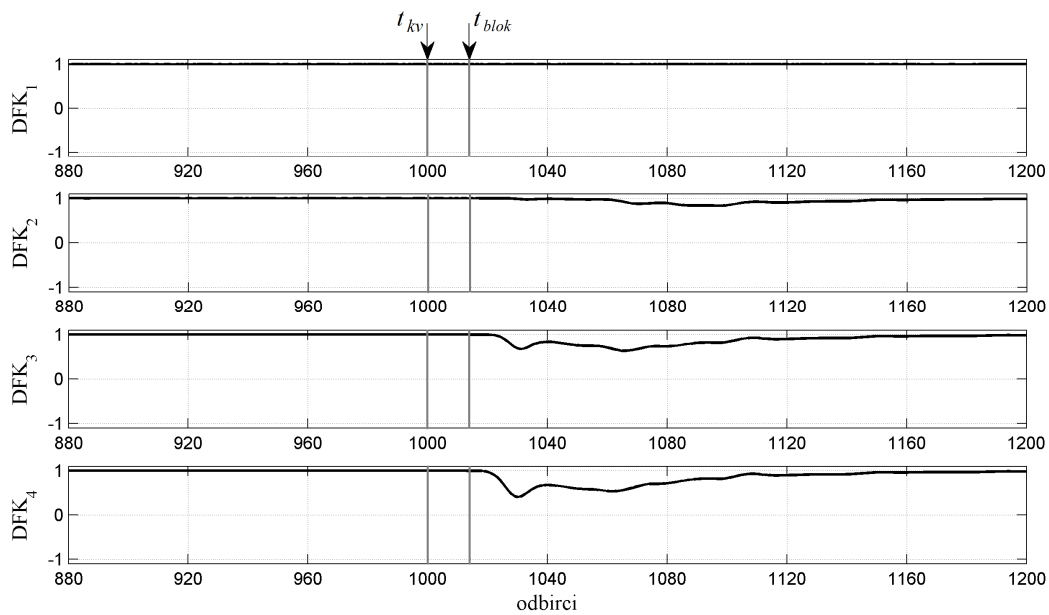


Sl. 4.10 Karakteristika reagovanja

Predstavljeni algoritam je testiran pomoću odbiraka sekundarnih struja strujnih transformatora u fazi sa kvarom za jedan slučaj spoljašnjeg KS-a i različita opterećenja sekundara ST<sub>a</sub>. Talasni oblici struja pomoću kojih je testiran algoritam su prikazani na Sl. 4.6. Na Sl. 4.11 prikazani su proračunati indeksi usmerenosti u fazi sa kvarom. Ovi indeksi su već prikazani na Sl. 4.8.(b). Broj odbiraka u periodu osnovnog signala je  $m=40$ . Trenutak kvara ( $t_{kv}$ ) za primere prikazane na slici odgovara 1000-tom odbirku. Na slici su sa ( $t_{blok}$ ) označeni trenuci kada je aktiviran signal za blokadu nepotrebnog

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

reagovanja diferencijalne zaštite. Signal za blokadu je aktiviran kada su pokazatelji efektivnih vrednosti struja na primaru i sekundaru bili veći od definisane granične vrednosti (120% nominalne vrednosti struje transformatora) i kada je indeks usmerenosti bio veći od definisane granične vrednosti  $DFK > 0,94$  r.j. Može se uočiti da je signal za blokadu, u slučajevima kada je postojalo zasićenje  $ST_a$ , aktiviran pre pojave zasićenja. Takođe, u sva četiri slučaja signal za blokadu je aktiviran 7 ms (14 odbiraka) nakon uspostavljanja KS-a.



Sl. 4.11 Indeksi usmerenosti u fazi sa kvarom

#### 4.2.2 Poređenje različitih algoritama za zaštitu ET-a

Pomoću 40 različitih slučajeva koji su opisani na početku poglavlja 4.2 testiran je rad sledećih algoritama za:

- 1) **Stabilizovanu diferencijalnu zaštitu ET-a.** Korišćena je karakteristika reagovanja sa jednim nagibom (Sl. 2.2), gde su:  $I_d$  – komponenta osnovne frekvencije diferencijalne struje,  $I_s$  – komponenta osnovne frekvencije stabilizacione struje,  $I_{d,min}=0,3$  r.j. ,  $I_{s,1}=1$  r.j., nagib  $m=0,2$  i vrednost  $k=0,5$  u relaciji (2.2).
- 2) **Stabilizovane diferencijalne zaštite blokirane usled prisustva viših harmonika.** Rad zaštite iz prethodne tačke će biti blokiran u slučaju prisustva

---

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

---

viših harmonika, i to drugog, trećeg, četvrtog i petog. Granice svih navedenih harmonika su podešene na 15%.

**3) Algoritma za blokadu nepotrebnog reagovanja stabilizovane diferencijalne zaštite** tokom spoljašnjih KS-eva, koji se bazira na digitalnom faznom komparatoru. Indeks usmerenosti je izračunat pomoću signala filtriranih DFT-om. U svim primerima izračunata vrednost indeksa usmerenosti je poređena sa graničnom vrednosti  $DFK_{gr} = 0,94$  r.j. Ukoliko bi njegova vrednost bila veća od zadanog praga, fazni pomeraj ( $\varphi$ ) između struja primara i sekundara bi se nalazio u sledećim granicama:  $340^\circ < \varphi < 20^\circ$ , što bi ukazivalo na to da relej ne treba da reaguje.

Za svaki kvar prikazana su vremena reagovanja zaštita 1) i 2) na Sl. 4.12. Provereno je i da li novi algoritam za blokadu utiče na rad diferencijalne zaštite tokom unutrašnjih kvarova. Sl. 4.12 prikazuje i vremenski trenutak kada indeks usmerenosti DFK pređe iz zone blokiranja u zonu reagovanja.

Na apscisi su označeni unutrašnji kvarovi (in1, in2, in3, in4 i in5) i za svaki od njih četiri različita slučaja opterećenja  $ST_a$  (1, 2, 3 i 4). Ordinata pokazuje vreme reagovanja, a ukoliko za neki kvar nije ucrtano vreme to znači da odgovarajući algoritam u tom primeru ne bi reagovao.

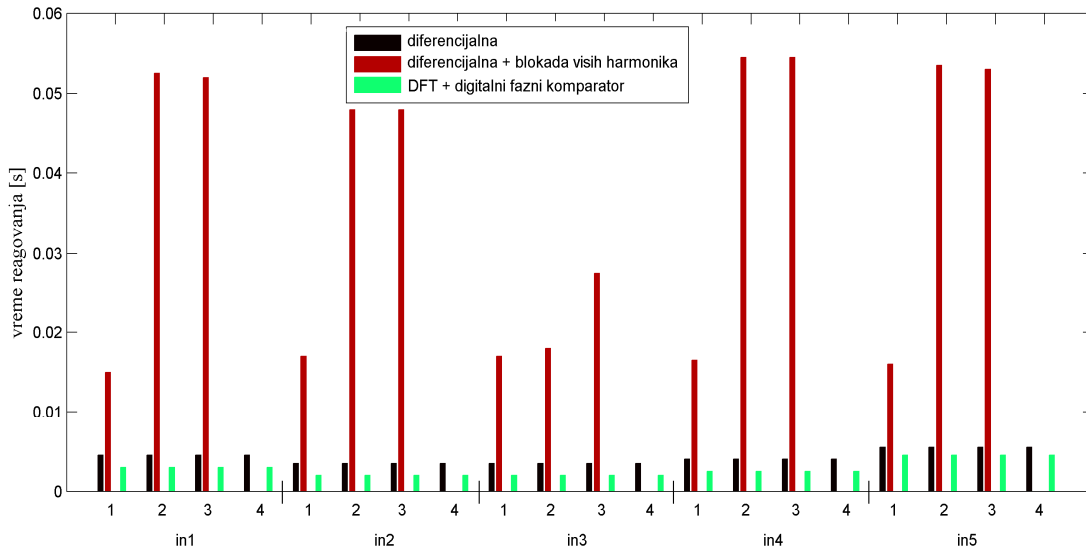
Može se uočiti da bi tokom svih analiziranih unutrašnjih kvarova diferencijalna zaštita reagovala u okviru 5,5 ms. Ako bi diferencijalna zaštita bila blokirana usled prisustva viših harmonika, tada bi u slučajevima kada je  $ST_a$  korektno preslikavao primarnu struju (in1-1, in2-1, in3-1, in4-1 i in5-1) zaštita reagovala u okviru 20 ms. Dok bi u slučajevima sa zasićenjem  $ST_a$  zaštiti trebalo više od 50 ms da reaguje, dok bi pri (in1-4, in2-4, in3-4, in4-4 i in5-4) usled izraženog prisustva viših harmonika zaštita bila blokirana i uopšte ne bi reagovala.

Novi algoritam tokom unutrašnjih kvarova ni u jednom primeru nije aktivirao signal za blokadu. Vreme koje je bilo potrebno indeksu usmerenosti da izađe iz zone blokiranja, kada algoritam dozvoljava diferencijalnoj zaštiti da reaguje, kreće se od 2 ms do 4,5 ms od trenutka nastanka kvara. Na Sl. 4.12 treba uočiti da je u svim primerima indeks usmerenosti ušao u zonu reagovanja pre nego što je diferencijalna zaštita



#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

reagovala. Iz čega se može zaključiti da algoritam za blokiranje zaštite ne bi ometao rad diferencijalne zaštite tokom unutrašnjih KS-eva.



Sl. 4.12 Unutrašnji KS - Vremena reagovanja testiranih algoritama za zaštitu ET-a

Na ordinati Sl. 4.13 su prikazana vremena kada je bio aktiviran signal za blokadu tokom spoljašnjih kvarova, kao i vremena nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite. Ukoliko za neki kvar nije ucrtano vreme to znači da odgovarajući algoritam u tom primeru ne bi reagovao. Na apscisi su spoljašnji kvarovi označeni sa (out1, out2, out3, out4 i out5) za različita opterećenja  $ST_a$  (1, 2, 3 i 4).

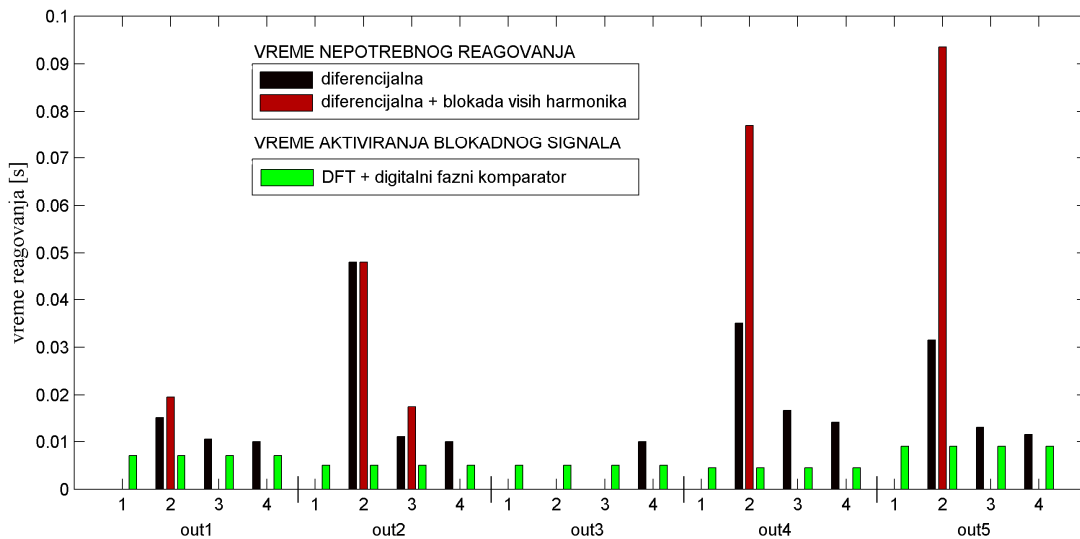
Tokom spoljašnjih KS-eva kada je  $ST_a$  korektno preslikavao primarnu struju (out1-1, out2-1, out3-1, out4-1 i out5-1) diferencijalna zaštita je korektno radila. Dok se za spoljašnje kvarove prećene zasićenjem  $ST_a$  može uočiti da diferencijalna zaštita u nekim slučajevima nepravilno reaguje. Ako se koristi 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 (out1-2, out2-2, out2-3, out4-2 i out5-2).

Signal za blokadu generisan predstavljenim novim algoritmom je aktiviran za svaki spoljašnji kvar, a vreme aktiviranja signala blokade se kreće od 4,5 ms do 9 ms od trenutka nastanka KS-a. Ono što je bitno uočiti jeste da je blokada svaki put aktivirana

#### 4. Unapređenje diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova primenom DFK

pre nego što je diferencijalni relej doneo odluku za (nepotrebno) reagovanje. Tako da bi upotrebom blokade koja je predložena bilo sprečeno pogrešno reagovanje diferencijalne zaštite.

Treba imati u vidu da se upotrebom Fourier-ovog filtra uvodi dodatno kašnjenje u konvergenciji od 20 ms. Takođe, treba imati u vidu i da vreme aktiviranja blokadnog signala nije isto što i vreme konvergencije. U posmatranim primerima, vreme aktiviranja blokadnog signala zavisi od podešene granične vrednosti indeksa usmerenosti i podešene granične vrednosti struja ( $I_{gr}$ ). Algoritam aktivira blokadni signal kada indeks i efektivne vrednosti struja pređu podešene granične vrednosti. U svim primerima, algoritam je aktivirao signal blokade na osnovu neiskonvergiranih vrednosti indeksa usmerenosti i pokazatelja efektivnih vrednosti struja u okviru od 4,5 ms do 9 ms od trenutka nastanka KS-a.



Sl. 4.13 Spoljašnji KS - Vremena (nepotrebno) reagovanja diferencijalne zaštite i aktiviranja blokadnog signala DFK

### **4.3 Zaključak**

Algoritam koji je predstavljen mogao bi se koristiti kao dopunski kriterijum za rad diferencijalne zaštite. Korišćen je novi pristup u rešavanju problema nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite ET-a usled kvarova van štice zone zbog zasićenja ST-a. Novi pristup se zasniva na faznoj komparaciji primarne i sekundarne struje ET-a i služi za indikaciju prisustva kvara van štice zone.

Prikazani rezultati potvrđuju da algoritam može da identifikuje prisustvo spoljašnjeg kvara i aktivira signal za blokadu pre nego što ST-i uđu u zasićenje. Njegovom primenom uspešno bi se moglo eliminisati nepotrebno delovanje diferencijalne zaštite i na taj način povećala njena sigurnost.

## 5. ZEMLJOSPOJNA ZAŠTITA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Trenutno jedna od najzastupljenijih zaštita energetskog transformatora (ET-a) od unutrašnjih kvarova jeste fazna diferencijalna zaštita. U velikom broju slučajeva ona obezbeđuje zadovoljavajući nivo pouzdanosti i sigurnosti u radu. Međutim, fazna diferencijalna zaštita nije dovoljno osetljiva da detektuje unutrašnji jednofazni kratak spoj ukoliko se kvar nalazi u blizini neutralne tačke transformatora ili ako je struja zemljospoja ograničena [25].

Ukoliko je zvezdište transformatora uzemljeno preko niskoomske impedanse fazna diferencijalna zaštita ne štiti ceo namotaj transformatora od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva. Da bi se prevazišao pomenuti problem koristi se zemljospojna zaštita transformatora. Ova zaštita se izvodi posebno za primarni i sekundarni namot transformatora zbog čega se u literaturi često naziva ograničenom zemljospojnom zaštitom.

Ograničena zemljospojna zaštita reaguje u slučaju pojave jednofaznog kratkog spoja na uzemljenom namotaju transformatora. Takođe, ova zaštita se može primeniti i na namotaj spregnut u trougao ukoliko je transformator za uzemljenje instaliran između namotaja spregnutog u trougao i strujnih transformatora. Za dobijanje veštačkog zvezdišta može se koristiti i prigušnica za uzemljenje (sprege cik-cak).

Istorijski posmatrano, u početku je bio dostupan visoko-impedansni zemljospojni relej. Visoko-impedansni relej za zemljospojnu zaštitu transformatora ima određeni stepen otpornosti na zasićenja ST-a. Međutim, upotreba ovog releja zahteva posebnu pažnju prilikom izbora ST-a jer je potrebno da: odnos broja navojaka faznih ST-a i ST u neutralnom provodniku budu isti, karakteristike magnećenja ST-a budu približno iste i da ST-i imaju približno iste i visoke vrednosti napona na kolenu karakteristike magnećenja. Danas su u širokoj upotrebi numerički (nisko-impedansni) zemljospojni releji. Veoma važna prednost ovih releja je činjenica da karakteristike i odnos broja navojaka faznih ST-a, kao i ST u neutralnom provodniku ne moraju biti isti. Međutim, ovaj relej je sklon nepotrebnom reagovanju ukoliko dođe do zasićenja ST-a tokom

spoljašnjih kvarova ili uključenja transformatora. Rad ovog releja se može poboljšati korišćenjem neke od metoda koje posmatraju prisustvo viših harmonika [26, 27], funkciju smera [26, 28, 29, 33, 34], ili metodu adaptivne stabilizacije struje.[35, 36].

Pri pojavi kvara van štice zone zaštite ili prilikom uključenja neopterećenog transformatora u slučaju zasićenja ST-a pojaviće se nulta diferencijalna struja koja može uzrokovati nepotrebno reagovanje zemljospojne diferencijalne zaštite transformatora.

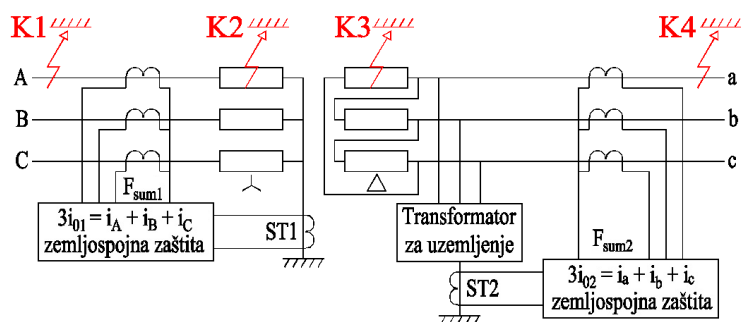
Ovde treba imati u vidu da uključenje ET-a ima različit uticaj na faznu diferencijalnu zaštitu (FDZ) i na ograničenu zemljospojnu zaštitu baziranu na diferencijalnom principu. Dok se kod FDZ tokom uključenja neopterećenog ET-a javlja diferencijalna struja, kao posledica razlike primarne i sekundarne struje, kod ograničene zemljospojne zaštite se nulta diferencijalna struja ne javlja, jer je suma faznih struja jednaka struji kroz neutralni provodnik. Do pojave lažne nulte diferencijalne struje tokom uključenja ET-a u slučaju ograničene zemljospojne zaštite dolazi ukoliko neki od ST-a uđe u zasićenje.

U ovoj disertaciji razvijen je algoritam koji se bazira na primeni funkcije usmerenosti zasnovane na digitalnom faznom komparatoru, čijom primenom bi ograničena zemljospojna zaštita bila poboljšana. U cilju provere i verifikacije predložene metode sproveden je niz eksperimenata i simulacija. Na taj način dobijeni su signali kojima je testiran rad predloženog algoritma.

### **5.1 Koncept primene fazne komparacije u zemljospojnoj zaštiti**

Na Sl. 5.1 je prikazana tipična šema zemljospojne zaštite transformatora sprege YNd [4]. Pri jednofaznom kratkom spoju van transformatora (K1) na strani namotaja spregnutog u zvezdu, suma faznih struja jednaka je struji kroz strujni transformator ST1, tako da je diferencijalna struja mala. Pri jednofaznom kratkom spoju u transformatoru (K2) suma faznih struja i struja kroz ST1 su različite, te je diferencijalna struja velika. Isto tako, na strani namotaja spregnutog u trougao pri spoljašnjem kvaru (K4) suma struja na priključcima ET-a jednaka je struji kroz strujni transformator ST2. Dok su pri unutrašnjem kvaru K3 suma struja na priključcima ET-a i struja kroz ST2 različite.

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora



Sl. 5.1 Tipična šema zemljospojne zaštite transformatora sprege YNd

Takođe, pri zemljospojevima K1 i K2 smer nulte struje kroz zvezdište odnosno kroz ST1 je isti, ali je smer zbira faznih struja kroz filter  $F_{sum1}$  suprotan za pomenuta dva kvara. Tako da se primenom usmerenog zemljospojnog releja mogu razlikovati kvarovi u transformatoru od kvarova van transformatora. Isto važi i za kvarove (K3) i (K4) na strani trougla.

Nulta struja koja je potrebna za rad zemljospojne zaštite se može meriti direktno upotrebom filtra nulte struje sastavljenog od tri ST-a ili upotrebom obuhvatnog kablovskog ST-a, ukoliko postoji mogućnost za njegovu montažu. Osim direktnog merenja, trostruka nulta struja se može izračunati kao suma struja koje su izmerene na priključcima ET-a. Zaštita ET-a najčešće obuhvata nekoliko jedinica, među kojima su diferencijalni releji i zemljospojni releji. Za rad diferencijalnog releja potrebno je meriti struje na priključcima ET-a. Tako da u slučaju kada su dostupne (izmerene) vrednosti struja na priključcima ET-a, nulta struja koja je potrebna za rad zemljospojne zaštite se može izračunati.

Ako posmatramo zemljospojnu zaštitu transformatora baziranu na diferencijalnom principu pri pojavi spoljašnjeg jednofaznog kratkog spoja praćenog zasićenjem strujnih transformatora (ST) pojaviće se diferencijalna struja koja može imati značajne vrednosti i zaštita može nepotrebno reagovati.

Takođe, još jedan razlog koji može dovesti do nepotrebno reagovanja ograničene zemljospojne zaštite je zasićenje ST-a tokom uključanja neopterećenog transformatora. Talasni oblik, vrednosti i trajanje udarne struje uključanja zavise od više faktora među kojima su remanentni fluks i početna faza napona u trenutku uključanja [18]. Struja magnetčenja sadrži znatan nivo viših harmonika i opadajuću jednosmernu komponentu.

ST-i mogu ući u zasićenje usled prisustva sporoopadajuće jednosmerne komponente, visoke amplitude struje kvara, remanentnog fluksa u jezgru ST ili kombinacije svega nabrojanog.

Da bi se poboljšao rad ograničene zemljospojne zaštite bazirane na diferencijalnom principu, pri eksternim kvarovima ili uključenju transformatora praćenim zasićenjem ST-a, koriste se razne metode za nadgledanje smera kombinovane sa blokadom usled prisustva viših harmonika [26, 28, 29]. Nepotrebno reagovanje tokom uključenja transformatora obezbeđuje se nadgledanjem nivoa drugog harmonika u struji neutralnog provodnika. Ukoliko je nivo veći od podešenog ograničeni zemljospojni relej se blokira.

Međutim, loša osobina blokade drugim harmonikom je unošenje kašnjenja u delovanje zaštite, pa štice element može biti izložen kvaru nepotrebno dugo. Isto tako, i pri unutrašnjim kvarovima transformatora nivo drugog harmonika može biti visok [8,16], pa bi u tim slučajevima relej bio nepotrebno blokiran. Uočeno je i da u je u struji uključenja transformatora novijih generacija, čije je jezgro izrađeno od amorfnih materijala sa malim gubicima, sadržaj drugog harmonika znatno niži, dok amplitude mogu biti dosta velike [8]. Moglo bi se dogoditi da prilikom uključenja transformatora, relej ne bi bio blokiran usled niskog nivoa drugog harmonika, a usled velikih vrednosti struje uključenja strujni transformator bi ušao u zasićenje i ograničena zemljospojna zaštita bi nepotrebno reagovala.

Metoda koja će biti opisana u ovoj glavi služi da se izbegne nepotrebno reagovanje ograničenog zemljospojnog releja. U svim sprovedenim laboratorijskim testovima i kompjuterskim simulacijama, pokazalo se da je predloženi metod robustan i pogodan za primenu u slučaju zasićenja ST-a. Metoda se bazira na primeni indeksa usmerenosti koji je proračunat na polovini periode signala. Sa stanovišta sigurnosti i pouzdanosti pogodno je što se indeks usmerenosti proračunava pomoću odbiraka signala uzetih iz prozora podataka dužine polovine periode signala. Na taj način se smanjuje uticaj malih ili kratkotrajnih smetnji na tačnost proračuna. Nova metoda ne koristi blokadu po višim harmonicima što povećava brzinu reagovanja.

## 5.2 Algoritam za zemljospojnu zaštitu baziran na faznoj komparaciji u vremenskom domenu

Algoritam koji će biti opisan namenjen je zaštiti jednog namotaja transformatora. Ovde ćemo posmatrati visokonaponski namotaj. Signal reagovanja bi se na isti način formirao i za niskonaponski namotaj transformatora.

Na ulaz algoritma se dovode odbirci četiri struje:

- tri struje izmerene na priključcima ET-a ( $i_A$ ,  $i_B$  i  $i_C$ ) i
- struje neutralnog provodnika ( $i_G$ ).

S obzirom da algoritam radi na bazi fazne komparacije usaglašavanje struja po amplitudi nije neophodno. Struktura algoritma prikazana je na Sl. 5.2. Mogu se uočiti sledeći algoritamski koraci:

Korak 1:

- U prvom koraku vrši se *A/D konverzija signala*. Sa zadatom periodom odabiranja odbirci svih ulaznih signala smeštaju se u posebne vektore dužine  $m/2$ , gde je  $m$  paran broj odbiraka u jednoj periodu signala. Na taj način formiraju se (4) pomoćna vektora.
- Nakon uzimanja svakog novog odbirka izvršava se aktualizacija vektora tako što se najstariji član, sa indeksom  $1$  odbaci, ostali članovi se "pomere" za jednu poziciju ulevo, indeksi im se smanje za jedan, a novi član se upiše na poslednju poziciju i dodeli mu se indeks  $m/2$ .

Korak 2:

- Rad algoritma zahteva proračun sledećih pokazatelja:
- Prvo, suma struja izmerenih na priključcima ET-a i struja neutralnog provodnika se dobijaju pomoću sledećih izraza:

$$3i_0(k) = i_A(k) + i_B(k) + i_C(k) \quad (5.1)$$

$$i_G(k) = i_G(k) \quad (5.2)$$

Korak 3:

- Zatim se na osnovu izraza (3.6) - (3.7) proračunavaju sledeći pokazatelji:

$3I_0$  - rms pokazatelj za ( $3i_0$ ),

$I_G$  - rms pokazatelj za ( $i_G$ ) i



DFK (r.j.) –indeks usmerenosti.

Korak 4:

- Proverava se da li je vrednost pokazatelja ( $I_G$ ) veća od podešene granične vrednosti. Ukoliko je izraz (5.3) ispunjen algoritam prelazi na sledeći korak, u suprotnom vraća se na korak 1.

$$I_G > I_{G-gr} \quad (5.3)$$

- Uslov (5.3) obezbeđuje sigurnost u odnosu na zasićenja faznih ST-a koja potiču od eksternih kvarova bez kontakta sa zemljom: dvofazni kvar ili trofazni kvar.
- Poznato je da će struja teći kroz neutralni provodnik u slučaju prisustva kvara sa zemljom, pa je zgodno uvesti uslov koji omogućava rad zemljospojne zaštite samo ako je struja u neutralnom provodniku prešla graničnu vrednost.
- Granična vrednost se bira tako da bude veća od nulte struje izazvane opterećenjem, neusklađenošću ST-a ili bilo kog drugog debalansa. Tipična vrednost na koju se podešava  $I_{G-gr}$  jednaka je 5% nominalne struje ET-a [26].

Korak 5:

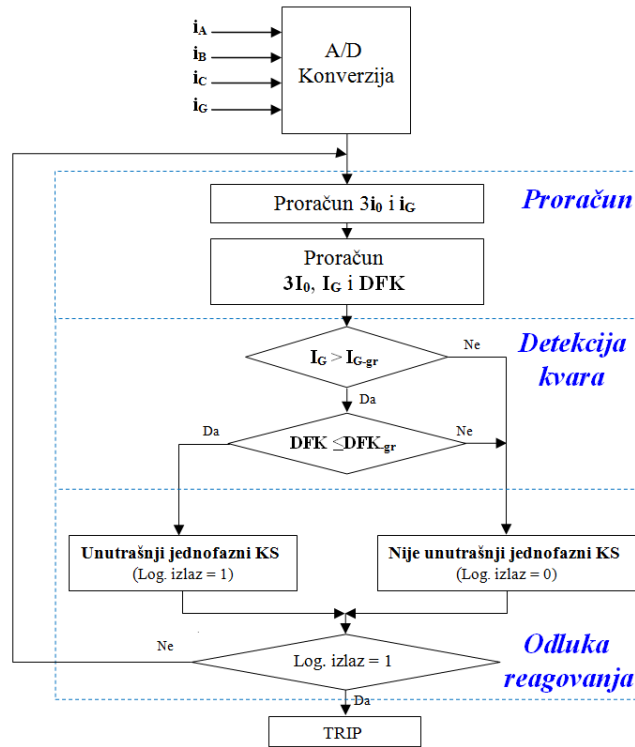
- U ovom koraku se vrši provera indeksa usmerenosti.
- Za unutrašnji jednofazni zemljospoj (K2) na Sl. 5.1 fazni pomeraj između struja  $3i_0$  i  $i_G$  iznosi  $180^\circ$ , prema tome vrednost indeksa usmerenosti iznosi -1 r.j. Prilikom spoljašnjeg jednofaznog zemljospoja (K1) struje  $3i_0$  i  $i_G$  su u fazi, pa vrednost indeksa usmerenosti iznosi 1 r.j.
- Na Sl. 5.3 je prikazan primer karakteristike reagovanja. Oblast reagovanja se može povećati ili smanjiti podešavanjem granične vrednosti indeksa usmerenosti ( $DFK_{gr}$ ). Za prostoperiodične signale indeks usmerenosti je jednak kosinusu ugla ( $\varphi$ ) koji predstavlja fazni pomeraj između struja  $3i_0$  i  $i_G$ .
- Vrednost ( $DFK_{gr}$ ) treba izabrati tako da ne dođe do nepotrebnog reagovanja zaštite usled dubokog zasićenja ST-a. Jedan od načina izbora ove vrednosti će biti prikazan u poglavlju 5.2.6.
- U ovom koraku dobijena vrednost indeksa usmerenosti se poredi sa graničnom vrednosti. Ukoliko je uslov (5.4) ispunjen smatra se da je prisutan zemljospoj unutar štíćene zone.

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

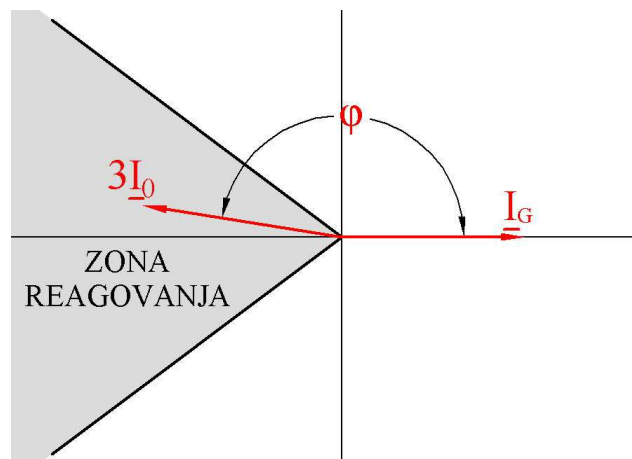
$$DFK \leq DFK_{gr} \tag{5.4}$$

Korak 6:

- Ispunjeni uslovi (5.3) i (5.4) ukazuju na to da je prisutan unutrašnji zemljospoj i aktivira se signal reagovanja, u suprotnom algoritam se vraća na početak.



Sl. 5.2 Algoritam za zemljospojnu zaštitu transformatora



Sl. 5.3 Karakteristika reagovanja

### 5.2.1 Testiranje algoritma

Performanse algoritma su ispitane korišćenjem signala koji su dobijeni merenjima u laboratoriji i kompjuterskim simulacijama kvarova. Prilikom izbora i generisanja signala kojima će biti testiran algoritam za zemljospojnu zaštitu cilj je bio da se testiranje algoritma obavi samo pomoću signala koji su dobijeni laboratorijskim merenjima. Međutim, nisu dobijeni zadovoljavajući nivoi zasićenja ST-a tokom eksperimenata unutrašnjih i spoljašnjih zemljospojeva. Zbog toga su potrebni signali, kojima je ispitan uticaj zasićenja ST-a tokom spoljašnjih u unutrašnjih KS-eva, generisani kompjuterskim simulacijama.

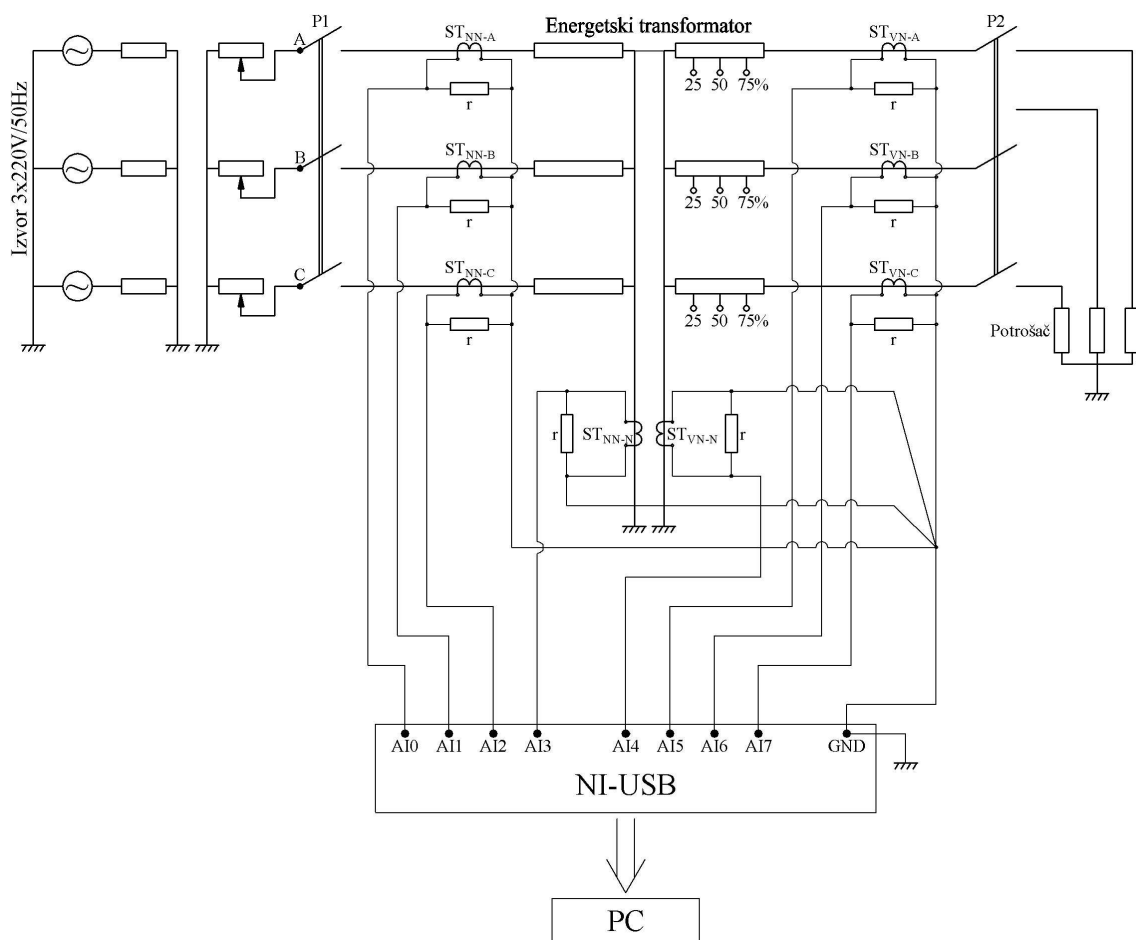
#### 5.2.1.1 Eksperimentalna merenja u laboratoriji

Testiranja su sprovedena na fizičkom modelu trofaznog trostubnog transformatora (poglavlje 3.2.2), koji ima izvode na 25%, 50% i 75% na VN namotaja. Sprega transformatora je YNyn.

Procedura ispitivanja

- Sproveden je niz merenja u laboratoriji sa ciljem da se dobiju signali kojima bi algoritam bio testiran. Na Sl. 5.4 je prikazana šema veza za laboratorijska merenja.
- Odabiranje i snimanje signala tokom merenja na trofaznom ET-u izvršeno je pomoću sledećih sistema za akviziciju podataka: NI USB-6008 (8 analognih ulaza,  $10 \cdot 10^3$  odbiraka/sec) i NI USB-6009 (8 analognih ulaza,  $48 \cdot 10^3$  odbiraka/sec), u zavisnosti od toga koji je sistem bio raspoloživ u trenutku merenja.
- Pomoću snimljenih odbiraka signala testiran je rad predloženog algoritma.

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora



Sl. 5.4 Šema veza za eksperimentalna merenja

### 5.2.1.2 Kompjuterske simulacije

Procedura ispitivanja:

- Sproveden je niz simulacija pomoću blok-modela koji odgovara šemi na Sl. 5.1. Energetski transformator sprege YNd se nalazi između dve uzemljene aktivne mreže.
- Signali na sekundarima ST-a generisani su pomoću PSCAD/EMTDC programskog paketa. Pomoću bloka ST-a, koji je dostupan u ovom programskom paketu, simulirano je zasićenje ST-a za vreme unutrašnjih i spoljašnjih kvarova. Cilj upotrebe ovog bloka bio je da se dobiju signali struje tokom zasićenja ST-a, kojima će dalje biti testirano ponašanje algoritama za zemljospojnu zaštitu ET-a. Potrebno je napomenuti da ovaj doktorat nema za cilj ispitivanje tačnosti korišćenog bloka ST-a.

- Pomoću signala koji su dobijeni simulacijama testiran je rad algoritma.

### 5.2.1.3 Testirani slučajevi

Algoritam je testiran za slučajeve date u Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Kvarovi i uključenja tokom kojih je testiran algoritam

<b>Eksterni i interni kvarovi</b>	
<b>A. Laboratorijska merenja:</b>	
1.	Eksterni kvar – jednofazni kratak spoj (1fks) faze A bez zasićenja ST
2.	Interni kvar – 1fks faze B na 25% VN namotaja
3.	Interni kvar – 1fks faze na 50% VN namotaja
4.	Interni kvar – 1fks faze B na 75% VN namotaja
5.	Interni kvar – 1fks faze B na 100% VN namotaja
<b>B. Kompjuterske simulacije:</b>	
6.	Eksterni kvar – 1fks faze A praćen zasićenjem ST-a u fazi A
7.	Eksterni kvar – 1fks faze A praćen zasićenjem ST-a u neutralnom provodniku ET-a
8.	Interni kvar – 1fks faze B na 50% VN namotaja sa zasićenjem ST-a u fazi B.
9.	Interni kvar – 1fks faze B na 50% VN namotaja sa zasićenjem ST-a u neutralnom provodniku
<b>Uključenje neopterećenog ET-a</b>	
Laboratorijska merenja:	
10.	Uključenje bez zasićenja ST-a
11.	Uključenje praćeno zasićenjem ST-a u jednoj fazi
12.	Uključenje praćeno zasićenjem ST-a u sve tri faze

### 5.2.2 Rezultati testova

Tokom unutrašnjih zemljospojeva fazni pomeraj ( $\varphi$ ) između nulte struje ( $3i_0$ ) i struje neutralnog provodnika ( $i_G$ ) približno jednak  $180^\circ$ , a tokom spoljašnjih zemljospojeva  $0^\circ$ . Polazeći od pethodne činjenice, oblast reagovanja bi mogla da se ("grubo") podesi tako

da se smatra da je prisutan kvar kada se fazni pomeraj  $\varphi = \angle(3i_0, i_G)$  nalazi u sledećim granicama  $90^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ$ . U svim primerima koji slede, testiran je rad algoritma sa strožijim uslovom reagovanja. Izračunata vrednost indeksa usmerenosti je upoređena sa graničnom vrednosti indeksa usmerenosti  $DFK_{gr} = -0.707$  r.j. Ako je uslov ( $DFK \leq DFK_{gr}$ ) zadovoljen, fazni pomeraj ( $\varphi$ ) se nalazi u sledećim granicama:  $135^\circ \leq \varphi \leq 225^\circ$ . U tom slučaju smatrano je da je prisutan kvar unutar štíčene zone zaštite.

### 5.2.2.1 Interni i eksterni kvarovi opterećenog transformatora

#### A. Laboratorijska merenja

Najpre će biti proveren rad algoritma za eksterni zemljospoj bez zasićenja ST-a (primer 1) i za interni zemljospoj na 50% namotaja faze B (primer 3). Oba primera će biti predstavljena sa tri slike. Prva slika prikazuje struje u neutralnom provodniku ( $i_G$ ) i izračunate sume struja na priključcima ET-a ( $3i_0$ ). Zatim, pokazatelji efektivnih vrednosti struja ( $3I_0$  i  $I_G$ ), indeks usmerenosti izraz (3.7) i signal reagovanja za VN stranu prikazani su na drugoj slici, a za NN stranu na trećoj. Ukoliko algoritam za zemljospojnu zaštitu, predstavljen u poglavlju 5.2, prepozna unutrašnji zemljospoj tada se signalu reagovanja dodeljuje vrednost 1, a u suprotnom vrednost 0.

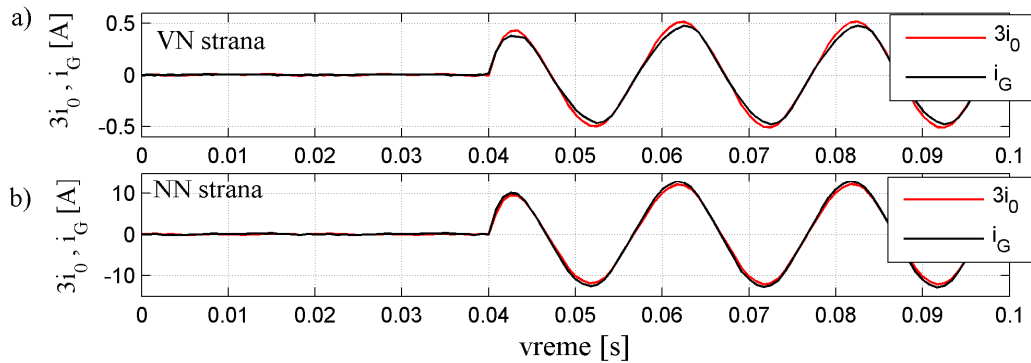
Tokom ovih merenja korišćen je sistem za akviziciju podataka NI USB 6008 (8 analognih ulaza,  $10 \cdot 10^3$  odbiraka/sec). Na ulaz sistema NI USB 6008 dovedeni su sledeći prilagođeni signali snimljeni na VN strani: 1) struja faze A ( $ST_{VN-A}$ ), 2) struja faze B ( $ST_{VN-B}$ ), 3) struja faze C ( $ST_{VN-C}$ ), 4) struja neutralnog provodnika ( $ST_{VN-N}$ ) i na NN strani transformatora: 5) struja faze a ( $ST_{NN-A}$ ), 6) struja faze b ( $ST_{NN-B}$ ), 7) struja faze c ( $ST_{NN-C}$ ); i 8) struja neutralnog provodnika ( $ST_{NN-N}$ ). Frekvencija odabiranja bila je jednaka 1,2 kHz, odnosno broj odbiraka u osnovnoj periodi  $m=24$ .

#### Primer 1: Eksperimentalni rezultati - eksterni jednofazni KS faze A

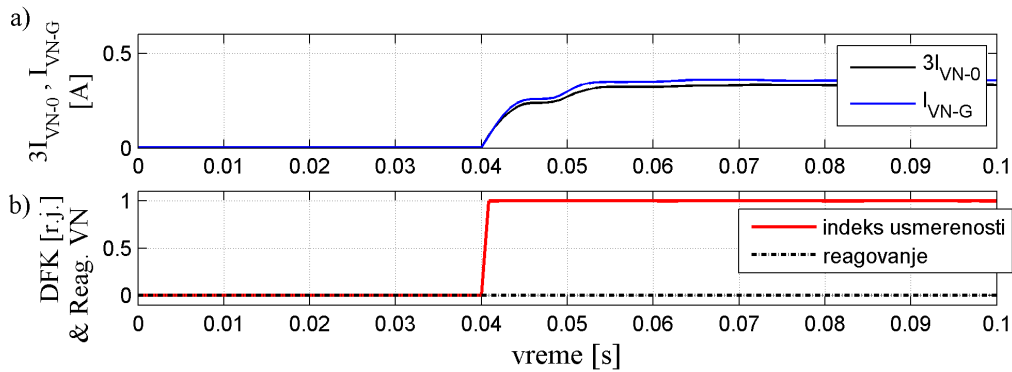
Kvar se dogodio u trenutku  $t=0,04$  s. Tokom merenja ST-i su tačno preslikavali primarne struje na sekundar. Može se uočiti da svi pokazatelji monotono konvergiraju i da konvergencija indeksa usmerenosti ka vrednosti koja je približno jednaka 1 r.j. traje

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

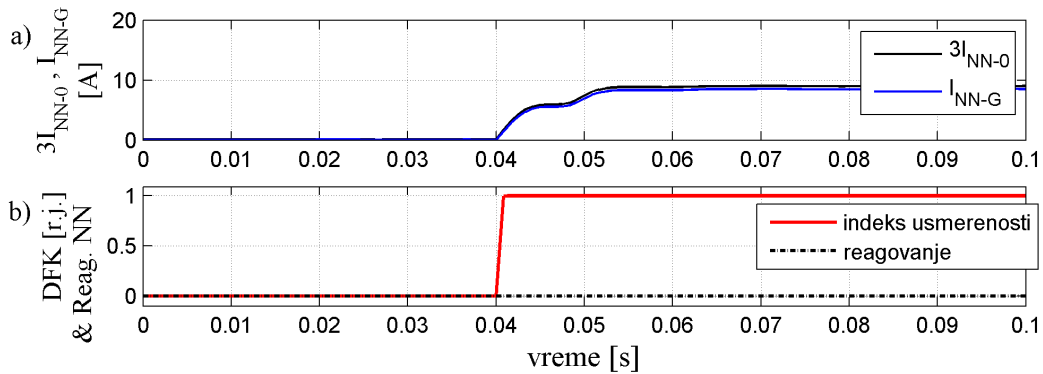
samo par perioda odabiranja (1-2 ms). Kao što je očekivano, u ovom slučaju uslov za reagovanje nije ispunjen.



Sl. 5.5 Primer 1: Struje  $3i_0$  i  $i_G$  za (a) VN i (b) NN stranu



Sl. 5.6 Primer 1 - VN strana: (a) pokazatelji efektivnih vrednosti ( $3I_{VN-0}$  i  $I_{VN-G}$ ) i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja



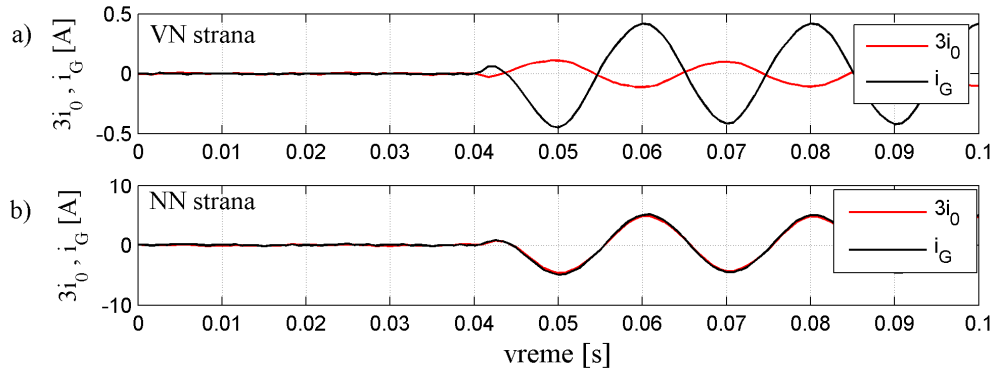
Sl. 5.7 Primer 1 - NN strana: (a) pokazatelji efektivnih vrednosti ( $3I_{NN-0}$  i  $I_{NN-G}$ ) i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja

### Primer 3: Eksperimentalni rezultati - interni zemljospoj 50% VN namotaja faze B

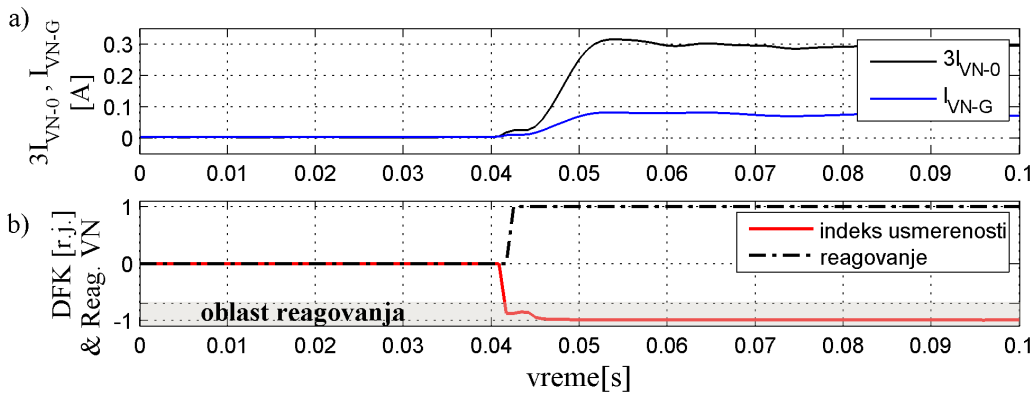
Kvar se dogodio u trenutku  $t=0,04$  s. Tokom merenja ST-i nisu ušli u zasićenje. Može se uočiti da svi pokazatelji monotono konvergiraju i da indeks usmerenosti

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

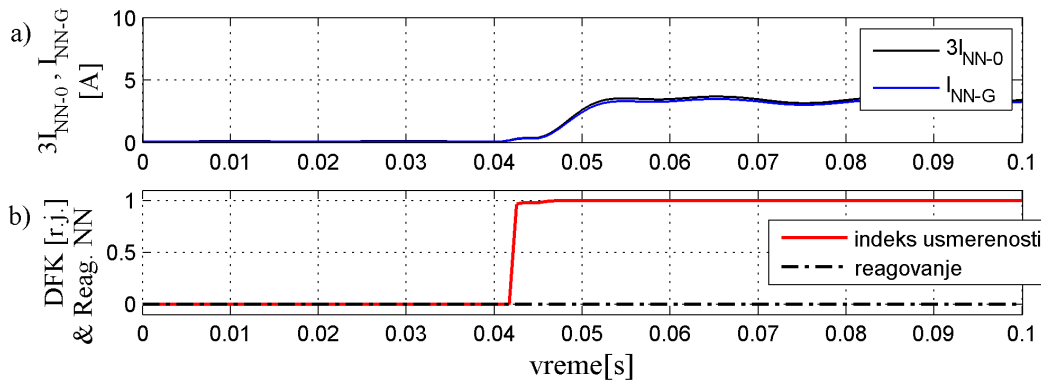
dostiže vrednost 0.98 pu nakon pet perioda odabiranja, odnosno da ulazi u oblast reagovanja unutar prvih 5 ms od uspostavljanja kvara. U ovom slučaju uslov za reagovanje je ispunjen i relej bi reagovao.



Sl. 5.8 Primer 3: Struje  $3i_0$  i  $i_G$  za (a)VN i (b) NN stranu



Sl. 5.9 Primer 3 - VN strana: (a) pokazatelji efektivnih vrednosti ( $3I_{VN-0}$  i  $I_{VN-G}$ ) i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja



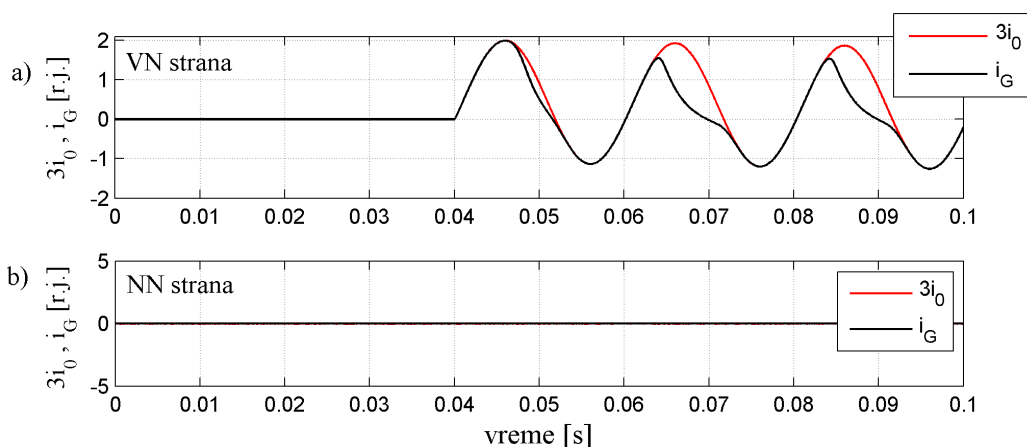
Sl. 5.10 Primer 3 - NN strana: (a) pokazatelji efektivnih vrednosti ( $3I_{NN-0}$  i  $I_{NN-G}$ ) i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja



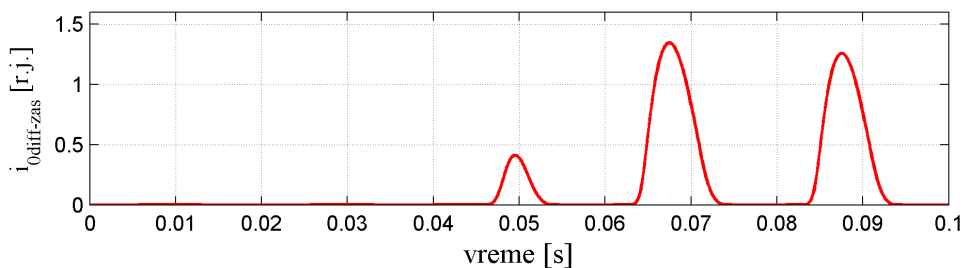
**B. Kompjuterske simulacije****Primer 7: Rezultati kompjuterske simulacije: eksterni jednofazni kratak spoj faze A praćen zasićenjem ST-a u neutralnom provodniku**

U nastavku su prikazani rezultati dobijeni kompjuterskom simulacijom jednofaznog KS-a van ET-a na strani namotaja spregnutog u zvezdu. ET je sprege YNd. Pošto je jednofazni KS simuliran na strani zvezde (VN strana), suma struja na priključcima na strani trougla jednaka je nuli (NN strana:  $3i_0=0$ ). Tako da će u nastavku biti analizirano ponašanje algoritma za VN namotaj koji je spregnut u zvezdu.

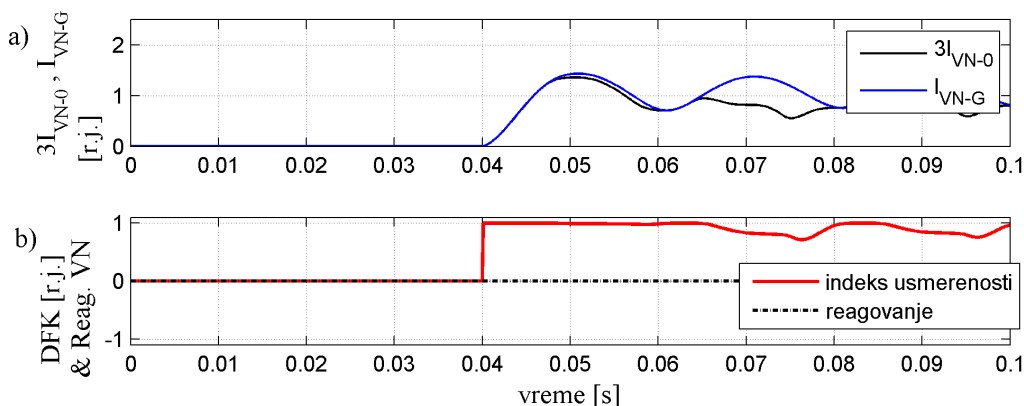
Tokom simulacije zadata je frekvencija odabiranja 2 kHz, odnosno broj odbiraka u osnovnoj periodi  $m=40$ . Usled zasićenja ST-a javlja se nulta diferencijalna struja, odnosno razlika struje ( $3i_0$ ) i struje neutralnog provodnika ( $i_G$ ), dobija značajne vrednosti (Sl. 5.12). Diferencijalni tip ograničenog zemljospojnog releja bi mogao da nepotrebno reaguje u slučaju ovakvog eksternog kvara. Takođe, vidi se da je vrednost indeksa usmerenosti u toku cele prve periode signala bliska 1 r.j. i da minimalna vrednost indeksa u vremenskom intervalu koji je prikazan na Sl. 5.13 iznosi 0.72 r.j.. Sve vrednosti indeksa koje su dobijene su van oblasti reagovanja i u ovom slučaju relej koji bi koristio algoritam koji smo razvili ne bi reagovao.

Sl. 5.11 Primer 7: Struje  $3i_0$  i  $i_G$  za (a)VN i (b) NN stranu

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora



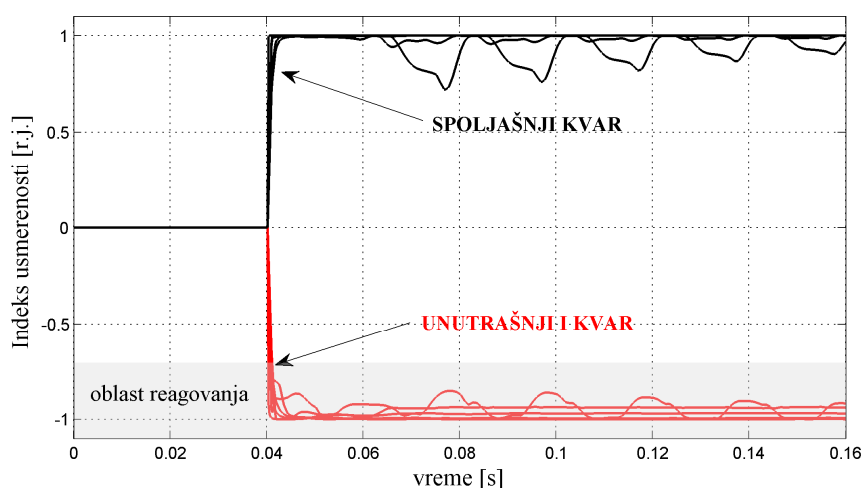
Sl. 5.12 Primer 7 - VN strana: Nulta diferencijalna struja



Sl. 5.13 Primer 7 - VN strana: (a) pokazatelji efektivnih vrednosti ( $3I_{VN-0}$  i  $I_{VN-G}$ ) i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja

U Tab. 5.1 su dati svi slučajevi unutrašnjih i spoljašnjih kvarova tokom kojih je testiran rad algoritma. **Primerima 1, 6 i 7** proveren je rad algoritma u slučaju spoljašnjih kvarova. Primerima su obuhvaćeni spoljašnji kvarovi praćeni zasićenjem ST-a: zasićenje faznog ST-a u fazi koja je pogođena kvarom (primer 6) i zasićenje ST-a u neutralnom provodniku (primer 7). **Primerima 2 – 5, 8 i 9** proveren je rad algoritma pri unutrašnjim kvarovima. Takođe, i ovde je uzet u obzir uticaj zasićenja faznog ST-a (primer 8) i ST-a u neutralnom provodniku (primer 9) na rad algoritma.

Indeksi usmerenosti za sve **primere 1 do 9** su prikazani zajedno na Sl. 5.14. Trenutak kvara u svim primerima odgovara  $t=40$  ms. U svim primerima jasno je napravljena razlika između spoljašnjih i unutrašnjih kvarova. Za svaki unutrašnji kvar, u Tab. 5.2 je dato vreme koje je proteklo od trenutka nastanka kvara do trenutka kada je indeks usmerenosti ušao u oblast reagovanja.



Sl. 5.14 Indeks usmerenosti za spoljašnje i unutrašnje jednofazne kratke spojeve opterećenog transformatora

Tab. 5.2 Unutrašnji kvar – vreme aktiviranja signala reagovanja

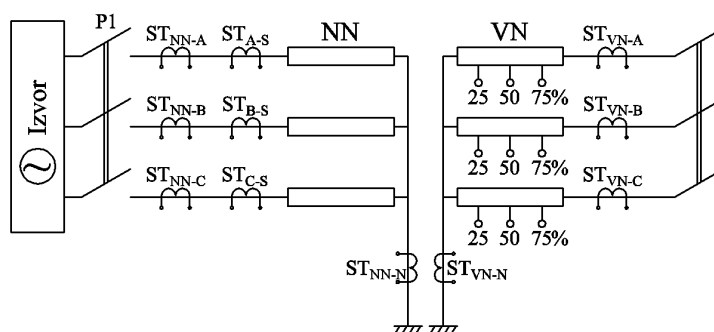
Primer	2	3	4	5	8	9
t [ms]	1,7	1,7	1,7	0,8	0,5	1,5

### 5.2.2.2 Uključenje neopterećenog ET-a

Osim što je provereno ponašanje algoritma u toku pojave spoljašnjih ili unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva, proverene su i njegove performanse tokom uključenja neopterećenog ET-a (primeri 10-12).

Uopšteno posmatrano, kod zemljospojne zaštite ET-a neće doći do nepotrebnog reagovanja tokom uključenja neopterećenog ET-a, kao što je to slučaj kod fazne diferencijalne zaštite. Zemljospojna zaštita može reagovati nepotrebno ukoliko tokom uključenja neopterećenog ET-a dođe do zasićenja ST-a. Poznato je da udarna struja magnećenja ET-a, koja se javlja pri uključenju, sadrži visok nivo viših harmonika i sporoopadajuću jednosmernu komponentu. Prisustvo jednosmerne komponente može lako dovesti do zasićenja ST i pri nižim vrednostima struje [55, 56].

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora



Sl. 5.15 Uključenje neopterećenog energetskog transformatora

Trofazni transformator prenosnog odnosa 5,8kV/220V je više puta uključen pomoću prekidača P1 na napon 3x220 V sa sekundarne strane dok mu je primar bio otvoren (Sl. 5.15).

U cilju provere ponašanja algoritma pri pojavi zasićenja ST-a na NN strani u fazama A, B i C redno su vezana po dva različita strujna transformatora, sa različitim teretima u sekundarnom kolu.

Strujni transformatori  $ST_{NN-A}$ ,  $ST_{NN-B}$  and  $ST_{NN-C}$  imaju iste karakteristike i tokom ogleda su verno preslikavali primarnu struju na sekundar. Dok, strujni transformatori  $ST_{A-S}$ ,  $ST_{B-S}$  and  $ST_{C-S}$  takođe imaju, međusobno, iste karakteristike i izabrani su tako da tokom eksperimenta uđu u zaisićenje.

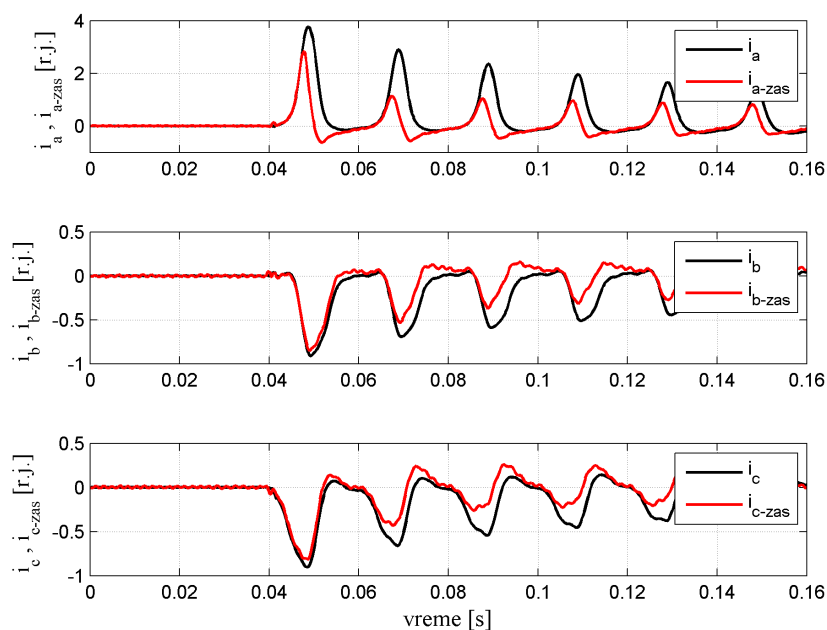
Tokom eksperimenta korišćen je sistem za akviziciju NI USB 6009 (8 analognih ulaza,  $48 \cdot 10^3$  odbiraka/sec). Sedam prilagođenih signala je dovedeno na ulaz sistema za akviziciju sa sekundara sledećih ST-a:

- 1) struje faze A –  $ST_{NN-A}$  i  $ST_{A-S}$ ,
- 2) struje faze B –  $ST_{NN-B}$  i  $ST_{B-S}$ ,
- 3) struje faze C –  $ST_{NN-C}$  i  $ST_{C-S}$ , i
- 4) struje neutralnog provodnika  $ST_{NN-N}$ .

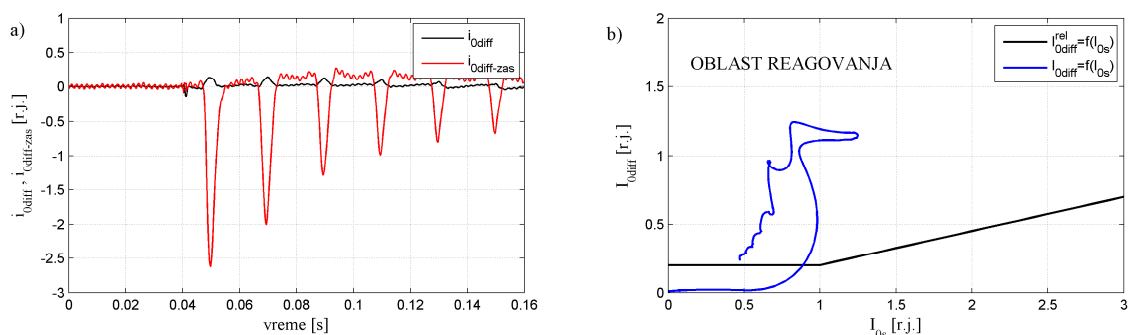
Izabrana je frekvencija odabiranja jednaka 5 kHz. Broj odbiraka u osnovnoj periodi  $m=100$ .

Pošto su vrednost i talasni oblik struje magnećenja stohastičkog karaktera, ogled uključenja transformatora je ponovljen više puta. Sl. 5.16 prikazuje fazne struje uključenja sa i bez zasićenja ST-a za jedan slučaj uključenja koji je snimljen tokom ispitivanja.

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora



Sl. 5.16 Struje uključenja neopterećenog ET-a sa i bez zasićenja ST-a



Sl. 5.17 a) Nulta diferencijalna struja; b) Proračunata trajektorija struja na osnovu modelovanog konvencionalnog zemljospojnog releja

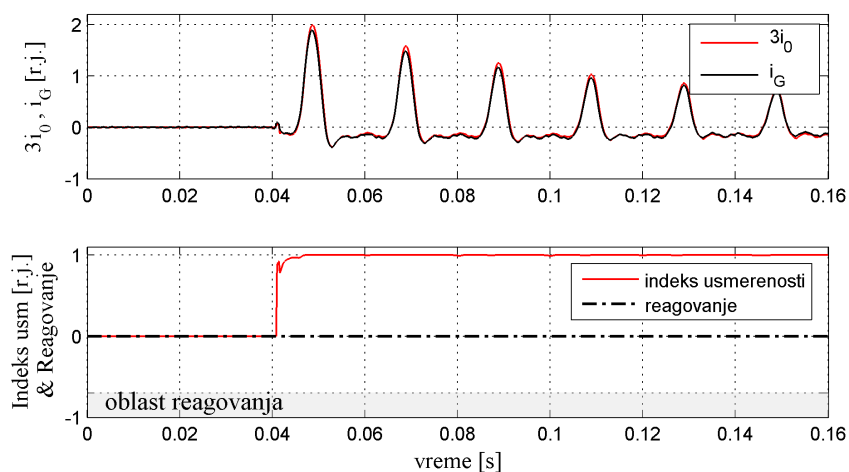
Na Sl. 5.17.a) prikazana je razlika struja  $3i_0$  i  $i_G$  kada zasićenje ST nije uzeto u obzir ( $i_{diff}$ ) i kada je uvaženo zasićenje sva tri fazna ST ( $i_{diff-zas}$ ). Može se uočiti da se pojavila značajna vrednost nulte diferencijalne struje pri pojavi zasićenja ST-a. Sl. 5.17.b) prikazuje karakteristiku reagovanja zemljospojnog releja diferencijalnog tipa  $I_{0diff}^{rel} = f(I_{0s})$ , koji kao nultu stabilizacionu struju koristi sumu  $3I_0$  i  $I_G$  [21, 35]. Nagib karakteristike reagovanja je 25%, a minimalna vrednost diferencijalne struje iznosi 0,2 r.j. Na istoj slici prikazana je i proračunata nulta diferencijalna struja u zavisnosti od nulte stabilizacione:  $I_{0diff} = f(I_{0s})$ . Vidi se da u slučaju zasićenja ST-a trajektorija

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

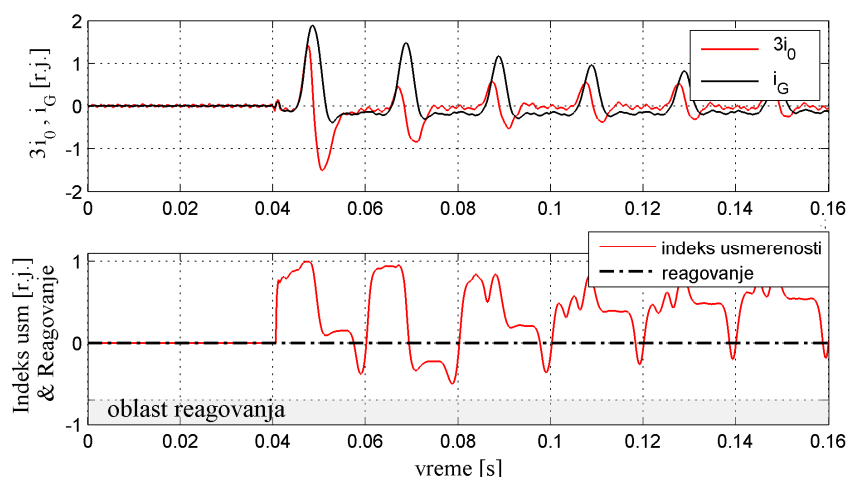
proračunatih struja  $I_{0diff}$  i  $I_{0s}$  ulazi u oblast reagovanja. U ovom slučaju konvencionalni diferencijalni tip zemljospojnog releja bi reagovao nepotrebno.

Na Sl. 5.18 je prikazano ponašanje novog algoritma tokom uključenja ET-a kada zasićenje ST-a nije uzeto u obzir (**primer 10**). Slika prikazuje struje  $3i_0$  i  $i_G$ , kao i indeks usmerenosti. Može se uočiti da indeks usmerenosti dostiže vrednost blisku 1 r.j. unutar 5 ms od trenutka uključenja. Shodno njegovom ponašanju relej ne bi reagovao.

Sl. 5.19 prikazuje struje  $3i_0$  i  $i_G$  u slučaju kada je uvaženo zasićenje faznih ST-a u sve tri faze (**primer 12**). Vrednosti indeksa usmerenosti tokom ovog ispitivanja su bile van oblasti reagovanja, što očigledno ukazuje na to da relej baziran na algoritmu koji smo razvili ne bi nepotrebno reagovao.



Sl. 5.18 Primer 10 - Uključenje neopterećenog ET-a bez zasićenja ST-a  
(a) struje  $3i_0$  i  $i_G$  i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja



Sl. 5.19 Primer 12 - Uključenje neopterećenog ET-a sa zasićenjem ST-a  
(a) struje  $3i_0$  i  $i_G$  i (b) indeks usmerenosti i signal reagovanja

Tokom svih testiranih slučajeva algoritam je napravio jasnu razliku između unutrašnjeg jednofaznog kratkog spoja i: (i) spoljašnjeg kratkog spoja ili (ii) uključanja neopterećenog transformatora.

Pomoću laboratorijski snimljenih signala pokazano je da u režimima koji nisu praćeni zasićenjem ST-a: eksterni kvar, interni kvar i uključanje ET, algoritam za par perioda odabiranja može da prepozna da li je prisutan unutrašnji kvar. Zatim je pomoću laboratorijski snimljenih signala i signala generisanih simulacijom, ispitano ponašanje algoritma tokom zasićenja ST-a. Pokazano je da je novi algoritam pogodan za primenu i u slučaju pojave zasićenja ST-a, i da može da prepozna da li je prisutan kvar u okviru 5 ms od njegovog nastanka.

### 5.2.3 Poboljšanje algoritma za zemljospojnu zaštitu transformatora

Rezultati prikazani u okviru prethodnog poglavlja pokazuju da bi se primenom predstavljenog algoritma mogla unaprediti ograničena zemljospojna zaštita i izbeći njeno nepotrebno reagovanje izazvano zasićenjem ST-a. Na Sl. 5.19 se vidi da vrednost indeksa usmerenosti osciluje u slučaju uključanja neopterećenog transformatora praćenim zasićenjem ST-a. Na slici se jasno može uočiti da je period oscilacija indeksa približno jednak periodu signala, kao i da je indeks dominantno pozitivan. Usrednjavanjem indeksa na jednoj periodu signala bi se eliminisale ili značajno umanjile oscilacije indeksa, što će biti pokazano u ovom poglavlju. Tako bi se slučaju uključanja neopterećenog transformatora vrednosti indeksa udaljile od oblasti reagovanja. Na taj način bi bila povećana sigurnost algoritma i u slučaju većeg zasićenja ST-a čime bi dodatno bio unapređen predstavljeni algoritam. Ovde treba napomenuti da je u pogledu konvergencije usrednjavanje na celoj periodu dalo bolje rezultate u odnosu na dvostruko usrednjavanje na polovini periode. Takođe, sa stanovišta unošenja manjeg kašnjenja u rad algoritma biće provereno ponašanje indeksa prilikom usrednjavanja na polovini periode.

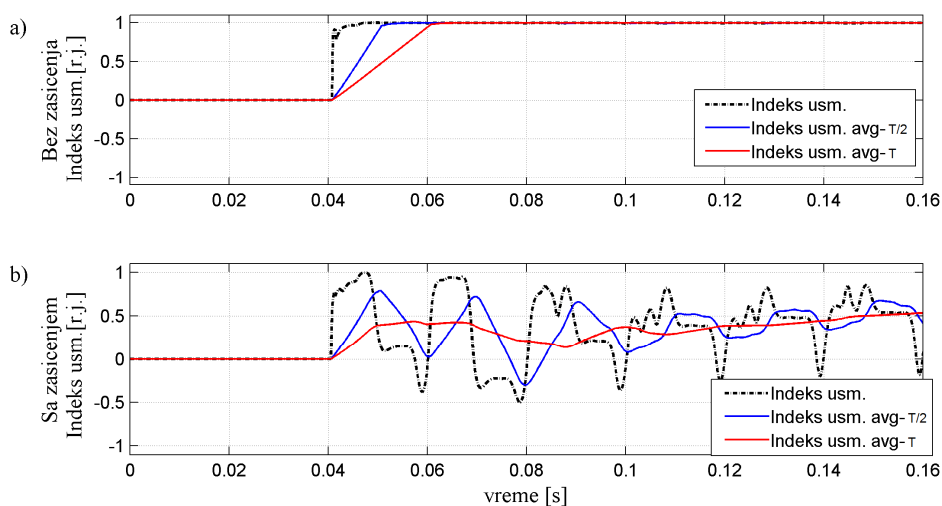
Najpre je potrebno formirati vektor dužine  $n$  u kome se pamti poslednjih  $n$  vrednosti indeksa DFK:

$$[DFK(1) \ DFK(2) \ DFK(3) \ \dots \ DFK(n-1) \ DFK(n)] \quad (5.5)$$

Usrednjena vrednost je računata pomoću izraza:

$$DFK_{-avg}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DFK(i) \quad (5.6)$$

gde je  $n=m/2$  ukoliko se usrednjavanje vrši na polovini periode, a  $n=m$  ukoliko se usrednjavanje vrši na celoj periodi signala. Sl. 5.20 prikazuje usrednjene vrednosti indeksa usmerenosti iz primera 10 i 12.



Sl. 5.20 Usrednjeni indeksi usmerenosti na polovini i na celoj periodi (a) primer 10, (b) primer 12

Novi algoritam pri donošenju odluke reagovanja koristi vrednosti indeksa usmerenosti. Ovde će u cilju očiglednijeg prezentovanja efekta usrednjavanja biti estimiran fazni pomeraj između struja  $3i_0$  i  $i_G$  pomoću izraza:

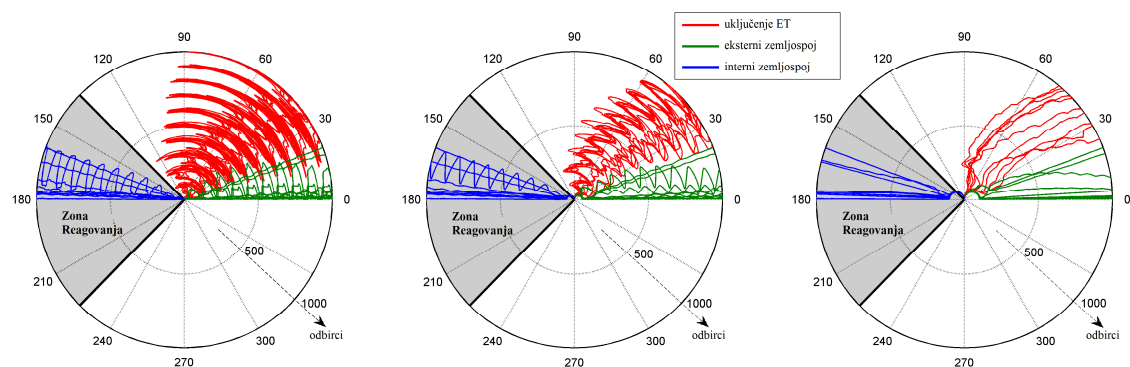
$$\begin{aligned} \varphi &= \arccos(DFK) \\ \varphi_{avg T/2} &= \arccos(DFK_{-avg T/2}) , \\ \varphi_{avg T} &= \arccos(DFK_{-avg T}) \end{aligned} \quad (5.7)$$



## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

gde su:  $\varphi$  ,  $\varphi_{\text{avg } T/2}$  ,  $\varphi_{\text{avg } T}$  – estimirane vrednosti faznog pomeraja na osnovu indeksa usmerenosti ( $DFK$ ), usrednjene vrednosti indeksa usmerenosti na polovini periode ( $DFK_{\text{-avg } T/2}$ ) i na celoj periodi ( $DFK_{\text{-avg } T}$ ).

Sl. 5.21 prikazuje trajektorije estimiranog faznog pomeraja  $\varphi$  (5.7) između struja  $3i_0$  i  $i_G$  na karakteristici reagovanja za sve primere iz Tab. 5.1.



Sl. 5.21 Trajektorija faznog pomeraja: a)  $\varphi$  , b)  $\varphi_{\text{avg } T/2}$  , c)  $\varphi_{\text{avg } T}$

Tab. 5.3 prikazuje vreme koje je proteklo od nastanka kvara do trenutka kada je aktiviran signal reagovanja za ispitane unutrašnje kvarove. U tabeli su data vremena reagovanja releja kada relej pri donošenju odluke reagovanja koristi indeks usmerenosti (3.7), indeks usmerenosti usrednjen na polovini periode i na celoj periodi (5.6).

Tab. 5.3 Unutrašnji kvar – vreme aktiviranja signala reagovanja

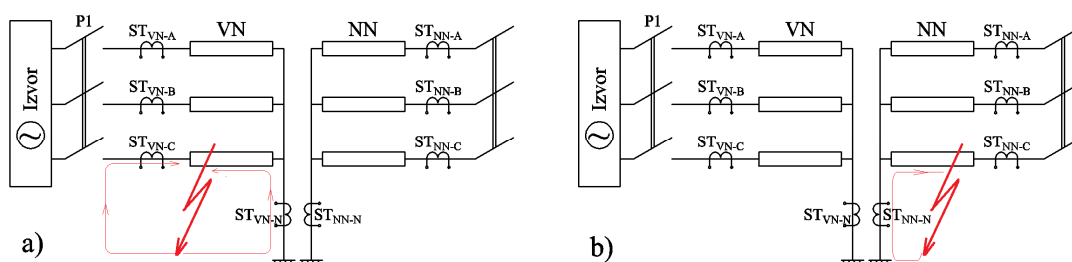
Primer	DFK	$DFK_{\text{avg } T/2}$	$DFK_{\text{avg } T}$
	t(ms)		
2.	1.7	8.3	15.8
3.	1.7	9.2	16.7
4.	1.7	9.2	16.7
5.	0.8	9.2	15.8
8.	0.5	7.5	15
9.	1.5	8	15
10.	1	8.2	15.2
11.	0.8	7.8	14.8
12.	0.6	7.6	14.8

Na osnovu prikazanih rezultata, vidi se da bi primenom poboljšane metode bila napravljena jasna razlika između unutrašnjih kvarova i spoljašnjih kvarova i uključenja ET-a. Usrednjavanjem bi se povećalo vreme do aktiviranja signala reagovanja, ali bi zato bila povećana sigurnost rada releja.

### 5.2.4 Uključenje neopterećenog transformatora u kvaru

Potrebno je razmotriti ponašanje zemljospojne zaštite prilikom uključenja neopterećenog ET-a u kvaru na mrežu. Pri tome će biti razdvojene dve grupe uključenja:

- A. kada je jednofazni kratak spoj na strani koja se uključuje na mrežu, i
- B. kada je jednofazni kratak spoj na strani transformatora čiji su priključci otvoreni.



Sl. 5.22 Uključenje neopterećenog ET-a u kvaru (a) 1fks na strani koja se uključuje na mrežu i (b) 1fks na strani transformatora čiji su priključci otvoreni

U prvoj grupi, jedinica za zemljospojnu zaštitu na strani kvara, na osnovu smera struja  $3i_0$  i  $i_G$ , prepoznaje da je kvar na strani transformatora sa koje se ET napaja, dok u slučaju prisustva jednofaznog kratkog spoja na strani na kojoj su otvoreni priključci, suma faznih struja je jednaka nuli, a kroz neutralni fazni provodnik teče struja. Konvencionalni zemljospojni relej, baziran na diferencijalnom principu, bi prepoznao prisustvo kvara, dok novi algoritam, koji se bazira na faznoj komparaciji  $3i_0$  i  $i_G$ , ne bi. Iz ovog razloga potrebno je u algoritam predstavljen u poglavlju 5.2 uvesti dodatni uslov na nivou *detekcije kvara*, odnosno između koraka 4 i 5.

Korak 4.b. dodatni uslov:

U ovom koraku bilo bi provereno da li je pokazatelj efektivne vrednosti struje  $3i_0$  jednak nuli:

$$3I_0 = 0 \quad (5.8)$$

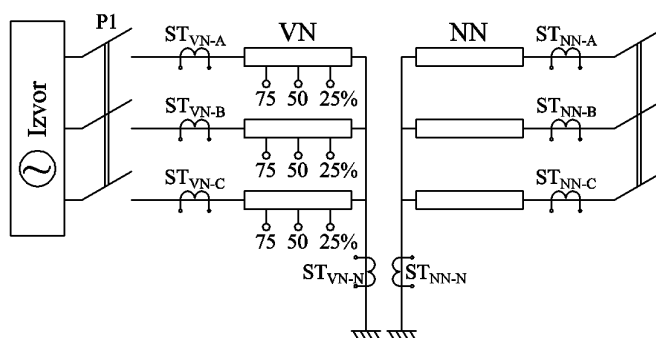
Ovim uslovom bio bi obuhvaćen slučaj **B**. Npr., posmatrajmo uključenje neopterećenog transformatora sa VN strane na čijem je NN namotaju prisutan jednofazni kratak spoj (Sl. 5.22.b). Pošto su priključci na NN strani otvoreni zbir faznih struja jednak je nuli, dok će usled prisustva kvara struja teći kroz neutralni provodnik na NN strani ET-a. Uslovi  $I_G > I_{G-gr}$  (5.3) i  $3I_0 = 0$  (5.8) obezbeđuju pravilan rad algoritma u ovakvim situacijama. Ukoliko je uslov (5.8) u koraku 4.b ispunjen, smatra se da je prisutan unutrašnji zemljospoj, u suprotnom algoritam prelazi na korak 5.

Tab. 5.4 prikazuje eksperimentalno ispitane slučajeve uključjenja neopterećenog ET-a u kvaru. Manuelno su pravljene kratki spojevi između izabranog izvoda na VN namotaju transformatora i zemlje, a zatim je zatvaranjem prekidača P1 izvršeno uključjenje transformatora u kvaru. Ispitivanje je podeljeno u dve grupe (A i B). Prva grupa, primeri 1 do 3, transformator u kvaru je napajan sa VN strane, dok su priključci transformatora na NN strani bili otvoreni (Sl. 5.23), a kvar je na namotaju koji je na strani napajanja. Sa sekundara ST-a posmatrana su sledeća četiri prilagođena signala: fazne struje VN namotaja ( $ST_{VN-A}$ ,  $ST_{VN-B}$ ,  $ST_{VN-C}$ ) i struja neutralnog provodnika na VN strani ( $ST_{VN-N}$ ).

Tab. 5.4 Posmatrani slučajevi uključjenja neopterećenog ET-a u kvaru

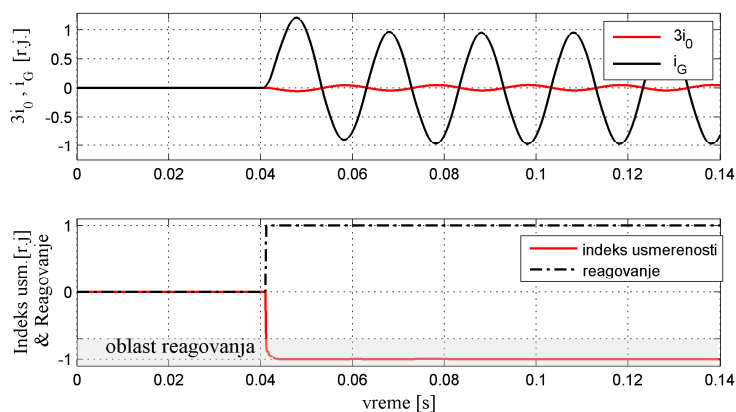
Kvar na VN strani, ET uključen na VN strani	
- zemljospoj faze A na	
1.	25% VN namotaja
2.	50% VN namotaja
3.	75% VN namotaja
Kvar na VN strani, ET uključen na NN strani	
- zemljospoj faze A na	
4.	25% VN namotaja
5.	50% VN namotaja
6.	75% VN namotaja
7.	100% VN namotaja

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora



Sl. 5.23 Uključenje neopterećenog ET sa VN strane

Sl. 5.24 prikazuje talasne oblike struja  $3i_0$  i  $i_G$  za slučaj kada je jednofazni kratak spoj lociran na 25% namotaja faze A od zvezdišta ET-a (primer 1). Odziv indeksa usmerenosti ukazuje na prisustvo unutrašnjeg kvara i signal reagovanja je aktiviran 1 ms nakon nastanka kvara.



Sl. 5.24 Ponašanje algoritma za zaštitu VN namotaja: primer 1 – uključenje na VN strani, jednofazni zemljospoj na VN strani

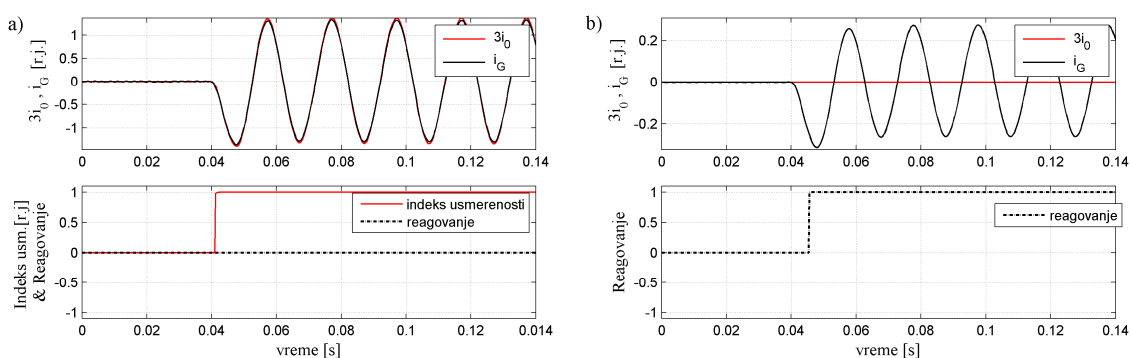
U drugoj grupi merenja, primeri 4 do 7, kvarovi su generisani na VN namotaju, a transformator je napajan sa NN strane (Sl. 5.15). Dakle, kvar je generisan na strani transformatora čiji su priključci otvoreni.

Sa sekundara ST-a posmatrano je sledećih osam prilagođenih signala: fazne struje VN namotaja ( $ST_{VN-A}$ ,  $ST_{VN-B}$ ,  $ST_{VN-C}$ ), fazne struje NN namotaja ( $ST_{NN-A}$ ,  $ST_{NN-B}$ ,  $ST_{NN-C}$ ) i struje neutralnih provodnika na VN i NN strani ( $ST_{VN-N}$  i  $ST_{NN-N}$ ).

Sl. 5.25 prikazuje rezultate dobijene za primer 4. U ovom primeru jednofazni zemljospoj je lociran na 25% namotaja faze A od zvezdišta ET-a.

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

Za zemljospojnu zaštitu NN namotaja kvar je spoljašnji, što algoritam uspešno prepoznaje. U ovom slučaju zaštitna jedinica na NN strani ne aktivira signal reagovanja, dok je logika za prepoznavanje kvara na VN namotaju detektovala da je prisutan kvar sa zemljom, na osnovu toga što je suma faznih struja jednaka nuli, a struja u neutralnom provodniku transformatora postoji i veća je od definisane granične vrednosti. U posmatranom slučaju, kao što je očekivano zemljospojna zaštitna jedinica VN namotaja na kome je kvar bi aktivirala signal reagovanja.

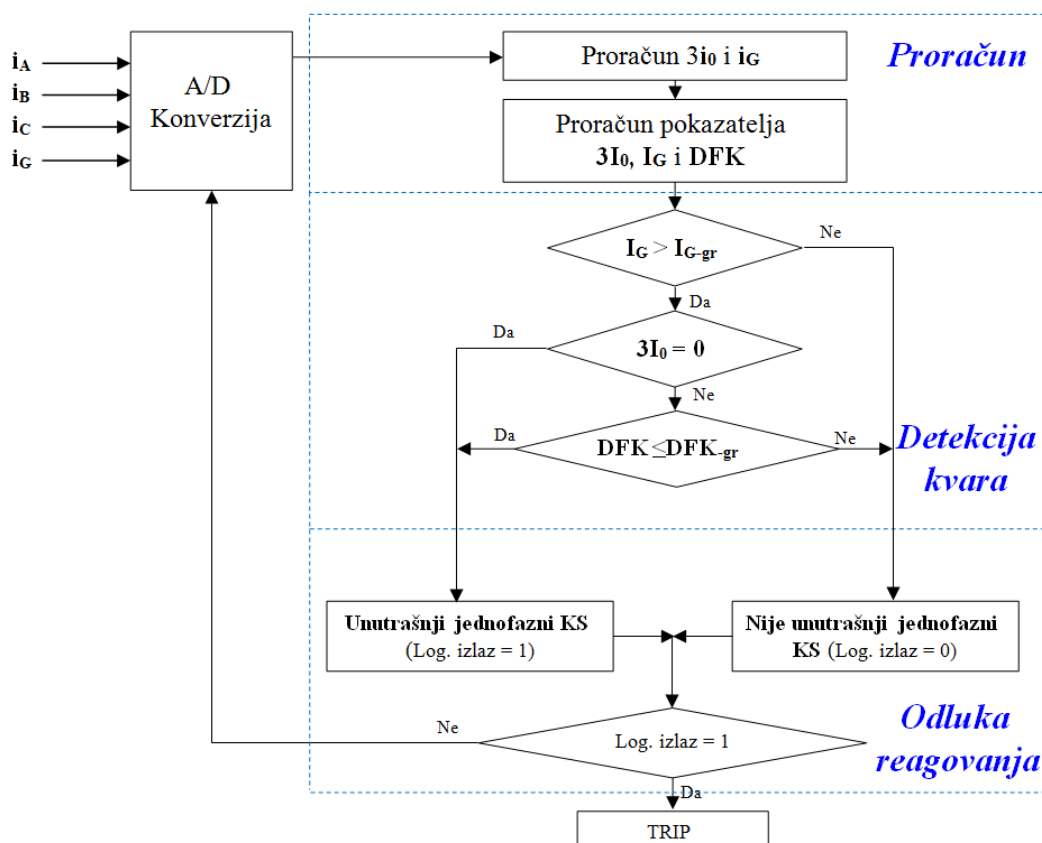


Sl. 5.25 Primer 4: Uključenje na NN strani ET u kvaru, jednofazni zemljospoj na VN namotaju – ponašanje algoritma za zaštitu (a) NN namotaja i (b) VN namotaja

### 5.2.5 Definitivni algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a

Na osnovu ponašanja algoritma tokom testova koji su do sada prikazani u okviru ove glave, može se predložiti definitivni algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a prikazan na Sl. 5.26. U skladu sa prethodnim izlaganjem u algoritmu se može koristiti indeks usmerenosti koji je neusrednjen, usrednjen na polovini periode ili usrednjen na celoj periodi signala. Prilikom izbora indeksa usmerenosti treba imati u vidu da se usrednjavanjem povećava vreme do aktiviranja signala reagovanja, ali se povećava i sigurnost rada releja. Zatim je u odnosu na algoritam predstavljen u poglavlju 5.2. nivo *detekcije kvara* modifikovan tako što je između Koraka 4 i 5 uveden dodatni uslov (5.8), koji proverava da li je pokazatelj efektivne vrednosti struje  $3i_0$  jednak nuli. Kao što je objašnjeno u poglavlju 5.2.4, ovim uslovom obezbeđuje pravilan rad algoritma za

ograničenu zemljospojnu zaštitu tokom uključenja neopterećenog ET-a u kvaru kada je kvar na strani transformatora čiji su priključci otvoreni.



Sl. 5.26 Definitivni algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a

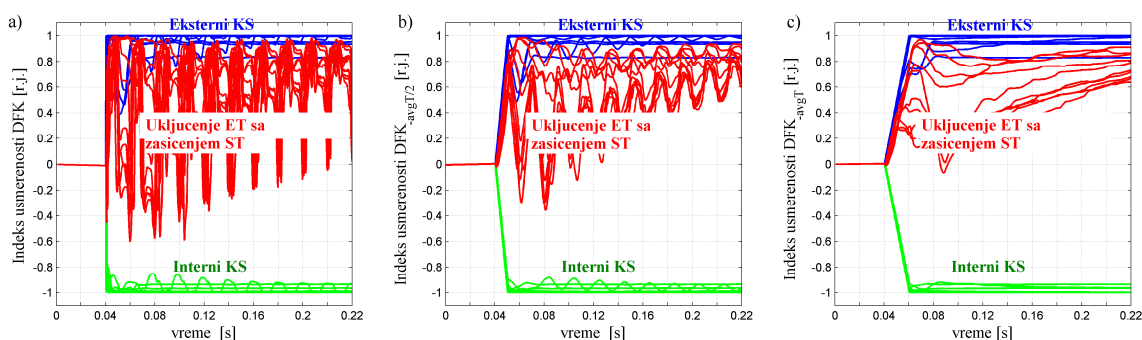
### 5.2.6 Izbor granične vrednosti indeksa usmerenosti

U prikazanom algoritmu za zemljospojnu zaštitu oblast reagovanja na karakteristici reagovanja se podešava izborom granične vrednosti indeksa usmerenosti. Algoritam donosi odluku reagovanja na osnovu faznog poređenja struja  $3i_0$  i  $i_G$  korišćenjem indeksa usmerenosti. Uslov koji je potrebno da bude ispunjen da bi algoritam prepoznao da je jednofazni kratak spoj unutar štice zone jeste da indeks usmerenosti bude manji ili jednak od podešene granične vrednosti. Granična vrednost indeksa usmerenosti treba da bude izabrana tako da ne dođe do nepotrebnog reagovanja zaštite usled zasićenja ST-a.

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

Pokazano je da vrednost indeksa usmerenosti monotono konvergira ka vrednosti  $1 r.j.$  pri jednofaznim kvarovima van šticiene zone i pri uključenju neopterećenog transformatora, a da konvergira ka vrednosti  $-1 r.j.$  pri jednofaznim kvarovima unutar šticiene zone. Takođe, pokazano je da u slučaju prisustva zasićenja ST-a vrednost indeksa osciluje. Na Sl. 5.27 prikazani su indeksi usmerenosti za više slučajeva:

- unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva (struje snimljene u laboratoriji i generisane simulacijama),
- spoljašnjih jednofaznih kratkih spojeva (struje snimljene u laboratoriji i generisane simulacijama), i
- uključenja neopterećenog ET praćenog zasićenjem ST-a (struje uključenja snimljene u laboratoriji).



Sl. 5.27 Indeks usmerenosti: (a) neusrednjen; (b) usrednjen na polovini periode i (c) usrednjen na celoj periodi

U ovom poglavlju će biti ispitano koje vrednosti uzima indeks usmerenosti prilikom uključenja neopterećenog ET-a praćenim zasićenjem ST-a i biće predložen način izbora granične vrednosti indeksa usmerenosti.

Tokom analiziranja pojave uključenja neopterećenog energetskog transformatora na mrežu pogodno je izvršiti simulacije uključenja. Simulacija daje potpuniji uvid u pomenutu prelaznu pojavu i poželjna je iz više razloga. Prelazna pojava uključenja neopterećenog ET-a veoma zavisi od početnih uslova. Merenja u laboratoriji ili na terenu ne mogu uvek obuhvatiti sve slučajeve da bi se mogle proceniti potencijalne posledice tokom uključenja. Takođe, u ekstremnim slučajevima, tokom ispitivanja na terenu može doći do oštećenja opreme [57]. Stoga, da bi se obuhvatilo i ispitalo što je

moguće više početnih uslova bez rizika od eventualnog oštećenja opreme pogodno je izvršiti simulacije.

Stohastičke simulacione metode omogućavaju da se pomoću zadatih raspodela verovatnoće ulaznih podataka procene raspodele verovatnoće izlaznih promenljivih [57]. Metoda koja će biti korišćena u ovom radu je Monte Carlo (MC) metoda. Struja uključenja nije deterministička nego stohastička promenljiva. Njene vrednosti zavise od dva neizvesna podatka: remanentnog fluksa u jezgru i trenutka uključenja transformatora na mrežu, odnosno početne faze napona u trenutku uključenja. Za potrebe MC simulacije prvo su definisani opsezi u kojima se mogu pronaći neizvesni ulazni podaci (remanentni fluks i početna faza napona u trenutku uključenja). Zatim su nasumično izabrane vrednosti neizvesnih ulaznih podataka iz definisanih opsega. Nakon čega je pomoću dobijenih ulaznih podataka izračunata struja uključenja ET-a.

Dakle, struje kojima je testiran algoritam su dobijene na dva načina: merenjima u laboratoriji i izračunate su pomoću podataka koji su dobijeni Monte Carlo simulacijom. Zatim su ove struje u vidu odbiraka propuštene kroz matematički model strujnog transformatora [51] koji je prikazan u okviru poglavlja 4.1.1. Prilikom simulacije rada strujnog transformatora vrednosti remanentnog fluksa u jezgru ST-a i šablon remanentnog fluksa ST-a u fazama A, B i C su takođe dobijene Monte Carlo simulacijom. Na ovaj način generisane su struje na sekundarima ST-a koje su upotrebljene za testiranje algoritma.

### 5.2.6.1 Simulacija uključenja neopterećenog energetskog transformatora

#### 5.2.6.1.1 Monofazni energetski transformator

U okviru ovog poglavlja 5.2.6.1.1 prikazana je teorija preuzeta iz [58]. Posmatrajmo najpre uključenje prigušnice samoinduktivnosti ( $L$ ) i otpornosti ( $R$ ) (Sl. 5.28), kojom se može ekvivalentirati transformator u praznom hodu [58]. Uvažavajući zasićenje magnetskog kola, mogu se napisati sledeće relacije:

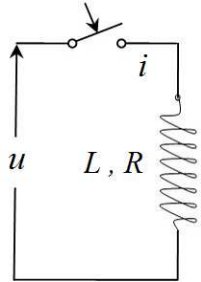
$$\Psi = L \cdot i \tag{5.9}$$



$$u - \frac{d\Psi}{dt} - Ri = 0 \quad (5.10)$$

gde je  $\Psi$  obuhvaćeni fluks. Iz (5.9) i (5.10) sledi:

$$\frac{d\Psi}{dt} + \frac{R}{L(\Psi)}\Psi = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5.11)$$



Sl. 5.28 Uključenje prigušnice

Pretpostavimo prvo da je  $L = \text{const}$ . Rešenje diferencijalne jednačine se sastoji od dva člana: aperiodičnog ( $\Psi_a$ ), koji potiče od homogene jednačine, i stacionarnog ( $\Psi_s$ ), koji predstavlja partikularni integral. Prvi član se dobija rešavanjem karakteristične jednačine:

$$\Psi_a = \Psi_a \cdot e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (5.12)$$

gde je  $\Psi_a$  integraciona konstanta. Partikularno rešenje ima istu formu kao napon:

$$\Psi_s = \Psi_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_1) \quad (5.13)$$

Rešavanjem diferencijalne jednačine (5.11) i uvažavajući da je obuhvaćeni fluks u trenutku  $t=0$  imao vrednost  $\Psi_r$ , dobija se:

$$\Psi_r = \Psi_a + \Psi_m \sin(\varphi_0 - \varphi_1), \quad (5.14)$$

odakle je:

$$\Psi_a = \Psi_r - \Psi_m \sin(\varphi_0 - \varphi_1) \quad (5.15)$$

na osnovu čega se dobija izraz za obuhvaćeni fluks:

$$\Psi(t) = [\Psi_r - \Psi_m \sin(\varphi_0 - \varphi_1)]e^{-t/T_1} + \Psi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_1), \quad (5.16)$$

gde su:

$\Psi_r$  – remanentni fluks,  $\varphi_0$  – početna faza,  $\varphi_1 = \arctg(L/\omega R)$  i  $T_1$  – vremenska konstanta.

## 5.2.6.1.2 Trofazni energetski transformator

Obuhvaćeni fluks u fazama A, B i C trofaznog dvonamotnog ET-a, koji je formiran od tri monofazne jedinice, može se predstaviti kao:

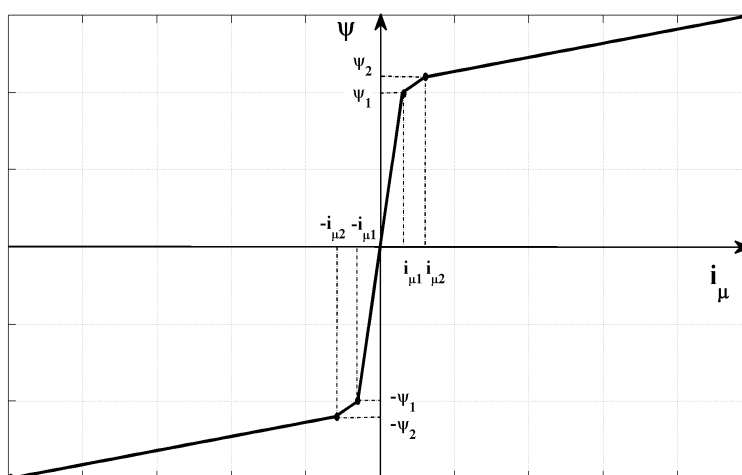
$$\Psi_A(t) = [\Psi_{Ar} - \Psi_m \sin(\varphi_0 - \varphi_1)] e^{-t/T_1} + \Psi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi_1) \quad (5.17)$$

$$\Psi_B(t) = \left[ \Psi_{Br} - \Psi_m \sin\left(\varphi_0 + \frac{2\pi}{3} - \varphi_1\right) \right] e^{-t/T_1} + \Psi_m \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{2\pi}{3} - \varphi_1\right) \quad (5.18)$$

$$\Psi_C(t) = \left[ \Psi_{Cr} - \Psi_m \sin\left(\varphi_0 + \frac{4\pi}{3} - \varphi_1\right) \right] e^{-t/T_1} + \Psi_m \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{4\pi}{3} - \varphi_1\right) \quad (5.19)$$

Na osnovu karakteristike magnećenja  $\Psi(t) = f(i_\mu(t))$  mogu se dobiti vrednosti struja uključjenja neopterećenog transformatora  $i_{\mu A}$ ,  $i_{\mu B}$  i  $i_{\mu C}$ . Struja kroz neutralni provodnik se može izračunati kao:

$$i_G(t) = i_{\mu A}(t) + i_{\mu B}(t) + i_{\mu C}(t) \quad (5.20)$$



Sl. 5.29 Nelinearna kriva magnećenja energetskog transformatora

## 5.2.6.2 Monte Carlo simulacija neizvesnih ulaznih podataka

## 5.2.6.2.1 Model energetskog transformatora

U modelu energetskog transformatora vrednost početne faze napona prilikom uključjenja i vrednost remanentnog fluksa su slučajne veličine. U Monte Carlo (MC) simulaciji vrednost početne faze ( $\varphi_0$ ) je varirana u opsegu od  $[-\pi, \pi]$ . Remanentni fluks

---

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

---

je zadat pomoću amplitude koja je varirana u opsegu  $\Psi_0 \in [-80, 80]\%$  nominalnog fluksa i pomoću šablona remanentnog fluksa u tri faze [59-61]. U [61] je pokazano da je kod trofaznih ET-a formiranih od monofaznih jedinica šablon remanentnog fluksa u obliku:  $\{\Psi_0, -\Psi_0, 0\}$ . Na osnovu toga, u MC simulaciji šablon remanentnog fluksa je modelovan kao  $\{\Psi_0, -\Psi_0, 0\}$  u svim mogućim permutacijama na način koji je prikazan u Tab. 5.5.

Pomoću Monte Carlo metode generisane su vrednosti početne faze napona ( $\varphi_0$ ), amplitude remanentnog fluksa energetskog transformatora ( $\Psi_0$ ) i šablon fluksa  $\{\Psi_{rA}, \Psi_{rB}, \Psi_{rC}\}$ .

Tab. 5.5 Šablon remanentnog fluksa u fazama A, B i C – energetski transformator

šablon	faza A ( $\Psi_{rA}$ )	faza B ( $\Psi_{rB}$ )	faza C ( $\Psi_{rC}$ )
1	$\Psi_0$	$-\Psi_0$	0
2	$\Psi_0$	0	$-\Psi_0$
3	$-\Psi_0$	$\Psi_0$	0
4	$-\Psi_0$	0	$\Psi_0$
5	0	$\Psi_0$	$-\Psi_0$
6	0	$-\Psi_0$	$\Psi_0$

### 5.2.6.2.2 Model strujnog transformatora

U modelu strujnog transformatora vrednost remanentnog fluksa je slučajna veličina koja je varirana u opsegu  $\lambda_0 \in [-80, 80]\%$  [51]. Takođe, i ovde je za remanentne flukseve ST-a u fazama A, B i C usvojen šablon fluksa prikazan u Tab. 5.6.

Pomoću Monte Carlo metode generisane su vrednosti amplitude remanentnog fluksa strujnog transformatora ( $\lambda_0$ ) i šablon remanentnog fluksa strujnih transformatora u fazama A, B i C:  $\{\lambda_{rA}, \lambda_{rB}, \lambda_{rC}\}$ .

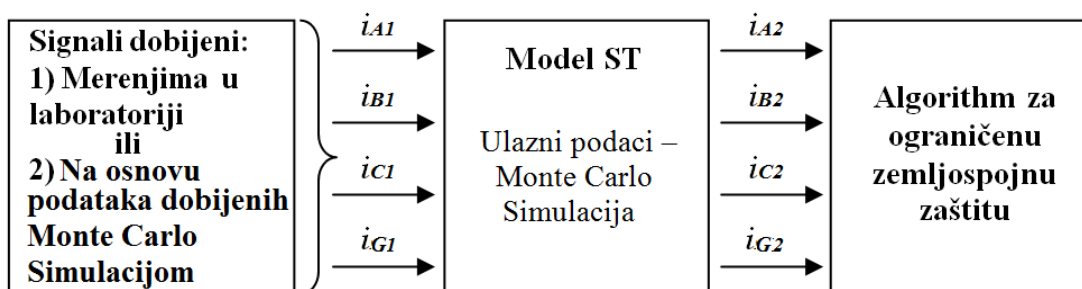
Tab. 5.6 Šablon remanentnog fluksa u fazama A, B i C – strujni transformator

šablon	faza A ( $\lambda_{rA}$ )	faza B ( $\lambda_{rB}$ )	faza C ( $\lambda_{rC}$ )
1	$\lambda_0$	$-\lambda_0$	0
2	$\lambda_0$	0	$-\lambda_0$
3	$-\lambda_0$	$\lambda_0$	0
4	$-\lambda_0$	0	$\lambda_0$
5	0	$\lambda_0$	$-\lambda_0$
6	0	$-\lambda_0$	$\lambda_0$

### 5.2.6.3 Testiranje algoritma

U cilju uvida i provere koje sve vrednosti indeks usmerenosti može imati tokom uključenja neopterećenog ET-a praćenog zasićenjem ST-a algoritam je testiran pomoću signala snimljenih u laboratoriji i signala generisanih Monte Carlo simulacijom. Sl. 5.30 daje šematski prikaz načina na koji je testiran algoritam.

Tokom simulacije rada ST-a pretpostavljeno je da samo fazni strujni transformatori ulaze u zasićenje, dok ST u neutralnom provodniku korektno transformiše struju sa primara na sekundar.



Sl. 5.30 Šematski prikaz načina na koji je testiran algoritam

#### 5.2.6.3.1 Testiranje algoritama pomoću signala snimljenih u laboratoriji

*Procedura testiranja:*

1. Niz laboratorijskih merenja je izvršen sa ciljem dobijanja signala pogodnih za testiranje algoritma. Sl. 5.4 pokazuje šemu veza koja je korišćena za ova

---

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

---

- merjenja. Sekundar trofaznog transformatora prenosnog odnosa 5.8kV / 220V spregnutog YNyn, je uključivan na naizmenični napon 3x220V, dok mu je VN namotaj bio otvoren. Uključivanja su ponavljena više puta zatvaranjem P1.
2. Snimanje i odabiranje struja je sprovedeno korišćenjem akvizicionog sistema NI USB-6009. Snimane su fazne struje ( $i_a, i_b, i_c$ ) i struja neutralnog provodnika ( $i_g$ ). Frekvencija odabiranja tokom snimanja je izabrana da bude 5 kHz.
  3. Za testiranje algoritma korišćeni su signali snimljeni pomoću 20 različitih slučajeva uključjenja neopterećenog energetskog transformatora.
  4. Zadati su opsezi vrednosti neizvesnih ulaznih podataka koji figurišu modelu ST-a.
  5. Monte Carlo simulacijom su nasumice izabrane vrednosti ovih neizvesnih podataka. Za svaki slučaj uključjenja je odrađeno 1000 simulacija.
  6. Fazne struje iz tačke 3. su u vidu odbiraka propuštene kroz model ST-a i na taj način su dobijene struje na sekundarima ST-a. Pomoću struja dobijenih na sekundarima ST-a izračunata je suma faznih struja ( $3i_0$ ).
  7. Na prethodno opisan način generisani su signali za 20000 različitih slučajeva. Ovim signalima je testiran rad algoritma poređenjem izračunate struje  $3i_0$  i izmerene struje  $i_G$ .
  8. Posmatrane su vrednosti indeksa usmerenosti.

### 5.2.6.3.2 Testiranje algoritama signalima izračunatim na osnovu podataka dobijenih Monte Carlo simulacijom

#### *Procedura testiranja:*

1. Prvo su zadati opsezi vrednosti neizvesnih ulaznih podataka koji figurišu modelu za simulaciju uključjenja neopterećenog ET-a.
2. Nakon toga su Monte Carlo simulacijom nasumice izabrane vrednosti ovih neizvesnih ulaznih podataka
3. Generisane su struje uključjenja u fazama a, b i c, a zatim je izračunata struja u neutralnom provodniku transformatora ( $i_G$ ) prema izrazu (5.20). Frekvencija odabiranja je izabrana da bude 5 kHz.
4. Zadati su opsezi vrednosti neizvesnih ulaznih podataka koji figurišu modelu ST.

5. Monte Carlo simulacijom su nasumice izabrane vrednosti ovih neizvesnih podataka.
6. Fazne struje generisane u okviru tačke 3. su u vidu odbiraka propuštene kroz model ST-a i na taj način su dobijene struje na sekundarima ST-a. Pomoću struja dobijenih na sekundarima ST-a izračunata je struja ( $3i_0$ ).
9. Na prethodno opisan način generisani su signali za 10000 različitih slučajeva. Ovim signalima je testiran rad algoritma, poređenjem struje  $3i_0$  (izračunate u okviru tačke 6.) i struje  $i_G$  (izračunate u okviru tačke 3.).
7. Posmatrane su vrednosti indeksa usmerenosti.

### 5.2.6.4 Rezultati

#### 5.2.6.4.1 Testiranje algoritma za ograničenu zemljospojnu zaštitu baziranog na faznoj komparaciji u vremenskom domenu

Na narednim slikama fazni pomeraj između struje ( $3i_0$ ) i struje neutralnog provodnika ( $i_G$ ) je estimiran pomoću (5.7). Sl. 5.31 prikazuje trajektorije estimiranih faznih pomeraja između struja  $3i_0$  i  $i_G$  u prvih osam perioda od uključenja, kada su struje uključenja snimljene u laboratoriji, a rad ST-a simuliran Monte Carlo metodom. Na slici je prikazano svih 20000 slučajeva. Broj odbiraka u osnovnoj periodu signala je bio jednak  $m=100$ .

Trajektorije estimiranih faznih pomeraja između struja  $3i_0$  i  $i_G$  u prvih osam perioda od uključenja, kada su i ulazni podaci za proračun struje uključenja ET-a i ulazni podaci ST-a dobijeni pomoću Monte Carlo metode, prikazane su na Sl. 5.32. Na slici je prikazano svih 10000 slučajeva. Broj odbiraka u osnovnoj periodu signala je bio jednak  $m=100$ .

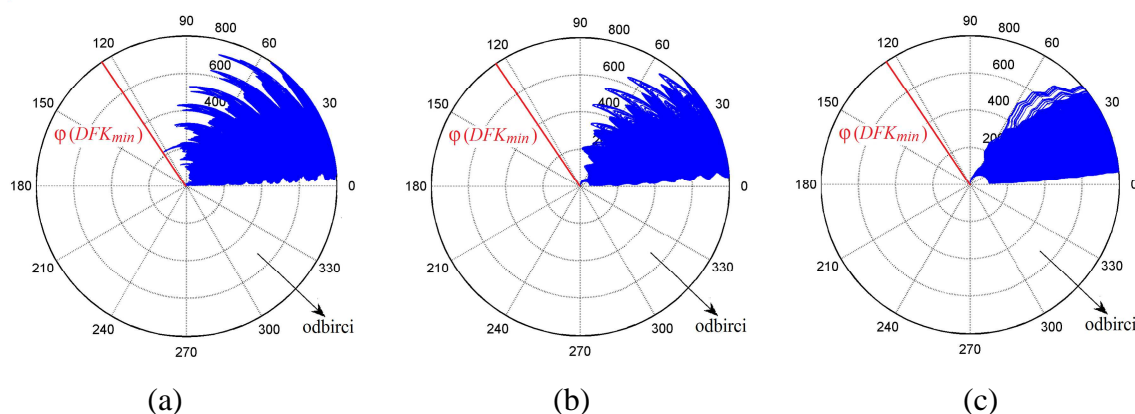
Na slikama se može uočiti da se poklapaju oblasti koje zauzima fazni pomeraj struja uključenja snimljenih u laboratoriji i struja koje su generisane Monte Carlo metodom. Takođe, može se uočiti da oblast dobijena pomoću Monte Carlo metode zauzima veću površinu, što je i očekivano jer je Monte Carlo simulacijom obuhvaćeno više slučajeva uključenja. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da se prilikom analize uključenja ET-a u praznom hodu može koristiti samo MC simulacija, što može

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

biti od velikog značaja u slučajevima kada je nemoguće izvršiti merenja na stvarnoj opremi.

Da ne bi došlo do nepotrebnog reagovanja zaštite usled zasićenja ST-a za maksimalnu podešenu granučnu vrednost indeksa usmerenosti mogla bi da se izabere minimalna vrednost neusrednjenog indeksa usmerenosti koja je dobijena, odnosno graničnu vrednost indeksa usmerenosti bi trebalo podesiti tako da važi uslov (5.21).

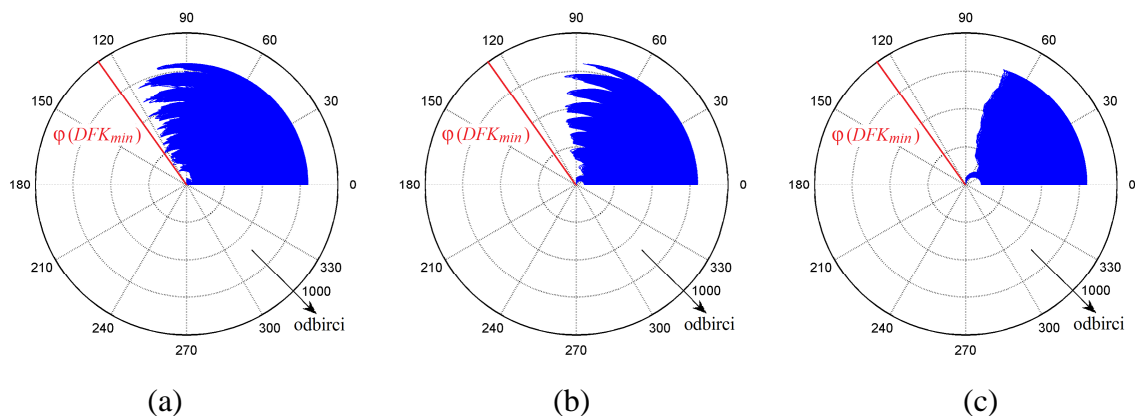
$$DFK_{gr} \leq \min(DFK) \quad (5.21)$$



Sl. 5.31 Trajektorije faznih pomeraja – za struje uključenja snimljene u laboratoriji:

a)  $\varphi$  (na osnovu neusrednjenog DFK), b)  $\varphi_{avg T/2}$  (na osnovu  $DFK_{avg T/2}$ ),

c)  $\varphi_{avg T}$  (na osnovu  $DFK_{avg T}$ )



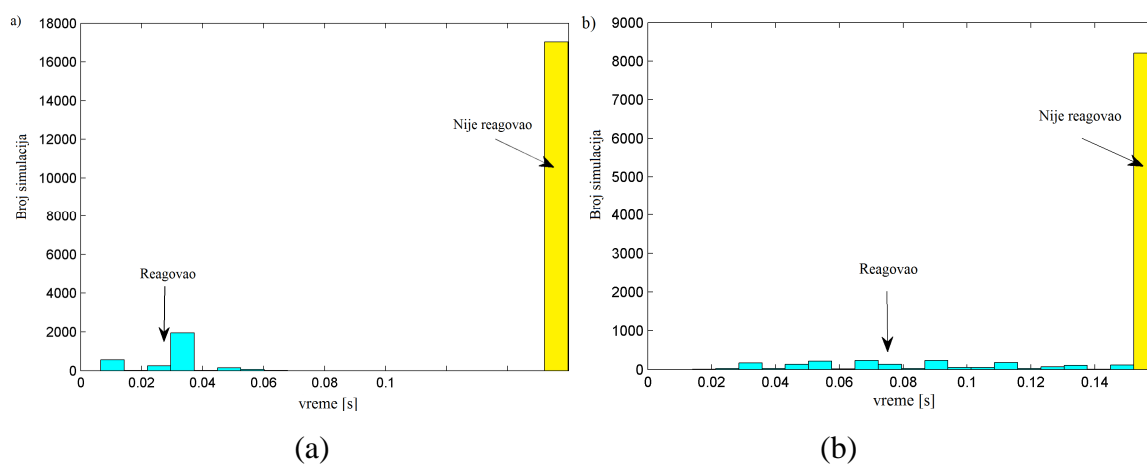
Sl. 5.32 Trajektorije faznih pomeraja – za struje uključenja izračunate na osnovu podataka dobijenih Monte Carlo simulacijom: a)  $\varphi$  (na osnovu neusrednjenog DFK),

b)  $\varphi_{avg T/2}$  (na osnovu  $DFK_{avg T/2}$ ), c)  $\varphi_{avg T}$  (na osnovu  $DFK_{avg T}$ )

## 5.2.6.4.2 Testiranje diferencijalnog releja za zemljospojnu zaštitu

Pomoću generisanih signala testiran je i rad konvencionalnog zemljospojnog releja. Konvencionalni zemljospojni relej, čiji rad je ispitan, kao stabilizacionu struju koristi sumu  $3I_0$  and  $I_G$  [21]. Nagib karakteristike reagovanja je jednak 25%, a minimalna diferencijalna struja je podešena na vrednost 0,2 r.j.

Sl. 5.33 prikazuje histograme odluke reagovanja i trenutak reagovanja u slučaju da je relej (nepotrebno) reagovao. Na desnoj strani, žutom bojom, dat je broj slučajeva kad je relej doneo pravilnu odluku da ne treba da reaguje. Na slikama se može uočiti da je posmatrani konvencionalni relej nepotrebno reagovao u ( $\approx 15\%$ ) ispitanih slučajeva uključenja ET-a praćenih zasićenjem ST-a.



Sl. 5.33 Histogram odluka reagovanja i trenutaka reagovanja u slučaju da je relej (nepotrebno) reagovao (a) Struje uključenja snimljene u laboratoriji (b) Struje uključenja izračunate na osnovu podataka dobijenih Monte Carlo simulacijom

## 5.3 Zaključak

U ovom poglavlju predstavljen je algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a baziran na digitalnoj faznoj komparaciji sume struja na priključcima ET-a ( $3i_0$ ) i struje neutralnog provodnika ( $i_G$ ). Algoritam određuje da li je prisutan zemljospoj unutar štice zone transformatora korišćenjem funkcije usmerenosti. Pokazano je da bi se primenom novog algoritma izbeglo nepotrebno reagovanje konvencionalne zemljospojne zaštite bazirane na diferencijalnom principu uzrokovano zasićenjem ST-a.



---

## 5. Zemljospojna zaštita energetskog transformatora

---

Na osnovu eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih simulacijama pokazano je da je novi metod precizan tokom svih ispitanih poremećaja. Prikazano je da je u režimima praćenim zasićenjem ST-a u prvih 5 ms od uspostavljanja kvara ili uključenja jasno uočljiva razlika između kvara unutar štíčene zone i: kvara van štíčene zone i uključenja neoprerećenog transformatora.

Pokazano je da vrednost indeksa usmerenosti monotono konvergira ka vrednosti  $I_{r.j.}$  pri jednofaznim kvarovima van štíčene zone i pri uključenju neopterećenog transformatora, a da konvergira ka vrednosti  $-I_{r.j.}$  pri jednofaznim kvarovima unutar štíčene zone. Takođe, pokazano je da u slučaju prisustva zasićenja ST-a vrednost indeksa osciluje. Dodatno usrednjavanje indeksa usmerenosti povećava otpornost algoritma na oscilacije koje nastaju usled zasićenja ST-a.

Nova metoda ne koristi blokadu po drugom harmoniku što ima veliku prednost u brzini formiranja signala reagovanja.

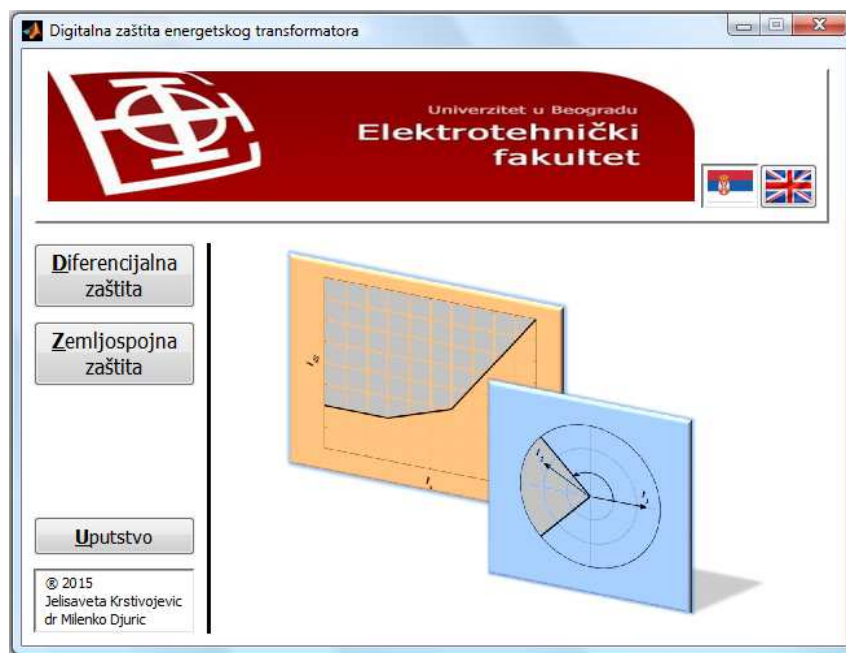
Granična vrednost indeksa usmerenosti treba da bude izabrana tako da ne dođe do nepotrebnog reagovanja zaštite usled zasićenja ST-a. Jedan od načina za izbor granične vrednosti je prikazan u okviru ovog poglavlja.

Iz prikazanih rezultata vidi se da je u svim testovima pouzdanost, sigurnost i brzina algoritma bila veoma dobra. Prednost predloženog algoritma za primenu u zemljospojnoj zaštiti transformatora čini njeogova jednostavnost, velika brzina odziva i pouzdanost. Lako se može implementirati u već postojeće jedinice za zaštitu energetskog transformatora. Diferencijalna zaštita najčešće obuhvata nekoliko jedinica, među kojima su diferencijalni releji i zemljospojni releji. Za rad pomenutih jedinica vrši se merenje struja na priključcima transformatora i struje neutralnog provodnika. Tako da su u već postojećim jedinicama za zaštitu ET-a, signali potrebni za rad novog algoritma obezbeđeni.

## 6. SOFTVERSKI ALAT ZA SIMULACIJU DIGITALNE ZAŠTITE ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Softverski alat je razvijen sa željom da korisniku približi rad tradicionalne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite ET-a, i da predstavi rad zaštite koja koristi algoritme koji su rezultat ove doktorske disertacije. Dakle, na osnovu razvijenih algoritama za zaštitu energetskog transformatora kreiran je softverski alat za simulaciju digitalne zaštite ET-a. Za izradu korisničkog interfejsa korišćen je Matlab GUIDE (engl. Graphical User Interface Development Environment).

Da bi se startovao kreirani softverski alat, prethodno je potrebno otvoriti program MATLAB i izabrati tekući direktorijum *Zastita ET*. Softverski alat se poziva kucanjem naredbe *Start* u komandnom prozoru. Nakon toga na ekranu se otvara glavni prozor prikazan na Sl. 6.1.



Sl. 6.1 Početni prozor softverskog alata za zaštitu energetskog transformatora

Glavni prozor sadrži:

- naslovnu liniju sa nazivom softverskog alata;
- tastere za izbor jezika;

---

## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora

---

– tastere za izbor zaštite čiji rad se želi simulirati:

- Diferencijalna zaštita ili
- Zemljospojna zaštita

– taster uputstva za korišćenje.

Tasteri za izbor jezika se nalaze u gornjem desnom uglu. Klikom na jedan od dva ponuđena tastera korisnik bira da li želi da koristi softverski alat na srpskom ili engleskom jeziku.

Nakon što korisnik odluči koju zaštitu želi da simulira klikom na odgovarajući taster automatski se otvara prozor za podešavanje karakteristike reagovanja izabrane zaštite.

Klikom na taster Uputstvo, korisnik dobija osnovne instrukcije za korišćenje softverskog alata.

### 6.1 Simulacija diferencijalne zaštite

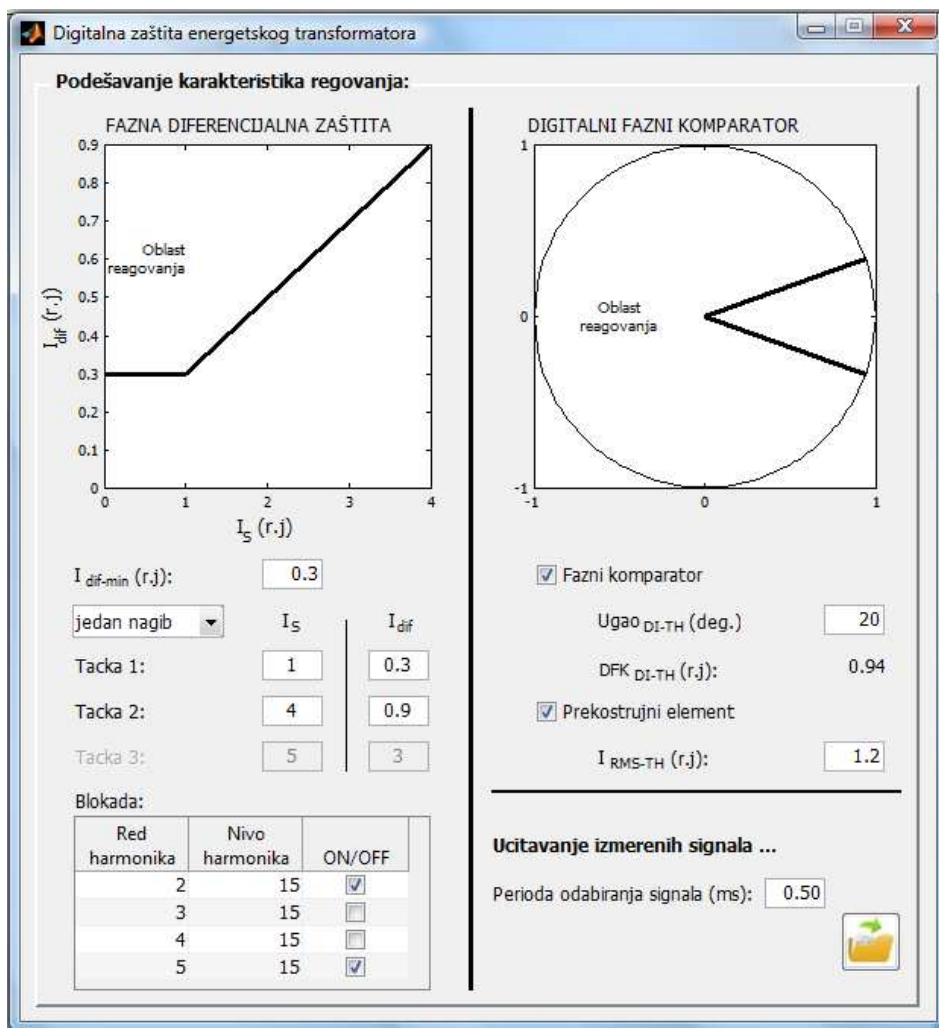
Klikom na taster *Diferencijalna zaštita* otvara se prozor prikazan na Sl. 6.2 u kome se podešavaju karakteristike reagovanja diferencijalne zaštite i zaštite koja koristi algoritam za blokiranje nepotrebnog reagovanja tokom spoljašnjih kvarova koji je rezultat ove doktorske disertacije.

Na levoj strani prozora vrši se podešavanje karakteristike reagovanja diferencijalne zaštite unosom podataka:

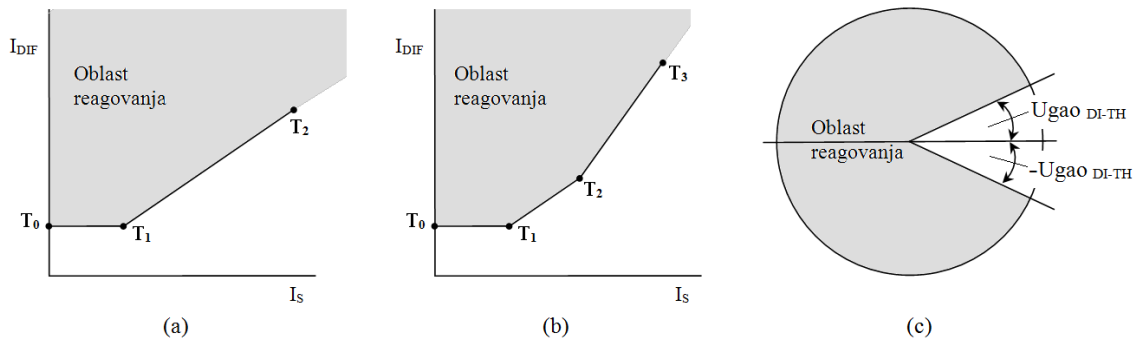
- Minimalne diferencijalne struje reagovanja ( $I_{\text{dif-min}}$ ). Upisivanjem ove vrednosti podešava se tačka  $T_0$  ( $0, I_{\text{dif-min}}$ ) na karakteristici (Sl. 6.3.a i b.).
- Zatim je potrebno iz padajućeg menija izabrati da li karakteristika reagovanja ima jedan ili dva nagiba. Ukoliko je izabrana karakteristika sa jednim nagibom, tada se nagib zadaje indirektno pomoću tačaka  $T_1$  i  $T_2$  na karakteristici (Sl. 6.3.a). Ukoliko se iz padajućeg menija izabere karakteristika sa dva nagiba na korisničkom prozoru postaje aktivna i treća tačka. Nagibi na karakteristici se zadaju unošenjem koordinata tačaka. Za nagib 1 unose se tačke  $T_1$  i  $T_2$ , a za nagib 2 tačke  $T_2$  i  $T_3$  (Sl. 6.3.b). Po unosu koordinata tačaka na korisničkom prozoru se automatski iscrtava zadata karakteristika reagovanja.

## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora

- Zatim, ukoliko korisnik želi da simulira rad diferencijalne zaštite koja se blokira usled prisustva viših harmonika potrebno je da u tabeli *Blokada* potvrdi polje pored izabranog reda harmonika po kome se vrši blokada i da upiše nivo harmonika pri kome se rad zaštite blokira. Dostupna je blokada po drugom, trećem, četvrtom i petom harmoniku. Ukoliko korisnik ne želi da simulira blokadu po višim harmonicima, tada nijedno polje za potvrdu ne treba da bude potvrđeno.



Sl. 6.2 Podešavanje karakteristika reagovanja fazne diferencijalne zaštite i zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru




Sl. 6.3 Podešavanje karakteristika reagovanja

Na desnoj strani prozora (Sl. 6.2) unose se podaci potrebni za rad novog algoritma za blokadu nepotrebnog reagovanja tokom spoljašnjih kvarova.

- Za rad ovog algoritma neophodno je podesiti karakteristiku reagovanja digitalnog faznog komparatora. Oblast blokiranja se zadaje upisivanjem ugla  $U_{gao\ DI-TH}$  [°]. Nakon upisivanja ugla na prozoru se automatski prikazuje izabrana karakteristika i ispisuje se granična vrednost indeksa usmerenosti  $DFK_{DI-TH}$  [r.j.] koji se koristi u algoritmu za zaštitu. Na Sl. 6.3.c je osenčena oblast u kojoj blokada nije aktivna, odnosno u kojoj je dozvoljeno reagovanje diferencijalne zaštite.
- Zatim korisnik može da izabere da li će u algoritmu za zaštitu osim fazne komparacije primarne i sekundarne struje, koristiti uslov koji nadgleda efektivne vrednosti ovih struja. Potvrđivanjem odgovarajućeg polja za potvrdu prekostrujna funkcija postaje aktivna i tada je potrebno uneti prag reagovanja za ovu funkciju  $I_{RMS-TH}$  [r.j.].

Nakon podešavanja karakteristika reagovanja algoritama za simulaciju diferencijalne zaštite i zaštite koja se bazira na digitalnom faznom komparatoru, korisnik treba da učita fajl sa odbircima signala pomoću kojih će ovi algoritmi biti testirani.

Nakon klika na taster sa slikom  korisnik treba da pronade odgovarajući fajl u *.mat* formatu na stablu računara, u *Windows* okruženju. Fajl koji se učitava može sadržati

---

## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora

---

odbirke signala koji su izmereni ili signala koji su generisani kompjuterskim simulacijama. Bitno je naglasiti da postoje ograničenja u pogledu dimenzija, strukture i naziva argumenta *.mat* fajla. Naziv argumenta u *.mat* fajlu treba da bude **M**, i treba da bude dimenzija  $6 \times n$ . Fajl treba da bude formiran tako da odbirci svakog signala budu upisani u posebnom redu, gde prva tri reda u matrici odgovaraju strujama, u fazama A, B i C, na jednoj strani ET-a, a druga tri reda strujama u fazama a, b i c na drugoj strani transformatora.

Broj *n* predstavlja neograničen broj odbiraka signala. Zahtevi koji su navedeni mogu biti ulazni podaci u programu za akviziciju podataka, koji se koristi tokom merenja ili u programu za simulaciju pomoću koga se generišu signali. Ukoliko format fajla sa odbircima signala ne ispunjava zahteve u pogledu dimenzija, strukture i naziva argumenta, potrebno ga je prilagoditi u skladu sa navedenim zahtevima.

Ovde treba napomenuti da se svi podaci koji se upisuju u prozoru prikazanom na Sl. 6.2 čuvaju i automatski učitavaju kao ulazni podaci u algoritmima koji se testiraju. Nakon izbora željenog *.mat* fajla sa odbircima signala, fajl se automatski učitava u algoritam za simulaciju rada diferencijalne zaštite i zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru. Nakon izvršenih proračuna automatski se otvara prozor koji prikazuje rezultate (Sl. 6.4).

### **Prikazivanje rezultata simulacije rada diferencijalne zaštite i zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru**

Prozor za prikazivanje rezultata simulacije rada diferencijalne zaštite i novog algoritma za zaštitu ET-a prikazan je na Sl. 6.4.

Na levoj strani prozora potvrđivanjem određenog boksa mogu se prikazati:

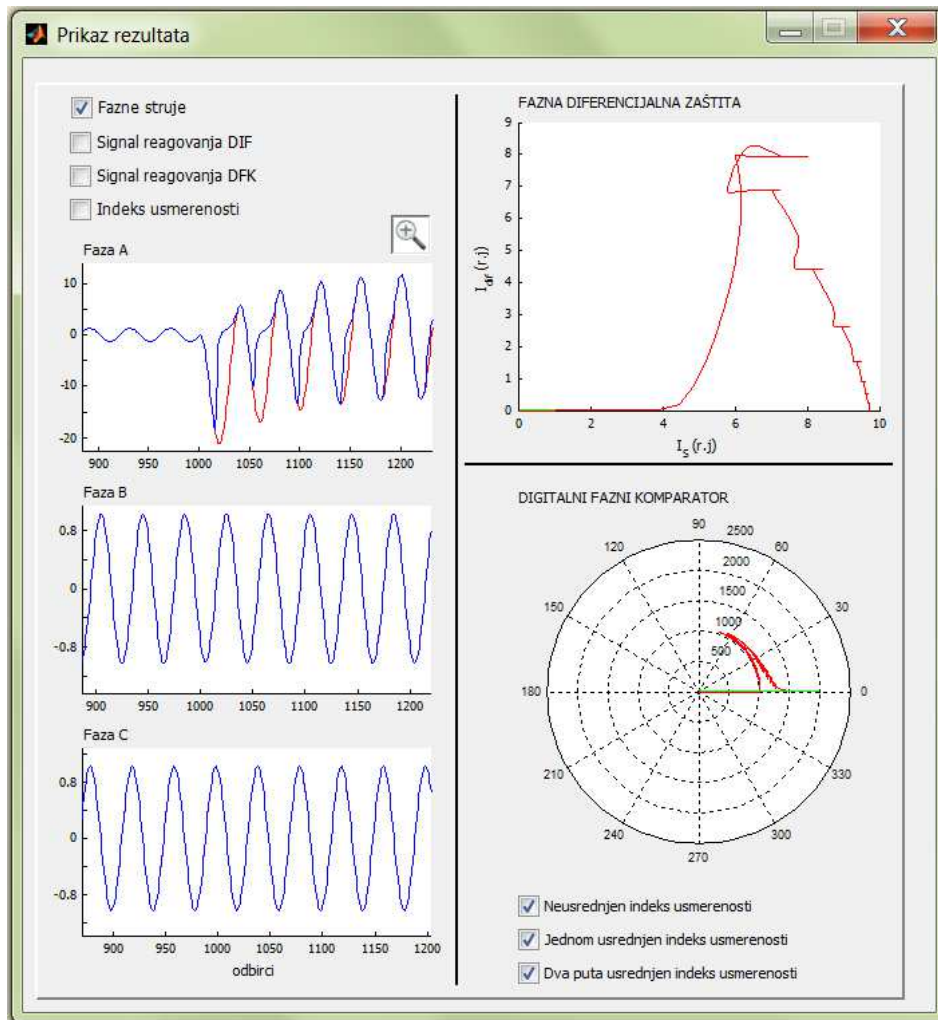
- struje koje se dovode na ulaz releju;
- signal reagovanja algoritma diferencijalne zaštite;
- signal reagovanja algoritma za blokadu diferencijalne zaštite baziranog na digitalnom faznom komparatoru i
- indeks usmerenosti na osnovu koga algoritam baziran na digitalnom faznom komparatoru aktivira signal reagovanja.

## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora

Boksovi se mogu potvrditi pojedinačno ili više odjednom. Potvrđivanjem nekog boksa odgovarajuća struja i/ili pokazatelj se prikazuje na grafikonima ispod. Na svim grafikonima korisniku je omogućeno da koristi funkciju zumiranja.

Na desnoj strani prozora prikazane su:

1. Zavisnost proračunate diferencijalne struje od stabilizacione ( $I_{dif}=f(I_S)$ ) za sve tri faze, i
2. Trajektorije estimiranog faznog pomeraja između primarne i sekundarne struje. Ovde je moguće prikazati fazne pomeraje estimirane pomoću indeksa usmerenosti koji je neusrednjen, usrednjen na pola periode i usrednjen na celoj periodi.



Sl. 6.4 Prozor za prikazivanje rezultata rada diferencijalne zaštite i zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru

Na Sl. 6.4 prikazan je slučaj spoljašnjeg KS-a u fazi A, koji je praćen zasićenjem ST-a i koji je analiziran u okviru glave 4.

## 6.2 Simulacija zemljospojne zaštite

Klikom na taster *Zemljospojna zaštita*, u Glavnom prozoru softverskog alata, otvara se prozor prikazan na Sl. 6.5 u kome se podešavaju karakteristike reagovanja zemljospojne zaštite bazirane na diferencijalnom principu i zaštite koja koristi algoritam za zemljospojnu zaštitu ET-a koji je rezultat ove doktorske disertacije.

Na levoj strani prozora vrši se podešavanje konvencionalne zemljospojne zaštite koja se bazira na diferencijalnom principu, gde je najpre potrebno izabrati i podesiti karakteristiku reagovanja. Karakteristika reagovanja se zadaje preko sledećih parametara:

- Minimalne nulte diferencijalne struje reagovanja ( $I_{\text{dif-min}}$ ). Upisivanjem ove vrednosti podešava se tačka  $T_0$  ( $0, I_{\text{dif-min}}$ ) na karakteristici (Sl. 6.3.a i b.).
- Zatim je potrebno iz padajućeg menija izabrati da li karakteristika reagovanja ima jedan ili dva nagiba. Ukoliko je izabrana karakteristika sa jednim nagibom, tada se nagib zadaje indirektno pomoću tačaka  $T_1$  i  $T_2$  na karakteristici (Sl. 6.3.a). Ukoliko se iz padajućeg menija izabere karakteristika sa dva nagiba na korisničkom prozoru postaje aktivna i treća tačka. Nagibi se zadaju unošenjem koordinata tačaka. Za nagib 1 unose se tačke  $T_1$  i  $T_2$ , a za nagib 2 tačke  $T_2$  i  $T_3$  (Sl. 6.3.b). Po unosu koordinata tačaka na korisničkom prozoru se automatski iscertava zadata karakteristika reagovanja.

Na desnoj strani prozora podešavaju se parametri za rad novog algoritma za zemljospojnu zaštitu ET-a.

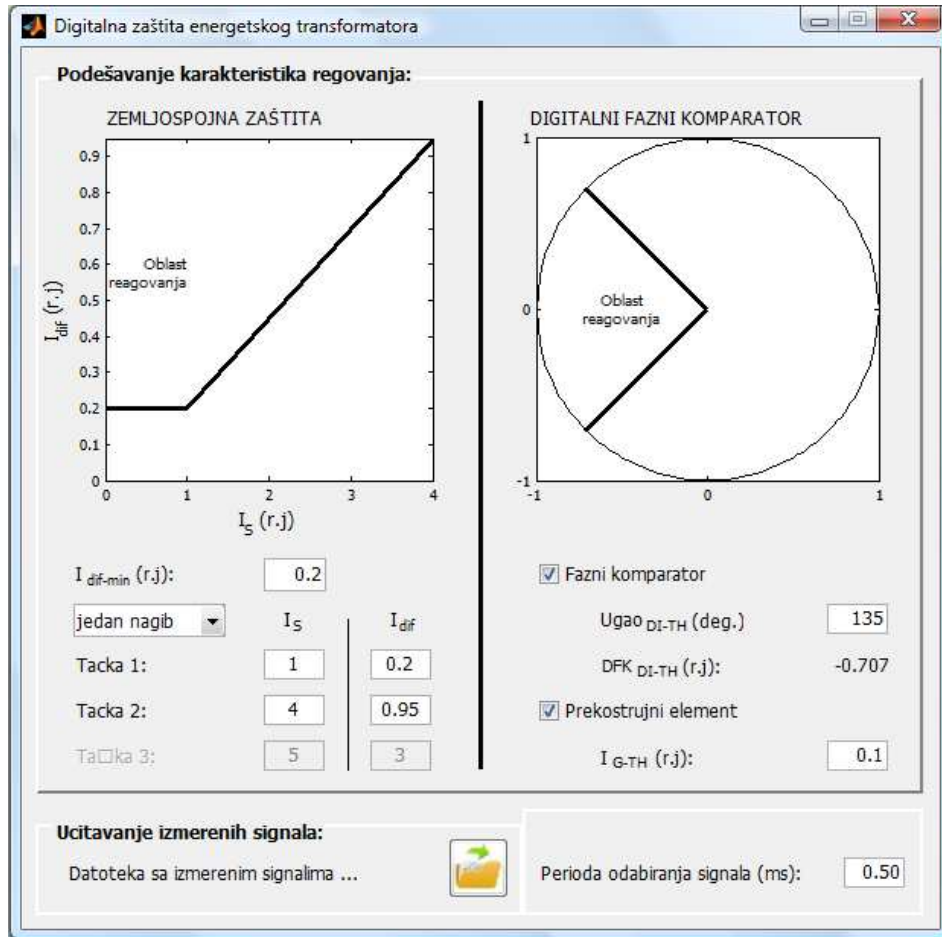
- Za rad ovog algoritma neophodno je podesiti karakteristiku reagovanja digitalnog faznog komparatora. Oblast reagovanja se zadaje upisivanjem ugla  $U_{\text{gao DI-TH}} [^\circ]$ . Nakon upisivanja ugla na prozoru se automatski prikazuje izabrana karakteristika i ispisuje se granična vrednost indeksa usmerenosti



## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora


$DFK_{DI-TH}$  [r.j.] koji se koristi u algoritmu za zaštitu. Na Sl. 6.3.c je osenčena oblast reagovanja zemljospojne zaštite.

- Zatim je potrebno da korisnik podesi graničnu vrednost sa kojom se poredi struja neutralnog provodnika  $I_{G-TH}$  [r.j.]..



- Sl. 6.5 Podešavanje karakteristika reagovanja zemljospojne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite koja se bazira na digitalnom faznom komparatoru

Nakon podešavanja karakteristika reagovanja algoritama za simulaciju zemljospojne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite koja se bazira na digitalnom faznom komparatoru, korisnik treba da učitava fajl sa odbircima signala pomoću kojih će ovi algoritmi biti testirani.

Nakon klika na taster sa slikom  korisnik treba da pronade odgovarajući fajl u *.mat* formatu na stablu računara, u *Windows* okruženju. Fajl koji se učitava može sadržati

---

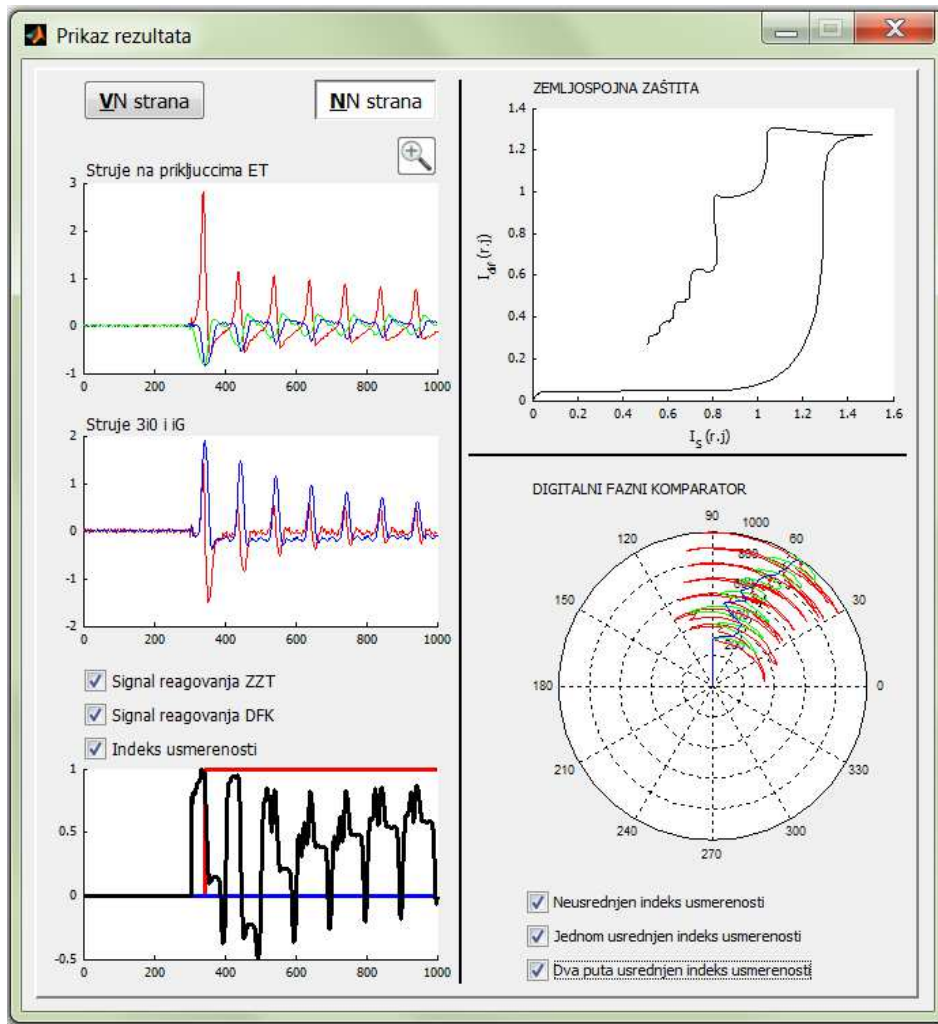
## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora

odbirke signala koji su izmereni ili signala koji su generisani kompjuterskim simulacijama. Bitno je naglasiti da postoje ograničenja u pogledu dimenzija, strukture i naziva argumenta *.mat* fajla. Naziv argumenta u *.mat* fajlu treba da bude **M**, i treba da bude dimenzija  $8 \times n$ . Fajl treba da bude formiran tako da odbirci svakog signala budu upisani u posebnom redu, gde prva četiri reda u matrici odgovaraju strujama u fazama A, B i C i struji neutralnog provodnika, na VN strani ET-a, a druga četiri reda strujama u fazama a, b i c i struji neutralnog provodnika na NN strani transformatora. Broj *n* predstavlja neograničen broj odbiraka signala. Zahtevi koji su navedeni mogu biti ulazni podatci u programu za akviziciju podataka, koji se koristi tokom merenja ili u programu za simulaciju pomoću koga se generišu signali. Ukoliko format fajla sa odbircima signala ne ispunjava zahteve u pogledu dimenzija, strukture i naziva argumenta, potrebno ga je prilagoditi u skladu sa navedenim zahtevima.

Ovde treba napomenuti da se svi podaci koji se upisuju u prozoru prikazanom na Sl. 6.5 čuvaju i automatski učitavaju kao ulazni podaci u algoritmima koji se testiraju. Nakon izbora željenog *.mat* fajla, fajl sa odbircima se automatski učitava u algoritam za simulaciju rada zemljospojne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru. Nakon izvršenih proračuna automatski se otvara prozor koji prikazuje rezultate (Sl. 6.6).

**Prikazivanje rezultata simulacije rada zemljospojne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru**

Prozor za prikazivanje rezultata simulacije rada diferencijalne zaštite i novog algoritma za zaštitu ET-a prikazan je na Sl. 6.6.



Sl. 6.6 Rezultati simulacije rada zemljospojne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru

Na levoj strani prozora klikom na taster *VN strana* ili *NN strana* korisnik bira za koju stranu ET-a želi da mu se prikažu rezultati simulacije zemljospojne zaštite.

Nakon izbora strane ET-a za koju se posmatra rad zemljospojne zaštite na grafikonima se prikazuju:

---

## 6. Softverski alat za simulaciju digitalne zaštite energetskog transformatora

---

- struje na priključcima ET-a;
- suma struja na priključcima ET-a ( $3i_0$ ) i struja neutralnog provodnika ( $i_G$ );
- i potvrđivanjem određenog boksa mogu se prikazati:
  - signal reagovanja zemljospojne diferencijalne zaštite
  - signal reagovanja zemljospojne zaštite bazirane na digitalnom faznom komparatoru i
  - indeks usmerenosti na osnovu koga algoritam baziran na digitalnom faznom komparatoru donosi odluku reagovanja.

Boksovi se mogu potvrditi pojedinačno ili više odjednom. Potvrđivanjem nekog boksa odgovarajući signal reagovanja i/ili indeks usmerenosti se prikazuju/e na grafikonima ispod. Na svim grafikonima korisniku je omogućeno da koristi funkciju zumiranja.

Na desnoj strani prozora prikazane su:

1. Zavisnost proračunate nulte diferencijalne struje od nulte stabilizacione ( $I_{dif}=f(I_S)$ ).
2. Trajektorije estimiranog faznog pomeraja između sume struja na priključcima ET-a ( $3i_0$ ) i struje neutralnog provodnika ( $i_G$ ). Ovde je moguće prikazati fazne pomeraje estimirane pomoću indeksa usmerenosti koji je neusrednjen, usrednjen na pola periode i usrednjen na celoj periodi.

Na Sl. 6.6 prikazan je slučaj uključanja neopterećenog ET-a praćen zasićenjem faznih ST-a, koji je razmatran u okviru glave 5.

### 6.3 Zaključak

Na osnovu razvijenih algoritama za zaštitu energetskog transformatora kreiran je softverski alat pomoću koga su korisniku slikovito i jasno približeni principi rada tradicionalne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite ET-a, i predstavljen je rad zaštite koja se bazira na faznoj komparaciji u vremenskom domenu. Softverski alat omogućava da se algoritmi za zaštitu testiraju učitavanjem realnih signala koji su snimljeni u laboratoriji ili korišćenjem signala koji su generisani kompjuterskim simulacijama. Kreirani softverski alat se može koristiti u edukativne svrhe.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljeni su algoritmi za digitalnu zaštitu energetskih transformatora (ET-a) od unutrašnjih kvarova. Predstavljeni algoritmi za zaštitu od kratkih spojeva namotaja ET-a i za zaštitu ET-a od zemljospojeva baziraju se na digitalnoj faznoj komparaciji u vremenskom domenu. Za estimaciju faznog pomeraja koristi se digitalni fazni komparator koji se bazira na proračunu proizvoda dva signala na intervalu dužine poluperiode signala. Na ovaj način ne određuje se direktno vrednost ugla, već se proračunava indeks usmerenosti.

U doktorskoj disertaciji je prvo ispitana mogućnost primene fazne komparacije primarne i sekundarne struje za detekciju unutrašnjih kratkih spojeva u ET-u. Na osnovu kompjuterski generisanih signala i signala dobijenih merenjima u laboratoriji pokazano je da je tokom normalnih radnih režima i kvarova van štíćene zone ET-a, fazni pomeraj između primarne i sekundarne ( $\varphi$ ) struje približno jednak  $0^\circ$ , kao i da je tokom KS-eva na namotaju ET-a fazni pomeraj ( $\varphi$ ) veći od  $0^\circ$ . U zavisnosti od položaja ET-a u sistemu tokom analize promene faznog pomeraja ( $\varphi$ ) za vreme KS-eva namotaja ET-a posebno su posmatrana dva slučaja. Kada se ET nalazi između dve aktivne mreže fazni pomeraj ( $\varphi$ ) se menja u opsegu  $0^\circ$  i  $180^\circ$ , dok će tokom KS-eva na namotaju ET-a koji se nalazi između aktivne mreže i potrošača fazni pomeraj ( $\varphi$ ) biti između  $0^\circ$  i  $90^\circ$ .

Pokazano je da vrednost faznog pomeraja ( $\varphi$ ) zavisi od procenta namotaja koji su KS-eni, radnog režima koji je prethodio kvaru i parametara mreže i potrošača između kojih radi ET.

Pomoću signala koji su generisani simulacijama i signala koji su snimljeni u laboratoriji pokazano je da se primenom fazne komparacije struja na primarnim i sekundarnim priključcima energetskog transformatora mogu detektovati kratki spojevi namotaja. Na osnovu rezultata simulacija, za svaku posmatranu spregu za KS-eve 5% namotaja procenjen je rad releja koji se bazira na diferencijalnom principu i releja koji koristi digitalni fazni komparator. U svim razmatranim primerima oba releja bi detektovala KS-eve.

---

## 7. Zaključak

---

Pošto bi fazni komparator služio kao dopunski kriterijum za rad diferencijalne zaštite, blokada nepotrebnog reagovanja tokom prepobuđenosti ET-a ili pojave udarne struje magnećenja bi bila ostvarena, već postojećom, blokadom po višim harmonicima.

Tokom analize promene faznog pomeraja ( $\varphi$ ), zbog postojanja opadajuće jednosmerne komponente u struji kvara, korišćen je digitalni filter opadajuće jednosmerne komponente, a zbog postojanja viših harmonika digitalni Fourier-ov filter.

Zatim je predstavljen novi algoritam koji bi služio za blokadu stabilizovane diferencijalne zaštite tokom kvarova van štice zone. Algoritam koristi novi pristup u rešavanju problema nepotrebnog reagovanja diferencijalne zaštite ET-a usled kvarova van štice zone zbog zasićenja ST-a. Novi pristup se zasniva na faznoj komparaciji primarne i sekundarne struje i služi za indicaciju prisustva kvara van štice zone. Prikazani rezultati potvrđuju da algoritam može da identifikuje prisustvo spoljašnjeg kvara i aktivira signal za blokadu pre nego što ST-i uđu u zasićenje. Njegovom primenom uspešno bi se moglo eliminisati nepotrebno delovanje diferencijalne zaštite i na taj način povećala njena sigurnost u radu.

U nastavku je predstavljen algoritam za zemljospojnu zaštitu energetskog transformatora koji se bazira na faznoj komparaciji sume struja izmerenih na priključcima ET-a i struje neutralnog provodnika. Prikazani algoritam predstavlja novo rešenje za realizaciju zemljospojne zaštite energetskog transformatora. Primenom predstavljenog algoritma eliminisalo bi se nepotrebno reagovanje konvencionalne zemljospojne zaštite ET-a bazirane na diferencijalnom principu tokom spoljašnjih kvarova i uključenja neopterećenog ET-a praćenih zasićenjem ST-a. Algoritam koristi signale koji se ne filtriraju digitalnom Fourier-ovom transformacijom. Takođe, algoritam ne koristi blokadu po drugom harmoniku što ima veliku prednost u brzini formiranja signala reagovanja. Prikazano je da se dodatnim usrednjavanjem indeksa usmerenosti smanjuju oscilacije njegove vrednosti koje nastaju usled zasićenja ST-a. Usrednjavanjem se povećava vreme reagovanja releja, ali se povećava sigurnost rada releja tokom zasićenja ST-a.

## 7. Zaključak

---

Svi algoritmi koji su predstavljeni u ovoj doktorskoj disertaciji su testirani pomoću signala koji su snimljeni u laboratoriji na fizičkim modelima jednofaznog i trofaznog energetskeg transformatora i pomoću kompjuterski generisanih signala.

Prednost algoritama, koji su predstavljeni u ovoj doktorskoj disertaciji, za primenu u zaštiti energetskeg transformatora čini njihova pouzdanost, sigurnost u radu, brzina i jednostavnost. Predstavljeni algoritmi se lako mogu implementirati u već postojeće jedinice za zaštitu energetskeg transformatora. Zaštita energetskeg transformatora najčešće obuhvata nekoliko jedinica, među kojima su diferencijalni releji i zemljospojni releji. Za rad pomenutih jedinica vrši se merenje struja na priključcima transformatora i struje neutralnog provodnika. Tako da su u već postojećim jedinicama za zaštitu ET, signali potrebni za rad predloženih algoritma obezbeđeni.

Na osnovu razvijenih algoritama za zaštitu energetskeg transformatora kreiran je softverski alat pomoću koga su korisniku slikovito i jasno približeni principi rada tradicionalne diferencijalne zaštite i zemljospojne zaštite ET-a, i predstavljen je rad zaštite koja se bazira na faznoj komparaciji u vremenskom domenu. Softverski alat omogućava da se algoritmi za zaštitu testiraju učitavanjem realnih signala koji su snimljeni u laboratoriji ili korišćenjem signala koji su generisani kompjuterskim simulacijama. Kreirani softverski alat se može koristiti u edukativne svrhe.

## 8. LITERATURA

1. International standard IEC 60076: Power transformers, Edition 2.1, 2000-04.
2. Rockefeller G.D., Fault Protection with a Digital Computer, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-88 , 1969; 4: 438 – 464.
3. W. Bartley, “Analysis of Transformer Failures”, International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference, Stockholm, Sweden, 2003.
4. M. Đurić, Z. Stojanović "Relejna zaštita", Beopres, Beograd 2014.
5. G. Zigler, Numerical Differential Protection, Second edition, Publicis Publishing, Erlangen 2012.
6. R. E. Cordray, “Percentage differential transformer protection,” Electrical Engineering, vol. 50, pp. 361–363, May 1931.
7. Walter A. Elmore, Protective Relaying: Theory and Applications, Second Edition, CRC Press, 2003.
8. Saleh S.A., Rahman M.A., Modeling and protection of a three-phase transformer using wavelet packet transform, IEEE Transactions Power Delivery Vol. 20, 2005; pp. 1273–1282.
9. Ozgonenel O., Onbilgin G., Kocaman C., Transformer Protection Using the Wavelet Transform, Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Sciences, Vol.13, 2005; 1: 119-135.
10. Pihler J., Grcar B., Dolinar D., Improved Operation Of Power Transformer Protection Using Artificial Neural Network, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, 1997; pp. 1128–1136.
11. Tripathy M., Power transformer differential protection using neural network Principal Component Analysis and Radial Basis Function Neural Network, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 18, 2010; 5: 600-611.
12. Perez L.G., Flechsig A.J., Meador J.L., Obradovic Z.; Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, 1994; 1: 434–441.



13. Kilic E., Ozgonenel O, Usta O, Thomas D., PCA based protection algorithm for transformer internal faults, *Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Sciences*, Vol.17, 2009; 2: 125-142.
14. Khorashadi-Zadeh H., Li Z., A Sensitive ANN Based Differential Relay for Transformer Protection with Security against CT Saturation and Tap Changer Operation, *Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Sciences*, Vol. 15, 2007; 3: 351-368.
15. Wiszniewski A., Kasztenny B., A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, 1995; 4: 1786–1792.
16. Shin M.C., Park C.W., Kim J.H., Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, 2003; 3: 718–724.
17. K. Yabe, Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, 1997: 3, 1109–1118.
18. 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*, Vol. 16, 2001; 4: 485-491.
19. Rahman M.A., Jeyasurya B., A state-of-the-art review of transformer protection algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, 1988; 2: 534–544.
20. R. L. Sharp, W. E. Glassburn, “A transformer differential relay with second-harmonic restraint,” *AIEE Transactions*, pt. III, vol. 77, pp.913–918, Dec. 1958.
21. IEEE Standard C37.91, “IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers”.
22. M.R. Rao, B.P. Singh “Detection and Localization of Interturn Fault in the HV Winding of a Power Transformer Using Wavelets”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8, Issue 4, pp. 652-657, Aug. 2001.
23. P. Liu, O.P. Malik, D. Chen, G.S. Hope, Y. Guo “Improved Operation of Differential Protection of Power Transformer for Internal Faults”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, Issue 4, pp.1912-1919, Oct. 1992.

24. Zoran Gajić, Differential Protection for Arbitrary Three-Phase Power Transformers, Doctoral Dissertation, Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Sweden, 2008.
25. Sezi T., A new approach for transformer ground differential protection, Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE (Volume: 1), 11-16 Apr 1999.
26. C. Labuschagne, I. V. Merwe, and E. Enterprises, "A comparison between high-impedance and low-impedance restricted earth-fault transformer protection," in Tech. Paper, Schweitzer Eng. Labs., Jul. 2007, pp. 1–9. [Online]. Available: [www.selinc.com](http://www.selinc.com)
27. Kasztenny, B., Impact of transformer inrush currents on sensitive protection functions How to configure adjacent relays to avoid nuisance tripping?, 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006., 4-6 April 2006.
28. A. Guzman, L. S. Anderson, "Restricted earth fault protection for transformers using a directional element", patent US5963404A, 5. Oct. 1999.
29. Siemens Co., Technical Documents of 7UT6, Numerical differential protection relay for transformers, generators, motors, and branch points. [Online]. Available: [www.siprotec.com](http://www.siprotec.com) 2003
30. Z. Stojanović, M. Djurić, "The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator", Electric Power Systems Research, 81 (2011), pp. 377–383.
31. Siniša J. Zubić, Milenko B. Djurić, "A distance relay algorithm based on the phase comparison principle", Electric Power Systems Research, 92 (2012), pp. 20–28.
32. Z. Stojanović, M. Djurić, "The An algorithm for directional earth-fault relay with no voltage inputs", Electric Power Systems Research, 96 (2013), pp. 144–149.
33. Krstivojevic J., Djurić M., "A New Method of Improving Transformer Restricted Earth Fault Protection", Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 14; Issue 3, pp. 41-48, 2014.
34. J. Krstivojevic, M. Djuric "A new algorithm for transformer ground fault protection", The 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, Athens, Greece, November 2-5, 2014.

35. Davarpanah, M.; Sanaye-Pasand, M.; Iravani, R., Performance Enhancement of the Transformer Restricted Earth Fault Relay, Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume: 28 , Issue: 1 ), 467 – 474, Jan. 2013,
36. “Transformer Management Relay, UR Series Instruction Manual, Revision ,” GE Co. Technical Documents of T60.
37. Stanbury M.; Djekic Z., The Impact of Current-Transformer Saturation on Transformer Differential Protection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PP , Issue: 99, 18 Dec 2014.
38. B. Kasztenny, A. Kulidjian: An Improved Transformer Inrush Restraint Algorithm, GE Power Management, <http://pm.geindustrial.com/faq/Documents>
39. Sonnemann, W.K., Wagner, C.L., and Rockefeller, G.D., Magnetizing inrush phenomena in transformer banks, AIEE Trans., 77, 884-892, 1958.
40. Krstivojević, J., Djurić, M., Terzić, M.: Algoritmi za prepoznavanje struje uključenja neopterećenog energetskog transformatora, - *INFOTEH-JAHORINA 2014*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, vol. 13,pp. 208-213, 2014.
41. J. L. Domínguez, J. F. M. Argüelles, M. Angel, Z. Arrieta, B. L. Jaurrieta, M. S. Benito, I. A. Zugazaga, „New quick-convergence invariant digital filter for phasor estimation“, Electric Power Systems Research Vol.79 (No.5), pp. 705–713. 2009.
42. S. Zubić, Algoritmi za distantne zaštite na bazi digitalne fazne komparacije, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2013.
43. P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier “A Transformer Model for Winding Fault Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9. Issue 2, pp. 690-699, April 1994.
44. J. Mikulovic, M. Savic, “Calculation of transients in transformer winding and determination of winding parameters,” Electrical Engineering, Volume 89, Issue 4, , pp 293-300, March 2007.
45. A. Koochaki, S. M. Kouhsari, G. Ghanavati, “ Transformer internal faults simulation,” Advances in Electrical and Computer Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 23-28, 2008.

46. B. Kasztenny, E. Rosolowski, M. M. Saba, B. Hillstrom, A power transformer model for investigation of protection schemes, International Conference on Power Systems Transients (IPST '95), Lisbon, Portugal, 1995. pp. 136 - 141.
47. D.V. Coury, P.G. Campos, M.C. Tavares, Modeling a Power Transformer for Investigation of Digital Protection Schemes, in: Proc. IEEE/PES, Harmonics and Quality of Power, vol. 2, 1998, pp. 1041–1046.
48. E. S. Jin, T. Chen, Z.Q. Bo, A Klimek and M. F. Yang, "A New Method to Identify CT Saturation Based on the time Difference Algorithm".
49. T. Zheng, J. Gu, S. F. Huang, F. Guo, and V. Terzija, "A New Algorithm to Avoid Maloperation of Transformer Differential Protection in Substations With an Inner Bridge Connection," IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 27, no. 3, July 2012.
50. M. Đurić, "Razvodna postrojenja", Beopres, Beograd 2008.
51. 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.
52. IEEE PSRC CT Saturation Calculator, 2003 [online] Available: [www.pes-psrc.org](http://www.pes-psrc.org)
53. IEEE Standard C37.110, "IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes".
54. L. J. Powell, "Current Transformer Burden and Saturation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, No. 3, May/June 1979.
55. Hunt R., "Impact of CT Errors on Protective Relays – Case Studies and Analysis", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol: 48 , Issue: 1, pp. 52 - 61, Nov. 2011.
56. Guzmán A., Altuve H.J., Benmouyal G., Power Transformer Protection, "Electric Power Transformer Engineering", Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004. pp. 353-381.
57. CIGRE WG C4.307, "Transformer Energization in Power Systems: A Study Guide", 2014.
58. Đ. Kalić, R. Radosavljević, Transformatori, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 2001.

59. D. Povh, W. Schultz, 1978, "Analysis of Overvoltages caused by Transformer Magnetizing Inrush Currents", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-97, Issue: 4, pp. 1355-1365. July 1978.
60. Holmgren, R., Jenkins, R.S., Riubrugent, J., "Transformer Inrush Current," CIGRE paper 12-03, CIGRE Paris, pp. 1-13, 1968.
61. J. H. Brunke, K. J. Fröhlich, "Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching—Part I: Theoretical Considerations", IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 16, NO. 2, pp. 276 – 280, April 2001.

## 9. NOMENKLATURA

$DFK_{s1-s2}$	integral proizvoda dva signala ( $s1$ ) i ( $s2$ ) na intervalu jednakom polovini osnovne periode signala
$DFK_{s1-s2} (r.j.)$	indeks usmerenosti - normalizovana vrednost integrala proizvoda dva signala ( $s1$ ) i ( $s2$ ) na intervalu jednakom polovini osnovne periode signala
$DFK_{-avg T}$	usrednjene vrednosti indeksa usmerenosti na celoj periodi
$DFK_{-avg T/2}$	usrednjene vrednosti indeksa usmerenosti na polovini periode
$DFK_{gr}$	granična vrednost indeksa usmerenosti
$DFT$	diskretna Fourier-ova transformacija
$ET$	energetski transformator
$f$	frekvencija napona
$FDZ$	fazna diferencijalna zaštita
$i_0$	struja praznog hoda ET-a
$I_1, I_2$	struja na primarnim i sekundarnim priključcima ET-a
$i_a, i_b, i_c$	struje na priključcima sekundara ET-a u fazama a, b, c,
$i_A, i_B, i_C$	struje na priključcima primara ET-a u fazama A, B, C
$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$	sekundarne struje strujnih transformatora na sekundaru ET-a u fazama a, b, c,
$i_{As}, i_{Bs}, i_{Cs}$	sekundarne struje strujnih transformatora na primaru ET-a u fazama A, B, C
$I_{d,min}$	minimalna diferencijalna struja pri kojoj diferencijalni relej reaguje
$I_{dif}$	diferencijalna struja
$I_{0dif}$	nulta diferencijalna struja
$I_{eff}$	efektivna vrednost signala
$i_G$	struja neutralnog provodnika
$3i_0$	trostruka nulta struja - suma struja na priključcima ET-a

$I_{G-gr}$	granična vrednost struje neutralnog provodnika
$I_{KS}$	struja u kratkospojenim navojcima
$I_{M1}, I_{M2}$	struja od mreže 1 i struja ka mreži 2
$I_{nT}$	nominalna struja energetskog transformatora
$I_s$	stabilizaciona struja
$I_{0s}$	nulta stabilizaciona struja
$(I_{s,1}, I_{d,min})$	koordinate prelomne tačke na karakteristici reagovanja stabilizovane diferencijalne zaštite
$i_{s1}(n)$	$n$ -ti odbirak signala $i_{s1}$
$i_{s2}(n)$	$n$ -ti odbirak signala $i_{s2}$
$i_\mu$	struja magnećenja
$L_2$	induktivnost rasipanja sekundarnog namotaja strujnog transformatora
$L_B$	induktivnost potrošača u sekundarnom kolu ST-a
$L_p$	induktivnost potrošača
$m$	broj odbiraka u periodu osnovnog harmonika signala
$m_1, m_2$	nagibi karakteristike reagovanja diferencijalnog releja
$m_p, m_s$	prenosni odnosi strujnih transformatora instaliranih na primarnim i sekundarnim priključcima energetskog transformatora
$m_T$	koeficijent transformacije ET-a
$N_1$	broj primarnih navojaka
$N_2$	broj sekundarnih navojaka
$n_{izv}$	broj izvoda na namotaju
$P_1, Q_1$	aktivana snaga i reaktivna snaga koje mreža 1 daje
$P_2, Q_2$	aktivana snaga i reaktivna snaga koje mreža 2 prima
$P_p, Q_p$	aktivana snaga i reaktivna snaga potrošača
$R$	otpornost potrošača
$r_\mu$	otpornost otočne grane energetskog transformatora
$R_2$	otpornost sekundarnog namotaja strujnog transformatora
$R_B$	otpornost potrošača u sekundarnom kolu ST-a

$r_t$	otpornost namotaja energetskog transformatora
$S_{ksM1}, S_{ksM2}$	snaga kratkog spoja mreže 1 i mreže 2
$S_{nT}$	nominalna snaga ET-a
$S_p$	prividna snaga potrošača
$ST$	strujni transformator
$T$	perioda osnovnog harmonika signala
$t$	vreme
$t_{blok}$	trenutak aktiviranja blokadnog signala
$t_{kv}$	trenutak nastanka kvara
$t_{oč}$	trenutak očitavanja
$T_{od}$	perioda odabiranja ( $T_{od}=T/m$ )
$U$	efektivna vrednost napona
$\underline{U}_{M1}, \underline{U}_{M2}$	naponi mreže 1 i mreže 2
$x_\mu$	reaktansa otočne grane ET
$x_t$	reaktansa rasipanja energetskog transformatora
$\underline{Y}_{10}, \underline{Y}_{20}, \underline{Y}_{12}$	admitanse koje figurišu u ekvivalentnoj $\pi$ – šemi elemenata između naponskih izvora mreže 1 i mreže 2
$\underline{Z}_{12}^{(p)}, \underline{Z}_{10}^{(p)}, \underline{Z}_{20}^{(p)}$	impedanse u ekvivalentnoj $\pi$ – šemi elemenata između naponskih izvora mreže 1 i mreže 2 za KS na primarnom namotaju ET-a
$\underline{Z}_{12}^{(s)}, \underline{Z}_{10}^{(s)}, \underline{Z}_{20}^{(s)}$	impedanse u ekvivalentnoj $\pi$ – šemi elemenata između naponskih izvora mreže 1 i mreže 2 za KS na sekundarnom namotaju ET-a
$\underline{Z}_B=R_B+j2\pi fL_B$	impedansa potrošača u sekundarnom kolu ST-a
$\underline{Z}_{M1}, \underline{Z}_{M2}$	impedanse mreže 1 i mreže 2
$\underline{Z}_p$	impedansa potrošača
$\underline{Z}_T$	impedansa transformatora
$\underline{\theta}_{M1}, \underline{\theta}_{M2}$	fazni stavovi napona mreže 1 i mreže 2
$\lambda$	fluks u jezgru ST-a
$\lambda_r$	remanentni fluks u jezgru ST-a
$\varphi$	fazni pomeraj između signala (struja)



$\varphi, \varphi_{avg T/2}, \varphi_{avg T}$	estimirane vrednosti faznog pomeraja na osnovu indeksa usmerenosti $DFK, DFK_{-avg T/2}$ i $DFK_{-avg T/2}$
$\phi_{M1}, \phi_{M2}$	fazni stavovi struja na primarnim i sekundarnim priključcima ET-a
$\Psi$	obuhvaćeni fluks
$\Psi_r$	remanentni fluks u jezgru ET-a

---

## 10. BIOGRAFIJA AUTORA

Jelisaveta Krstivojević je rođena 23.3.1982. godine u Valjevu, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju. Nosilac je diplome „Vuk Stefanović Karadžić“. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu upisala je 2001. godine, gde je diplomirala 2006. godine na Energetskom odseku – Smer za Elektroenergetske sisteme sa prosečnom ocenom 8,77 i ocenom 10 na diplomskom radu. U martu 2008. godine je upisala doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na smeru Elektroenergetske mreže i sistemi, gde je položila sve predviđene ispite sa prosečnom ocenom 10.

Tokom osnovnih studija od strane Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu proglašavana je za najboljeg studenta u generaciji na Energetskom odseku u trećoj, četvrtoj i petoj godini studiranja. Dobitnik je ETF BAFA USA nagrade za izvanredan uspeh postignut u toku studiranja. Nakon završetka osnovnih studija, od strane Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, proglašena je za najboljeg diplomca u generaciji na Energetskom odseku.

Od marta 2007. godine tri meseca je radila kao projektant saradnik u Projektном birou “Elektroistok”, Beograd. Od jula 2007. godine je zaposlena na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu kao saradnik u nastavi na Katedri za Elektroenergetske sisteme. Trenutno je u zvanju asistenta. Učestvuje u izvođenju računskih vežbi iz predmeta Elementi elektroenergetskih sistema, Razvodna postrojenja, Relejna zaštita, Praktikum iz elemenata elektroenergetskih sistema i Projektovanje TS nadzemnih i kablovskih vodova, kao i laboratorijskih vežbi iz predmeta Električna merenja 1, Električna merenja 2, Relejna zaštita i Praktikum iz elemenata elektroenergetskih sistema.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Јелисавета П. Крстивојевић

број индекса 07/5039

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 15.05.2015. године

Јелисавета Крстивојевић

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора                     Јелисавета П. Крстивојевић                    

Број индекса                                     07/5039                                    

Студијски програм                     Електроенергетске мреже и системи                    

Наслов рада           Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова          

Ментор           др Миленко Ђурић, ред. проф. у пензији и др Јован Микуловић, ванред. проф.          

Потписани/а                                     Јелисавета П. Крстивојевић                                    

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду,           15.05.2015. године          

*Јелисавета Крстивојевић*

### Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Дигитална заштита енергетских трансформатора од унутрашњих кварова

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 15.05.2015. године

*Јелена Ђекић Креативна заједница*

1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.