

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Zoran N. Stojanović

**USMERENI RELEJI BAZIRANI NA
DIGITALNOM FAZNOM KOMPARATORU**

doktorska disertacija

Beograd, 2011

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Zoran N. Stojanović

**DIRECTIONAL RELAYS BASED ON
DIGITAL PHASE COMPARATOR**

Doctorial Dissertation

Belgrade, 2011

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

red. prof. dr Milenko Đurić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

red. prof. dr Dragan Tasić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Član komisije:

red. prof. dr Zoran Radojević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

red. prof. dr Zoran Lazarević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

doc. dr Jovan Mikulović, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane:

USMERENI RELEJI BAZIRANI NA DIGITALNOM FAZNOM KOMPARATORU

Rezime

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljen je nov algoritam za usmereni relej baziran na digitalnoj faznoj komparaciji. Za realizaciju digitalnog faznog komparatora pošlo se od ideje da se ne računa fazni pomeraj između struje i referentnog napona, već energija odnosno integral trenutne snage signala na intervalu dužine polovine osnovne periode napona ili struje. Interval integracije je polovina osnovne periode jer je frekvencija trenutne snage dva puta veća u odnosu na frekvenciju ulaznih signala. Algoritam usmerenog releja koji se bazira na integralu trenutne snage signala ima osobine faznog komparatora.

Podešavanje maksimalne osetljivosti releja vrši se direktno iz naponskog ili strujnog registra. U odnosu na dosadašnja rešenja, ovakvim pristupom eliminisana je potreba za impedansom modela voda Z_m .

Izlaz koji generiše usmereni relej ograničen je na intervalu ± 1 , deljenjem srednje snage signala prividnom snagom. Na taj način omogućeno je jednostavno zadavanje praga reagovanja ili blokiranja releja, koji je različit od nule.

Opisani postupak u proračunima koristi samo jednostavne matematičke operacije (sabiranje, množenje i deljenje) zbog čega u maloj meri koristi procesorsko vreme.

Zbog postojanja viših harmonika i jednosmerne komponente u ulaznim signalima algoritam je u nastavku proširen digitalnim Fourierovim filtrom. To je otvorilo mogućnost regulacije osetljivosti releja korišćenjem sinusne i kosinusne komponente Fourierovog reda.

Brzina reagovanja releja zavisi od režima koji je prethodio kvaru i podešenog praga reagovanja. Kreće se od trenutnog dejstva do 10 ms, što relej svrstava u one sa brzim odzivom. Opisani algoritam može umesto trenutnih vrednosti signala da koristi njihove priraštaje čime se dobija ultrabrzi usmereni relej. Vreme odziva ovog releja je manje od 5 ms i nema zonu neosetljivosti.

U nastavku disertacije izloženo je nekoliko specifičnih primena digitalnog faznog komparatora na realnim problemima. Svaki od algoritama detaljno je testiran serijom računarski generisanih signala.

Kao prva primena predstavljen je algoritam za usmereni relej bez mrtve zone reagovanja. Osnovni nedostatak klasičnih usmerenih zaštita predstavlja postojanje zone neosetljivosti pri bliskim kratkim spojevima. Pri bliskim kvarovima napon na mestu ugradnje releja postaje toliko mali da je praktično neupotrebljiv za ispravan rad releja. Ovaj problem rešen je uvođenjem kašnjenja po naponu koji se koristi u proračunima. Pri tome, posebna pažnja posvećena je problemu sinhronizacije kada stvarna frekvencija sistema odstupa od naznačene. Za sinhronizaciju odbiraka koji ulaze u proračun korišćena je metoda prolaska signala kroz nulu (Zero-crossing).

U nastavku je razvijena trofazna varijanta usmerenog releja baziranog na digitalnom faznom komparatoru. Usmerena funkcija kombinovana je sa prekostrujnom i distantnom zaštitom kako bi bili izvedeni konkretni uslovi reagovanja za sve vrste kratkih spojeva u mreži: jednofazni kratak spoj, dvofazni kratak spoj, dvofazni kratak spoj sa zemljom i trofazni kratak spoj.

Na kraju, predstavljen je i algoritam za usmereni relej bez naponskih ulaza namenjen radu u izolovanim, radijalnim mrežama. Ovaj relej, umesto nultog napona kao referentne veličine, koristi radne struje budući da se iste praktično ne menjaju pri pojavi jednostrukog zemljospoja. Predložena tehnika može se primeniti u sistemima gde naponski signali nisu dostupni i na taj način povećava upotrebljivost klasičnih prekostrujnih releja. Korak dalje u odnosu na klasičnu usmerenu zemljospojnu zaštitu predstavlja mogućnost izolovanja ne samo voda u kvaru već i faze pogođene kvarom. Ovaj algoritam verifikovan je i kroz eksperiment na fizičkom modelu izolovane mreže sa dva izvoda.

Ključne reči: relejna zaštita, digitalni releji, usmereni releji, fazni komparator, usmerena zemljospojna zaštita

Naučna oblast: Tehničke nauke - Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi

UDK: 621.3

DIRECTIONAL RELAYS BASED ON DIGITAL PHASE COMPARATOR

Abstract

In this doctoral dissertation, a new algorithm for directional relay based on digital phase comparison is presented. The basic idea for realization of digital phase comparator is as follows: instead of calculating phase shift between the reference voltage and current, this algorithm calculates energy i.e. integral of the instantaneous power over one half-period of the voltage or current signal. The integration interval is the half-period because the frequency of the instantaneous power is two times higher than the frequency of the input signals. The algorithm for the directional element based on the integral of instantaneous power possesses the features of the phase comparator.

The adjustment of relay sensitivity is performed directly from voltage or current register. In comparison to existing solutions, this approach eliminates the necessity for the line or network model impedance Z_m .

The output signal, generated by the directional element is limited to interval ± 1 , by division of the average signal power with the apparent power. This way, the tripping or blocking threshold setting different than zero is enabled.

The described procedure uses only simple mathematical operations (addition, multiplication and division) for calculations resulting in small CPU time occupation.

Due to existence of higher harmonics and/or direct component in input signals, the algorithm is extended by Fourier filter. This opened a possibility for rough regulation of the relay sensitivity by using only sine or cosine component of the Fourier series.

The relay tripping time depends upon the regime before the fault occurrence and the adjusted tripping threshold. It varies from the instantaneous tripping to 10 ms so the relay is characterized by high speed of response. Instead of instantaneous values of the input signals, the described algorithm can use their increments and therefore further increase the speed of response. The tripping time of this relay is less than 5 ms and operates without dead tripping zone.

In the following chapters of dissertation, several specific applications of digital phase comparator on practical problems are investigated. Each algorithm is tested in detail with the series of computer-generated signals.

As the first application, the algorithm for directional relay without dead tripping zone is displayed. The basic limitation of classical directional element is the existence of insensitivity zone for close faults. At nearby faults, the voltage on the measuring site becomes so low and practically useless for proper operation of the relay. The dead tripping zone is eliminated by introducing voltage delay which is used for determination of direction. Special attention is paid to the problem of synchronization which appears when the signal frequency deviates from the assumed (rated) value. The described problem is efficiently solved through application of the zero-crossing method.

In the following chapter, the three-phase directional relay based on digital phase comparator is developed. The direction function is combined with overcurrent and distant protection to develop unique tripping conditions for all types of faults: phase-to-ground, two-phase, two-phase-to-ground and three-phase faults.

Finally, the algorithm for directional element without voltage inputs is presented. This relay is intended for use in isolated networks. For the reference quantity the algorithm does not use zero sequence voltage, but phase currents since in an isolated network they vary only slightly upon a phase-to-earth fault occurs. The suggested algorithm can be used in the system where voltage signal is not available, to increase the functionality of simple overcurrent relay. Compared to classical directional earth-fault protection, this technique detects not only the line containing a phase-to-earth fault but also the faulted phase. This algorithm is also verified by performing an experiment on the physical model of the isolated network with two lines.

Keywords: relay protection, digital relaying, directional element, phase comparator, directional earth-fault protection

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power Systems

UDK: 621.3

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. O usmerenim relejima	1
1.1.1. Usmereni releji na bazi putujućih talasa	2
1.1.2. Usmereni releji na bazi priraštaja električnih veličina	6
1.1.2.1. Fazni komparatori	7
1.1.2.2. Amplitudski komparatori	8
1.1.3. Usmereni releji na bazi fazora električnih veličina	10
1.1.4. Usmereni releji bez naponskih ulaza	11
1.1.4.1. Dvostruki vodovi	11
1.1.4.2. Vodovi koji povezuju elektranu sa mrežom	13
1.1.4.3. Mreža sa uzemljenom neutralnom tačkom	14
1.1.4.4. Mreža sa izolovanim neutralnom tačkom	15
1.1.4.5. Mreža sa kompenzovanom neutralnom tačkom	16
1.2. Ciljevi istraživanja	17
2. DIGITALNI FAZNI KOMPARATOR	18
2.1. Vreme konvergencije algoritma	25
2.2. Uticaj viših harmonika i jednosmerne komponente	28
2.3. Ultrabrzi digitalni fazni komparator	30
2.4. Testiranje algoritma	31
3. ELIMINISANJE ZONE NEOSETLJIVOSTI USMERENOG RELEJA	43
3.1. Testiranje algoritma	46
4. TROFAZNI USMERENI RELEJ	54
4.1. Jednofazni kratak spoj	55
4.2. Dvofazni kratak spoj	57
4.3. Dvofazni kratak spoj sa zemljom	59
4.4. Trofazni kratak spoj	62
4.5. Rekapitulacija	64

4.6. Testiranje algoritma	65
4.6.1. Jednofazni kratak spoj	66
4.6.2. Dvofazni kratak spoj	69
4.6.3. Dvofazni kratak spoj sa zemljom	72
4.6.4. Trofazni kratak spoj	74
5. USMERENI ZEMLJOSPOJNI RELEJ BEZ NAPONSKIH ULAZA	76
5.1. Testiranje algoritma	86
5.2. Eksperimentalni rezultati	95
6. ZAKLJUČAK	105
7. LITERATURA	107
8. BIOGRAFIJA AUTORA	111

1. UVOD

Svaki tehnički sistem ima neku pouzdanost koja je za dostignuti tehnološki razvoj prihvatljiva. Međutim, ni jedan sistem nije apsolutno pouzdan jer je verovatnoća pojave kvarova uvek veća od nule. Za dovoljno pouzdan rad elektroenergetskog sistema neophodno je brzo detektovati i izolovati element sa kvarom od ostatka sistema. Zadaci relejne zaštite jesu sprečavanje pojave kvara zbog nenormalnih radnih stanja odnosno, minimiziranje štete ukoliko do kvara ipak dođe. Da bi relejna zaštita uspešno izvršila svoje zadatke mora biti:

- selektivna ili sposobna da izoluje samo element pogođen kvarom,
- brza, jer kvarove u elektroenergetskom sistemu treba eliminisati što brže da bi se sprečile ili minimizirale štetne posledice koje pri njihovoj pojavi nastaju,
- osetljiva, jer mora detektovati sve kvarove unutar svoje podešene zone delovanja,
- pouzdana, jer od njenog rada zavisi pouzdanost celog elektroenergetskog sistema.

Od kraja 19. veka do danas u tehnološkom smislu razvijene su tri generacije zaštitnih releja: elektromehanički, analogni elektronski i digitalni releji. Zaštitni releji prve dve generacije su monofunkcionalni, tj. svaka zaštitna funkcija zahteva poseban uređaj. Digitalna tehnologija treće generacije omogućava da jedan hardverski uređaj obavlja više zaštitnih funkcija. Prve dve generacije releja više se ne proizvode. Međutim, karakteristike zaštitnih releja nastale su i standardizovane su u vreme dominacije elektromehaničkih releja te su kasnije samo preslikane na nove generacije zaštitnih uređaja. Zbog toga bi bez poznavanja principa rada prvih generacija releja teško bilo objasniti karakteristike današnjih releja.

1.1. O usmerenim relejima

Usmereni relej pojavljuje se u sklopu većeg broja zaštita (prekostrujnih, diferencijalnih, distantnih) kao dodatna funkcija koja obezbeđuje selektivnost zaštite. Usmereni relej određuje smer struje u odnosu na referentnu veličinu, koja može biti napon ili neka druga struja. Kod naizmeničnih veličina smer struje u odnosu na

referentnu veličinu određen je faznim pomerajem između posmatrane struje i referentne veličine.

Fazni pomeraji između električnih veličina, za potrebe digitalnih releja, mogu se odrediti različitim metodama. Tako, kod prenosnih vodova visokog i ekstremno visokog napona primenu nalaze metode na bazi putujućih talasa, odnosno metode na bazi priraštaja električnih veličina. Pomenute metode odlikuje velika brzina odziva te se otuda nazivaju i ultrabrzim usmerenim relejima. Kada nema potrebe za tako velikim brzinama odziva, u upotrebi su metode koje se zasnivaju na fazorima električnih veličina.

U nekim specifičnim situacijama za određivanje smera moguće je koristiti samo jednu električnu veličinu.

Treba napomenuti da pažnju naučne javnosti u poslednje vreme privlače i dve nove tehnike u realizaciji usmerene zaštite: Wavelet transformacija [1, 2] i neuralne mreže [3, 4]. Ove tehnike su u začetku i do sada nisu našle primenu u komercijalne svrhe kako zbog zahtevnijeg hardvera tako i zbog neodređenosti koja uvek prati neuralne mreže. Zbog toga, ovi pravci biće analizirani nekom drugom prilikom.

1.1.1. Usmereni releji na bazi putujućih talasa

Posmatra se vod koji povezuje dva izvora kao što je prikazano na **Slici 1.1**. Vod sa kvarom (**Slika 1.1a**) može se primenom principa superpozicije razložiti na vod bez kvara (**Slika 1.1b**) i vod sa fiktivnim izvorom na mestu kvara (**Slika 1.1c**).

Priraštaje signala generiše uključenje fiktivnog izvora na mestu kvara sa naponom jednakim po amplitudi i suprotnog znaka prema naponu na tom mestu pre kvara. Priraštaje signala lako je dobiti oduzimanjem napona i struja pre kvara od merenih signala tokom kvara:

$$\Delta u(t) = u_k(t) - u_{pk}(t), \quad (1.1)$$

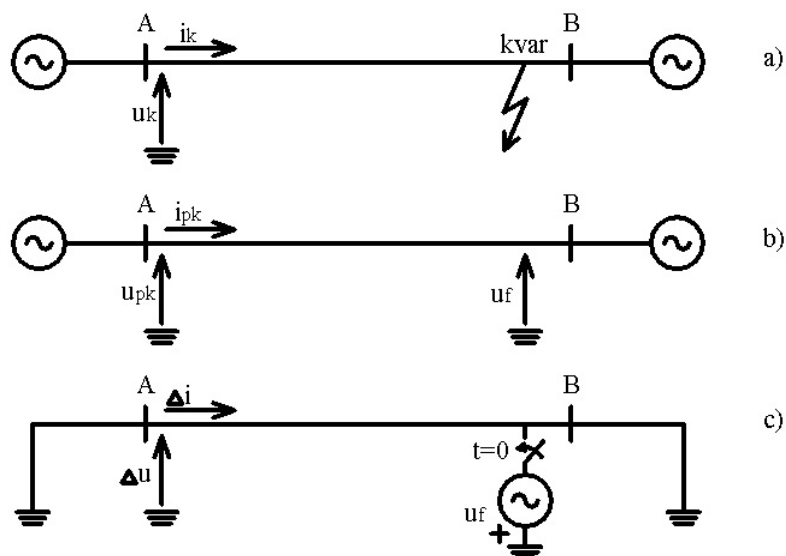
$$\Delta i(t) = i_k(t) - i_{pk}(t), \quad (1.2)$$

gde su:

$u_{pk}(t)$ i $i_{pk}(t)$ – napon i struja na mestu ugradnje releja pre kvara,

$\Delta u(t)$ i $\Delta i(t)$ – priraštaji napona i struje na mestu ugradnje releja kao posledica kvara,

$u_k(t)$ i $i_k(t)$ – napon i struja na mestu ugradnje releja za vreme kvara.



Slika 1.1. Primena principa superpozicije: a) vod sa kvarom, b) vod bez kvara i c) vod sa fiktivnim izvorom na mestu kvara

Pad napona na mestu kvara, odnosno uključenje fiktivnog izvora na mestu kvara (Slika 1.1c) generiše putujuće talase levo i desno od mesta kvara. Ako se posmatra vod sa distribuiranim parametrima, zavisnost napona u i struje i duž voda od rastojanja x i vremena t opisana je jednačinama telegrafičara. Pod pretpostavkom da je vod bez gubitaka, dolazi se do talasnih jednačina:

$$\frac{\partial^2 \Delta u}{\partial t^2} = \frac{1}{lc} \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial x^2}, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta i}{\partial t^2} = \frac{1}{lc} \frac{\partial^2 \Delta i}{\partial x^2}, \quad (1.4)$$

gde su:

l -podužna induktivnost voda,

c - podužna kapacitivnost voda.

Prema [5] rešenje jednačina (1.3) i (1.4) može se izraziti kao zbir direktnog i inverznog talasa:

$$\Delta u(x,t) = F_1(x-at) + F_2(x+at), \quad (1.5)$$

$$\Delta i(x,t) = \frac{1}{Z_c} (F_1(x-at) - F_2(x+at)), \quad (1.6)$$

gde su:

$F_1(x-at)$ – direktni talas,

$F_2(x-at)$ – inverzni talas,

$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$ – karakteristična impedansa voda,

$a = \frac{1}{\sqrt{lc}}$ – brzina prostiranja talasa po vodu,

x – rastojanje,

t – vreme.

Iz (1.5) i (1.6) mogu se izraziti inverzna i direktna komponenta talasa na mestu ugradnje releja ($x=0$) kao:

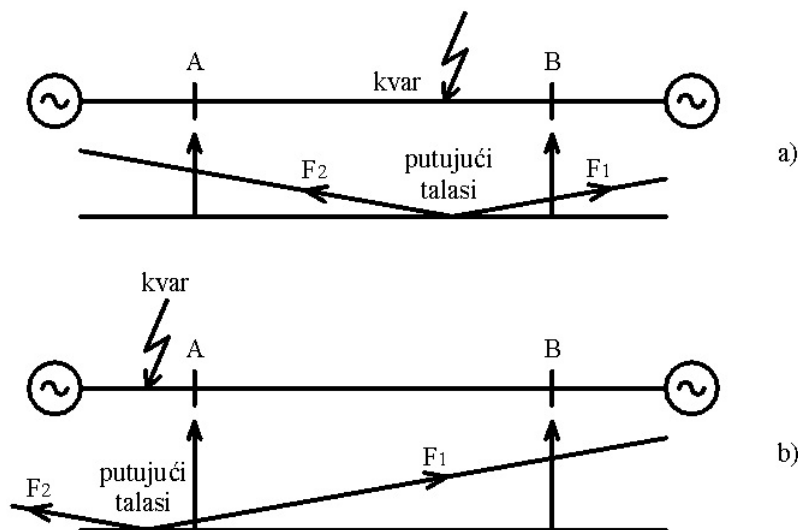
$$2F_2(t) = \Delta u(t) - Z_c \Delta i(t), \quad (1.7)$$

$$2F_1(t) = \Delta u(t) + Z_c \Delta i(t). \quad (1.8)$$

Teorija putujućih talasa može se upotrebiti u relejnoj zaštiti kao što je prikazano na **Slici 1.2** [5]. Ukoliko se na mestu ugradnje releja prvo detektuje inverzni talas reč je o kvaru ispred releja, odnosno ukoliko se prvo detektuje direktni talas reč je o kvaru iza releja. Tako se konačno dobijaju kriterijumski signali za rad usmerenog releja na bazi putujućih talasa:

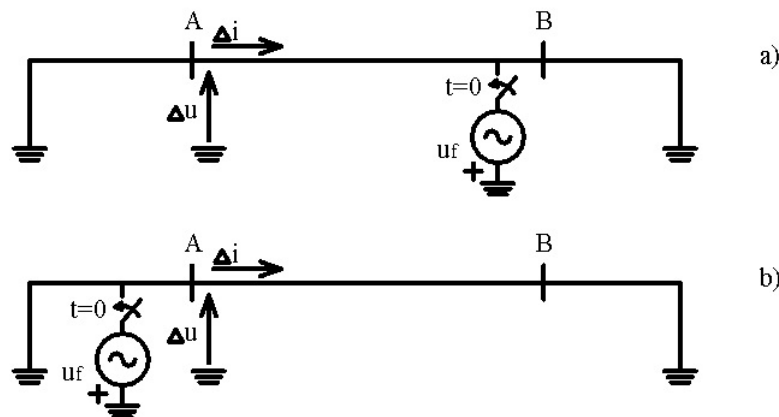
$$S_1(t) = \Delta u(t) - Z_c \Delta i(t), \quad (1.9)$$

$$S_2(t) = \Delta u(t) + Z_c \Delta i(t). \quad (1.10)$$



Slika 1.2. Prostiranje putujućih talasa na vodu sa kvarom: a) kvar ispred mesta ugradnje releja i b) kvar iza mesta ugradnje releja

Za dobijanje uslova reagovanja usmerenog releja može se primeniti fazna ili amplitudska komparacija. Faznu komparaciju najlakše je objasniti pomoću **Slike 1.3** [5]. Najpre se posmatra kvar ispred releja (**Slika 1.3a**). Ukoliko je u trenutku kvara $u_f(t) > 0$, za usvojene referentne smerove priraštaja napona i struja na mestu ugradnje releja važi: $\Delta u(t) < 0$ i $\Delta i(t) > 0$. Ukoliko je u trenutku kvara $u_f(t) < 0$, za priraštaje napona i struja na mestu ugradnje releja važi: $\Delta u(t) > 0$ i $\Delta i(t) < 0$. Za kvarove iza releja (**Slika 1.3b**) i $u_f(t) > 0$ dobija se: $\Delta u(t) < 0$ i $\Delta i(t) < 0$. Ukoliko je u trenutku kvara $u_f(t) < 0$ dobija se: $\Delta u(t) > 0$ i $\Delta i(t) > 0$.



Slika 1.3. Vod sa kvarom: a) kvar ispred mesta ugradnje releja i b) kvar iza mesta ugradnje releja

Na osnovu izloženog dolazi se do kriterijumske funkcije faznog komparatora:

$$KOMP_1(t) = \text{sgn}(\Delta u(t)) \cdot \text{sgn}(\Delta i(t)), \quad (1.11)$$

gde je:

sgn - funkcija znaka "signum".

Znak promenljive $KOMP_1(t)$ sadrži informaciju o mestu kvara: ukoliko je $KOMP_1(t) = -1$ kvar je ispred releja, odnosno za $KOMP_1(t) = 1$ kvar je iza releja.

Ukoliko je u pitanju amplitudska komparacija [6], uslov reagovanja dat je sa:

$$KOMP_2(t) = |S_1(t)| - |S_2(t)|. \quad (1.12)$$

Vrednost promenljive $KOMP_2(t)$ sadrži informaciju o mestu kvara: ukoliko je $KOMP_2(t) > 0$ kvar je ispred mesta ugradnje releja, odnosno za $KOMP_2(t) < 0$, kvar je iza releja.

Osnovni nedostatak ove teorije je lažno reagovanje ili blokiranje za kvarove u trenucima kada se napon približava nuli. Da bi se to otklonilo bilo je pokušaja uvođenja

dodatnih kriterijuma u vidu izvoda napona i struja. U [7, 8] predložen je brojač i dodatni kriterijum $KOMP_2'(t)$:

$$KOMP_2'(t) = \left| \frac{dS_1(t)}{dt} \right| - \left| \frac{dS_2(t)}{dt} \right|, \quad (1.13)$$

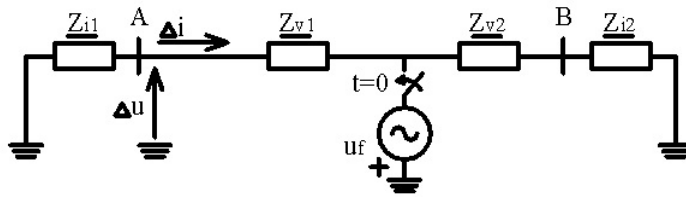
dok [9, 10] predlaže sledeće kriterijumske signale:

$$S_1(t) = (\Delta u(t) - Z_c \Delta i(t))^2 + \frac{1}{\omega^2} \left(\frac{d\Delta u}{dt} - Z_c \frac{d\Delta i}{dt} \right)^2, \quad (1.14)$$

$$S_2(t) = (\Delta u(t) + Z_c \Delta i(t))^2 + \frac{1}{\omega^2} \left(\frac{d\Delta u}{dt} + Z_c \frac{d\Delta i}{dt} \right)^2. \quad (1.15)$$

Uvođenje izvoda u uslove reagovanja dovelo je do novog pristupa u radu usmerenih releja baziranih na priraštaju električnih veličina koji je razmotren u nastavku.

1.1.2. Usmereni releji na bazi priraštaja električnih veličina



Slika 1.4. Model voda sa fiktivnim izvorom na mestu kvara

Posmatra se zamenska šema voda u kojoj deluje fiktivni naponski izvor na mestu kvara (Slika 1.4). U odnosu na Sliku 1.1c sada se uvode odgovarajuće impedanse: Z_{i1} – impedansa izvora (mreže) 1, Z_{i2} – impedansa izvora (mreže) 2, Z_{v1} – impedansa voda od tačke A do mesta kvara, Z_{v2} – impedansa voda od mesta kvara do tačke B. Ostale oznake imaju isto značenje kao one prikazane na Slici 1.1c.

Vremenske promene priraštaja napona i struja mogu se izraziti kao:

$$\Delta u(t) = \sqrt{2} \Delta U \sin(\omega t + \psi), \quad (1.16)$$

$$\Delta i(t) = \sqrt{2} \Delta I \sin(\omega t + \psi - \varphi_i). \quad (1.17)$$

Pad napona koji struja kvara stvara na modelu impedanse mreže (izvora) je:

$$\Delta u_m(t) = \sqrt{2} \Delta I Z_m \sin(\omega t + \psi - \varphi_i + \varphi_m) = \sqrt{2} \Delta U_m \sin(\omega t + \psi + \varphi), \quad (1.18)$$

gde je:

$\varphi = \varphi_m - \varphi_i$ – fazni ugao između pada napona na modelu mreže i merenog napona.

U idealnom slučaju je $Z_{i1} = Z_m$, pa je $\varphi=0$. Za proveru smera kvara u upotrebi su fazni i amplitudski komparatori.

1.1.2.1. Fazni komparatori

Trenutni fazni komparator [11] može se realizovati računanjem promenljive $KOMP_1(t)$ po nastanku kvara na sledeći način:

$$KOMP_1(t) = \text{sgn}(\Delta u(t)) \cdot \text{sgn}(\Delta u_m(t)). \quad (1.19)$$

Znak promenljive $KOMP_1(t)$ sadrži informaciju o mestu kvara: ukoliko je $KOMP_1(t)=-1$ kvar je ispred releja, odnosno za $KOMP_1(t)=1$, kvar je iza releja. Glavni nedostatak ove tehnike je očigledan: ukoliko fazni pomeraj φ nije jednak nuli, $KOMP_1(t)$ može imati vrednost -1 ili 1 po slučajnom principu tako da nema garancije da vrednost trenutnog faznog komparatora odgovara smeru kvara.

Naprednije rešenje u odnosu na pomenuto je trenutni fazni komparator sa brojačem koji se može nazvati delimično integralni fazni komparator.

U cilju dobijanja još pouzdanijeg faznog komparatora, uzastopne vrednosti trenutnog faznog komparatora $KOMP_1(t)$ treba integraliti ili sumirati tokom osnovne periode T . Na taj način dobija se integralni fazni komparator $KOMP_2(t)$ [12]:

$$KOMP_2(T) = \frac{2}{T} \int_0^T \Delta u(t) \Delta u_m(t) dt. \quad (1.20)$$

U digitalnim sistemima sa periodom odabiranja T_{od} i brojem odbiraka po periodi m , integral se može implementirati u vidu sume odbiraka:

$$KOMP_2(mT_{od}) = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u(k) \Delta i(k). \quad (1.21)$$

$KOMP_2(T)$ je idealan pokazatelj smera kvara samo ako je φ jednako nuli. U suprotnom, vrednost $KOMP_2(T)$ za neke vrednosti ugla φ tokom konvergencije može da menja znak i dovede do pogrešnog zaključka. Prevazilaženje ovog nedostatka postiže se uvođenje granice reagovanja koja je veća od nule. Ovo utiče negativno na performanse integralnog faznog komparatora: vreme odziva se produžava do 10 ms, a opseg

reagovanja se smanjuje. Poseban problem je što je za uspostavljanje praga reagovanja većeg od nule neophodno prethodno poznavanje amplituda priraštaja napona i struja.

Tokom prethodnih razmatranja nije uzet u obzir uticaj jednosmerne komponente struje kvara, uticaj viših harmonika, smetnji i šumova. Visokofrekventni prelazni procesi mogu nastati iz manipulacije rasklopnom opremom, preskoka i direktnih pražnjenja, pri čemu su naročito izraženi kod kompenzovanih vodova i kod upotrebe kapacitivnih naponskih transformatora. Takođe, uvođenje modela mreže Z_m , tj. proces diferenciranja snažno pojačava više harmonike iako isti izvorno mogu biti mali. Zato ovi releji imaju naročite zahteve u pogledu analognog filtriranja ulaznih signala.

Uticaj višeharmonijskih komponenti dodatno se eliminiše upotrebom priraštaja fazora umesto priraštaja trenutnih vrednosti [11, 13, 14]. Na taj način gubi se na brzini odziva ali je pouzdanost izlaza takvog releja veća. Upotreba fazora počinje pojavom moćnijih procesora. Fazori su najpre primenjivani na nulti i inverzni komponentni sistem. Kako ovakvi releji nisu bili osetljivi na simetrične poremećaje, odnosno kvarove prešlo se na fazore direktnog komponentnog sistema.

Upotrebom fazora usmerenost se proverava praćenjem znaka skalarnog proizvoda napona ΔU i ΔU_m :

$$KOMP_3(t) = \text{sgn}(\text{real}(\Delta U \Delta U_m^*)), \quad (1.22)$$

gde su:

real – realni deo kompleksnog broja,

* – operacija konjugovanja.

1.1.2.2. Amplitudski komparatori

Pored faznog komparatora u upotrebi je i amplitudski komparator. Trenutni amplitudski komparator [11] može se realizovati računanjem promenljive $KOMP_4(t)$ po nastanku kvara na sledeći način:

$$KOMP_4(t) = |\Delta u(t) - \Delta u_m(t)| - |\Delta u(t) + \Delta u_m(t)|. \quad (1.23)$$

Znak promenljive $KOMP_4(t)$ sadrži informaciju o mestu kvara: ukoliko je $KOMP_4(t) > 0$ kvar je ispred mesta ugradnje releja, odnosno za $KOMP_4(t) < 0$, kvar je iza releja. Za razliku od faznog komparatora gde je neophodno zadati samo fazni pomeraj

modela mreže φ_m , kod amplitudske komparacije neophodno je poznavati i impedansu modela mreža Z_m . S druge strane, amplitudski komparatori su brži od faznih.

Ukoliko fazni pomeraj φ nije jednak nuli, $KOMP_4(t)$ može imati i pozitivne i negativne vrednosti nezavisno od mesta kvara, tako da nema garancije da vrednost trenutnog amplitudskog kompartora odgovara smeru kvara. Iz tog razloga se kod amplitudske komparacije obavezno postavlja granica reagovanja veća od nule kako bi se dobilo ispravno reagovanje releja. Ova granica zavisi od impedanse Z_m , te se zbog sigurnosti postavlja na više vrednosti u odnosu na faznu komparaciju. Poseban problem je što je za uspostavljanje praga reagovanja većeg od nule neophodno prethodno poznavanje i amplitude priraštaja napona.

Naprednije rešenje u odnosu na pomenuto je trenutni amplitudski komparator sa brojačem koji se može nazvati delimično integralni amplitudski komparator [15, 16].

Najsigurniji amplitudski komparator dobija se ako se uzastopne vrednosti trenutnog amplitudskog komparatora $KOMP_4(t)$ integrale ili saberu tokom osnovne periode T . Na taj način dobija se integralni amplitudski komparator $KOMP_5(t)$ [11]:

$$KOMP_5(T) = \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta u(t) - \Delta u_m(t)| dt - \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta u(t) + \Delta u_m(t)| dt. \quad (1.24)$$

U digitalnim obliku izraz (1.24) postaje:

$$KOMP_5(mT_{od}) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\Delta u(k) - \Delta u_m(k)| - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |\Delta u(k) + \Delta u_m(k)|. \quad (1.25)$$

$KOMP_5(T)$ je idealan pokazatelj smera kvara samo ako je φ jednako nuli. U suprotnom, vrednost $KOMP_5(T)$ tokom konvergencije može da menja znak i dovede do pogrešnog zaključka. Rešenje ovog nedostatka je uvođenje granice reagovanja koja je veća od nule, ali se time vreme reagovanja produžava.

Ukoliko se umesto trenutnih vrednosti upotrebe fazori, usmerenost se tada dobija proverom znaka promenljive $KOMP_6(t)$:

$$KOMP_6(t) = |\Delta \underline{U} - \Delta \underline{U}_m| - |\Delta \underline{U} + \Delta \underline{U}_m|. \quad (1.26)$$

Postoji nekoliko izraženih problema kada se koriste priraštaji električnih veličina za rad usmerenih releja. Prvi problem predstavlja ograničeno trajanje izlaza takvog releja. Drugi problem je uspostavljanje praga reagovanja većeg od nule, jer se tada zahteva prethodno poznavanje amplitude priraštaja. Treći nedostatak je problem

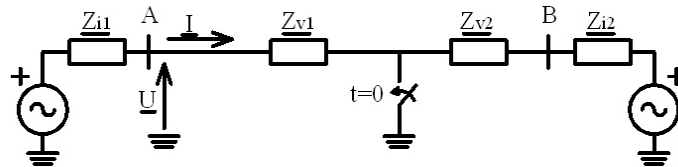
sinhronizacije i javlja se kada stvarna frekvencija signala odstupa od pretpostavljene. Tada se čini ozbiljna greška u estimaciji priraštaja električne veličine.

Zbog svega pomenutog usmereni releji često se realizuju pomoću fazora električnih veličina, bez računanja priraštaja.

1.1.3. Usmereni releji na bazi fazora električnih veličina

Usmereni releji na bazi priraštaja električnih veličina generišu izlazni signal u jako kratkom vremenskom intervalu. Za generisanje kontinualnog signala reagovanja u upotrebi su usmereni releji koji koriste fazore električnih veličina [17].

Posmatra se monofazni model voda sa kvarom, prikazan na **Slici 1.5**.



Slika 1.5. Model voda sa kvarom

Fazori napona i struje mogu se izraziti kao:

$$\underline{U} = Ue^{j\psi}, \quad (1.27)$$

$$\underline{I} = Ie^{j(\psi-\varphi_i)}, \quad (1.28)$$

gde su:

U – efektivna vrednost napona na mestu ugradnje releja,

I – efektivna vrednost struje na mestu ugradnje releja.

Pad napona koji struja kvara stvara na modelu voda je:

$$\underline{U}_m = IZ_m e^{j(\psi-\varphi_i+\varphi_m)} = IZ_m e^{j(\psi+\varphi)}. \quad (1.29)$$

U idealnom slučaju je $\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{v1} = \underline{Z}_m$, pa je $\varphi=0$. Za proveru smera kvara može se upotrebiti fazna ili amplitudska komparacija. Ako se primeni fazna komparacija, usmerenost se tada dobija praćenjem znaka skalarnog proizvoda fazora napona \underline{U} i

\underline{U}_m :

$$KOMP_7(t) = \text{sgn}(\text{real}(\underline{U}\underline{U}_m^*)). \quad (1.30)$$

Znak promenljive $KOMP_7(t)$ sadrži informaciju o mestu kvara: ukoliko je $KOMP_7(t)=1$ kvar je ispred mesta ugradnje releja, odnosno za $KOMP_7(t)=-1$, kvar je iza mesta ugradnje releja.

Primenom amplitudske komparacije uslov reagovanja je određen promenljivom $KOMP_8(t)$:

$$KOMP_8(t) = |\underline{U} + \underline{U}_m| - |\underline{U} - \underline{U}_m|. \quad (1.31)$$

Vrednost promenljive $KOMP_8(t)$ sadrži informaciju o mestu kvara: ukoliko je $KOMP_8(t)>0$ kvar je ispred mesta ugradnje releja, odnosno za $KOMP_8(t)<0$, kvar je iza releja.

Fazore električnih veličina moguće je dobiti korišćenjem dobro poznatih metoda za obradu signala kao što su metoda prolaska kroz nulu [18], Fourierova metoda [19], metoda najmanjih kvadratnih odstupanja [20, 21], Newtonova metoda [22, 23, 24], itd.

Pored sporijeg odziva i zahtevnijih matematičkih operacija, kod usmerenih releja na bazi fazora električnih veličina postoji i zone neosetljivosti, odnosno mrtva zone reagovanja koja se javlja kod bliskih kratkih spojeva. Tada napon na mestu ugradnje releja može biti tako nizak da je praktično neupotrebljiv u proračunima.

1.1.4. Usmereni releji bez naponskih ulaza

U specifičnim situacijama za određivanje smera struje moguće je kao referentne veličine koristiti neke druge struje umesto napona ili čak istu struju.

1.1.4.1. Dvostruki vodovi

Jednu od karakterističnih situacija čine paralelno vođeni vodovi na istim ili zasebnim stubovima (**Slika 1.6**). Dvostruki vodovi štite se poprečnom diferencijalnom zaštitom. Ukoliko svaki od vodova ima sopstvene prekidače, što je u praksi najčešći slučaj, treba selektivno isključiti vod sa kvarom. Ovo omogućava usmerena poprečna diferencijalna zaštita. Klasična usmerena diferencijalna zaštita zahteva naponske ulaze. Međutim, ovu zaštitu moguće je realizovati korišćenjem samo strujnih ulaza.

U početku je kao indikator kvara korišćen priraštaj srednjih vrednosti struja vodova [25, 26]:

$$M_1(k) = M_1(k-1) + |i_1(k)| - |i_1(k-m)|, \quad (1.32)$$

$$M_2(k) = M_2(k-1) + |i_2(k)| - |i_2(k-m)|, \quad (1.33)$$

$$M_{12}(k) = M_1(k) - M_2(k), \quad (1.34)$$

gde su:

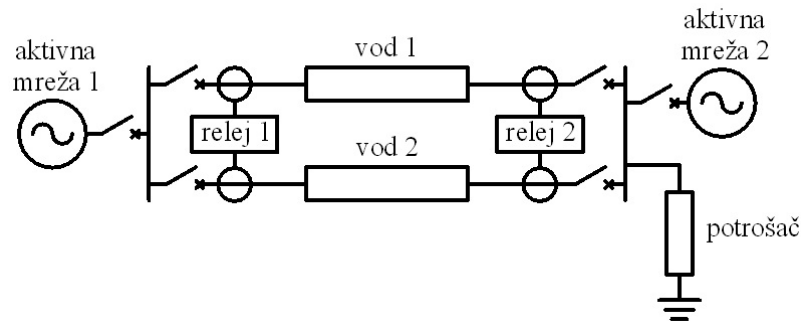
$i_1(k)$ – k -ti odbirak struje voda 1,

$i_2(k)$ – k -ti odbirak struje voda 2,

$M_1(k)$ – k -ti priraštaj srednje vrednosti struje voda 1,

$M_2(k)$ – k -ti priraštaj srednje vrednosti struje voda 2,

$M_{12}(k)$ – k -ta razlika priraštaja srednjih vrednosti struja vodova.



Slika 1.6. Dvostruki vod

Razlika priraštaja srednjih vrednosti struja vodova $M_{12}(k)$ određuje poziciju kvara: za $M_{12}(k) > M_{pod}$ kvar je na vodu 1, odnosno za $M_{12}(k) < -M_{pod}$ kvar je na vodu 2. M_{pod} predstavlja unapred podešen prag reagovanja. Ukoliko je kvar van štićene deonice tada je $|M_{12}(k)| < M_{pod}$.

Osnovni nedostatak ovog pristupa je primena samo kod dvostrano napajanih vodova, budući da se upotrebom priraštaja srednjih vrednosti gubi uticaj faznog pomeraja u strujama. Zato se sa priraštaja srednjih vrednosti prešlo na priraštaje struja koji uzimaju u obzir amplitudu i fazni stav struja za vreme kvara [27]:

$$\Delta i_1(k) = i_1(k) - i_1(k-m), \quad (1.35)$$

$$\Delta i_2(k) = i_2(k) - i_2(k-m), \quad (1.36)$$

$$D_{12}(k) = D_{12}(k-1) + |\Delta i_1(k)| - |\Delta i_2(k)|, \quad (1.37)$$

gde su:

$\Delta i_1(k)$ – k -ti odbirak priraštaja struje voda 1,

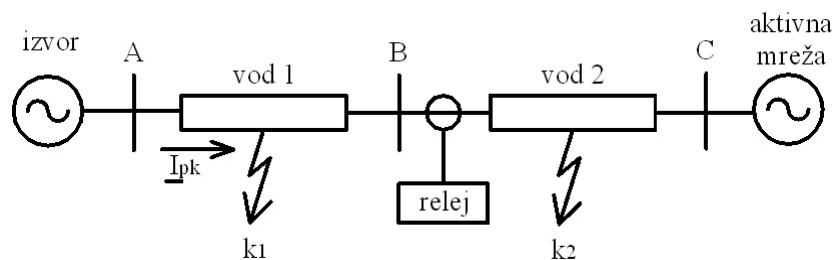
$\Delta i_2(k)$ – k -ti odbirak priraštaja struje voda 2,

$D_{12}(k)$ – k -ta razlika priraštaja struja vodova.

Indikator $D_{12}(k)$ određuje poziciju kvara: za $D_{12}(k) > D_{pod}$ kvar je na vodu 1, odnosno za $D_{12}(k) < -D_{pod}$ kvar je na vodu 2. D_{pod} predstavlja unapred podešen prag reagovanja. Ukoliko je kvar van šticiene deonice tada je $|D_{12}(k)| < D_{pod}$. Upotrebom indikatora $D_{12}(k)$ primena zaštite je proširena i na jednostrano napajane dvostruke vodove.

1.1.4.2. Vodovi koji povezuju elektranu sa mrežom

Naredna situacija u kojoj se za realizaciju usmerenog releja koriste samo strujni ulazi javlja se kod vodova koji povezuju elektranu sa mrežom [28]. Posmatra se sistem prikazan na **Slici 1.7**.



Slika 1.7. Vod koji vezuje elektranu sa mrežom

Struja pre kvara I_{pk} uvek ima smer naznačen na slici te se može koristiti kao referentna veličina. Struja pre kvara data je relacijom:

$$I_{pk} = \frac{U_A - U_C}{Z}, \quad (1.38)$$

gde su:

U_A – napon na sabirnicama A,

U_C – napon na sabirnicama C,

Z – ukupna impedansa vodova 1 i 2.

Za kvarove k_1 i k_2 , struje kvara na sabirnicama B mogu se odrediti kao:

$$I_{k1} = \frac{U_C}{Z_1}, \quad (1.39)$$

$$\underline{I}_{k2} = \frac{U_A}{\underline{Z}_2}, \quad (1.40)$$

gde su:

\underline{Z}_1 – impedansa vodova od C do k_1 ,

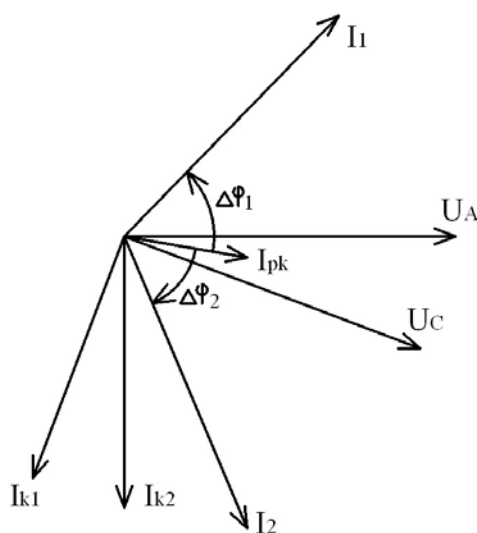
\underline{Z}_2 – impedansa vodova od A do k_2 .

Promene struja na sabirnicama B pri kvarovima k_1 i k_2 mogu se izraziti kao:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{pk} - \underline{I}_{k1}, \quad (1.41)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{pk} + \underline{I}_{k2}. \quad (1.42)$$

Prethodno definisani fazori grafički su prikazati kao na **Slici 1.8**. Radi jednostavnosti omske komponente impedansi su zanemarene.

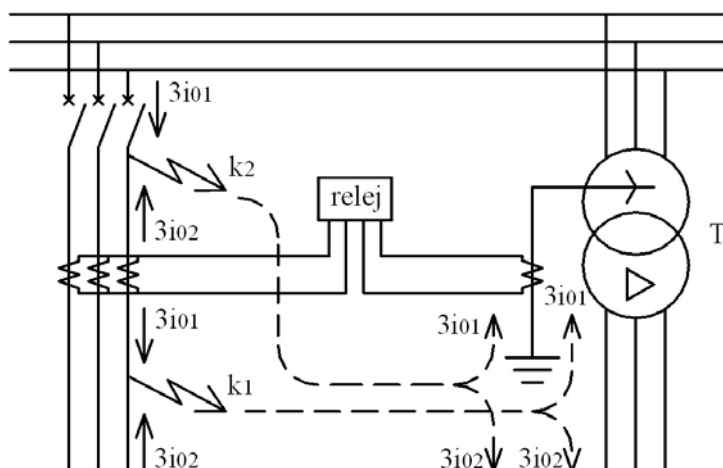


Slika 1.8. Fazorski dijagram napona i struja

Kao što se sa **Slike 1.8** može primetiti, fazori struja \underline{I}_1 i \underline{I}_2 nalaze se sa različitih strana fazora \underline{I}_{pk} , te se estimacijom faznog pomeraja između struja \underline{I} i \underline{I}_{pk} može odrediti pozicija kvara: za $\Delta\varphi > 0$ kvar je iza mesta ugradnje releja, za $\Delta\varphi < 0$ kvar je ispred mesta ugradnje releja.

1.1.4.3. Mreža sa uzemljenom neutralnom tačkom

Ako u postrojenju postoji uzemljeno zvezdište na naponskom nivou štićenog voda, onda se usmerena zaštita može realizovati korišćenjem samo strujnih ulaza [29]. Posmatra se postrojenje čija je šema data na **Slici 1.9**.

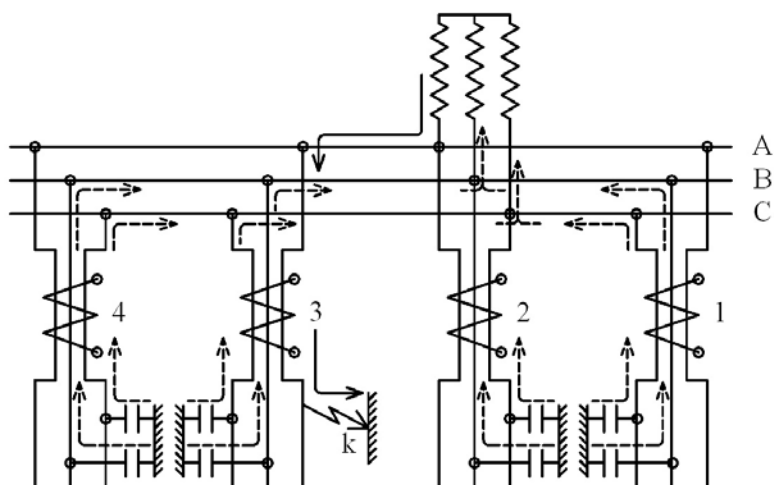


Slika 1.9. Postrojenje sa uzemljenom neutralnom tačkom

Za kvar k_1 na štićenom vodu, kroz filter nulte komponente F_0 teče nulta struja $3i_{01}$ sa smerom od sabirnica ka vodu. Ova struja zatvara se preko zvezdišta transformatora T sa smerom od "zemlje" ka zvezdištu. Za kvar k_2 van štićenog voda, kroz filter nulte komponente struje teče nulta struja $3i_{02}$ sa smerom od voda ka sabirnicama, dok kroz zvezdište transformatora T teče struja $3i_{01}$ sa smerom od "zemlje" ka zvezdištu. Smer struje kroz zvezdište transformatora T ne zavisi od mesta kvara, pa se može upotrebiti umesto nultog napona kao referentna veličina.

1.1.4.4. Mreža sa izolovanim neutralnom tačkom

Izolovana mreža sa četiri odvoda prikazana je na **Slici 1.10** [29].



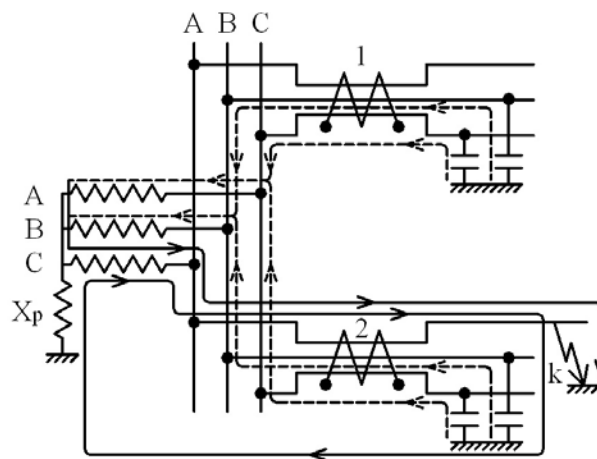
Slika 1.10. Postrojenje sa izolovanim neutralnom tačkom

Zemljospoj je na fazi A voda 3. Iako je kvar na jednom odvodu, struja kvara se rasprostire na sve odvode mreže. Kroz provodnike faze A (puna strelica), struja teče od transformatora do mesta kvara gde utiče u zemlju. Zatim se kroz kapacitete prema zemlji faza B i C svih odvoda vraća u mrežu. Kroz obuhvatne transformatore 1, 2 i 3 zdravih odvoda teče samo deo struje zemljospoja koji se zatvara preko pripadajućih dozemnih kapaciteta. Međutim, kroz obuhvatni transformator odvoda sa kvarom teče vektorska suma ukupne i dela struje zemljospoja koji se u mrežu vraća kroz dozemne kapacitete voda 3. Zato je nulta struja odvoda sa kvarom veća od nultih struja zdravih odvoda te se selektivnost zemljospojne zaštite može postići strujnim podešavanjem neusmerenih prekostrujnih releja.

Na ovaj način selektivnost se može postići samo u postrojenjima sa više od dva odvoda. U suprotnom, koristi se usmerena zemljospojna zaštita sa nultim naponom kao referentnom veličinom.

1.1.4.5. Mreža sa kompenzovanom neutralnom tačkom

Na **Slici 1.11** prikazana je mreža sa dva odvoda kompenzovana Petersenovom prigušnicom [29].



Slika 1.11. Postrojenje uzemljeno Petersenovom prigušnicom

Pri kvaru k, kroz odvod 2 teče vektorska suma kapacitivne struje zemljospoja i induktivne struje prigušnice. Kroz odvod bez kvara teče samo kapacitivna komponenta koja se zatvara preko dozemnih kapaciteta. Petersenova prigušnica, zbog gvođenog magnetskog kola, generiše treći harmonik struje, te struja voda sa kvarom sadrži i treći

harmonik. Selektivnost zemljospojne zaštite postiže se harmonijskom analizom struje odvoda.

1.2. Ciljevi istraživanja

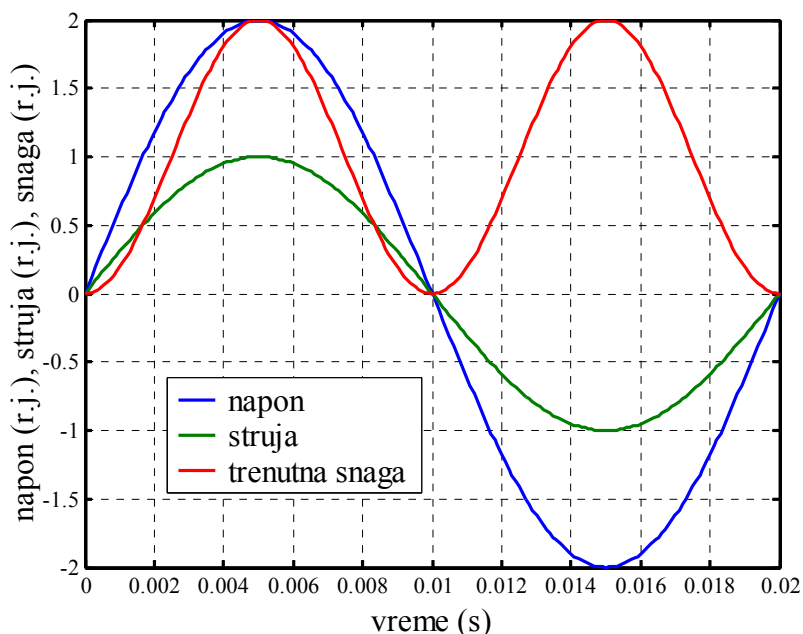
Na osnovu izloženih, postojećih rešenja za usmerene releje mogu se postaviti osnovni ciljevi ove doktorske disertacije:

- razvoj novog algoritma za usmereni relej baziranog na digitalnoj faznoj komparaciji,
- korišćenje jednostavnih matematičkih operacija,
- korišćenje integralnog principa rada,
- fazno pomeranje struje bez uvođenja modela voda,
- lako podešavanje praga reagovanja ili blokiranja,
- pouzdan rad pri bliskim kratkim spojevima,
- pouzdan rad u uslovima kada frekvencija sistema odstupa od naznačene,
- pouzdan rad u uslovima kada su ulazni signali zaprljani višim harmonicima i jednosmernom komponentom,
- kratko vreme odziva,
- razvoj trofazne konstrukcije,
- primena i u uslovima kada naponski signal nije dostupan.

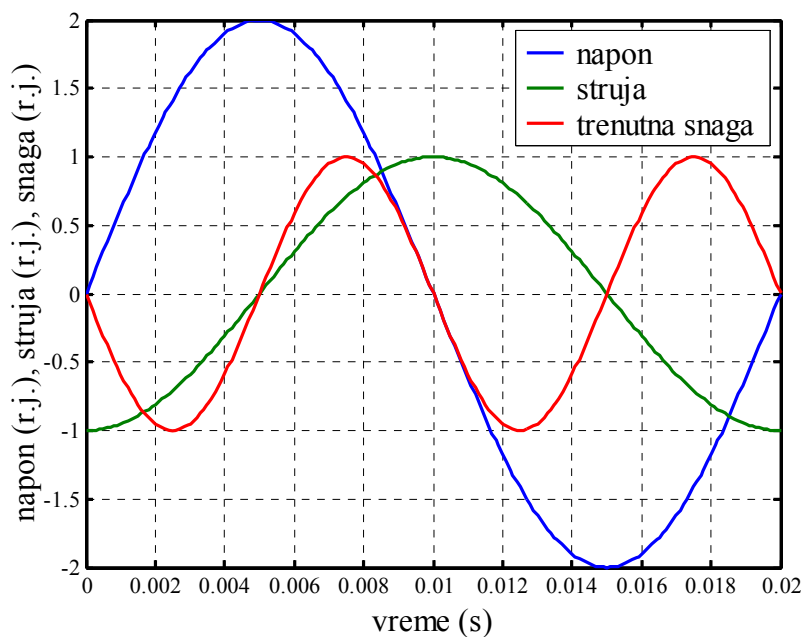
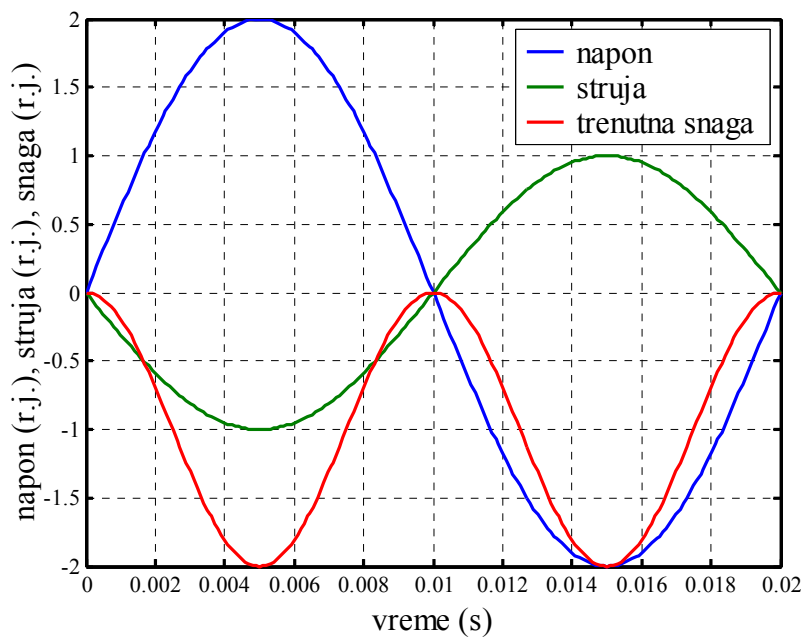
2. DIGITALNI FAZNI KOMPARATOR

Za realizaciju digitalnog faznog komparatora pošlo se od ideje da se ne računa fazni pomeraj između struje i referentnog napona, već energija odnosno integral trenutne snage signala na intervalu dužine polovine osnovne periode napona ili struje [30]. Interval integracije je polovina osnovne periode jer je frekvencija trenutne snage dva puta veća u odnosu na frekvenciju ulaznih signala.

Ovu ideju najlakše je objasniti grafički. Na **Slici 2.1** prikazani su vremenski oblici napona i struje za slučaj kada su isti u fazi. U ovom slučaju proizvod napona i struje je u svakom trenutku pozitivan, te je i integral trenutne snage računat na intervalu dužine poluperiode strujnog i naponskog signala pozitivan. Na **Slici 2.2** prikazani su talasni oblici napona i struje kada su isti međusobno fazno pomereni za 90° . U ovom slučaju proizvod napona i struje je u četvrtini periode pozitivan, a u četvrtini periode negativan. Energija signala na intervalu dužine poluperiode jednaka je nuli. Na **Slici 2.3** prikazane su vremenske promene napona i struje u slučaju kada su fazno pomereni za 180° , odnosno kada su u protiv fazi. U ovom slučaju trenutna snaga uvek je negativna, te je i njen integral na intervalu dužine poluperiode negativan.



Slika 2.1. Signali napona i struje su u fazi

Slika 2.2. Signal struje kasni iza napona za 90° 

Slika 2.3. Signali napona i struje su u protiv fazi

Algoritam usmerenog releja koji se bazira na integralu trenutne snage signala ima osobine faznog komparatora. Ako fazni pomeraj između napona i struje leži u opsegu $-90^\circ(270^\circ) < \varphi < 90^\circ$ integral trenutne snage je pozitivan. Ako fazni pomeraj

između struje i napona leži u opsegu $90^\circ < \varphi < 270^\circ (-90^\circ)$ integral trenutne snage je negativan. Energija signala je po modulu maksimalna ako je $\varphi = 0^\circ$ ili 180° , odnosno usmereni relej sa ovakvim algoritmom je najosetljiviji kada je struja u fazi ili protiv fazi u odnosu na napon. Na ovaj način dobija se usmereni relej aktivne snage. Usmereni relej aktivne snage nije dobar za induktivne petlje kvara u kojima struja znatno kasni za naponom. U praksi, kod nadzemnih vodova, taj ugao leži u opsegu $60^\circ < \varphi < 80^\circ$. Za induktivne petlje bolji je usmereni relej reaktivne snage, čija je osetljivost najveća kada su napon i struja fazno pomereni za 90° . Predloženi algoritam veoma lako se podešava, tako da mu osetljivost može biti maksimalna za bilo koji fazni pomeraj između struje i napona, što će biti objašnjeno u nastavku.

Za realizaciju algoritma neophodna su dva registra ili prozora podataka. Neka su oba registra dužine m odbiraka. U prvi registar smeštaju se odbirci napona, a u drugi odbirci struje:

$$u = [u(1) \ u(2) \ \dots \ u(m-1) \ u(m)], \quad (2.1)$$

$$i = [i(1) \ i(2) \ \dots \ i(m-1) \ i(m)], \quad (2.2)$$

gde su:

$u(j)$ – odbirci napona [V],

$i(j)$ – odbirci struje [A],

m – broj odbiraka u osnovnoj periodi signala.

Broj odbiraka u osnovnoj periodi zavisi od frekvencije odabiranja A/D konvertora i računa se kao:

$$m = f_{od} / f_n, \quad (2.3)$$

gde su:

f_{od} – frekvencija odabiranja [Hz],

f_n – naznačena frekvencija elektroenergetskog sistema ($f_n = 50$ Hz).

Nakon uzimanja svakog novog odbirka, u registrima se vrši pomeranje za jednu poziciju ulevo, odnosno drugi odbirak postaje prvi, a novi odbirak postaje m -ti.

Energija ili integral trenutne snage na poluperiodi može se odrediti pomoću:

$$E = \int_t^{t+T/2} p(t) dt = \int_t^{t+T/2} u(t)i(t) dt \approx \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k)i(k)T_{od} = T_{od} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k)i(k), \quad (2.4)$$

gde su:

E – energija signala [J],

$p(t)$ – trenutna snaga signala [W],

T – osnovna perioda signala ($T = 1/f_n$) [s],

T_{od} – perioda odabiranja A/D konvertora ($T_{od} = 1/f_{od}$) [s].

Za proračun energije koristi se centralnih $m/2$ odbiraka iz oba registra. Kako u oba registra postoje neiskorišćeni odbirci sa obe strane, prilagođenje petlji kvara može se ostvariti na više načina: pomeranjem samo naponskih odbiraka, pomeranjem samo strujnih odbiraka ili njihovom kombinacijom. U odnosu na dosadašnja rešenja, ovakvim pristupom eliminisana je potreba za impedansom modela voda Z_m .

Ako se podešavanje osetljivosti vrši pomoću odbiraka iz naponskog registra (naponsko podešavanje) dobija se:

$$E = T_{od} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k+os)i(k), \quad (2.5)$$

gde je:

os – podešena osetljivost releja izražena u broju odbiraka.

Za $os=0$ suma (2.5) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz registara, te se dobija usmereni relej aktivne snage, jer će suma (2.5) biti maksimalna ako su struja i napon u fazi. Za $os=-m/4$ suma (2.5) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz registra za struju i odbircima napona sa indeksima $1 \leq j \leq m/2$, te se dobija usmereni relej reaktivne induktivne snage, jer će suma (2.5) biti maksimalna i pozitivna ako struja kasni za naponom za 90° . Za $os=m/4$ suma (2.5) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz registra za struju i odbircima napona sa indeksima $m/2+1 \leq j \leq m$, te se dobija usmereni relej reaktivne kapacitivne snage, jer će suma (2.5) biti maksimalna i pozitivna ako struja prednjači naponu za 90° . Za kvarove "iza" releja pomenute sume postaju maksimalne po modulu, ali negativne po znaku.

Ako se podešavanje osetljivosti vrši pomoću odbiraka iz strujnog registra (strujno podešavanje) dobija se:

$$E = T_{od} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k)i(k-os). \quad (2.6)$$

Veličina os u izrazu (2.6) ulazi sa negativnim predznakom da bi podešenje osetljivosti ostalo nezavisno od vrste registra koji se koristi. Za $os=0$ suma (2.6) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz oba registra, te se dobija usmereni

relej aktivne snage. Za $os=-m/4$ suma (2.6) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz registra za napon i odbircima struje sa indeksima $m/2+1 \leq j \leq m$, te se dobija usmereni relej reaktivne induktivne snage. Za $os=m/4$ suma (2.6) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz registra za napon i odbircima struje sa indeksima $1 \leq j \leq m/2$, te se dobija usmereni relej reaktivne kapacitivne snage.

Ako se podešavanje osetljivosti vrši pomoću odbiraka iz oba registra (kombinovano podešavanje) dobija se:

$$E = T_{od} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k + os/2) i(k - os/2) \quad . \quad (2.7)$$

Za $os=0$ suma (2.7) izračunava se korišćenjem centralnih $m/2$ odbiraka iz oba registra, te se dobija usmereni relej aktivne snage. Za $os=-m/4$ suma (2.7) izračunava se odbircima napona sa indeksima $m/8+1 \leq j \leq 5m/8$ i odbircima struje sa indeksima $3m/8+1 \leq j \leq 7m/8$, te se dobija usmereni relej reaktivne induktivne snage. Za $os=m/4$ suma (2.7) izračunava se odbircima napona sa indeksima $3m/8+1 \leq j \leq 7m/8$ i odbircima struje sa indeksima $m/8+1 \leq j \leq 5m/8$, te se dobija usmereni relej reaktivne kapacitivne snage. U ovom slučaju dužine ulaznih registara mogu se smanjiti na $3m/4$ odbiraka o čemu će više reći biti kasnije.

Numerička vrednost energije na intervalu jednakom poluperiodi signala zavisi od amplitude napona i struje. Bilo bi veoma teško proceniti udaljenost od granice usmerenosti ako bi se radilo sa apsolutnim vrednostima integrala. Zato je zgodno normalizovati energiju tako da se ista kreće u ograničenom intervalu, npr. od -1 do 1. Kao logično rešenje nameće se deljenje energije signala efektivnom vrednošću napona i struje na istom intervalu:

$$ps = \frac{E}{UI \frac{T}{2}} = \frac{P \frac{T}{2}}{S \frac{T}{2}} = \frac{P}{S} = \cos(\varphi), \quad (2.8)$$

gde su:

ps – pokazatelj smera,

U – efektivna vrednost napona [V],

I – efektivna vrednost struje [A],

P – srednja snaga signala [W],

S – prividna snaga signala [VA],

φ – fazni pomeraj između napona i struje [°].

Kao što se može uočiti, normalizovana energija signala, odnosno pokazatelj smera ps brojno je jednak $\cos\varphi$. Treba naglasiti da ovaj $\cos\varphi$ ne odgovara originalnim ulaznim signalima već modifikovanim signalima čiji $\cos\varphi$ u toku kvara treba da teži 1. Takođe, iz izraza (2.8) sledi da se pored energije signala, odnosno integrala trenutne snage potpuno ravnopravno može koristiti i srednja snaga signala za proračun indikatora ps .

Ograničavanjem pokazatelja smera ps na interval ± 1 ostvarena je mogućnost podešavanja praga reagovanja releja različitog od nule.

U jednačini (2.8), u imeniocu figurišu efektivne vrednosti napona i struje. Razvijen je veliki broj postupaka za njihov proračun [29, 31]. Najčešće korišćene metode su:

- Proračun efektivnih vrednosti po definiciji:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^m u(k)^2 T_{od}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m u(k)^2}, \quad (2.9)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t)^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^m i(k)^2 T_{od}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m i(k)^2}. \quad (2.10)$$

- Metoda srednje vrednosti:

$$U = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{sr} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} |u(t)| dt \approx \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{2}{T} \sum_{k=1}^{m/2} |u(k)| T_{od} = \frac{\pi}{\sqrt{2m}} \sum_{k=1}^{m/2} |u(k)|, \quad (2.11)$$

$$I = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{sr} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} |i(t)| dt \approx \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{2}{T} \sum_{k=1}^{m/2} |i(k)| T_{od} = \frac{\pi}{\sqrt{2m}} \sum_{k=1}^{m/2} |i(k)|. \quad (2.12)$$

- Metoda maksimalne vrednosti:

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \max_{k=1}^m (|u(k)|), \quad (2.13)$$

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \max_{k=1}^m (|i(k)|). \quad (2.14)$$

Metode srednje i maksimalne vrednosti podrazumevaju da je procesirani signal prostoperiodičan. Pri tome, metoda srednje vrednosti manje je osetljiva na šumove i smetnje jer se u proračunu koriste svi odbirci u prozoru podataka, za razliku od metode maksimalne vrednosti gde ceo postupak zavisi od jednog odbirka. Osnovna prednost

pomenutih metoda jeste korišćenje jednostavnih matematičkih operacija, za razliku od proračun efektivnih vrednosti po definiciji koji zahteva traženje kvadratnog korena što spada u složene operacije koje zahtevaju više procesorskog vremena. Zato će u nastavku za estimaciju efektivne vrednosti struje biti korišćena metoda srednje vrednosti kao kompromisno rešenje.

Kada se izrazi (2.11) i (2.12) ubace u (2.8), za naponsko podešavanje osetljivosti dobija se:

$$ps = \frac{P}{S} = \frac{\frac{2}{m} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k+os)i(k)}{\frac{\pi}{\sqrt{2m}} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u(k+os)| \frac{\pi}{\sqrt{2m}} \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i(k)|} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k+os)i(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u(k+os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i(k)|}, \quad (2.15)$$

za strujno podešavanje osetljivosti dobija se:

$$ps = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k)i(k-os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i(k-os)|}, \quad (2.16)$$

a za kombinovano podešavanje osetljivosti dobija se:

$$ps = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k+os/2)i(k-os/2)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u(k+os/2)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i(k-os/2)|}. \quad (2.17)$$

Na osnovu jednačina (2.15), (2.16) i (2.17) može se primetiti da predloženi postupak za utvrđivanje smera koristi najjednostavnije matematičke operacije: sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje, čime je zauzeće procesorskog vremena pri proračunima svedeno na minimum.

Algoritam usmerenog releja treba podesiti izborom osetljivosti os , tako da pokazatelj smera ps bude po modulu maksimalan u režimima u kojima je potrebno meriti "smer", odnosno fazni pomeraj između napona i struje:

$$os = -\text{round}\left(\varphi_k \frac{m}{360^\circ}\right), \quad (2.18)$$

gde su:

round – funkcija zaokruživanja na prvu bližu celobrojnu vrednost,

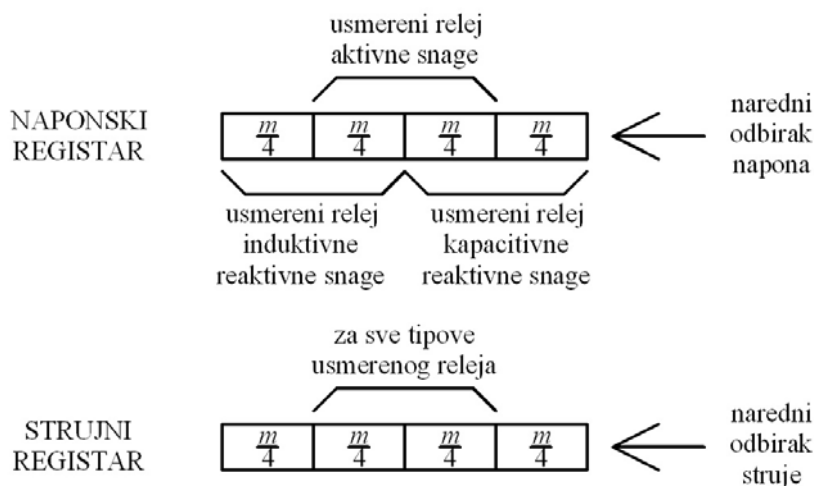
φ_k – argument petlje kvara [$^\circ$].

Pozitivna vrednost indikatora ps ukazuje na kvarove "ispred" releja, a negativna vrednost na kvarove "iza" releja. Zbog konačne frekvencije odabiranja A/D konvertora nije moguće kontinualno podešavanje osetljivosti os . Stoga je minimalni korak, izražen u stepenima [°], sa kojim se osetljivost algoritma može podešavati dat izrazom:

$$\delta = \frac{360^\circ}{m}. \quad (2.19)$$

2.1. Vreme konvergencije algoritma

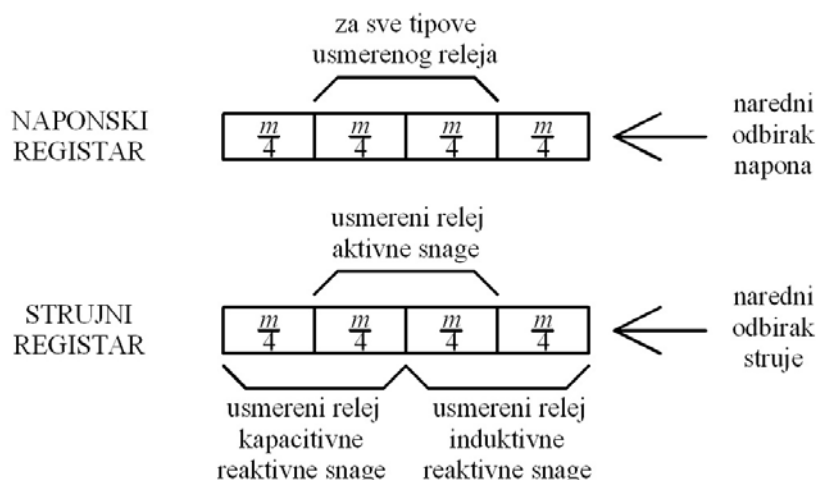
Vreme konvergencije algoritma zavisi od podešene osetljivosti releja i izbora registra preko kog se osetljivost podešava. Na **Slici 2.4** prikazani su naponski i strujni registar kada se osetljivost podešava preko naponskog registra. Vreme neophodno da svi novi strujni odbirci uđu u proračun je nezavisno od podešene osetljivosti i iznosi $3T/4$, odnosno 15 ms. Kada je naponski registar u pitanju, ovo vreme zavisi od podešene osetljivosti i može biti 10 ms, 15 ms ili 20 ms. Pošto se pokazatelj smera ps računa preko odbiraka iz oba registra, vreme konvergencije indikatora ps odgovara dužem od dva pojedinačna vremena: za usmereni relej kapacitivne reaktivne snage i aktivne snage iznosi 15 ms, dok za usmereni relej induktivne reaktivne snage iznosi 20 ms.



Slika 2.4. Naponsko podešavanje osetljivosti

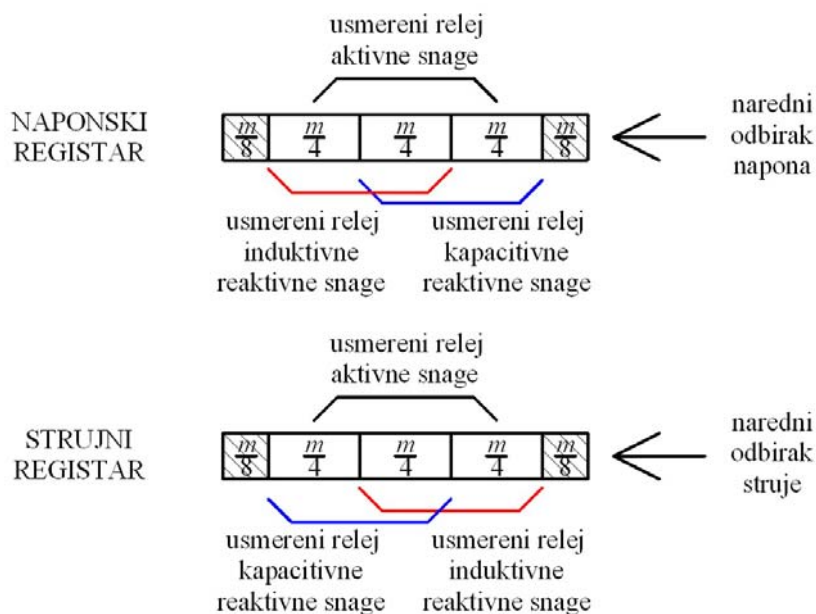
Na **Slici 2.5** prikazani su naponski i strujni registar kada se osetljivost podešava preko strujnog registra. Po analogiji, vreme konvergencije pokazatelja ps odgovara dužem od dva pojedinačna vremena: za usmereni relej induktivne reaktivne snage i

aktivne snage iznosi 15 ms, dok za usmereni refej kapacitivne reaktivne snage iznosi 20 ms.



Slika 2.5. Strujno podešavanje osetljivosti

Na Slici 2.6 prikazani su naponski i strujni registar kada se osetljivost podešava preko oba registra. Vreme konvergencije usmerenog releja aktivne snage iznosi 15 ms, dok za usmereni refej induktivne i kapacitivne reaktivne snage iznosi 17.5 ms.



Slika 2.6. Kombinovano podešavanje osetljivosti

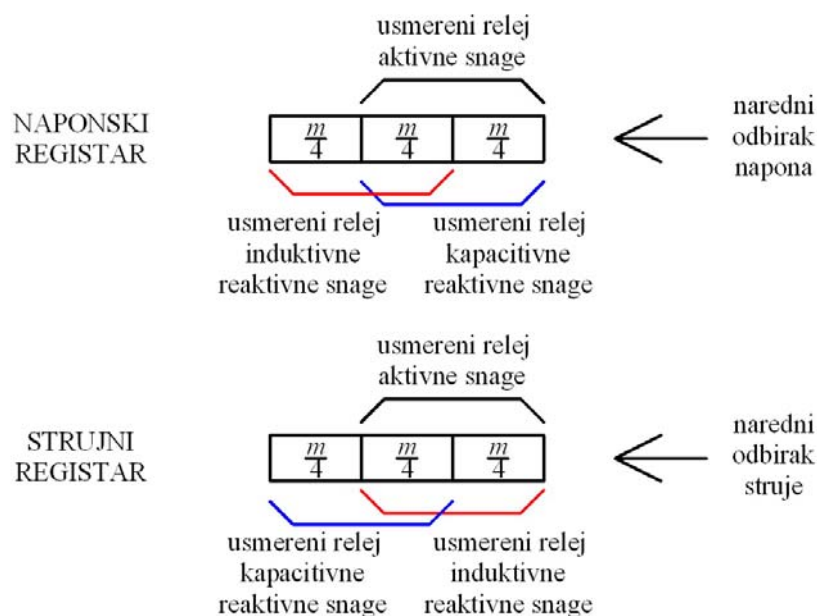
Već je pomenuto da se kod kombinovanog podešavanja osetljivosti dužine registara mogu smanjiti na $3m/4$ odbiraka budući da se šrafirani odbirci ne koriste. Na

taj način skraćuje se i vreme konvergencije usmerenog releja induktivne i kapacitivne reaktivne snage na 15 ms. Međutim, uvođenjem podešenja osetljivosti preko oba registra javlja se problem ukoliko je os neparan broj. Ovaj problem može se otkloniti na dva načina. Prvi način predstavlja zaokruživanje vrednosti $os/2$ na prvu bližu celobrojnu vrednost, ali se time ceo postupak dodatno usložnjava. Drugi način je da se za induktivne petlje osetljivost podešava preko naponskog registra, a da se za kapacitivne petlje koristi strujni registar, odnosno:

$$ps = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k+os)i(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u(k+os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i(k)|}, \text{ za } -m/4 \leq os \leq 0, \quad (2.20)$$

$$ps = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u(k)i(k-os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i(k-os)|}, \text{ za } 0 \leq os \leq m/4. \quad (2.21)$$

Na ovaj način postiže se i dodatno skraćenje vremena konvergencije koje je najizraženije kod usmerenog releja aktivne snage i iznosi 10 ms. Ovo unapređenje ilustrovano je na **Slici 2.7**.



Slika 2.7. Unapređeno podešavanje osetljivosti korišćenjem oba registra

Ovakvim izborom odbiraka postiže se optimalno korišćenje memorijskih resursa i maksimalna brzina konvergencije algoritma. Međutim, postupak proračuna indikatora

ps je nešto komplikovaniji jer zavisi od podešene osetljivosti os (jednačine (2.20) i (2.21)).

2.2. Uticaj viših harmonika i jednosmerne komponente

Pošto ulazni signali mogu sadržati više harmonike i/ili jednosmernu komponentu moraju se filtrirati pre upotrebe. Za filtriranje signala koriste se kako analogni tako i digitalni filtri. Analogno filtriranje vrši se pre analogno-digitalne konverzije. Nakon digitalizacije, signali se propuštaju kroz digitalni filter. U relejnoj zaštiti diskretna Fourierova transformacija gotovo da ima status standarda kada je u pitanju digitalno filtriranje [32]. Ako se za digitalno filtriranje koristi kosinusni Fourierov red [29], dobija se:

$$u_c(m) = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m u(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (2.22)$$

$$i_c(m) = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m i(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (2.23)$$

gde su:

$u_c(m)$ – m -ti kosinusni odbirak napona,

$i_c(m)$ – m -ti kosinusni odbirak struje.

Na filtrirane odbirke primenjuje se procedura opisana u prethodnom poglavlju. Korišćenjem Fourierovog filtra uvodi se dodatno kašnjenje u konvergenciji od 20 ms.

Da bi se procesorsko vreme za proračune skratilo, koeficijente $\frac{2}{m} \cos\left(k \frac{2\pi}{m}\right)$ ne treba računati posle svakog učitavanja novog odbirka, već ih treba unapred proračunati i memorisati u vidu vektora **COS**:

$$\mathbf{COS} = \left[\frac{2}{m} \cos\left(\frac{2\pi}{m}\right) \frac{2}{m} \cos\left(2 \frac{2\pi}{m}\right) \dots \frac{2}{m} \cos\left((m-1) \frac{2\pi}{m}\right) \frac{2}{m} \right]. \quad (2.24)$$

Ako se za digitalno filtriranje koristi sinusni Fourierov red [29], dobija se:

$$u_s(m) = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m u(k) \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (2.25)$$

$$i_s(m) = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m i(k) \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (2.26)$$

gde su:

$u_s(m)$ – m -ti sinusni odbirak napona,

$i_s(m)$ – m -ti sinusni odbirak struje.

Po analogiji, vektor sinusnih koeficijenata dat je preko (2.27):

$$\mathbf{SIN} = \left[\frac{2}{m} \sin\left(\frac{2\pi}{m}\right) \frac{2}{m} \sin\left(2 \frac{2\pi}{m}\right) \dots \frac{2}{m} \sin\left((m-1) \frac{2\pi}{m}\right) 0 \right]. \quad (2.27)$$

Ukoliko nema potrebe za finom regulacijom osetljivosti algoritma mogu se koristiti samo kombinacije sinusne i kosinusne komponente napona i struje bez upotrebe promenljive os . Pošto je kosinusna komponenta filtriranog signala u fazi sa originalnim signalom, a sinusna komponenta kasni za $\pi/2$ u odnosu na isti, ovo se može iskoristiti za dobijanje usmerenog releja sa korakom za podešavanje osetljivosti od $\pi/2$ bez eksplicitnog podešavanja promenljive os . Moguće su sledeće kombinacije:

- korišćenjem kosinusne komponente napona i kosinusne komponente struje ili sinusne komponente napona i sinusne komponente struje dobija se usmereni relej aktivne snage:

$$ps = \frac{4m \sum_{k=1}^{m/2} u_c(k) i_c(k)}{\pi^2 \sum_{k=1}^{m/2} |u_c(k)| \sum_{k=1}^{m/2} |i_c(k)|} = \frac{4m \sum_{k=1}^{m/2} u_s(k) i_s(k)}{\pi^2 \sum_{k=1}^{m/2} |u_s(k)| \sum_{k=1}^{m/2} |i_s(k)|}, \quad (2.28)$$

- korišćenjem sinusne komponente napona i kosinusne komponente struje dobija se usmereni relej reaktivne induktivne snage:

$$ps = \frac{4m \sum_{k=1}^{m/2} u_s(k) i_c(k)}{\pi^2 \sum_{k=1}^{m/2} |u_s(k)| \sum_{k=1}^{m/2} |i_c(k)|}, \quad (2.29)$$

- korišćenjem kosinusne komponente napona i sinusne komponente struje dobija se usmereni relej reaktivne kapacitivne snage:

$$ps = \frac{4m \sum_{k=1}^{m/2} u_c(k) i_s(k)}{\pi^2 \sum_{k=1}^{m/2} |u_c(k)| \sum_{k=1}^{m/2} |i_s(k)|}. \quad (2.30)$$

Pošto nema podešavanja osetljivosti preko promenljive os , dužine registara za smeštanje odbiraka skraćuju se na $m/2$ odbiraka tako da je ukupno vreme konvergencije algoritma 30 ms: 20 ms zahteva Fourierov filter i 10 ms je vreme odziva indikatora ps .

2.3. Ultrabrzi digitalni fazni komparator

Ultrabrzi releji umesto trenutnih vrednosti signala koriste njihove priraštaje. Suština ovog pristupa je da relej generiše kratkotrajni izlazni signal prilikom poremećaja nakon čega se izlaz ponovo vraća na nulu. Opisani digitalni fazni komparator nema ograničenja u pogledu ulaznih signala te je primenljiv i ako mu se dovedu priraštaji signala:

$$ps = \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} \Delta u(k+os) \Delta i(k)}{\sqrt{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} \Delta u(k+os)^2} \sqrt{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} \Delta i(k)^2}}, \text{ za } -m/4 \leq os \leq 0, \quad (2.31)$$

$$ps = \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} \Delta u(k) \Delta i(k-os)}{\sqrt{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} \Delta u(k)^2} \sqrt{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} \Delta i(k-os)^2}}, \text{ za } 0 \leq os \leq m/4, \quad (2.32)$$

gde su:

Δu – registar priraštaja napona,

Δi – registar priraštaja struje.

Registri priraštaja Δu i Δi formiraju se iz ulaznih registara napona i struje kao:

$$\Delta u(k) = u(k-m) - u(k), \quad (2.33)$$

$$\Delta i(k) = i(k) - i(k-m), \quad (2.34)$$

gde su:

u – ulazni naponski registar dužine $m+1$,

i – ulazni strujni registar dužine $m+1$.

Priraštaji signala nisu prostoperiodične veličine čak i kad ulazni signali jesu. Zato se u izrazima (2.31) i (2.32) proračun efektivnih vrednosti vrši po definiciji na poluperiodi signala, a ne metodom srednje vrednosti. Time se postiže veća tačnost u estimaciji efektivne vrednosti pa je i odziv releja pouzdaniji.

Efekat priraštaja signala može se postići korišćenjem trenutnih signala inverznog i nultog komponentnog sistema, obzirom da isti ne postoje pre kvara. Međutim, ovi releji nisu osetljivi na simetrične poremećaje.

Osnovni nedostatak korišćenja priraštaja električnih veličina je neprimenljivost u uslovima kada stvarna frekvencija sistema odstupa od nominalne.

2.4. Testiranje algoritma

U cilju utvrđivanja performansi predloženog algoritma sproveden je niz testova sa računarski generisanim naponskim i strujnim signalima. Neka je frekvencija odabiranja A/D konvertora $f_{od}=3000$ Hz [32]. Dužine naponskog i strujnog registra su $3m/4$ odbiraka.

U prvom testu na ulaz releja dovode se naponski i strujni signali sledećih karakteristika:

$I_{pk}=1$ r.j. – efektivna vrednost struje pre kvara,

$I_k=3$ r.j. – efektivna vrednost struje kvara,

$U_{pk}=1$ r.j. – efektivna vrednost napona pre kvara,

$U_k=0.2$ r.j. – efektivna vrednost napona za vreme kvara,

$\varphi_{pk}=180^\circ$ – fazni pomeraj napona i struje pre kvara,

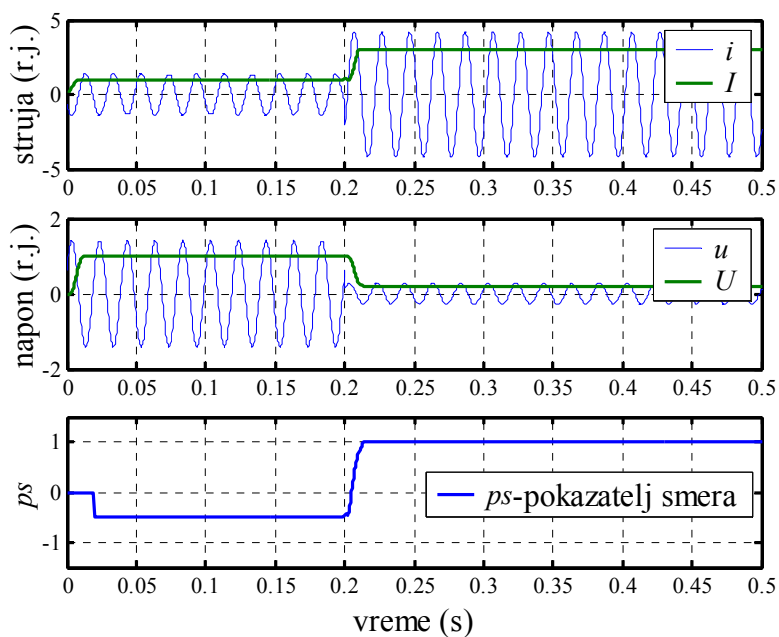
$\varphi_k=60^\circ$ – fazni pomeraj napona i struje za vreme kvara,

$f=50$ Hz – frekvencija ulaznih signala.

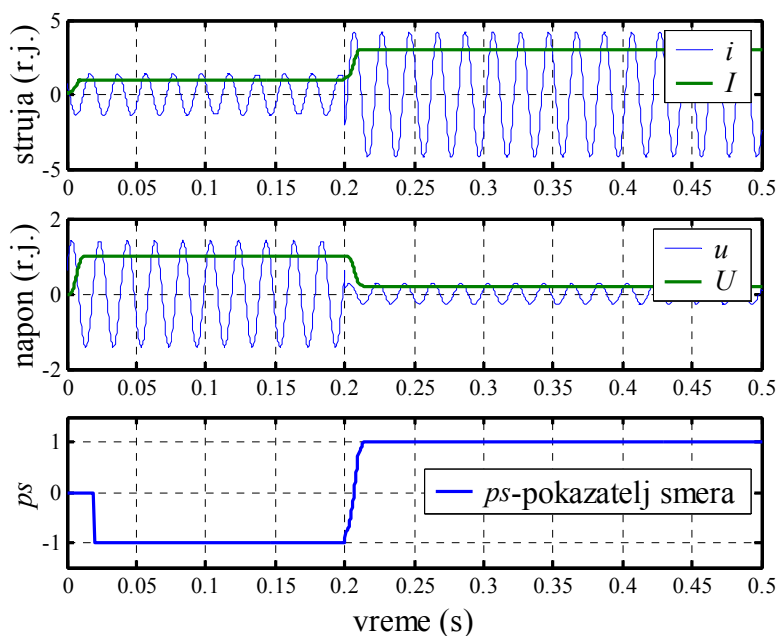
Kvar se dešava posle 0.2 s od početka simulacije, a sama simulacija traje 0.5 s. Relej je podešen tako ima najveću osetljivost pri usvojenom argumentu petlje kvara, tj. $os=-10$. Rezultati testa prikazani su na **Slici 2.8a**. Obzirom da marker ps po nastanku kvara teži 1, relej uspešno detektuje "smer" kvara.

Vreme konvergencije efektivne vrednosti struje je 10 ms i posledica je metode srednje vrednosti. Vreme konvergencije efektivne vrednosti napona je nešto duže jer se zbog usvojene induktivne petlje kvara osetljivost podešava preko ovog registra. U najgorem slučaju ($\varphi_k=90^\circ$) ovo vreme ne prelazi 15 ms. Vreme odziva pokazatelja smera ps odgovara dužem od prethodna dva pomenuta vremena.

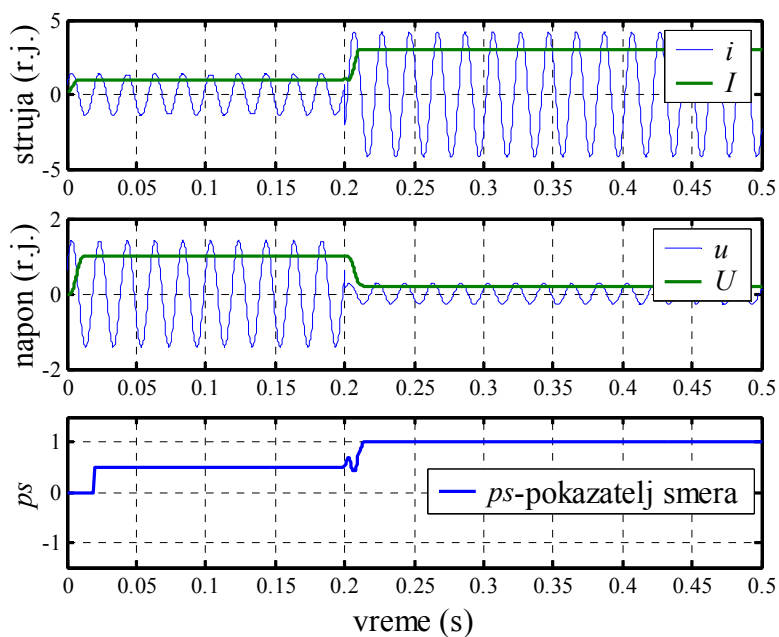
Vreme reagovanja releja nije isto što i vreme konvergencije i zavisi kako od režima pre kvara tako i od podešenog praga reagovanja. Pod pretpostavkom da je prag reagovanja $ps>0$, na osnovu **Slike 2.8a**, relej reaguje nakon 5 ms što ga svrstava u veoma brze releje. Najduže vreme reagovanja dobija se ako je pokazatelj ps pre kvara imao vrednost -1. Ova situacija nastaje pri $\varphi_{pk}=240^\circ$ i prikazana je na **Slici 2.8b**. Tada je vreme odziva releja 7 ms. Za režime pre kvara koje karakteriše $-30^\circ<\varphi_{pk}<150^\circ$ odziv releja je trenutni, obzirom da je pokazatelj smera tada uvek veći od nule. Ova situacija ilustrovana je na **Slici 2.8c** za $\varphi_{pk}=0^\circ$.



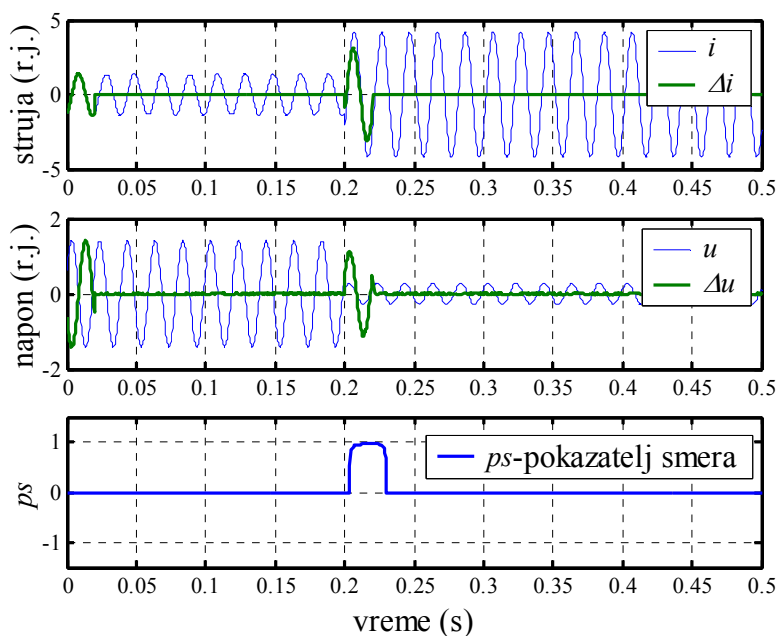
Slika 2.8a. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, bez viših harmonika, podešena osetljivost releja $os=-10$



Slika 2.8b. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=240^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, bez viših harmonika, podešena osetljivost releja $os=-10$



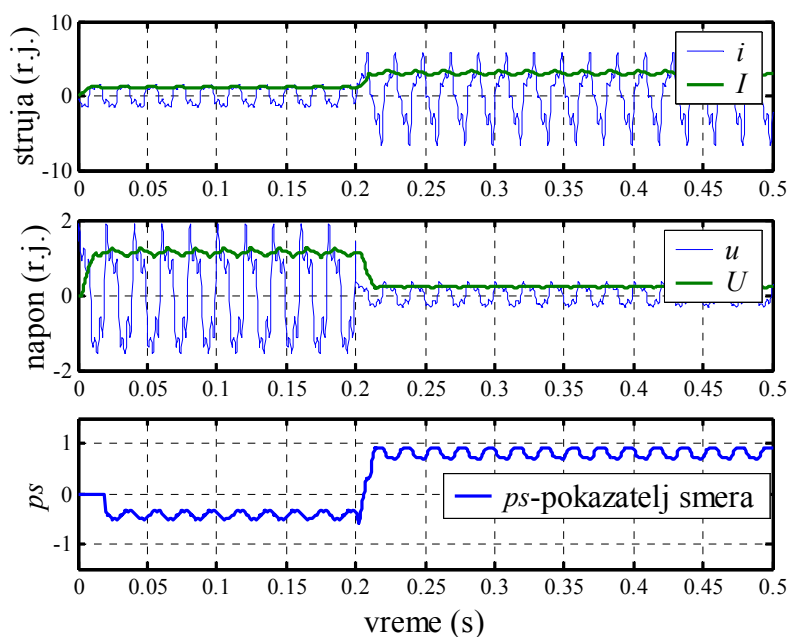
Slika 2.8c. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=0^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, bez viših harmonika, podešena osetljivost releja $os=-10$



Slika 2.8d. Ultrabrzi usmereni relej: $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, bez viših harmonika, podešena osetljivost releja $os=-10$

Ultrabrzi usmereni relej, koji koristi priraštaje veličina Δu i Δi , daje odziv prikazan na **Slici 2.9d**. Karakteristike ulaznih signala odgovaraju onima sa **Slike 2.8.a**. Vreme reagovanja releja je manje od 3.5 ms, a trajanje izlaznog signala je oko 26 ms.

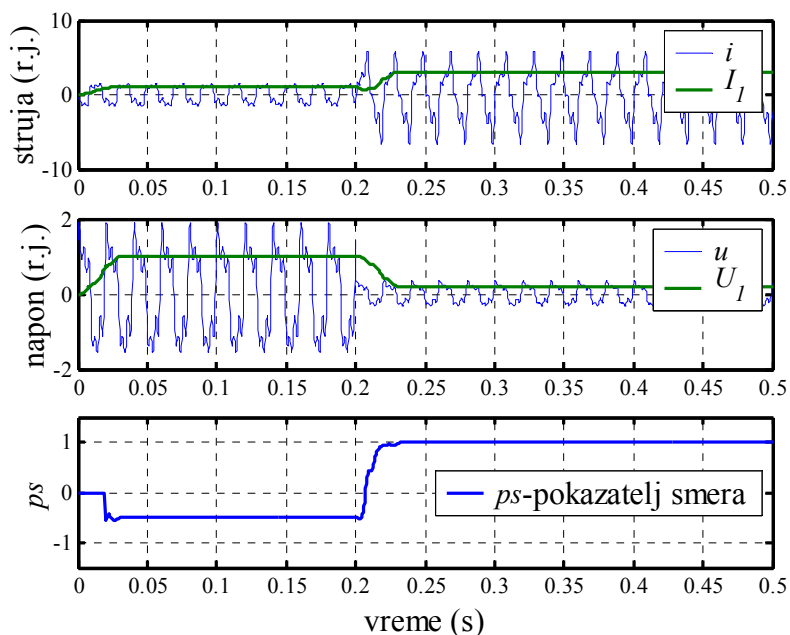
U drugom testu releju se dovode signali napona i struje, koji pored osnovnog harmonika sadrže i izražene višeharmonijske komponente do reda 5: $U_2=10\%U_1$, $U_3=30\%U_3$, $U_4=10\%U_4$, $U_5=30\%U_5$, $I_2=10\%I_1$, $I_3=30\%I_3$, $I_4=10\%I_4$ i $I_5=30\%I_5$. Na **Slici 2.9a** prikazani su rezultati testa u kome nije primenjeno digitalno filtriranje signala. Vreme odziva releja je 6 ms. Međutim, sa slike se uočava veliki uticaj višeharmonijskih komponenti na estimaciju efektivnih vrednosti I i U , odnosno indikator ps . Kao posledica pomenutog, u režimima u kojima je ps u okolini nule mogući su višestruki prolasci ovog indikatora kroz nulu. Zato je neophodno uvođenje digitalnog filtra.



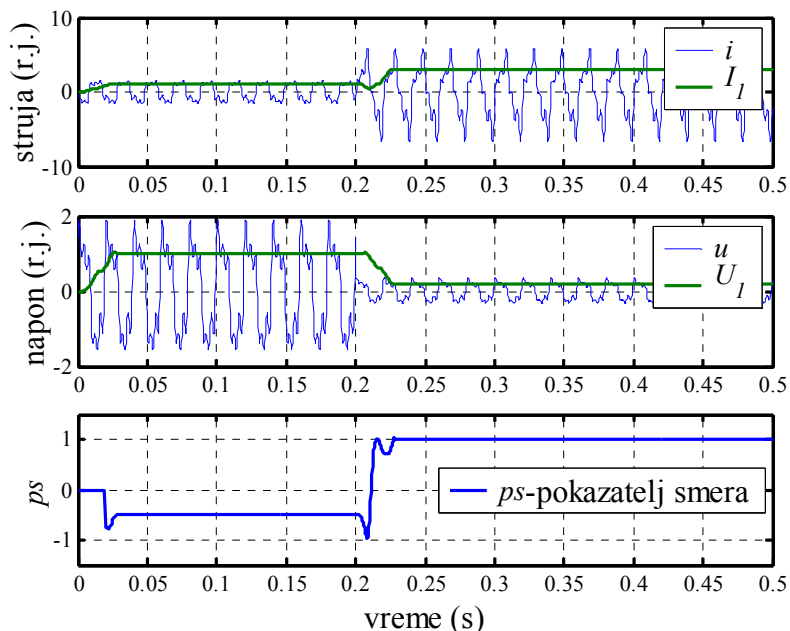
Slika 2.9a. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$

U naredna dva testa releju se dovode isti signali, ali se pre proračuna vrši digitalno filtriranje. Na **Slici 2.9b** prikazani su rezultati dobijeni primenom kosinusnog Fourierovog reda, a na **Slici 2.9c** rezultati dobijeni sinusnom komponentom Fourierovog reda. Sa slika se uočava da oba filtra uspešno eliminišu više harmonike, ali se vreme konvergencije produžava za 20 ms. Takođe, može se uočiti da rezultati

dobijeni kosinusnim redom mirnije konvergiraju ka ustaljenoj vrednosti, što mu daje odlučujuću prednost za dalju upotrebu.



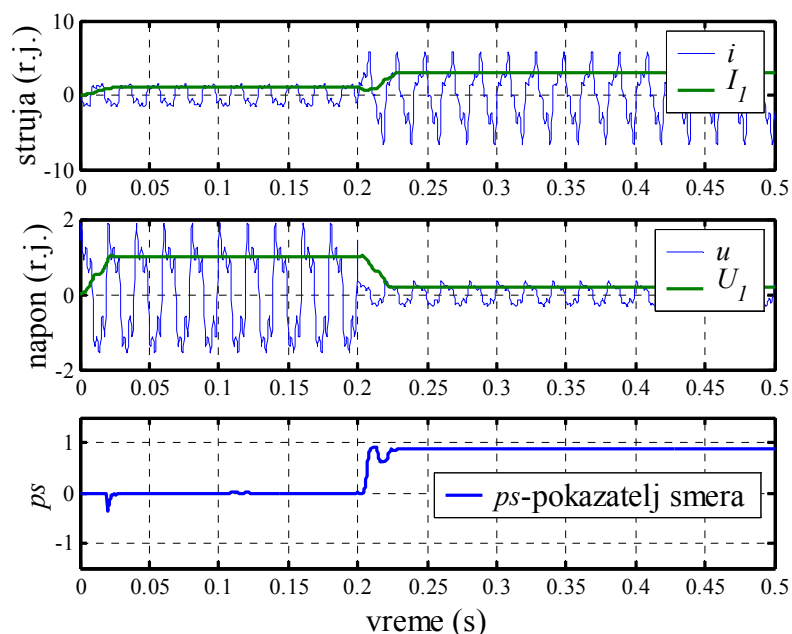
Slika 2.9b. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$



Slika 2.9c. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, digitalno filtriranje sinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$

Uvođenjem digitalnog filtriranja, vreme konvergencije efektivne vrednosti struje je 30 ms: 20 ms je neophodno Fourierovom filtru i 10 ms zahteva metoda srednje vrednosti. Vreme konvergencije efektivne vrednosti napona je nešto duže jer se zbog usvojene induktivne petlje kvara osetljivost podešava preko ovog registra. Vreme konvergencije pokazatelja smera ps odgovara dužem od prethodna dva pomenuta vremena i u najgorem slučaju ne prelazi 35 ms. Ako je uslov reagovanja releja $ps > 0$, sa **Slike 2.9b** može se uočiti da promenljiva ps premašuje vrednost 0 za oko 7 ms. Ako bi se koristila sinusna komponenta Fourierovog reda (**Slike 2.9c**), vreme odziva je nešto duže i iznosi oko 11 ms.

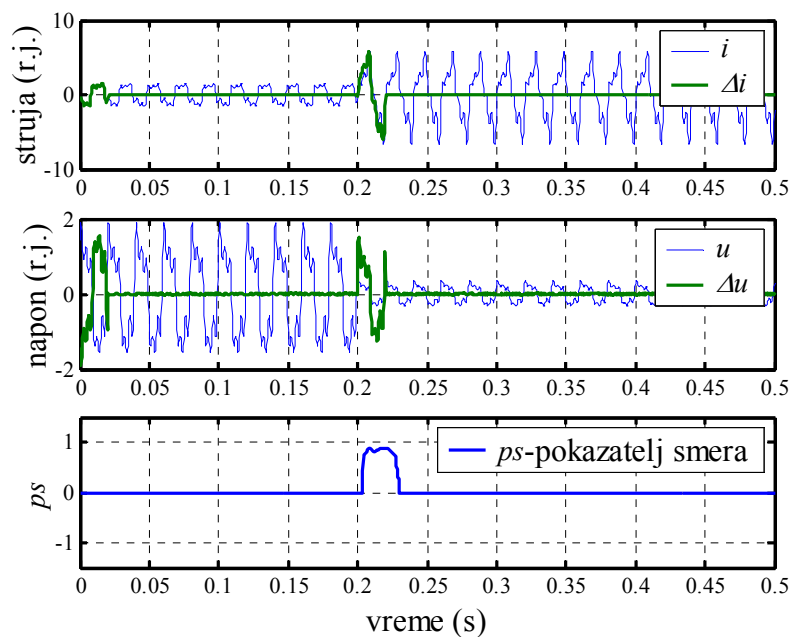
Primenom algoritama za grubo podešavanje osetljivosti preko ortogonalnih komponenti Fourierovog reda za iste ulazne signale, dobijaju se talasni oblici prikazani na **Slici 2.9d**. Pošto je argument petlje kvara manji od 90° , promenljiva ps konvergira ka vrednosti 0.87. Vreme odziva pokazatelja ps iznosi 4 ms.



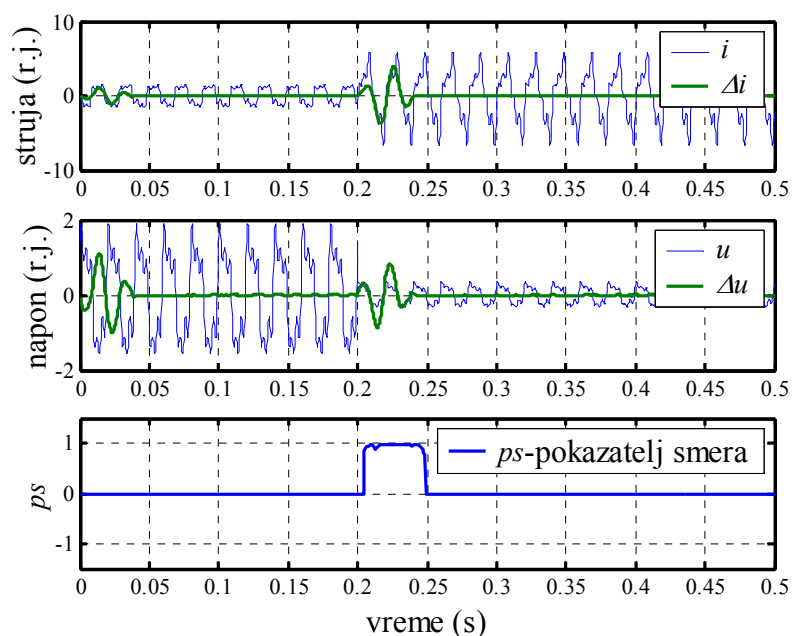
Slika 2.9d. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, sa višim harmonicima, grubo podešavanje osetljivosti preko ortogonalnih komponenti Fourierovog reda

Odziv algoritma za ultrabrzni usmereni relej pri istoj pobudi prikazan je na **Slici 2.9e**. Brzina reagovanja algoritma je manja od 3.5 ms i izlaz traje oko 26 ms. Viši harmonici u ulaznim signalima utiču samo na amplitudu izlaznog signala koja je sada nešto manja od 1. Ako se pre procesiranja signala upotrebi kosinusni Fourierov filter,

dobijaju se talasni oblici prikazani na **Slici 2.9f**. Brzina reagovanja algoritma u ovom slučaju je nešto manja i iznosi 5 ms, dok izlazni signal traje oko 44 ms.

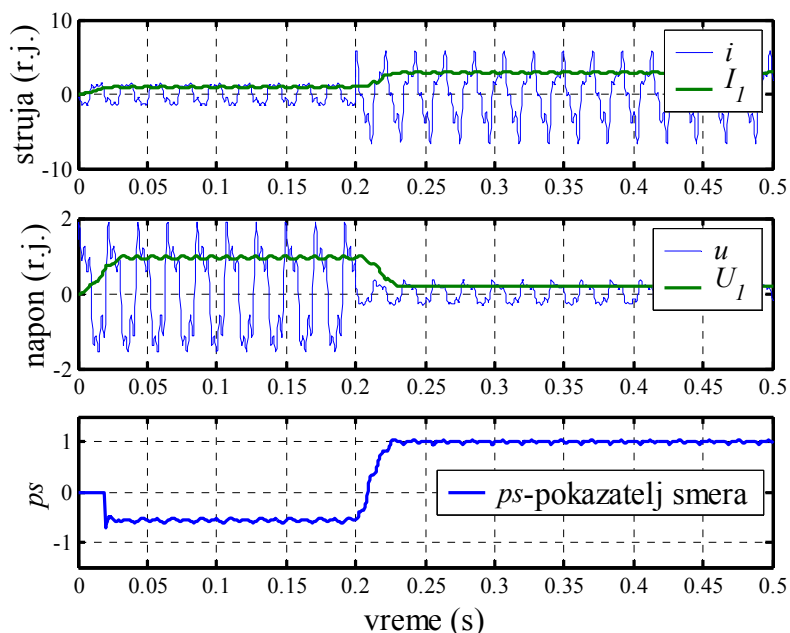


Slika 2.9e. Ultrabrzi usmereni relej: $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$



Slika 2.9f. Ultrabrzi usmereni relej: $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=50$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$

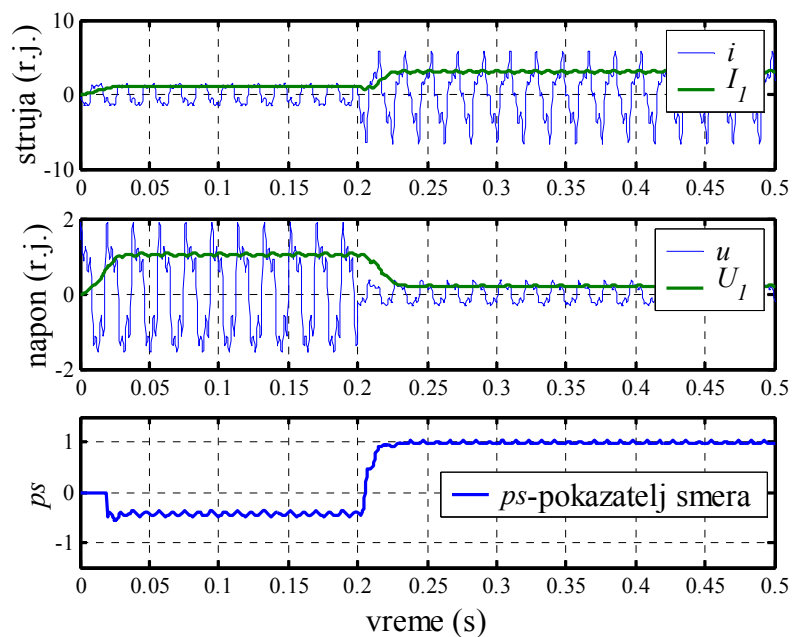
U narednom testu proverava se uticaj odstupanja frekvencije od naznačene vrednosti. Pri tome, sadržaj višeharmonijskih komponenti ostaje isti. Na **Slici 2.10a** prikazani su rezultati dobijeni pri sniženoj frekvenciji (47 Hz), a na **Slici 2.10b** rezultati dobijeni pri povišenoj frekvenciji sistema (53 Hz).



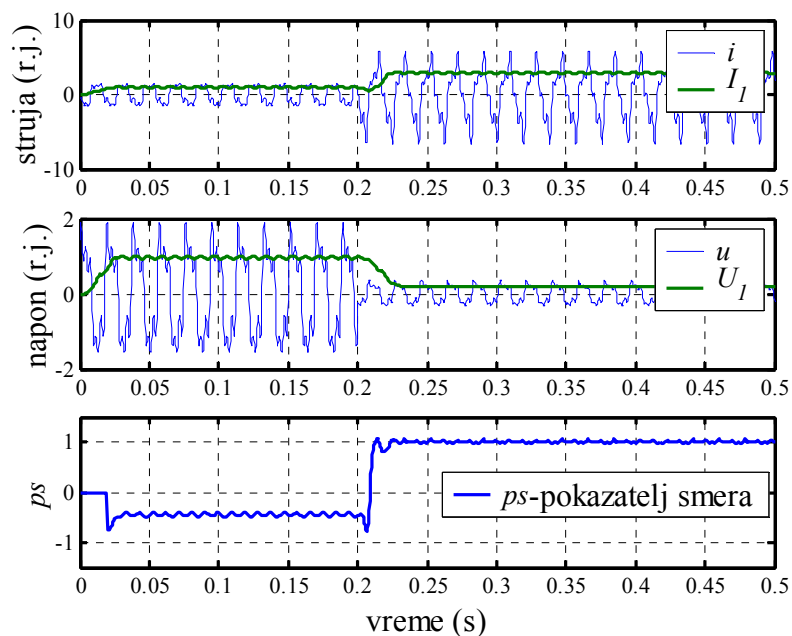
Slika 210a. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=47$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$

Zbog odstupanja frekvencije od naznačene vrednosti postoji talasanje pokazatelja ps . Najmanja amplituda javlja se oko vrednosti koja određuje reagovanje releja (oko 1). Što je ps manje, to je talasanje veće. Ovakva vremenska promena pokazatelja smera ps i dalje omogućava pouzdano utvrđivanje smera kvara bez ikakvog dodatnog "peglanja" promenljive ps . Naravno, manju amplitudu oscilovanja uvek je moguće dobiti usrednjavanjem na osnovnoj periodi ili poluperiodi, ali bi to uvelo dodatno kašnjenje u odzivu algoritma. Vreme reagovanja releja pri sniženoj frekvenciji sistema je 9 ms, a pri povišenoj 6 ms.

Pošto je na odstupanje frekvencije imunija sinusna komponenta Fourierovog reda [18], poslednji test je ponovljen sa digitalnim filtriranjem pomoću sinusne komponente. Rezultati testa prikazani su na **Slici 2.10c** sa koje se uočava isti nedostatak kao i na **Slici 2.9c** (izražene oscilacije u prelaznom režimu). Vreme odziva releja je 9 ms.

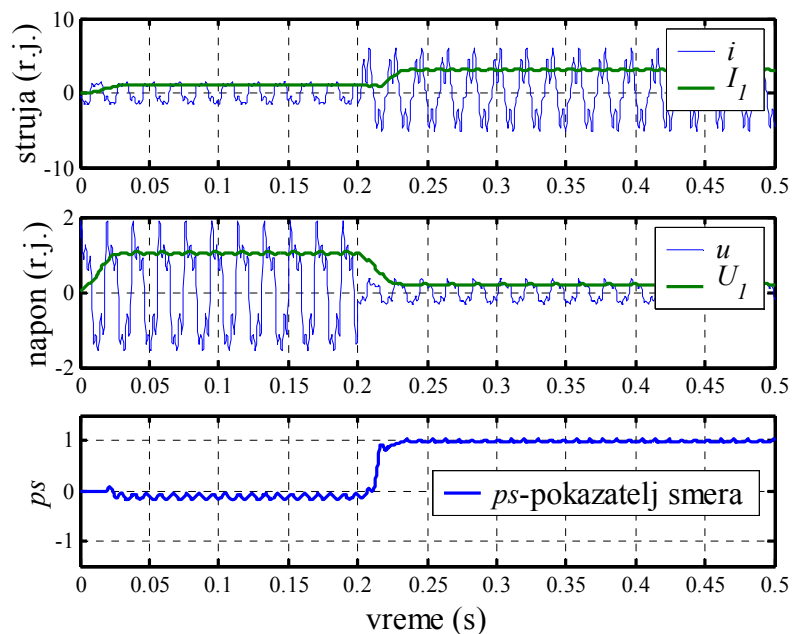


Slika 2.10b. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=53$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$

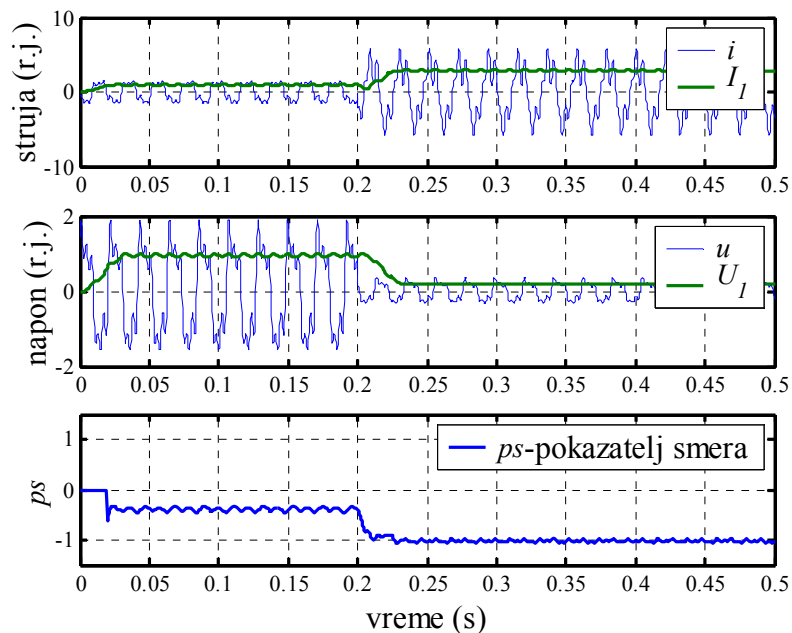


Slika 2.10c. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=60^\circ$, $f=53$ Hz, digitalno filtriranje sinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-10$

U četvrtom testu simulirana je kapacitivna petlja kvara ($\varphi_k=-80^\circ$), pa je podešena osetljivost releja na osnovu (2.18) promenjena na 13 kako bi relej ispravno reagovao. Frekvencija ulaznih signala ostala je 53 Hz. Rezultati testa su prikazani na **Slici 2.11**.



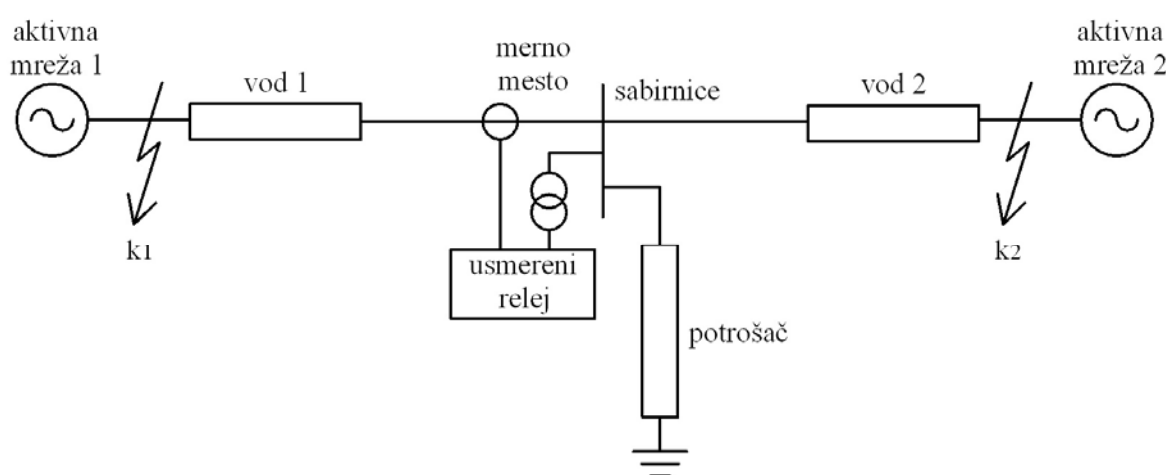
Slika 2.11. Deveti test: $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=-80^\circ$, $f=53$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=13$



Slika 2.12. Deseti test: $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=250^\circ$, $f=47$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-12$

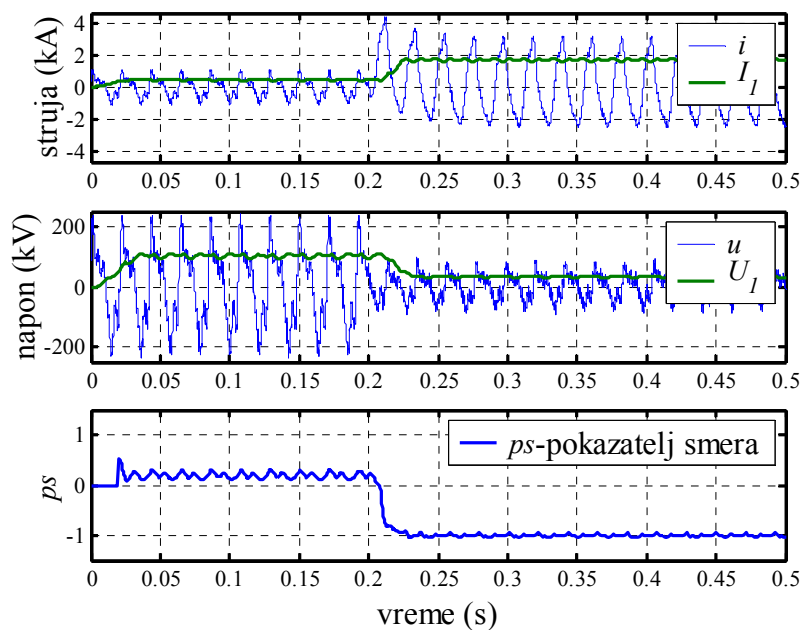
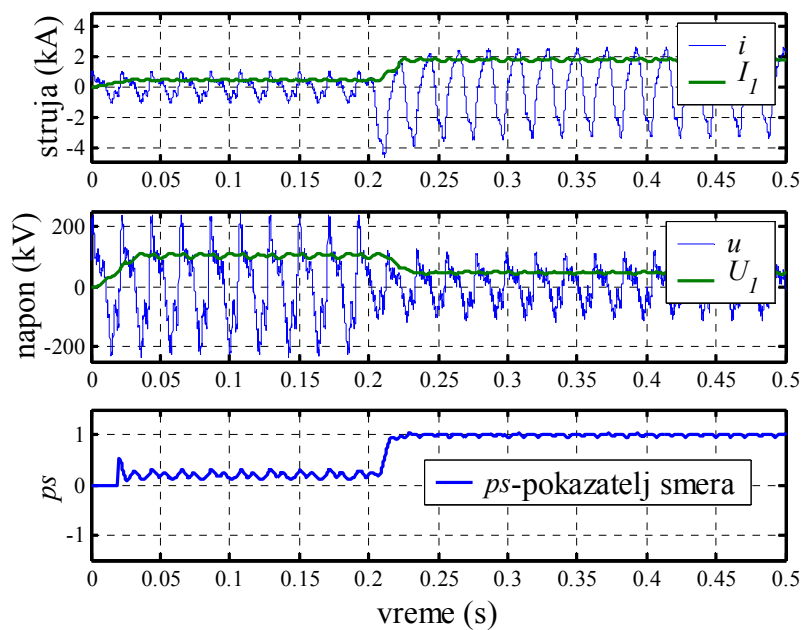
U petom primeru testira se induktivni usmerni relej za kvar "iza" mesta ugradnje releja. Usvojena je induktivna petlja kvara ($\varphi_k=250^\circ$) i frekvencija od 47 Hz. Sada je uslov reagovanja releja $ps<0$, a podešena osetljivost je prilagođena argumentu petlje kvara ($os=-12$). Rezultati testa prikazana su na **Slici 2.12**.

Na kraju, u cilju generisanja što realističnijih ulaznih signala, modelovana je mreža na **Slici 2.13** korišćenjem dodatnog Matlab modula Power System Blockset. Analizirana su dva karakteristična kvara: k_1 – kvar "iza" mesta ugradnje releja i k_2 – kvar "ispred" mesta ugradnje releja.



Slika 2.13. Mreža modelovana pomoću dodatnog Matlab modula Power System Blockset

Obe aktivne mreže generišu, pored osnovnih, i višeharmonijske komponente do reda 5 sledećih karakteristika: $U_1=110$ kV, $\theta_1=25^\circ$, $U_2=0.3U_1$, $\theta_2=90^\circ$, $U_3=0.3U_1$, $\theta_3=0^\circ$, $U_4=0.3U_1$, $\theta_4=45^\circ$, $U_5=0.3U_1$, $\theta_5=60^\circ$. Dalje, na mernom mestu injektira se šum kojim se simuliraju smetnje u elektroenergetskom sistemu. Zbog toga, pre analogno digitalne konverzije signali se propuštaju kroz analogni niskopropusni filter drugog reda. Podešena frekvencija sistema je 47 Hz. Podužni parametri vodova su identični i iznose: $r_v=0.06$ Ω/km i $l_v=1.3$ mH/km. Kvar k_1 nastaje na 50-tom kilometru, a kvar k_2 na 70-tom kilometru gledano od mesta ugradnje releja. Pošto se razmatra induktivna petlja kvara, podešena osetljivost releja je prema (2.18) -14. Talasni oblici napona, struje i indikatora ps za kvarove k_1 i k_2 prikazani su na **Slikama 2.14a** i **2.14b**.

Slika 2.14a. Talasni oblici karakterističnih veličina za kvar k_1 Slika 2.14b. Talasni oblici karakterističnih veličina za kvar k_2

Sa slika se može uočiti da pored izraženih viših harmonika i šuma u ulaznim signalima, u strujnom signalu postoji i opadajuća jednosmerna komponenta. Međutim, čak i u ovakvim uslovima indikator ps nedvosmisleno i pouzdano ukazuje na "smer" kvara. Vreme reagovanja releja u prvom slučaju je 8 ms, a u drugom trenutno.

3. ELIMINISANJE ZONE NEOSETLJIVOSTI USMERENOG RELEJA

Nedostatak usmerenih zaštita predstavlja postojanje zone neosetljivosti, odnosno "mrtve" zone reagovanja. Naime, pri bliskim kratkim spojevima napon na mestu ugradnje releja postaje toliko mali da je praktično neupotrebljiv za ispravan rad releja. Ovaj problem ne postoji kod ultrabrzih releja koji koriste priraštaje električnih veličina. "Mrtva" zona reagovanja može se otkloniti izborom odgovarajuće kombinacije napona i struje koji se dovode releju [29] za sve kvarove osim za trofazni kratak spoj. Eliminisanje ove zone za trofazni kratak spoj može se postići ako se uvede kašnjenja po naponu koji se koristi za utvrđivanje smera [30]. To kašnjenje treba da je dovoljnog trajanja kako bi omogućilo pouzdano i nedvosmisleno utvrđivanje "smera" struje i pri bliskim kratkim spojevima.

Za realizaciju algoritma koristi se digitalni fazni komparator sa modifikovanim dužinama registara. Naponski registar neophodno je produžiti kako bi se uvelo kašnjenje po naponu. Pošto se već vrši produženje onda je zgodno vršiti regulaciju osetljivosti samo preko ovog registra. Na taj način dužina strujnog registra se minimizira i dobija brži odziv releja. Modifikovani registri prikazani su na **Slici 3.1**. Dužine ovih registara utvrđuju se prema (3.1) i (3.2):

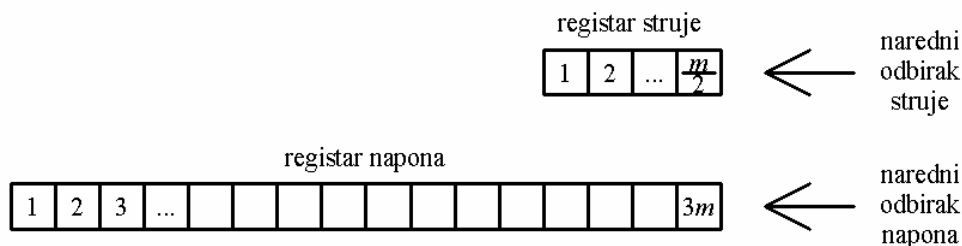
$$b_i = m / 2, \quad (3.1)$$

$$b_u = 3m, \quad (3.2)$$

gde su:

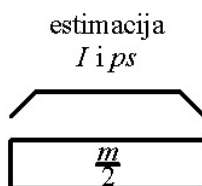
b_i – veličina strujnog registra,

b_u – veličina naponskog registra.



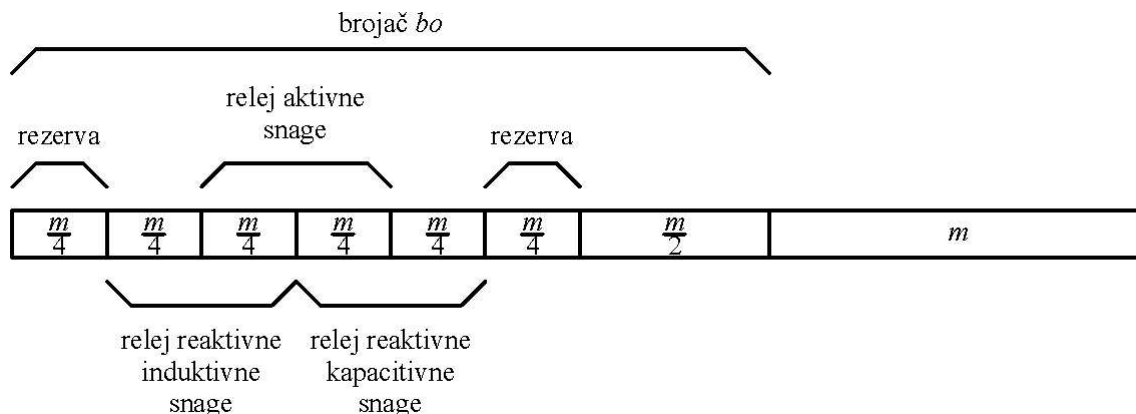
Slika 3.1. Strujni i naponski registar

Registar sa strujnim odbircima služi za estimaciju efektivne vrednosti struje i utvrđivanje smera kvara pomoću pokazatelja ps i prikazan je **Slici 3.2**.



Slika 3.2. Strujni registar

Naponski registar prikazan je na **Slici 3.3**. Odbirci sa indeksima od $m/2+1$ do m služe za utvrđivanje smera kvara preko vrednosti ps kada se dobija usmereni relej aktivne snage. Narednih $m/4$ odbiraka sa leve i desne strane koriste se za podešavanje osetljivosti releja kroz promenljivu os , kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju.



Slika 3.3. Naponski registar

Grupe odbiraka označene kao rezerve (**Slika 3.3**) služe za korekciju podešene osetljivosti, koja se dešava kada frekvencija odstupa od naznačene. $2m$ odbiraka počev od levog kraja registra koristi se za grubu procenu frekvencije naponskog signala metodom prolaska kroz nulu (Zero-crossing). Pošto su delovi strujnog i naponskog registra, predviđeni za proračun pokazatelja smera ps pomereni za $2m$ odbiraka, to je za procenu frekvencije moguće koristiti odbirke iz dve osnovne periode naponskog signala. Ovo je jako zgodno sa stanovišta preciznosti estimirane frekvencije, pošto u slučaju odstupanja stvarne frekvencije signala od pretpostavljene broj izbrojanih obiraka po periodu može biti različit u dve susedne periode. Imajući u vidu predhodno pomenuto, korigovana osetljivost releja računa se prema (3.3):

$$os_k' = os - bo + 2m, \quad (3.3)$$

gde su:

os_k' – korigovana osetljivost releja izražena u broju odbiraka, u slučaju da frekvencija signala odstupa od pretpostavljene,

os – podešena osetljivost releja izražena u broju odbiraka,

bo – broj odbiraka iz dve susedne periode naponskog signala.

Ova korekcija vrši se zbog faznog pomeranja signala od 2 periode. Međutim, ovim nije uzeta u obzir korekcija zbog faznog pomeranja signala podešavanjem osetljivosti os . Dodatna korekcija os_k zbog uvođenja osetljivosti os vrši se na osnovu korigovane osetljivosti os_k' i podešene osetljivosti os :

$$os_k = os_k' + \text{round}\left(\frac{os - os_k'}{2m} os\right). \quad (3.4)$$

Uvođenjem korekcije osetljivosti i promenom dužina naponskog i strujnog registra, izraz (2.15) postaje:

$$ps = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/2+1}^m u(k + os_k) i(k)}{\sum_{k=m/2+1}^m |u(k + os_k)| \sum_{k=1}^{m/2} |i(k)|}. \quad (3.4)$$

Uvođenjem kašnjenja po naponu uspešno se eliminiše zona neosetljivosti usmerenog releja. Pri pojavi napona manjeg od upotrebljivog, relej i dalje na raspolaganju ima dovoljan broj "zdravih" odbiraka za utvrđivanje smera kvara. Trajanje valjanosti pokazatelja ps po nastanku kvara je 30 ms plus dodatno vreme. Pomenuto vreme uključuje i vreme konvergencije promenljive ps koje iznosi 10 ms. Dodatno vreme zavisi od podešene i korigovane osetljivosti releja. Pod pretpostavkom da se za korekciju koriste svi rezervni odbirci, dodatno vreme za relej aktivne snage je 10 ± 5 ms, za relej reaktivne induktivne snage je 15 ± 5 ms i za relej reaktivne kapacitivne snage je 5 ± 5 ms. Predznak + važi kada je stvarna frekvencija signala manja od naznačene, a predznak – kada je stvarna frekvencija signala veća od naznačene. Treba istaći da korekcija osetljivosti sa svih $m/4$ odbiraka odgovara devijaciji frekvencije od 6 Hz, što se u praksi teško može javiti.

Vreme konvergencije predloženog algoritma odgovara dužini strujnog registra, odnosno polovini osnovne periode. Ukoliko se prethodno upotrebi Fourierov filtar, vreme konvergencije se produžava na 30 ms.

3.1. Testiranje algoritma

Verifikacija predloženog algoritama izvršena je nizom testova sa računarski generisanim naponskim i strujnim signalima. Usvojena frekvencija odabiranja A/D konvertora je $f_{od}=3000$ Hz [32]. Dužine naponskog i strujnog registra su $3m$ i $m/2$ odbiraka, respektivno.

U prvom testu na ulaz releja dovode se naponski i strujni signali sledećih karakteristika:

$I_{pk}=1$ r.j. – efektivna vrednost struje pre kvara,

$I_k=3$ r.j. – efektivna vrednost struje kvara,

$U_{pk}=1$ r.j. – efektivna vrednost napona pre kvara,

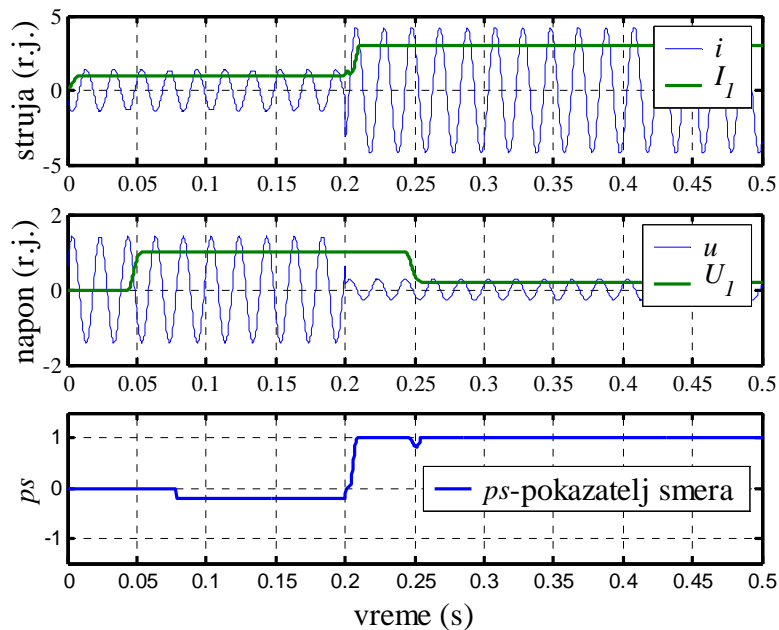
$U_k=0.2$ r.j. – efektivna vrednost napona za vreme kvara,

$\varphi_{pk}=180^\circ$ – fazni pomeraj napona i struje pre kvara,

$\varphi_k=80^\circ$ – fazni pomeraj napona i struje za vreme kvara,

$f=50$ Hz – frekvencija ulaznih signala.

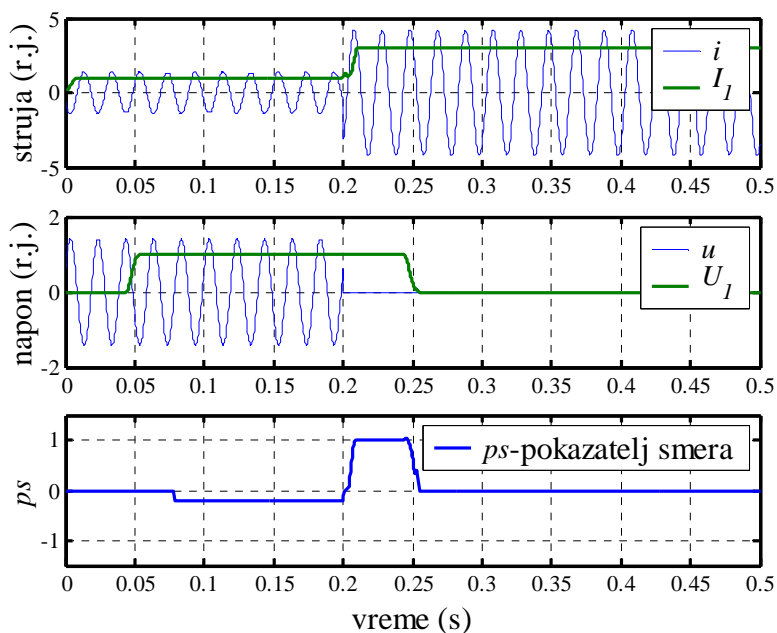
Kvar se dešava posle 0.2 s od početka simulacije, a sama simulacija traje 0.5 s. Relej je podešen tako ima najveću osetljivost pri usvojenom argumentu petlje kvara, tj. $os=-13$. Rezultati testa kojim se simulira udaljen kvara, prikazani su na **Slici 3.4**.



Slika 3.4. $U_k=0.2$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=80^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, bez viših harmonika, podešena osetljivost releja $os=-13$

Vreme konvergencije algoritma je 10 ms. To je ujedno i vreme neophodno za estimaciju efektivne vrednosti struje. Proračun efektivne vrednosti napona vremenski je pomeren za 44 ms obzirom da je učitani usmereni relej pretežno induktivne reaktivne snage. Kako marker ps po nastanku kvara teži 1, relej uspešno detektuje "smer" kvara. Pod pretpostavkom da je uslov reagovanja $ps > 0.2$, relej generiše izlazni signal sa kašnjenjem od 5 ms.

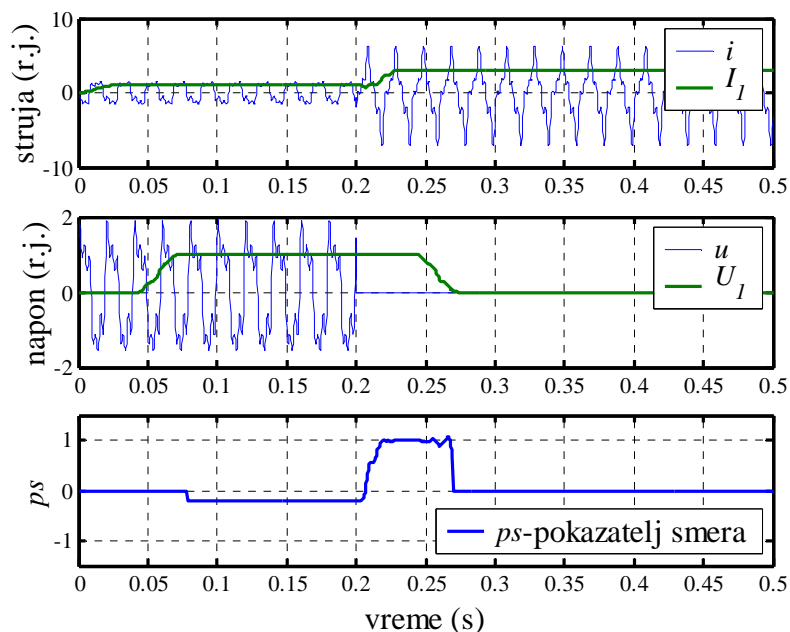
U drugom testu posmatra se nepovoljniji slučaj, kada napon na mestu ugradnje releja padne ispod granice upotrebljivosti, tj. usvaja se $U_k=0$ r.j. Rezultati testa kojim se simulira blizak kratak spoj prikazani su na **Slici 3.5**. Može se uočiti da pokazatelj ps traje dovoljno dugo (oko 48 ms) da se "smer" kvara može pouzdano utvrditi.



Slika 3.5. $U_k=0$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=80^\circ$, $f=50$ Hz, bez filtriranja, bez viših harmonika, podešena osetljivost releja $os=-13$

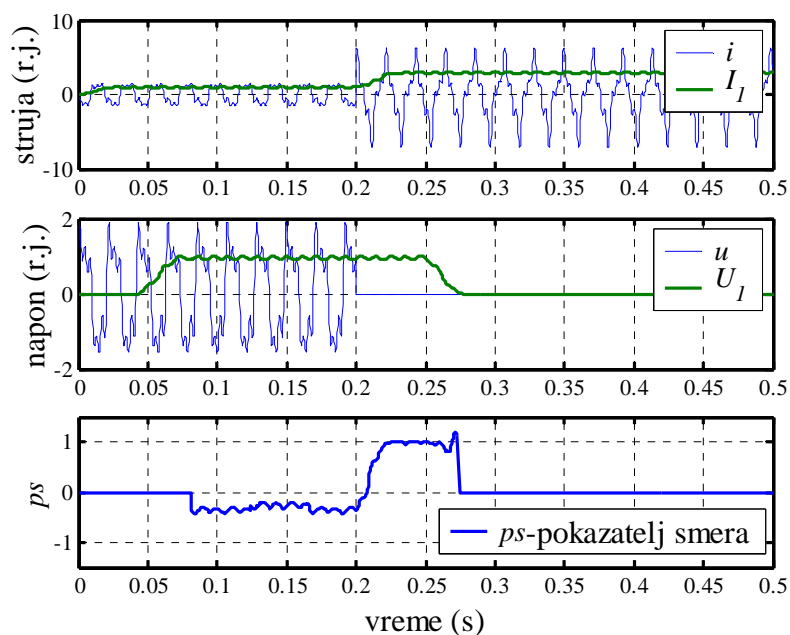
U sledećem testu (**Slika 3.6**) prethodno upotrebljenim signalima dodati su viši harmonici. Kako bi izobličenja bila uočljivija, usvojene su sledeće vrednosti višeharmonijskih komponenti: $U_2=10\%U_1$, $U_3=30\%U_1$, $U_4=10\%U_1$, $U_5=30\%U_1$, $I_2=10\%I_1$, $I_3=30\%I_1$, $I_4=10\%I_1$ i $I_5=30\%I_1$. Početne faze pre i posle kvara izabrane su proizvoljno. Sa **Slike 3.6** može se uočiti da viši harmonici nemaju uticaja na proračun indikatora ps . Ovi rezultati su očekivani, obzirom da je diskretna Fourierova

transformacija primenjena pre proračuna. Zbog primene Fourierovog filtra javlja se dodatno kašnjenje od 20 ms u estimaciji efektivni vrednosti i pokazatelja ps . Međutim, ako se pretpostavi uslov reagovanja usmerenog releja $ps > 0.2$, onda je vreme odziva algoritma manje od 8 ms, a trajanje promenljive ps je oko 61 ms, što je dovoljno za procenu "smera" kvara.

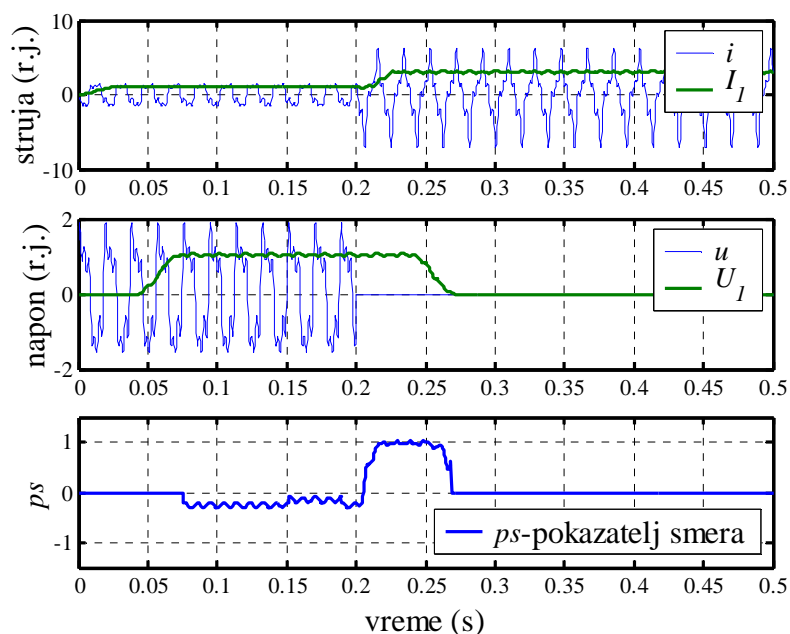


Slika 3.6. $U_k=0$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=80^\circ$, $f=50$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-13$

U naredna dva testa proverava se uticaj odstupanja frekvencije od naznačene vrednosti. Pri tome, sadržaj višeharmonijskih komponenti ostaje isti. Na **Slici 3.7** prikazani su rezultati dobijeni pri sniženoj frekvenciji (47 Hz), a na **Slici 3.8** rezultati dobijeni pri povišenoj frekvenciji sistema (53 Hz). Pošto frekvencija ulaznih signala odstupa od pretpostavljene, algoritam vrši korekciju podešene osetljivosti os metodom prolaska signala kroz nulu. Upotreba ove metode potpuno je validna, pošto se naponski odbirci pre upotrebe filtriraju kosinusnim Fourierovim redom čime se onemogućavaju višestruki prolasci kroz nulu zbog izobličenja naponskog signala. Pri sniženoj frekvenciji uslov reagovanja releja ($ps > 0.2$) je ispunjen za 9 ms i neprekidno traje 64 ms. Pri povišenoj frekvenciji sistema ova vremena su 6 ms i 62 ms, respektivno.

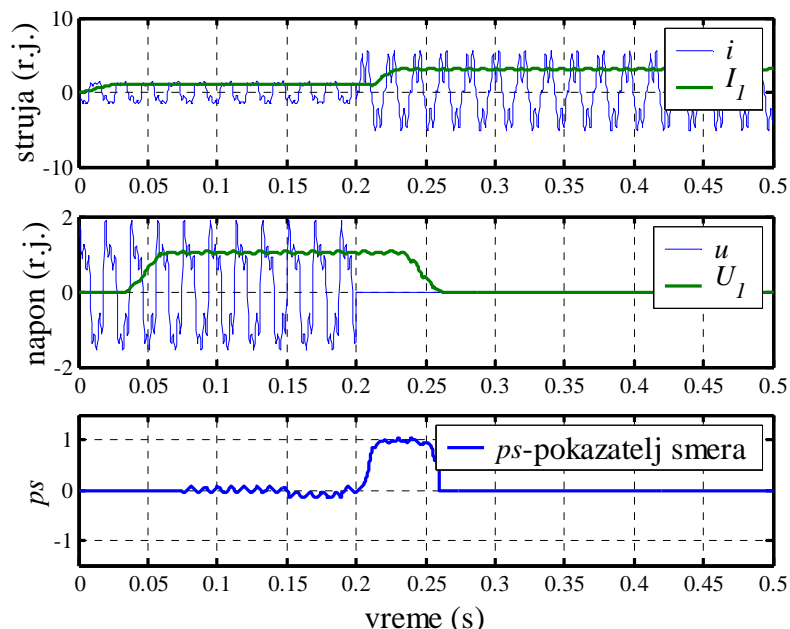


Slika 3.7. $U_k=0$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=80^\circ$, $f=47$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-13$



Slika 3.8. $U_k=0$ r.j., $\varphi_{pk}=180^\circ$, $\varphi_k=80^\circ$, $f=53$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-13$

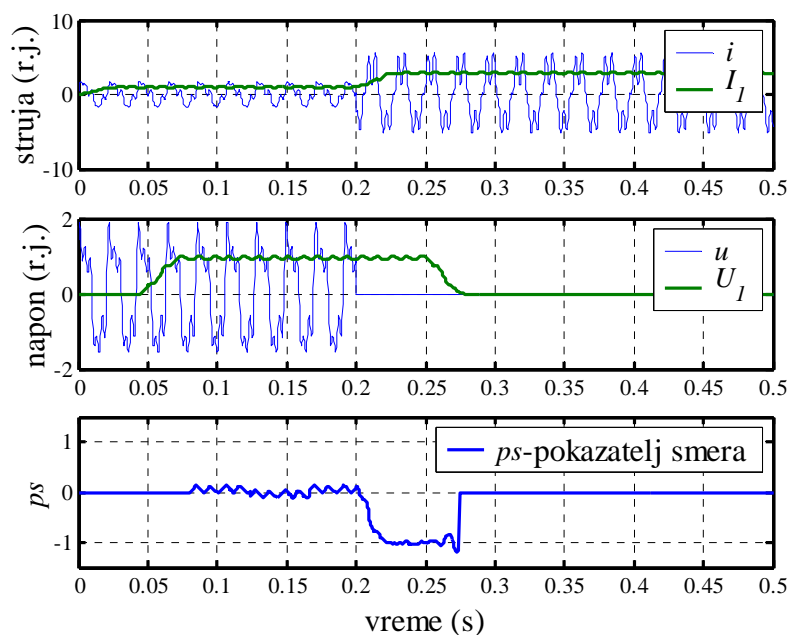
U šestom testu učitan je kapacitivna petlja kvara ($\varphi_k=-90^\circ$), pa je podešena osetljivost releja promenjena na 15 kako bi relej ispravno reagovao. Frekvencija ulaznih signala ostala je 53 Hz. Rezultati testa prikazani su na **Slici 3.9**.



Slika 3.9. $U_k=0$ r.j., $\varphi_{pk}=0^\circ$, $\varphi_k=-90^\circ$, $f=53$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=15$

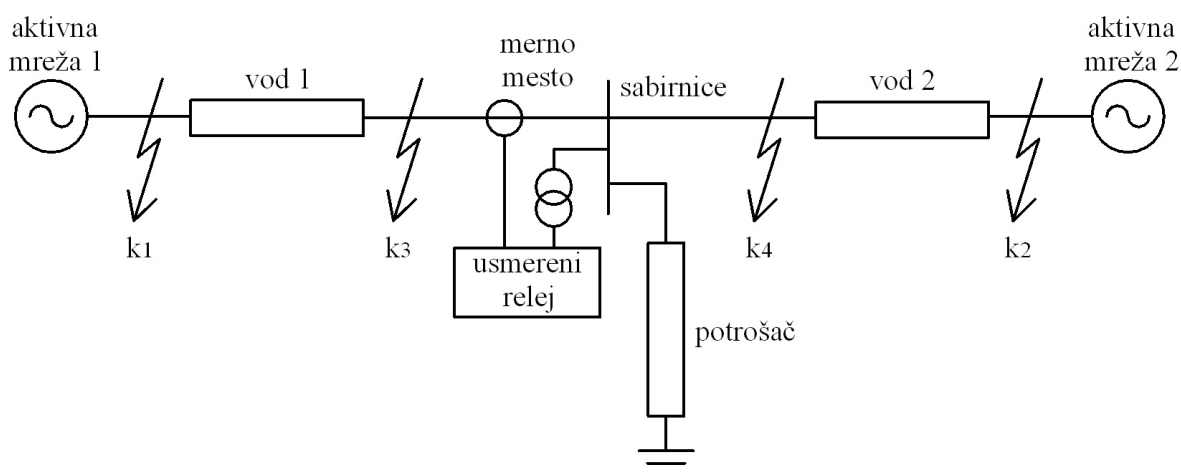
Pošto je učitan usmereni relej kapacitivne reaktivne snage ($os=15$) i postoji korekcija podešene osetljivosti ($f=53$ Hz), indikator ps je tokom kvara validan oko 52 ms što je dovoljno za utvrđivanje "smera" kvara. Vrednost veću od 0.2 indikator ps postiže za 7 ms.

U sedmom primeru testira se induktivni usmereni relej za kvar "iza" mesta ugradnje releja. Usvojena je induktivna petlja kvara ($\varphi_k=270^\circ$) i frekvencija od 47 Hz. Sada je uslov reagovanja releja $ps<-0.2$, a podešena osetljivost je prilagođena argumentu petlje kvara ($os=-15$). Rezultati testa prikazana su na **Slici 3.10**. Pokazatelj ps po nastanku kvara dostiže vrednost manju od -0.2 za 8 ms i validan je oko 66 ms što je dovoljno za utvrđivanje "smera" kvara.



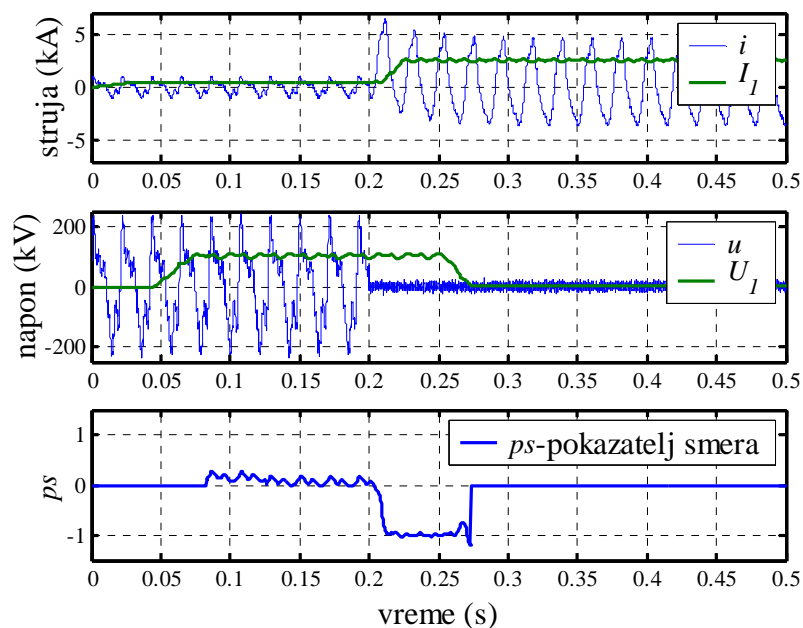
Slika 3.10. $U_k=0$ r.j., $\varphi_{pk}=0^\circ$, $\varphi_k=270^\circ$, $f=47$ Hz, digitalno filtriranje kosinusnom komponentom, sa višim harmonicima, podešena osetljivost releja $os=-15$

Poslednja dva testa obavljena su pomoću istog modela mreže prikazanog na **Slici 2.13**. Međutim, umesto analize udaljenih kratkih spojeva k_1 i k_2 sada se analiziraju bliski kratki spojevi: k_3 – blizak kvar "iza" mesta ugradnje releja i k_4 – blizak kvar "ispred" mesta ugradnje releja (**Slika 3.11**).

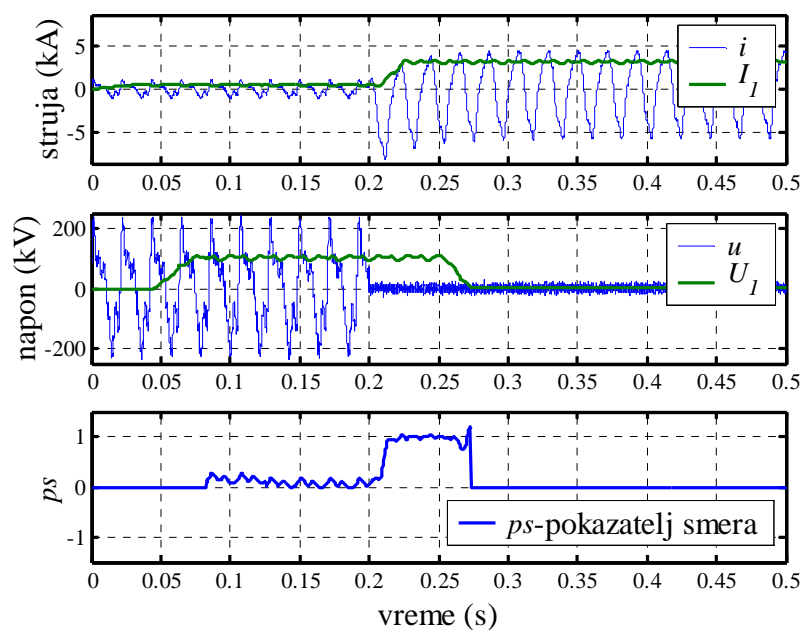


Slika 3.11. Mreža modelovana pomoću dodatnog Matlab modula Power System Blockset

Podsećanja radi, obe aktivne mreže generišu, pored osnovnih, i višeharmonijske komponente, dok se na mernom mestu injektira šum kojim se simuliraju smetnje u elektroenergetskom sistemu. Podešena frekvencija sistema je 47 Hz. Na osnovu podužnih parametra vodova osetljivost releja podešena je na -14. Talasni oblici napona, struje i indikatora ps za kvarove k_3 i k_4 prikazani su na **Slikama 3.12** i **3.13**.



Slika 3.12. Talasni oblici karakterističnih veličina za kvar k_3



Slika 3.13. Talasni oblici karakterističnih veličina za kvar k_4

Pri kvaru k_3 uslov reagovanja ($ps < -0.2$) ispunjen je za 8 ms i neprekidno traje 65 ms. Nakon nastanka kvara k_4 , pokazatelj ps dostiže vrednost veću od 0.2 za 9 ms i validan je oko 65 ms. Dakle, u oba slučaja algoritam nedvosmisleno i pouzdano detektuje "smer" kvara bez obzira na njegovu blizinu.

4. TROFAZNI USMERENI RELEJ

Za realizaciju trofaznog usmerenog releja u uzemljenim mrežama, istom je neophodno dovesti tri fazne struje i dva međufazna napona ili tri fazna napona. Teoretski, za proračun pokazatelja smera ps u jednoj fazi može se upotrebiti jedna fazna struja i bilo koji od tri fazna ili međufazna napona. Međutim, pošto se napon koristi kao referentna veličina, treba napraviti takav izbor da vrsta kvara što manje utiče na upotrebljeni napon. Pošto u trofaznom sistemu postoje različite vrste kvarova najpre će biti razmotren najzastupljeniji, a to je jednofazni kratak spoj. Imajući prethodno u vidu, za proračun pokazatelja ps u fazi A izbor se sužava na faznu struju i_a i neki od napona: u_b , u_c ili u_{bc} . Ako se sada u razmatranje uvedu dvofazni kratki spojevi između faza A i B ili A i C, iz igre ispadaju i fazni naponi u_b i u_c , tako da na kraju kao najbolji izbor ostaje međufazni napon u_{bc} . Izbor međufaznog napona u_{bc} za referentni je opravdan i sa strane njegove dostupnosti, obzirom da je dostupan i kod upotrebe tri jednopolno izolovana i kod upotrebe dva dvopolno izolovana naponska transformatora. Ovakvim izborom referentnog napona, jedini nepokriveni kvar ostaje blizak trofazni kratak spoj. Moguće rešenje problema vezanih za bliske kratke spojeve dato je u prethodnom poglavlju.

Uvažavajući prethodno, pokazatelj smera za fazu A računa se kao:

$$ps_a = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u_{bc}(k) i_a(k - os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u_{bc}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_a(k - os)|}. \quad (4.1)$$

Izraz (4.1) koristi strujnu regulaciju osetljivosti i pokriva induktivne petlje kvara ($\varphi_k > 0$). Induktivne petlje kvara mogu se javiti u uzemljenim mrežama, bilo da su one efikasno (direktno) uzemljene ili neefikasno uzemljene preko niskoomske reaktanse ili otpornosti. Za $os=0$ dobija se usmereni relej čisto induktivne reaktivne snage, a za $os=m/4$ usmereni relej čisto aktivne snage. Pri tome, osetljivost os računa se kao:

$$os = \text{round}\left(\left(90^\circ - \varphi_k\right) \frac{m}{360^\circ}\right). \quad (4.2)$$

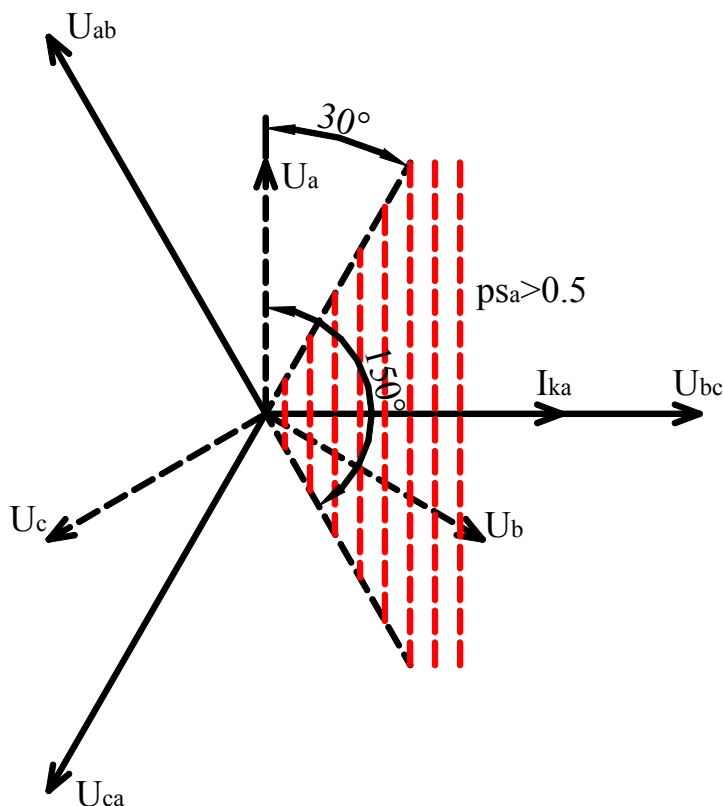
Proračun pokazatelja ps za faze B i C teče na identičan način i dat je izrazima (4.3) i (4.4):

$$ps_b = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u_{ca}(k) i_b(k-os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u_{ca}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_b(k-os)|}, \quad (4.3)$$

$$ps_c = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} u_{ab}(k) i_c(k-os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |u_{ab}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_c(k-os)|}. \quad (4.4)$$

4.1. Jednofazni kratak spoj

Posmatra se jednofazni kratak spoj faze A "ispred" mesta ugradnje releja (analiza je identična za kvarove na fazama B i C). Radi jednostavnosti, podešena osetljivost releja je $os=0$. Neka je uslov reagovanja $ps_a > 0.5$. Ovom uslovu odgovara površina označena crvenom šrafurom na **Slici 4.1**, odnosno fazni pomeraj za vreme kvara $30^\circ < \varphi_k < 150^\circ$ (φ_k je argument petlje kvara). Na **Slici 4.1** struja kvara I_{ka} nacrtana je za $\varphi_k = 90^\circ$ (čisto induktivna petlja kvara).



Slika 4.1. Jednofazni kratak spoj

Prvi granični slučaj dobija se ako je nakon kvara napon faze A ostao nepromenjen (dalek kratak spoj). Uslovom $ps_a > 0.5$ pokrivaju se petlje kvara koje zadovoljavaju nejednakost $30^\circ < \varphi_k < 150^\circ$ (Slika 4.1 – crvena šrafura).

Drugi granični slučaj dobija se ako je nakon kvara napon faze A pao na nulu (blizak kratak spoj). Kako se releju dovodi napon U_{bc} , uslovom $ps_a > 0.5$ pokrivaju se petlje kvara sa istim argumentom kao i pri prvom graničnom slučaju. Za jednofazne kvarove "iza" releja odgovarajući pokazatelji treba da su manji od -0.5.

Primeru radi, u Tabeli 4.1a dati su uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite na jednofazne kratke spojeve. Pored prekostrujne, usmereni element može se kombinovati i sa distantnom zaštitom. Uslovi reagovanja usmerene impedansne distantne zaštite na jednofazne kratke spojeve dati su u Tabeli 4.1b.

Tabela 4.1a. Uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite na jednofazne kratke spojeve

kvar faze	uslov reagovanja prekostrujnog releja	
	"ispred"	"iza"
A	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a > 0.5)$	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a < -0.5)$
B	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b > 0.5)$	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b < -0.5)$
C	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c > 0.5)$	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c < -0.5)$
Napomena: I_a, I_b, I_c – merene fazne struje, I_{pod} – podešena struja prekostrujne zaštite		

Tabela 4.1b. Uslovi reagovanja usmerene impedansne distantne zaštite na jednofazne kratke spojeve

kvar faze	uslov reagovanja distantnog releja	
	"ispred"	"iza"
A	$(Z_a < Z_{pod}) \& (ps_a > 0.5)$	$(Z_a < Z_{pod}) \& (ps_a < -0.5)$
B	$(Z_b < Z_{pod}) \& (ps_b > 0.5)$	$(Z_b < Z_{pod}) \& (ps_b < -0.5)$
C	$(Z_c < Z_{pod}) \& (ps_c > 0.5)$	$(Z_c < Z_{pod}) \& (ps_c < -0.5)$
Napomena: Z_a, Z_b, Z_c – merene impedanse, Z_{pod} – podešena impedansa distantne zaštite		

Ovim uslovima pokrivaju se petlje kvara sa argumentom $\varphi_k \in (30^\circ, 150^\circ)$, što odgovara realnoj situaciji. Pooštavanjem uslova, npr. $ps > \sqrt{3}/2$, smanjuje se pokrivenost na interval od 60° , odnosno $\varphi_k \in (60^\circ, 120^\circ)$. Sa druge strane, ublažavanjem uslova, npr. $ps > 0$, povećava se pokrivenost na interval od 180° , odnosno $\varphi_k \in (0^\circ, 180^\circ)$.

U svakoj od prethodnih situacija, osetljivost algoritma je maksimalna ($ps=1$) kada je struja kvara čisto induktivna ($\varphi_k=90^\circ$). Izborom osetljivosti os različite od 0, interval pokrivenosti može se rotirati u obrnutom smeru kazaljke na časovniku. Tako, za $os=m/12$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=60^\circ$, za $os=m/6$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=30^\circ$, dok se za $os=m/4$ najveća osetljivost postiže pri struji kvara čiji je argument $\varphi_k=0^\circ$ (releji aktivne snage).

4.2. Dvofazni kratak spoj

Posmatra se dvofazni kratak spoj faza A i B "ispred" mesta ugradnje releja (analiza je identična za kvarove na fazama B i C i C i A). Radi jednostavnosti, podešena osetljivost releja je $os=0$. Neka je uslov reagovanja $ps_a > 0.5$ & $ps_b > 0.5$. Na **Slici 4.2** struje kvara I_{ka} i I_{kb} nacrtane su za $\varphi_k=90^\circ$ (čisto induktivna petlja kvara).

Prvi granični slučaj dobija se ako je nakon kvara napon U_{ab} nepromenjen (dalek kratak spoj). Tada važi:

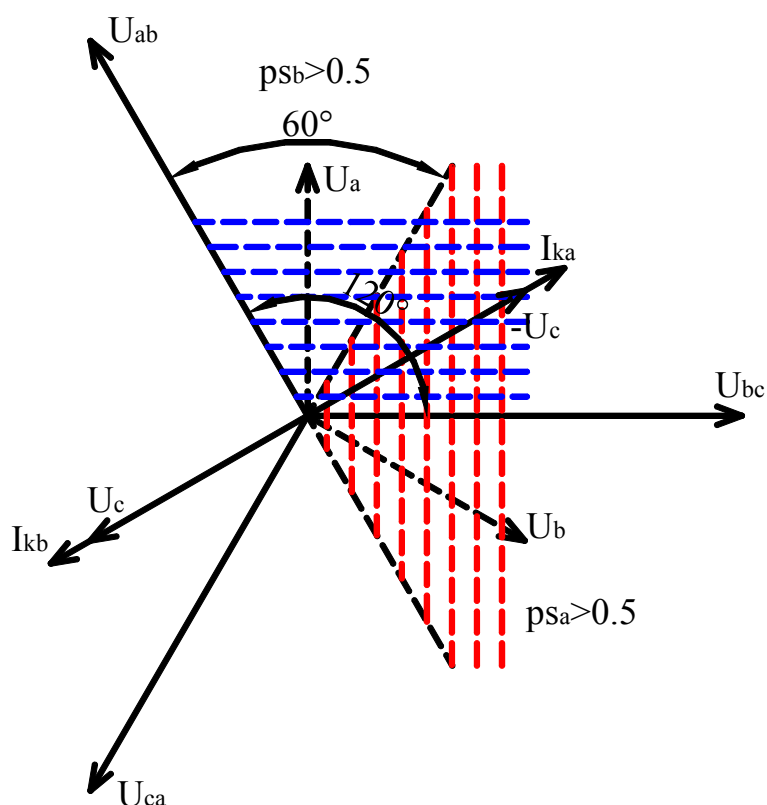
- iz uslova $ps_a > 0.5$ za vreme kvara sledi $60^\circ < \varphi_k < 180^\circ$ (**Slika 4.2** – crvena šrafura),
- iz uslova $ps_b > 0.5$ za vreme kvara sledi $0^\circ < \varphi_k < 120^\circ$, (**Slika 4.2** – plava šrafura).

Drugi granični slučaj dobija se ako nakon kvara napon U_{ab} padne na nulu (blizak kratak spoj). Tada naponi koji se dovde releju U_{bc} i U_{ca} postaju $-U_c$ i U_c (**Slika 4.2**), pa važi:

- iz uslova $ps_a > 0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ < \varphi_k < 150^\circ$,
- iz uslova $ps_b > 0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ < \varphi_k < 150^\circ$.

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti da će svi slučajevi biti pokriveni ako argument petlje kvara zadovoljava nejednakost $60^\circ < \varphi_k < 120^\circ$, što odgovara realnoj situaciji.

Za dvofazne kvarove "iza" releja odgovarajući pokazatelji treba da su manji od 0.5.



Slika 4.2. Dvofazni kratak spoj

Tabela 4.2a. Uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite na dvofazne kratke spojeve

kvar faza	uslov reagovanja prekostrujnog releja	
	"ispred"	"iza"
A i B	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a > 0.5) \& (I_b > I_{pod}) \& (ps_b > 0.5)$	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a < -0.5) \& (I_b > I_{pod}) \& (ps_b < -0.5)$
B i C	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b > 0.5) \& (I_c > I_{pod}) \& (ps_c > 0.5)$	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b < -0.5) \& (I_c > I_{pod}) \& (ps_c < -0.5)$
C i A	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c > 0.5) \& (I_a > I_{pod}) \& (ps_a > 0.5)$	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c < -0.5) \& (I_a > I_{pod}) \& (ps_a < -0.5)$

Napomena: I_a, I_b, I_c – merene fazne struje,
 I_{pod} – podešena struja prekostrujne zaštite

Na osnovu svega pomenutog, u **Tabelama 4.2a i 4.2b** dati su uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite i usmerene imedansne distantne zaštite na dvofazne kratke spojeve.

Ovim uslovima pokrivaju se petlje kvara sa argumentom $\varphi_k \in (60^\circ, 120^\circ)$. Pooštavanjem uslova, npr. $ps > \sqrt{3}/2$, smanjuje se pokrivenost na samo jednu vrednost $\varphi_k = 90^\circ$. Sa druge strane, ublažavanjem uslova, npr. $ps > 0$, povećava se pokrivenost na interval od 120° , odnosno $\varphi_k \in (30^\circ, 150^\circ)$.

U svakoj od prethodnih situacija, osetljivost algoritma je maksimalna ($ps=1$) kada je struja kvara čisto induktivna ($\varphi_k=90^\circ$). Izborom osetljivosti os različite od 0, interval pokrivenosti može se rotirati u obrnutom smeru kazaljke na časovniku. Tako, za $os=m/12$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=60^\circ$, za $os=m/6$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=30^\circ$, dok se za $os=m/4$ najveća osetljivost postiže pri struji kvara čiji je argument $\varphi_k=0^\circ$ (relej aktivne snage).

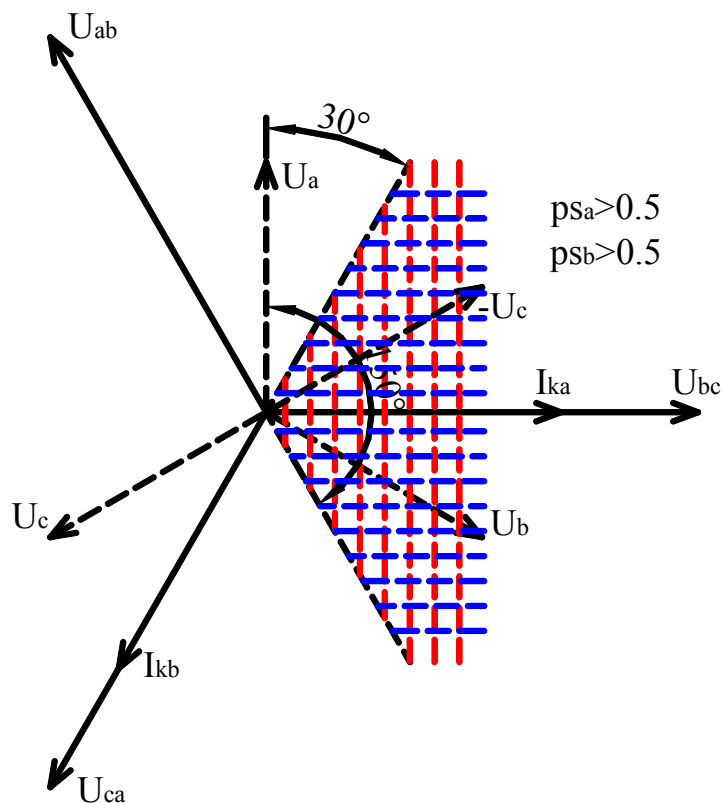
Tabela 4.2b. Uslovi reagovanja usmerene impedansne distantne zaštite na dvofazne kratke spojeve

kvar faza	uslov reagovanja distantnog releja	
	"ispred"	"iza"
A i B	$(Z_{ab} < Z_{pod}) \& (ps_a > 0.5) \& (ps_b > 0.5)$	$(Z_{ab} < Z_{pod}) \& (ps_a < -0.5) \& (ps_b < -0.5)$
B i C	$(Z_{bc} < Z_{pod}) \& (ps_b > 0.5) \& (ps_c > 0.5)$	$(Z_{bc} < Z_{pod}) \& (ps_b < -0.5) \& (ps_c < -0.5)$
C i A	$(Z_{cb} < Z_{pod}) \& (ps_c > 0.5) \& (ps_a > 0.5)$	$(Z_{cb} < Z_{pod}) \& (ps_c < -0.5) \& (ps_a < -0.5)$
Napomena: Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} – merene impedanse, Z_{pod} – podešena impedansa distantne zaštite		

4.3. Dvofazni kratak spoj sa zemljom

Posmatra se dvofazni kratak spoj faza A i B sa zemljom "ispred" mesta ugradnje releja (analiza je identična za kvarove na fazama B i C sa zemljom i C i A sa zemljom).

Radi jednostavnosti, podešena osetljivost releja je $os=0$. Neka je uslov reagovanja $ps_a>0.5$ & $ps_b>0.5$. Na **Slici 4.3** struje kvara I_{ka} i I_{kb} nacrtane su za $\varphi_k=90^\circ$ (čisto induktivna petlja kvara).



Slika 4.3. Dvofazni kratak spoj sa zemljom

Prvi granični slučaj dobija se ako su nakon kvara naponi faza A i B nepromenjeni (dalek kratak spoj). Tada važi:

- iz uslova $ps_a>0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ<\varphi_k<150^\circ$ (**Slika 4.3** – crvena šrafura),
- iz uslova $ps_b>0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ<\varphi_k<150^\circ$ (**Slika 4.3** – plava šrafura).

Drugi granični slučaj dobija se ako nakon kvara naponi faza A i B padnu na nulu (blizak kratak spoj). Tada naponi koji se dovde releju U_{bc} i U_{ca} postaju $-U_c$ i U_c (**Slika 4.3**), pa važi:

- iz uslova $ps_a>0.5$ za vreme kvara sledi $0^\circ<\varphi_k<120^\circ$,
- iz uslova $ps_b>0.5$ za vreme kvara sledi $60^\circ<\varphi_k<180^\circ$.

Svi slučajevi će biti pokriveni ako argument petlje kvara zadovoljava nejednakost $60^\circ<\varphi_k<120^\circ$. Za dvofazne kvarove sa zemljom "iza" releja odgovarajući pokazatelji treba da su manji od -0.5.

Uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite na dvofazne kratke spojeve za zemljom dati su u **Tabeli 4.3a**. Da bi se dvofazni kratak spoj razlikovao od dvofaznog kratkog spoja sa zemljom može se uvesti dodatni uslov $3I_0 > 3I_{pod0}$ jer se releju svakako dovode sve tri fazne struje ($3i_0 = i_a + i_b + i_c$). Uslovi reagovanja usmerene impedansne distantne zaštite na dvofazne kratke spojeve sa zemljom dati su u **Tabeli 4.3b**.

Tabela 4.3a. Uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite na dvofazne kratke spojeve sa zemljom

kvar faza	uslov reagovanja prekostrujnog releja	
	"ispred"	"iza"
A, B i Z	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a > 0.5) \&$ $(I_b > I_{pod}) \& (ps_b > 0.5) \&$ $3I_0 > 3I_{pod0}$	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a < -0.5) \&$ $(I_b > I_{pod}) \& (ps_b < -0.5) \&$ $3I_0 > 3I_{pod0}$
B, C i Z	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b > 0.5) \&$ $(I_c > I_{pod}) \& (ps_c > 0.5) \&$ $3I_0 > 3I_{pod0}$	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b < -0.5) \&$ $(I_c > I_{pod}) \& (ps_c < -0.5) \&$ $3I_0 > 3I_{pod0}$
C, A i Z	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c > 0.5) \&$ $(I_a > I_{pod}) \& (ps_a > 0.5) \&$ $3I_0 > 3I_{pod0}$	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c < -0.5) \&$ $(I_a > I_{pod}) \& (ps_a < -0.5) \&$ $3I_0 > 3I_{pod0}$
Napomena: I_a, I_b, I_c – merene fazne struje, I_{pod} – podešena struja prekostrujne zaštite		

Ovim uslovima pokrivaju se petlje kvara sa argumentom $\varphi_k \in (60^\circ, 120^\circ)$. Pooštavanjem uslova, npr. $ps > \sqrt{3}/2$, smanjuje se pokrivenost na samo jednu vrednost $\varphi_k = 90^\circ$. Sa druge strane, ublažavanjem uslova, npr. $ps > 0$, povećava se pokrivenost na interval od 120° , odnosno $\varphi_k \in (30^\circ, 150^\circ)$.

U svakoj od prethodnih situacija, osetljivost algoritma je maksimalna ($ps=1$) kada je struja kvara čisto induktivna ($\varphi_k=90^\circ$). Izborom osetljivosti os različite od 0, interval pokrivenosti može se rotirati u obrnutom smeru kazaljke na časovniku. Tako, za $os=m/12$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=60^\circ$, za $os=m/6$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=30^\circ$, dok se za

$os=m/4$ najveća osetljivost postiže pri struji kvara čiji je argument $\varphi_k=0^\circ$ (relej aktivne snage).

Tabela 4.3b. Uslovi reagovanja usmerene impedansne zaštite na dvofazne kratke spojeve sa zemljom

kvar faza	uslov reagovanja distantnog releja	
	"ispred"	"iza"
A, B i Z	$(Z_{ab}<Z_{pod})\&(ps_a>0.5)\&(ps_b>0.5)\&3I_0>3I_{pod0}$	$(Z_{ab}<Z_{pod})\&(ps_a<-0.5)\&(ps_b<-0.5)\&3I_0>3I_{pod0}$
B, C i Z	$(Z_{bc}<Z_{pod})\&(ps_b>0.5)\&(ps_c>0.5)\&3I_0>3I_{pod0}$	$(Z_{bc}<Z_{pod})\&(ps_b<-0.5)\&(ps_c<-0.5)\&3I_0>3I_{pod0}$
C, A i Z	$(Z_{cb}<Z_{pod})\&(ps_c>0.5)\&(ps_a>0.5)\&3I_0>3I_{pod0}$	$(Z_{cb}<Z_{pod})\&(ps_c<-0.5)\&(ps_a<-0.5)\&3I_0>3I_{pod0}$
Napomena: Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} – merene impedanse, Z_{pod} – podešena impedansa distantne zaštite		

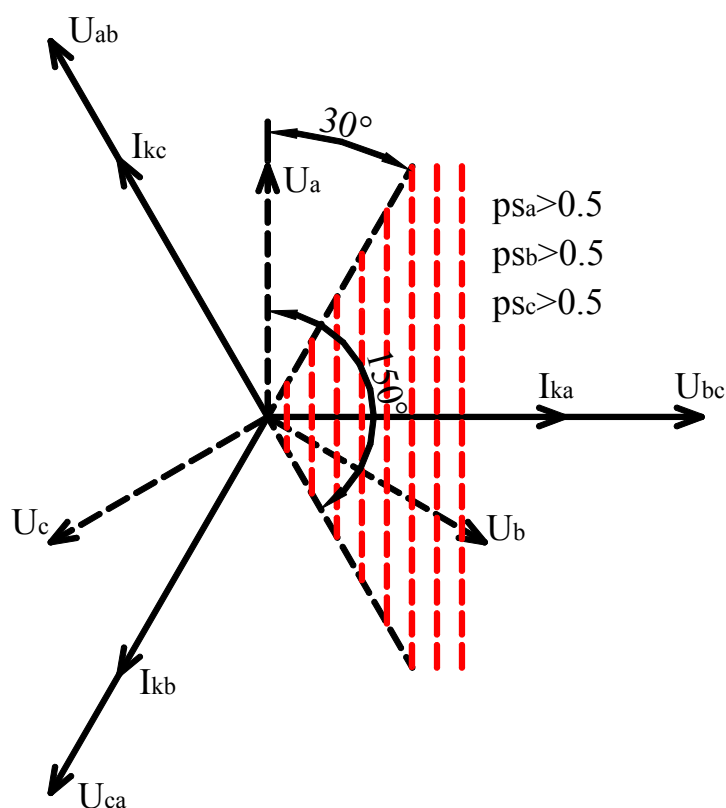
4.4. Trofazni kratak spoj

Posmatra se trofazni kratak spoj "ispred" mesta ugradnje releja. Radi jednostavnosti, podešena osetljivost releja je $os=0$. Neka je uslov reagovanja $ps_a>0.5\&ps_b>0.5\&ps_c>0.5$. Na **Slici 4.4** struje kvara I_{ka}, I_{kb} i I_{kc} nacrtane su za $\varphi_k=90^\circ$ (čisto induktivna petlja kvara).

Prvi granični slučaj dobija se ako su nakon kvara naponi faza A, B i C nepromenjeni (dalek kratak spoj). Tada važi:

- iz uslova $ps_a>0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ<\varphi_k<150^\circ$ (**Slika 4.4** – crvena šrafura),
- iz uslova $ps_b>0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ<\varphi_k<150^\circ$ (**Slika 4.4** – crvena šrafura),
- iz uslova $ps_c>0.5$ za vreme kvara sledi $30^\circ<\varphi_k<150^\circ$ (**Slika 4.4** – crvena šrafura).

Drugi granični slučaj dobija se ako nakon kvara naponi faza A, B i C padnu na nulu (blizak kratak spoj). U takvoj situaciji nije moguće odrediti smer kvara jer ne postoji informacija o naponu. Jedan od načina za prevazilaženje ovog problema jeste uvođenje kašnjenja po naponu što je detaljno opisano u prethodnom poglavlju.



Slika 4.4. Trofazni kratak spoj

Uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite i usmerene imedansne distantne zaštite na trofazne kratke spojeve dati su u **Tabeli 4.4a** i **Tabeli 4.4b**.

Tabela 4.4a. Uslovi reagovanja usmerene prekostrujne zaštite na trofazne kratke spojeve

kvar faza	uslov reagovanja prekostrujnog releja	
	"ispred"	"iza"
A, B i C	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a > 0.5)$	$(I_a > I_{pod}) \& (ps_a < -0.5)$
	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b > 0.5)$	$(I_b > I_{pod}) \& (ps_b < -0.5)$
	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c > 0.5)$	$(I_c > I_{pod}) \& (ps_c < -0.5)$
Napomena: I_a, I_b, I_c – merene fazne struje, I_{pod} – podešena struja prekostrujne zaštite		

Tabela 4.4b. Uslovi reagovanja usmerene impedansne distantne zaštite na trofazne kratke spojeve

kvar faza	uslov reagovanja distantnog releja	
	"ispred"	"iza"
A, B i C	$(Z_{ab} < Z_{pod}) \& (ps_a > 0.5)$	$(Z_{ab} < Z_{pod}) \& (ps_a < -0.5)$
	$(Z_{bc} < Z_{pod}) \& (ps_b > 0.5)$	$(Z_{bc} < Z_{pod}) \& (ps_b < -0.5)$
	$(Z_{cb} < Z_{pod}) \& (ps_c > 0.5)$	$(Z_{cb} < Z_{pod}) \& (ps_c < -0.5)$
Napomena: Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} – merene impedanse, Z_{pod} – podešena impedansa distantne zaštite		

Ovim uslovima pokrivaju se petlje kvara sa argumentom $\varphi_k \in (30^\circ, 150^\circ)$ i udaljeni kratki spojevi. Poošttravanjem uslova, npr. $ps > \sqrt{3}/2$, smanjuje se pokrivenost na interval od 60° , odnosno $\varphi_k \in (60^\circ, 120^\circ)$. Sa druge strane, ublažavanjem uslova, npr. $ps > 0$, povećava se pokrivenost na interval od 180° , odnosno $\varphi_k \in (0^\circ, 180^\circ)$.

U svakoj od prethodnih situacija, osetljivost algoritma je maksimalna ($ps=1$) kada je struja kvara čisto induktivna ($\varphi_k=90^\circ$). Izbrom osetljivosti os različite od 0, interval pokrivenosti može se rotirati u obrnutom smeru kazaljke na časovniku. Tako, za $os=m/12$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=60^\circ$, za $os=m/6$ najveća osetljivost postiže se za struje kvara čiji je argument $\varphi_k=30^\circ$, dok se za $os=m/4$ najveća osetljivost postiže pri struji kvara čiji je argument $\varphi_k=0^\circ$ (relej aktivne snage).

4.5. Rekapitulacija

Na osnovu prethodne analize mogu se formirati opšti uslovi reagovanja usmerenog releja, bez obzira na vrstu kvara (**Tabela 4.5**). Ovi uslovi kombinuju se sa uslovima reagovanja osnovne zaštite (prekostrujna, distantna, diferencijalna, itd.) logičkim I kolima u cilju postizanja veće selektivnosti osnovne zaštite.

Uslovima iz **Tabele 4.5** pokrivaju se petlje kvara sa argumentom $\varphi_k \in (60^\circ, 120^\circ)$. Jedini nepokriveni kvar je blizak trofazni kratak spoj. Po potrebi, opseg argumenata može se zarotirati u smeru kazaljke na časovniku uvođenjem osetljivosti os , tako da npr. φ_k pripada opsegu od 30° do 90° . Uvođenje

osetljivosti os sa sobom povlači i povećanje dužine odgovarajućih registara za smeštaj odbiraka (bez podešavanja osetljivosti dužina im je $m/2$). Rotacija opsega bez povećanja dužine registara može se postići izborom drugačije sprege (npr. sprege "30°").

Tabela 4.5. Opšti uslovi reagovanja trofazne usmerene prekostrujne zaštite

kvar faze	uslov reagovanja usmerenog releja	
	"ispred"	"iza"
A	$ps_a > 0.5$	$ps_a < -0.5$
B	$ps_b > 0.5$	$ps_b < -0.5$
C	$ps_c > 0.5$	$ps_c < -0.5$
Z	$3I_0 > 3I_{pod0}$	$3I_0 > 3I_{pod0}$
Napomena: poslednji uslov nije neophodan za reagovanje releja, služi samo da bi se napravila razlika između 2pks i 2pksz		

Opseg argumenata petlje kvara može se proširiti ublažavanjem uslova za ps sa 0.5 na npr. 0. Tada za argument petlje kvara važi $\varphi_k \in (30^\circ, 150^\circ)$.

4.6. Testiranje algoritma

U cilju utvrđivanja performansi predloženog algoritma sproveden je niz testova sa računarski generisanim naponskim i strujnim signalima. Simulacije su izvršene pomoću dodatnog Matlab modula Simulink [21]. Jednopolna šema kola za analizu prikazana je na **Slici 4.5**.

Ovom šemom modelovana je 110 kV mreža sa sledećim usvojenim parametrima:

vod 1: Al/Č 240/40, $r_{v20^\circ C} = 0.1188 \Omega/\text{km}$, $r_{0v} = 0.2688 \Omega/\text{km}$, $l_v = 1.257 \text{ mH}/\text{km}$, $l_{0v} = 3l_v$, $c_v = 10 \text{ nF}/\text{km}$, $c_{0v} = 5 \text{ nF}/\text{km}$, dužina voda $d_{v1} = 30 \text{ km}$;

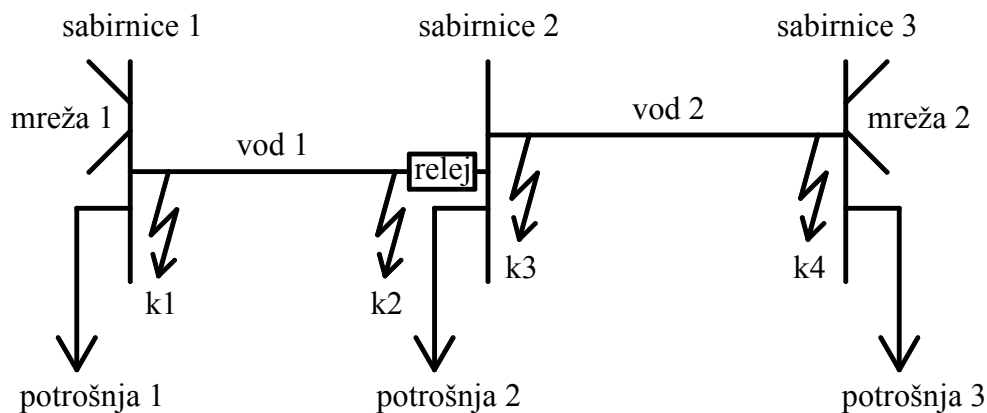
vod 2: $r_{v20^\circ C} = 0.1188 \Omega/\text{km}$, $r_{0v} = 0.2688 \Omega/\text{km}$, $l_v = 1.257 \text{ mH}/\text{km}$, $l_{0v} = 3l_v$, $c_v = 10 \text{ nF}/\text{km}$, $c_{0v} = 5 \text{ nF}/\text{km}$, dužina voda $d_{v2} = 60 \text{ km}$;

potrošnja 1: $S_{p1} = 40 \text{ MVA}$, $\cos\varphi = 0.98$;

potrošnja 2: $S_{p2} = 80 \text{ MVA}$, $\cos\varphi = 1$;

potrošnja 3: $S_{p3}=30$ MVA, $\cos\varphi=0.97$;

mreže 1 i 2: $U_n=110$ kV, $S_{3pks}''=475.75$ MVA.



Slika 4.5. Jednopolna šema kola za analizu

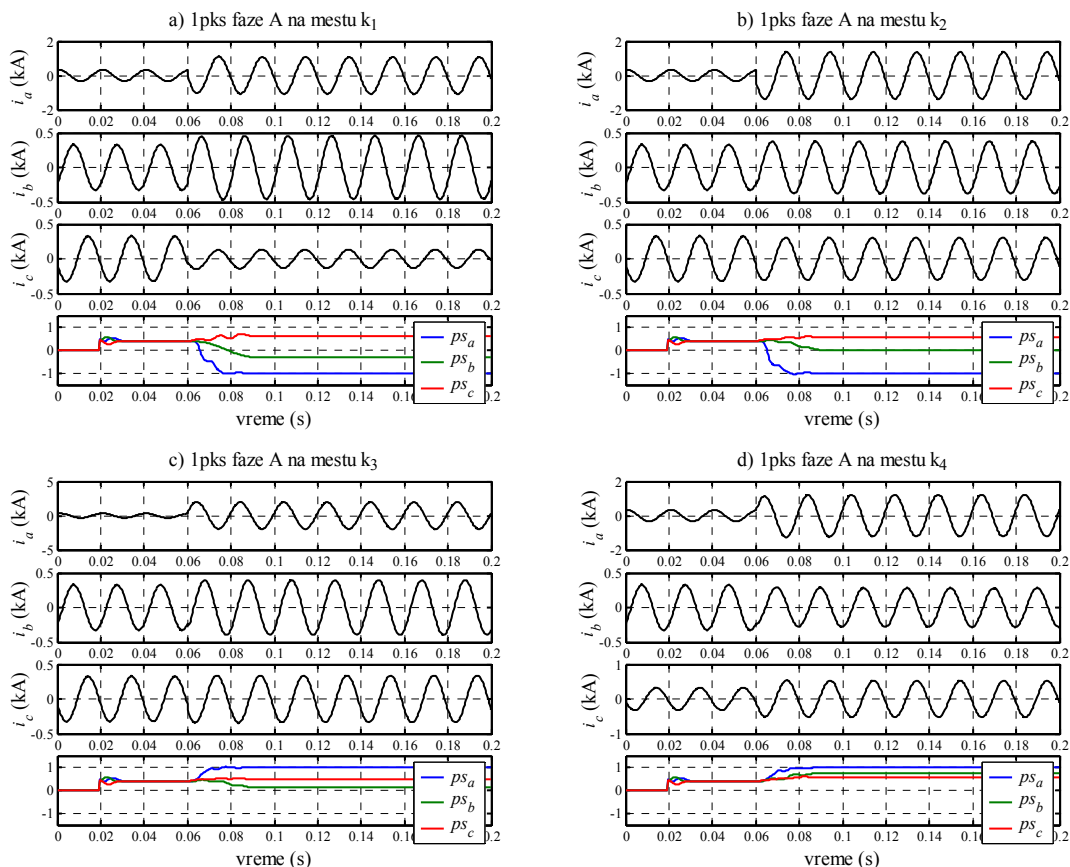
Karakteristična mesta sa kvarom na **Slici 4.5** označena su sa k_1 , k_2 , k_3 i k_4 . Kvarom na mestu k_1 simulira se udaljen kratak spoj "iza" mesta ugradnje releja, kvarom na mestu k_2 simulira se blizak kratak spoj "iza" mesta ugradnje releja, kvarom na mestu k_3 simulira se blizak kratak spoj "ispred" mesta ugradnje releja, kvarom na mestu k_4 simulira se udaljen kratak spoj "ispred" mesta ugradnje releja.

Trajanje simulacije podešeno je na 0.2 s, pri čemu se kvar dešava 0.06 s od početka simulacije. Usvojena frekvencija odabiranja A/D konvertora je $f_{od}=3$ kHz, dok je podešena osetljivost releja 4. Otpornost rasprostiranja uzemljivača je $R_{uz}=2.5 \Omega$.

4.6.1. Jednofazni kratak spoj

Pomoću opisanog modela simuliran je jednofazni kratak spoj (1pks) faze A na mestima k_1 , k_2 , k_3 i k_4 . Talasni oblici faznih struja i_a , i_b i i_c kao i vrednosti pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c prikazani su na **Slici 4.6**.

Neka je uslov reagovanja usmerenog releja za kvarove "iza" mesta ugradnje je $ps_a < -0.5$, odnosno za kvarove "ispred" mesta ugradnje releja $ps_a > 0.5$. Na osnovu **Slike 4.6** zaključuje se da usmereni refej nezavisno od mesta kvara uspešno detektuje "smer" struje faze A za vreme kvara: za kvarove k_1 i k_2 ps_a je približno -1 (**Slike 4.6a** i **4.6b**), a za kvarove k_3 i k_4 ps_a je približno 1 (**Slike 4.6c** i **4.6d**).



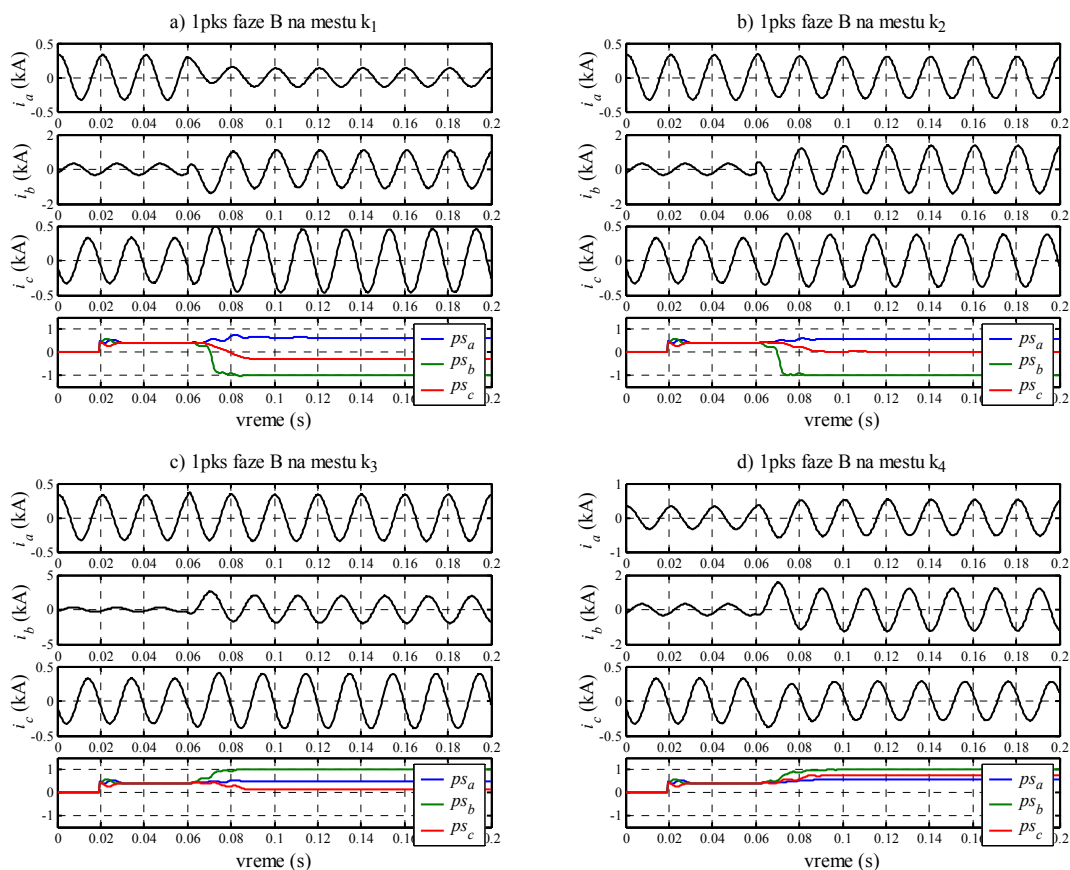
Slika 4.6. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za jednofazni kratak spoj faze A: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

Vreme odziva, odnosno vreme ispunjenja uslova $|ps_a| > 0.5$ zavisi od režima koji je prethodio kvaru. Pošto kod kvarova k_1 i k_2 struja faze A menja smer vreme ispunjenja uslova je nešto duže i iznosi oko 12 ms i 7 ms, respektivno, dok je za kvarove k_3 i k_4 kraće i iznosi svega 5 ms, odnosno 6 ms. Treba istaći da su ova vremena dobijena primenom algoritma koji uključuje Fourierov filtar. Teoretski, vreme konvergencije može biti i 0 s, ukoliko je režim pre kvara po argumetu sličan petlji kvara.

Sa **Slike 4.6d** uočava se da uslov reagovanja usmerenog releja može biti ispunjen i za neku od zdravih faza ($ps_b > 0.5$, $ps_c > 0.5$) zbog magnetne sprege faznih provodnika. U ekstremnim situacijama struja zdrave faze može promeniti i smer. Međutim, usmereni relej sam po sebi nista ne znači bez osnovne zaštitne funkcije kao

što je prekostrujna ili distantna zaštita. Primera radi, da bi reagovala usmerena prekostrujna zaštita treba da reaguju i usmereni i prekostrujni član.

Iste veličine za jednofazni kratak spoj faza B i C na mestu k_1 , k_2 , k_3 i k_4 prikazane su na **Slikama 4.7 i 4.8**.

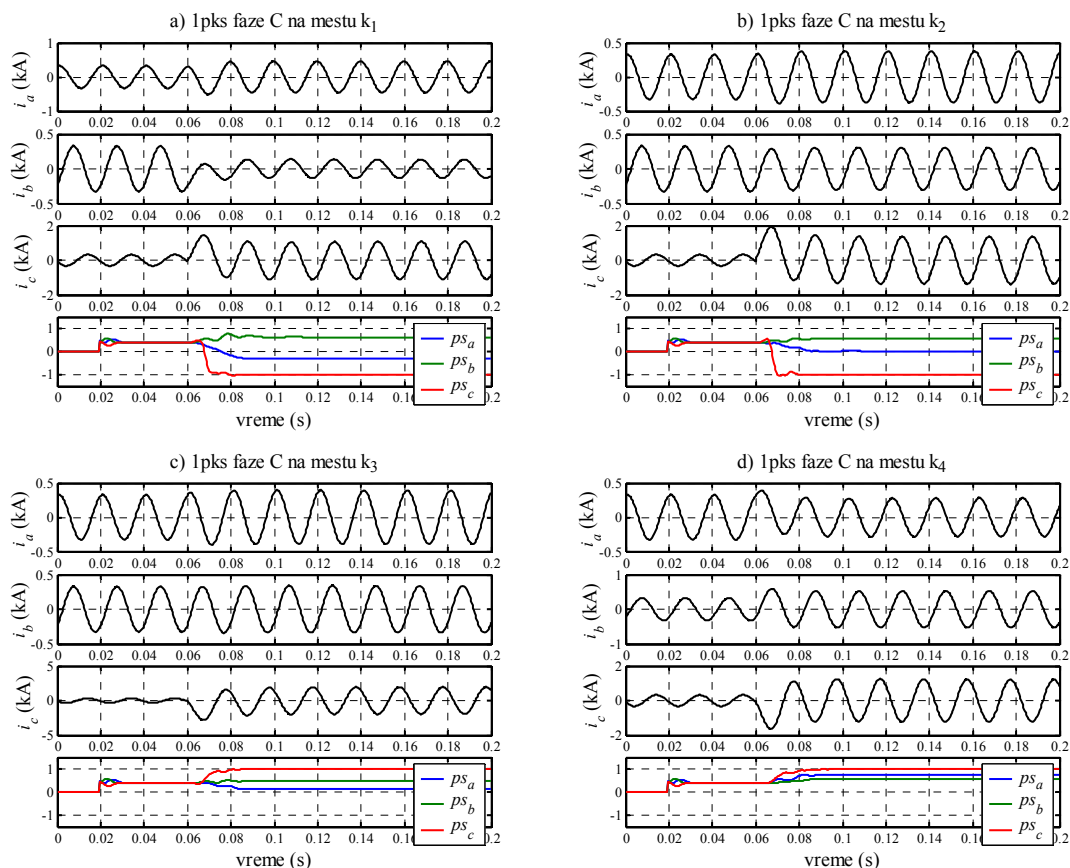


Slika 4.7. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za jednofazni kratak spoj faze B: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

Slika 4.7 pokazuje da algoritam uspešno detektuje "smer" struje jednofaznog kratkog spoja faze B: za kvarove na mestima k_1 i k_2 ps_b je približno -1 (**Slike 4.7a** i **4.7b**), a za kvarove k_3 i k_4 ps_b je približno 1 (**Slike 4.7c** i **4.7d**). Vreme odziva pokazatelja ps_b za kvarove k_1 , k_2 , k_3 i k_4 iznosi 12 ms, 12 ms, 5 ms, i 7 ms, respektivno.

Slika 4.8 pokazuje da algoritam uspešno detektuje "smer" struje jednofaznog kratkog spoja faze C: za kvarove na mestima k_1 i k_2 ps_c je približno -1 (**Slike 4.8a** i

4.8b), a za kvarove k_3 i k_4 ps_c je približno 1 (Slike 4.8c i 4.8d). Vreme odziva pokazatelja ps_c za kvarove k_1 , k_2 , k_3 i k_4 iznosi 9 ms, 9 ms, 5 ms i 8 ms, respektivno.



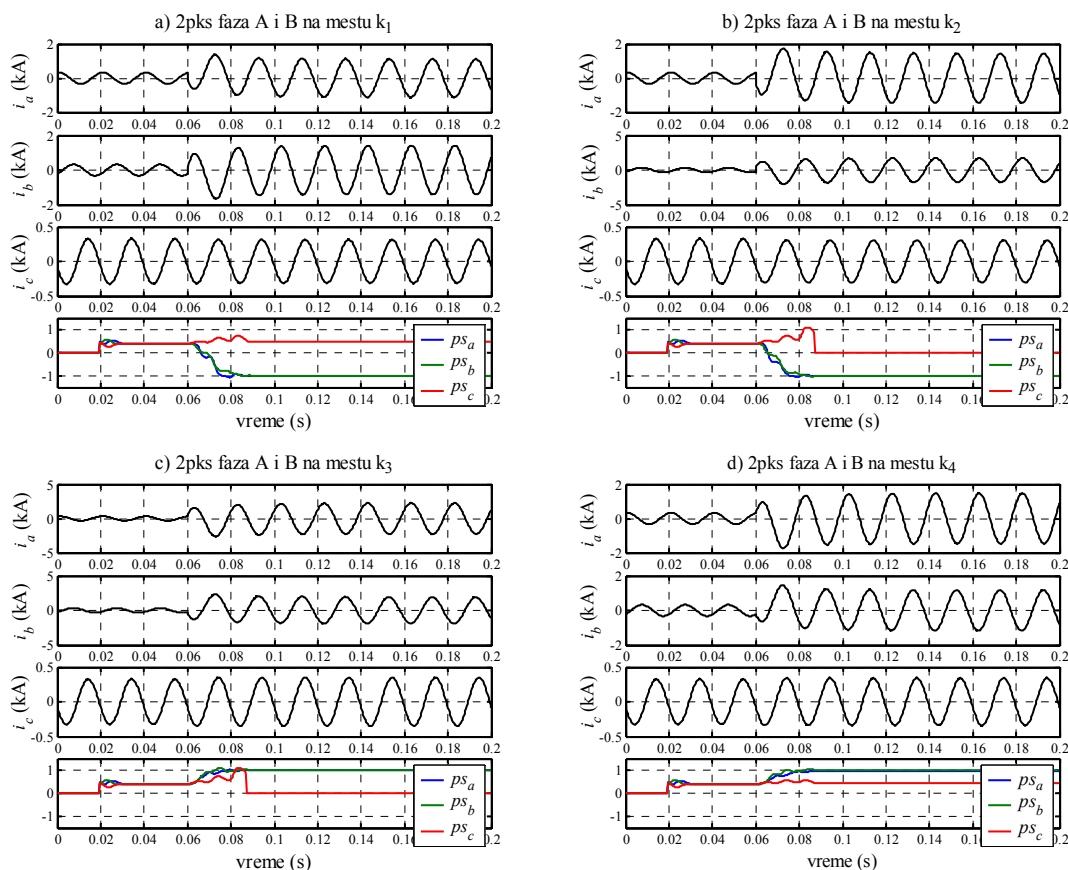
Slika 4.8. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za jednofazni kratak spoj faze C: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

4.6.2. Dvofazni kratak spoj

Istim modelom simuliran je i dvofazni kratak spoj (2pks) faza A i B "iza" releja (pozicije k_1 i k_2), odnosno "ispred" releja (pozicije k_3 i k_4). Talasni oblici faznih struja i_a , i_b i i_c kao i vrednosti pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c prikazani su na **Slici 4.9**.

Na osnovu **Slike 4.9** zaključuje se da usmereni relej nezavisno od mesta kvara uspešno detektuje "smer" struje kvara obzirom da važi: za kvarove k_1 i k_2 ps_a i ps_b su približno -1 (**Slike 4.9a** i **4.9b**), a za kvarove k_3 i k_4 ps_a i ps_b su približno 1 (**Slike 4.9c** i **4.9d**).

Vreme generisanja izlaznog signala odgovara dužem vremenu konvergencije jednog od pokazatelja ps_a i ps_b . Za kvarove k_1 , k_2 , k_3 i k_4 vreme odziva iznosi 13 ms, 12 ms, 5 ms i 5 ms, respektivno.



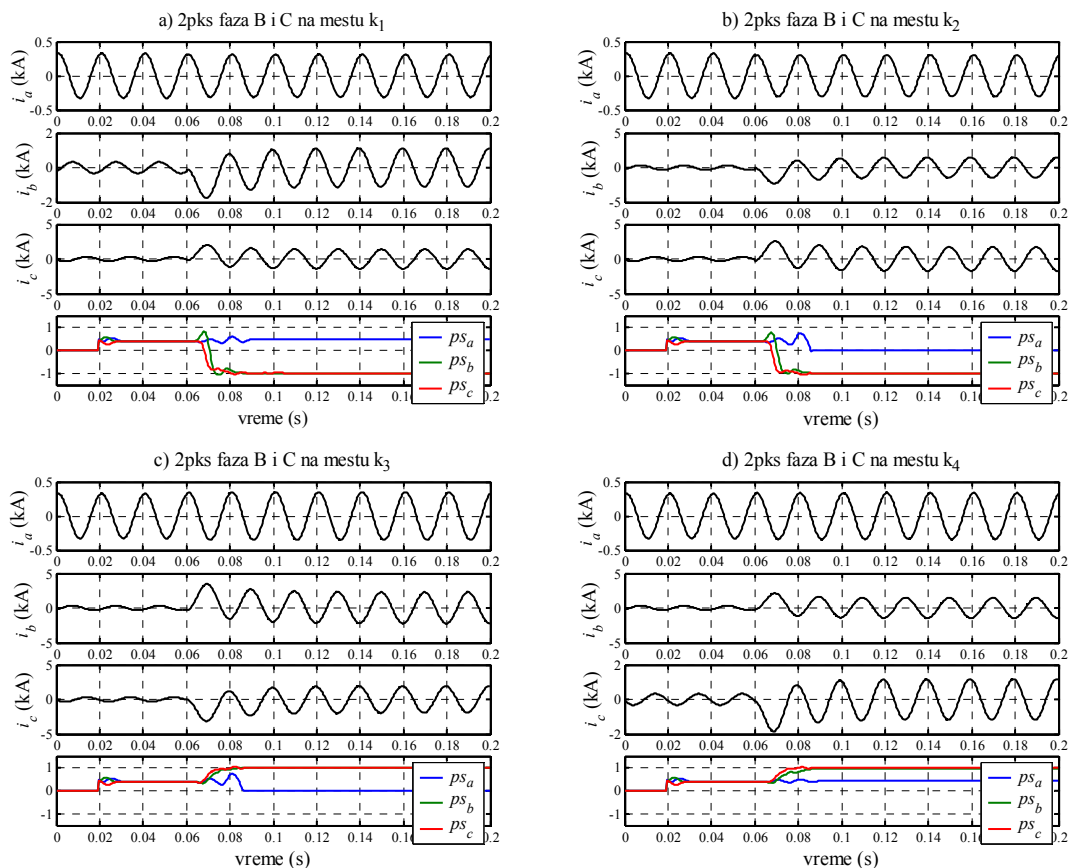
Slika 4.9. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj faza A i B: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

Pri bliskim kratkim spojevima (**Slike 4.9b** i **4.9c**) pokazatelj smeru za fazu C se ne može sračunati obzirom da koristi međufazni napon U_{ab} koji je 0. Međutim, ovo postaje irelevantno budući da faza C nije pogođena kvarom.

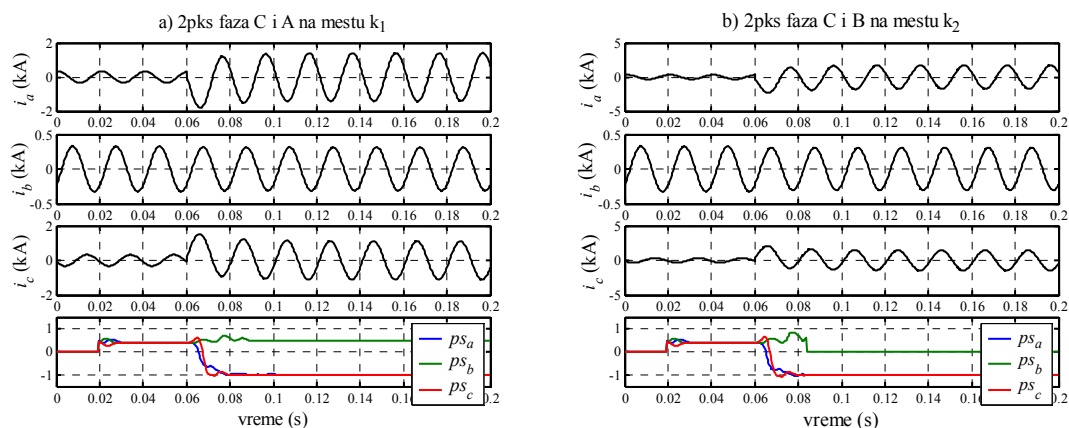
Iste veličine za dvopolni kratak spoj faza B i C i C i A na mestu k_1 , k_2 , k_3 i k_4 prikazane su na **Slikama 4.10** i **4.11**.

Slika 4.10 pokazuje da algoritam uspešno detektuje "smer" struje dvofaznog kratkog spoja faza B i C: za kvarove na mestima k_1 i k_2 ps_b i ps_c su približno -1 (**Slike 4.10a** i **4.11b**), a za kvarove k_3 i k_4 ps_b i ps_c su približno 1 (**Slike 4.10c** i **4.10d**). Vreme

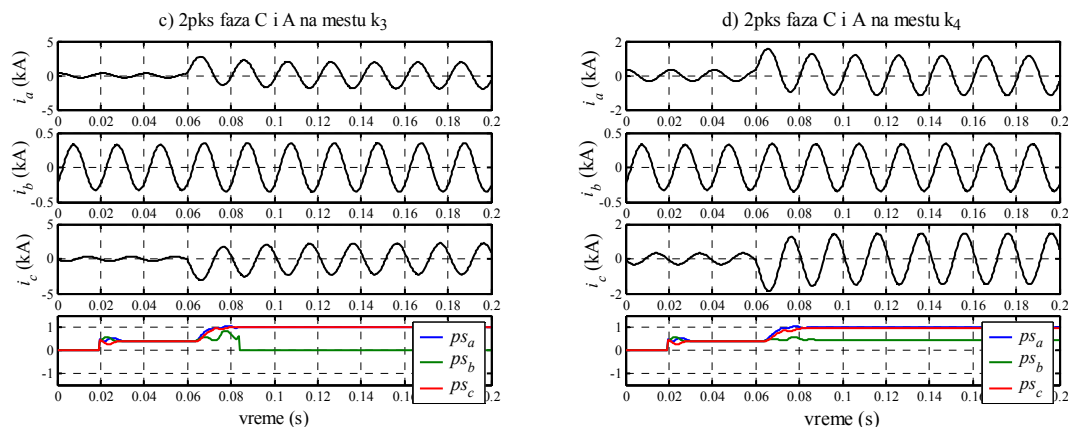
odziva algoritma za kvarove k_1 , k_2 , k_3 i k_4 iznosi 12 ms, 12 ms, 11 ms i 11 ms, respektivno.



Slika 4.10. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj faza B i C: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4



Slika 4.11. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj faza C i A: a) na mestu k_1 , i b) na mestu k_2

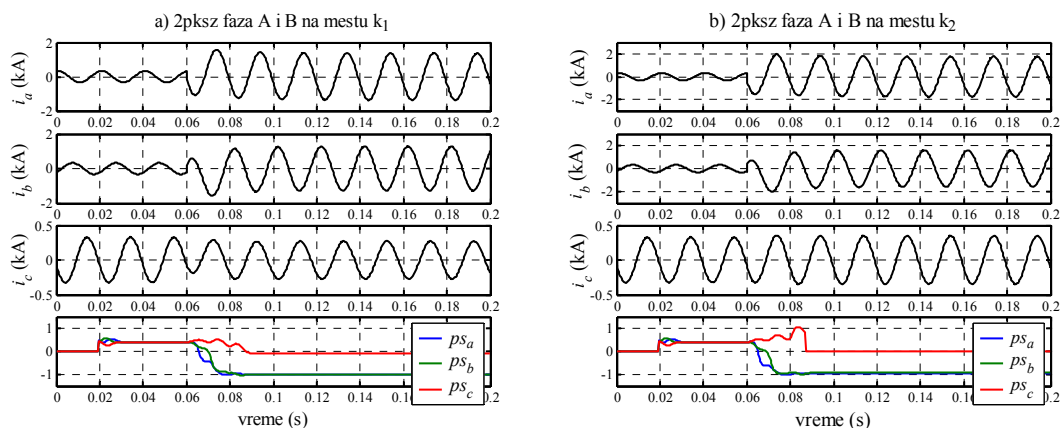


Slika 4.11 (nastavak). Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj faza C i A: c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

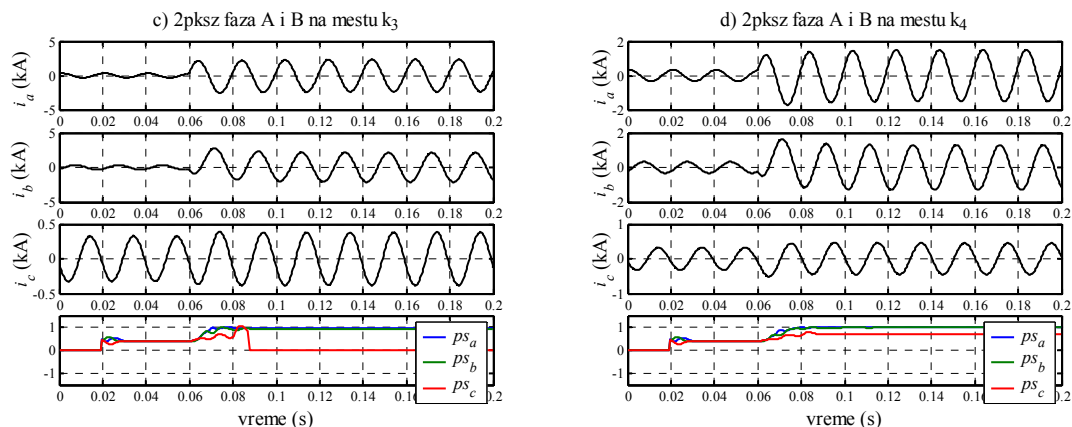
Slika 4.11 pokazuje da algoritam uspešno detektuje "smer" struje dvofaznog kratkog spoja faza C i A: za kvarove na mestima k_1 i k_2 ps_c i ps_a su približno -1 (**Slike 4.11a** i **4.11b**), a za kvarove k_3 i k_4 ps_c i ps_a su približno 1 (**Slike 4.11c** i **4.11d**). Vreme odziva pokazatelja ps_c za kvarove k_1 , k_2 , k_3 i k_4 iznosi 9 ms, 8 ms, 6 ms i 7 ms, respektivno.

4.6.3. Dvofazni kratak spoj sa zemljom

Predloženi algoritam testiran je i na dvofazni kratak spoj sa zemljom (2pksz). Na **Slici 4.12** prikazane su odgovarajuće veličine za kratak spoj faza A i B sa zemljom, na **Slici 4.13** prikazane iste veličine za kvar faza B i C sa zemljom, dok je na **Slici 4.14** analiziran dvopolni kratak spoj faza C i A sa zemljom.

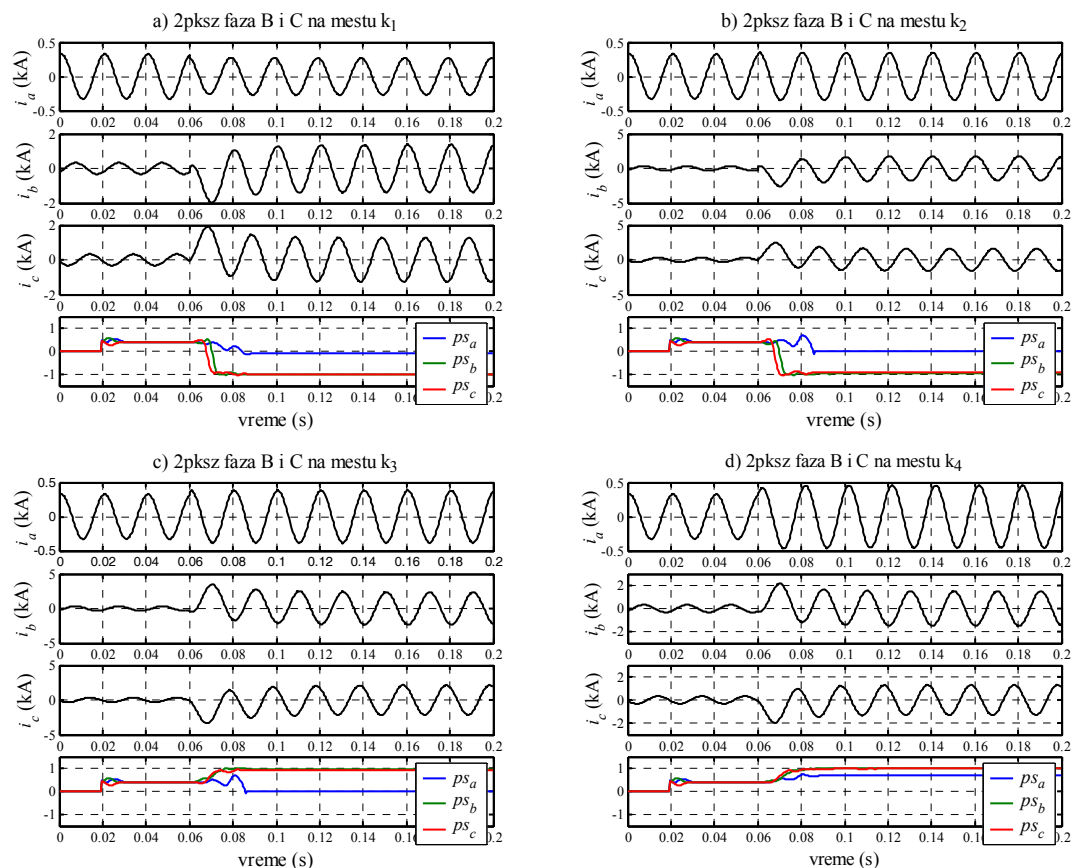


Slika 4.12. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj sa zemljom faza A i B: a) na mestu k_1 i b) na mestu k_2

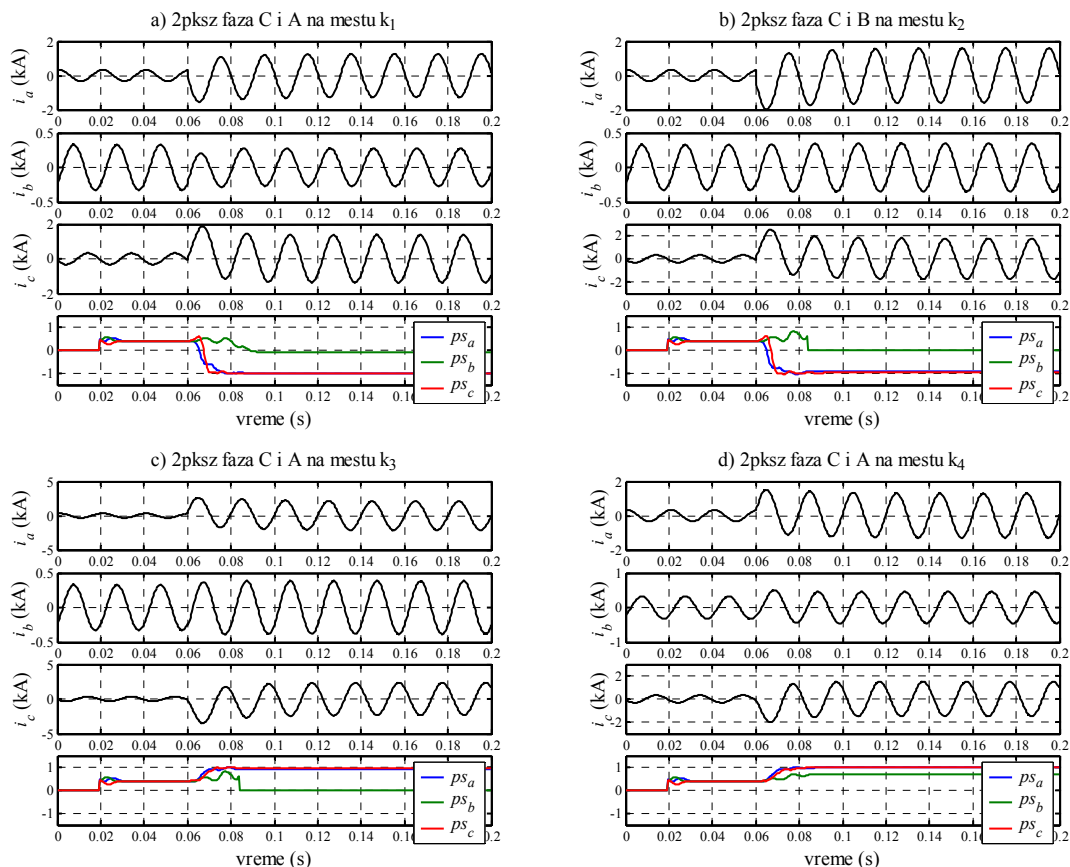


Slika 4.12 (nastavak). Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj sa zemljom faza A i B: c) na mestu k_3 i d) na mestu

k_4



Slika 4.13. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj sa zemljom faza B i C: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

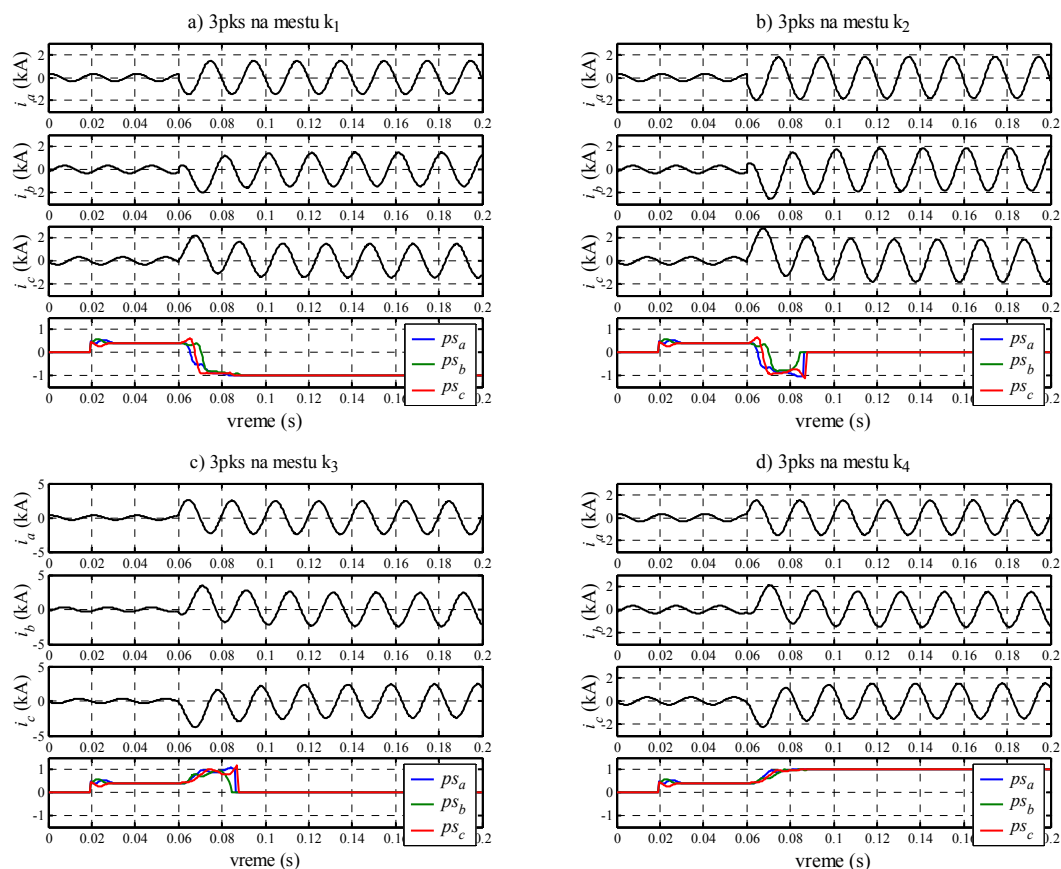


Slika 4.14. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za dvofazni kratak spoj sa zemljom faza C i A: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

Na osnovu priloženih slika vidi se da algoritam jednoznačno prepoznaje "smer" dvopolnog kratkog spoja sa zemljom bez obzira na mesto kvara (blizak ili udaljen kratak spoj) i fazu pogodenu kvarom. Vreme konvergencije pokazatelja smera je u okvirima vremena odziva za druge vrste kvarova

4.6.4. Trofazni kratak spoj

Na kraju je sproveden i test trofaznog kratkog spoja "ispred" i "iza" mesta ugradnje releja. Odgovarajuće veličine prikazane su na **Slici 4.15**.



Slika 4.15. Vremenske promene faznih struja i_a , i_b i i_c i pokazatelja smerova ps_a , ps_b i ps_c za trofazni kratak spoj: a) na mestu k_1 , b) na mestu k_2 , c) na mestu k_3 i d) na mestu k_4

Sa **Slike 4.15** uočljivo je da algoritam radi korektno i pri trolnom kratkom spoju, obzirom da pokazatelji u svim fazama teže -1 odnosno 1. Međutim, pri bliskim kvarovima (**Slike 4.15b i 4.15c**) zbog nestanka napona pokazatelji padaju na 0 tako da relej određuje smer u ograničenom vremenskom intervalu: za kvar na poziciji k_2 uslov $ps_{abc} < -0.5$ je ispunjen u trajanju od 10 ms, dok je za kvar k_3 uslov $ps_{abc} > 0.5$ ispunjen u trajanju od 16 ms. Ovo kratkotrajno generisanje izlaznog signala pri bliskim kratkim spojevima omogućava Fourierov filter, odnosno kašnjenje koje isti izaziva. Za pouzdanije utvrđivanje smera pri bliskim kratkim spojevima može se primeniti postupak opisan u prethodnom poglavlju.

5. USMERENI ZEMLJOSPOJNI RELEJ BEZ NAPONSKIH ULAZA

Sredjenaponske industrijske mreže (3, 6, 10 i 20 kV) obično se izvode kao izolovane. U takvim mrežama pri pojavi zemljospoja struja kvara ne prelazi 30 A [33], pa sistem može da nastavi sa radom bez isključenja. Kod jednofaznog zemljospoja, faza pogođena kvarom dolazi na nulti potencijal, a ispravne faze na potencijale koji su jednaki međufaznim naponima. Usled toga od ispravnih faza, preko njihovih otočnih kapacitivnosti protiču struje koje se zatvaraju preko mesta kvara. Ove struje su pretežno kapacitivne i zavise od ukupne dužine vodova, ali ne i od mesta kvara. Pri tome je aktivna komponenta manja za red veličine, odnosno ne prelazi 10 % kapacitivne komponente. Opasnost predstavlja pojava drugog zemljospoja u jednoj od zdravih faza kada zemljospoj prerasta u dvofazni kvar sa velikim faznim strujama. Zato je neophodno signalizirati pojavu prvog zemljospoja i kvar otkloniti u najkraćem mogućem roku. Kod postrojenja sa većim brojem odvoda potrebno je detektovati odvod sa kvarom, za šta se uspešno koristi usmerena zemljospojna zaštita. Konvencionalna rešenja zahtevaju merenje nultog napona radi utvrđivanja smera struje zemljospoja. U ovom poglavlju predložen je algoritam koji omogućava selektivnu detekciju zemljospoja bez korišćenja naponskog signala.

Pri pojavi zemljospoja struja kvara je mala (mnogo manja od radne struje) pa se struje u svim fazama neznatno menjaju. Ova činjenica je iskorišćena da se umesto nultog napona kao referentne veličine upotrebi radna struja.

Kolo za analizu smera struje zemljospoja prikazano je na **Slici 5.1**. Pri kratkom spoju faze A prvog odvoda struja kvara se zatvara preko otočnih kapaciteta C_{01} i C_{02} prema smerovima prikazanim na slici.

Za struje nultog redosleda na mernim mestima 1 i 2 se mogu napisati jednačine:

$$3i_{01} = i_{fa1} + i_{fb1} + i_{fc1} = (i_{pfa1} + i_{pfb1} + i_{pfc1}) - (i_f - i_{ca1}) + i_{cb1} + i_{cc1} = -i_f + i_{ca1} + i_{cb1} + i_{cc1} = -(i_{ca2} + i_{cb2} + i_{cc2}) \quad (5.1)$$

$$3i_{02} = i_{fa2} + i_{fb2} + i_{fc2} = (i_{pfa2} + i_{pfb2} + i_{pfc2}) + i_{ca2} + i_{cb2} + i_{cc2} = i_{ca2} + i_{cb2} + i_{cc2} = -3i_{01} \quad (5.2)$$

gde su:

i_{fa1} , i_{fb1} , i_{fc1} – fazne struje odvoda 1 za vreme kvara,

$i_{pfa1}, i_{pfb1}, i_{pfc1}$ – fazne struje odvoda 1 pre kvara bez kapacitivnih struja ($i_{pfa1}+i_{pfb1}+i_{pfc1}=0$),

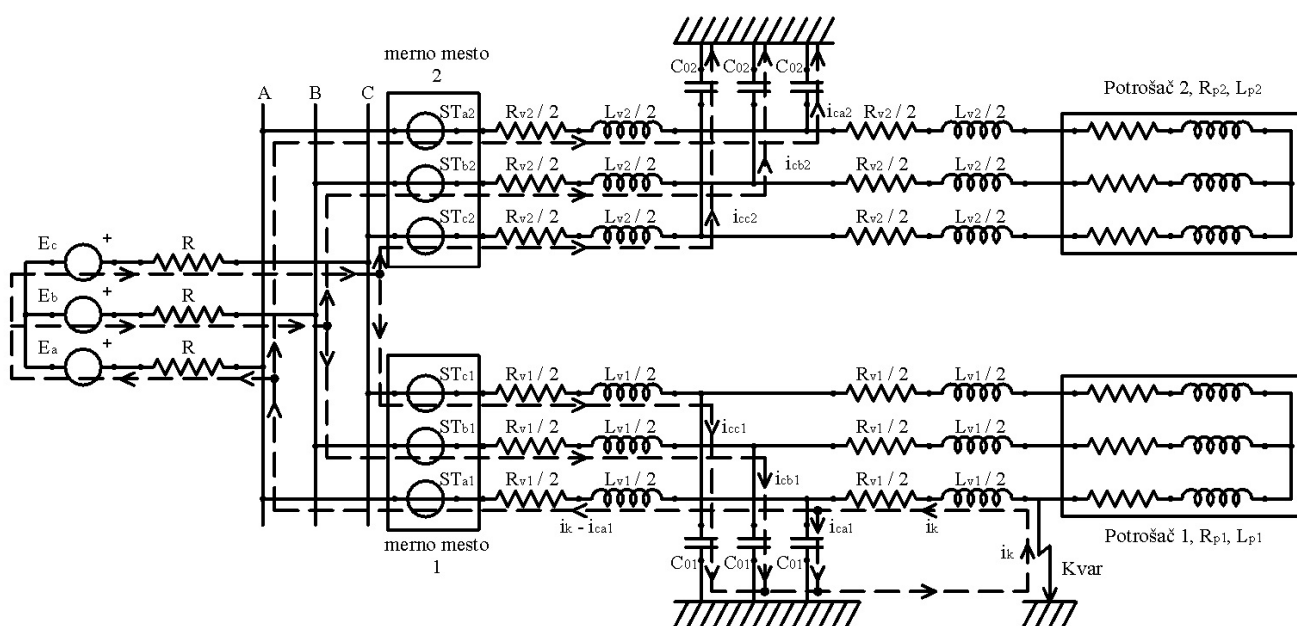
$i_{ca1}, i_{cb1}, i_{cc1}$ – kapacitivne struje odvoda 1 za vreme kvara,

i_f – struja kvara ($i_f=i_{ca1}+i_{cb1}+i_{cc1}+i_{ca2}+i_{cb2}+i_{cc2}$),

$i_{fa2}, i_{fb2}, i_{fc2}$ – fazne struje odvoda 2 za vreme kvara,

$i_{pfa2}, i_{pfb2}, i_{pfc2}$ – fazne struje odvoda 2 pre kvara bez kapacitivnih struja ($i_{pfa2}+i_{pfb2}+i_{pfc2}=0$),

$i_{ca2}, i_{cb2}, i_{cc2}$ – kapacitivne struje odvoda 2 za vreme kvara.

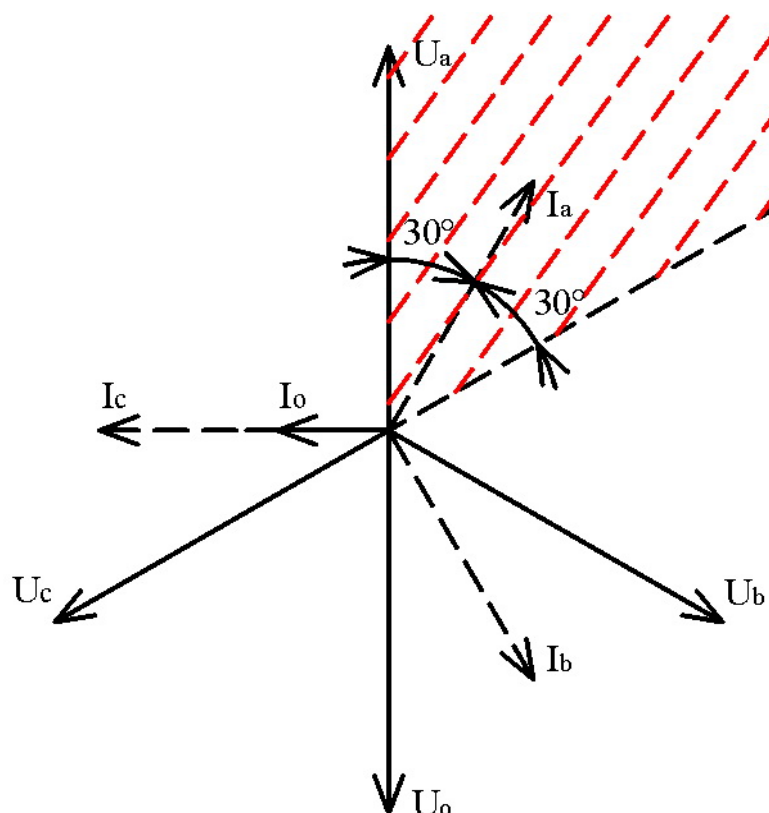


Slika 5.1. Kolo za analizu

Kao što se može primetiti, struje nultog redosleda koje prolaze kroz merna mesta 1 i 2 imaju različite smerove. Pošto se struje po odvodima pre i posle kvara neznatno razlikuju po amplitudi i faznom uglu, moguće je utvrditi odvod sa zemljospojem i fazu pogođenu kvarom.

Za realizaciju algoritma primenjen je usmereni relej baziran na digitalnom faznom komparatoru. Umesto napona kao referentne veličine upotrebljava se odgovarajuća fazna struja tako da se registar u zemenjuje novim registrom i_0 .

Za kvar na fazi A odvoda broj 1 fazorski dijagram odgovarajućih veličina prikazan je na Slici 5.2, pod pretpostavkom da je fazni stav φ između napona i struje 30° .



Slika 5.2. Fazorski dijagram za slučaj kvara na fazi A odvodu 1 viđen sa mernog mesta broj 1

Primenom pomenutog algoritma pokazatelj smera ps za pojedine faze će imati sledeće vrednosti:

$$ps_{a1} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_{a1}(k)i_{01}(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{a1}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{01}(k)|} = \cos(120^\circ) = -0.5, \quad (5.3)$$

$$ps_{b1} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_{b1}(k)i_{01}(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{b1}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{01}(k)|} = \cos(-120^\circ) = -0.5, \quad (5.4)$$

$$ps_{c1} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_{c1}(k)i_{01}(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{c1}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{01}(k)|} = \cos(0^\circ) = 1, \quad (5.5)$$

gde su:

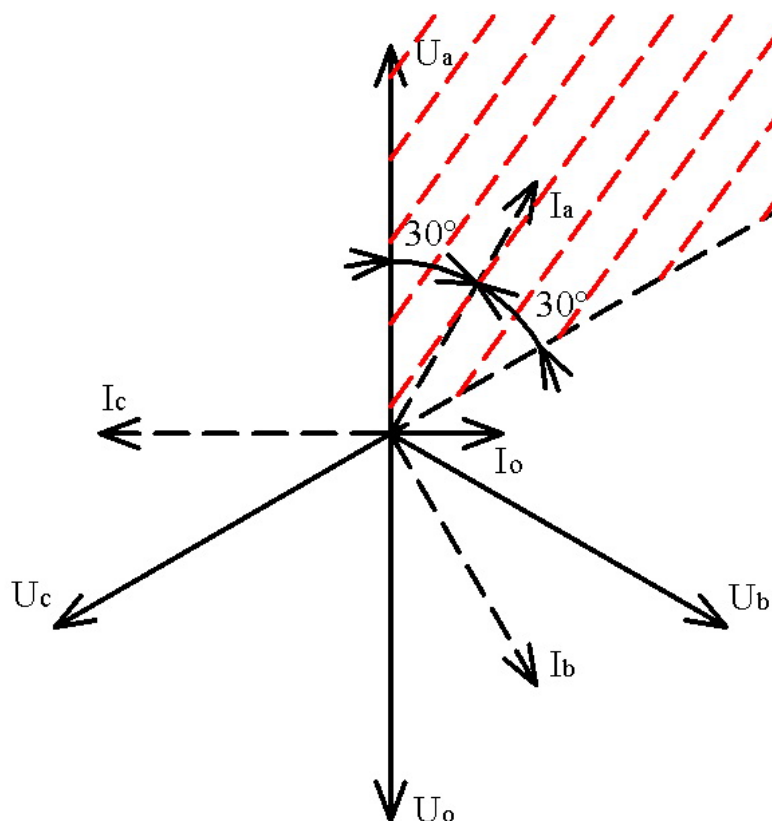
$i_{a1}(k)$, $i_{b1}(k)$, $i_{c1}(k)$ – k -ti odbirci trenutnih vrednosti faznih struja na odvodu broj 1,

$i_{0l}(k)$ – k -ti odbirak nulte komponente struje na odvodu 1

$$(i_{0l}(k) = \frac{1}{3}(i_{a1}(k) + i_{b1}(k) + i_{c1}(k))),$$

$I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}, I_{01}$ – odgovarajuće efektivne vrednosti faznih i nulte struje.

Fazorski dijagram električnih veličina za isti kvar viđen sa mernog mesta broj 2 prikazan je na **Slici 5.3**.



Slika 5.3. Fazorski dijagram za slučaj kvara na fazi A odvoda 1 viđen sa mernog mesta 2

Pokazatelj smera ps sada dobija vrednosti:

$$ps_{a2} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_{a2}(k) i_{02}(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{a2}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{02}(k)|} = \cos(-60^\circ) = 0.5, \quad (5.6)$$

$$ps_{b2} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_{b2}(k) i_{02}(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{b2}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{02}(k)|} = \cos(60^\circ) = 0.5, \quad (5.7)$$

$$ps_{c2} = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_{c2}(k) i_{02}(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{c2}(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{02}(k)|} = \cos(\pm 180^\circ) = -1, \quad (5.8)$$

gde su:

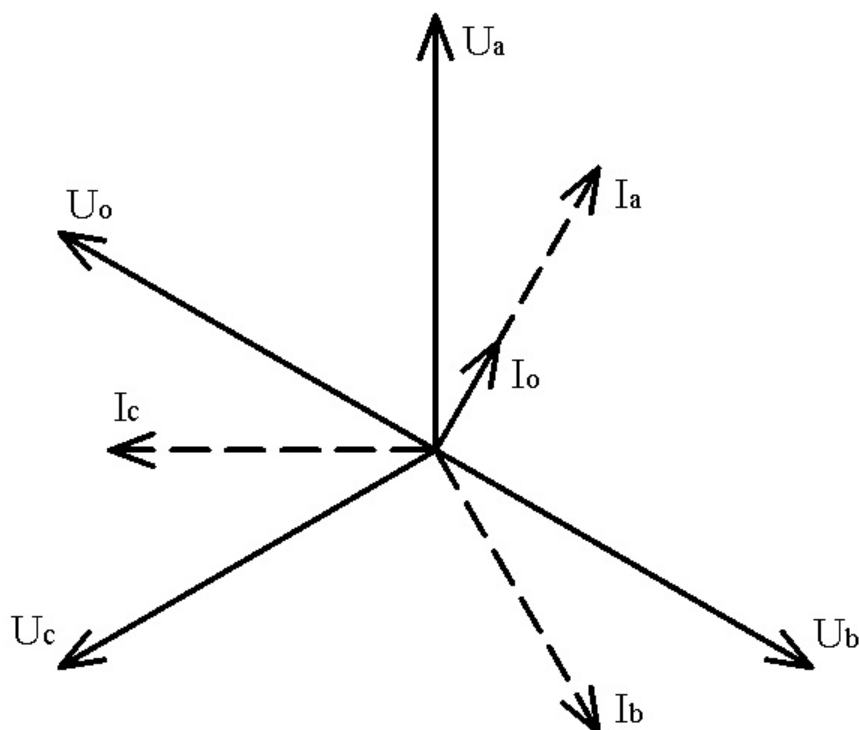
$i_{a2}(k), i_{b2}(k), i_{c2}(k)$ – k -ti odbirci trenutnih vrednosti faznih struja na odvodu broj 2,

$i_{02}(k)$ – k -ti odbirak nulte komponente struje na odvodu 2

$$(i_{02}(k) = \frac{1}{3}(i_{a2}(k) + i_{b2}(k) + i_{c2}(k))),$$

$I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}, I_{02}$ – odgovarajuće efektivne vrednosti faznih i nulte struje.

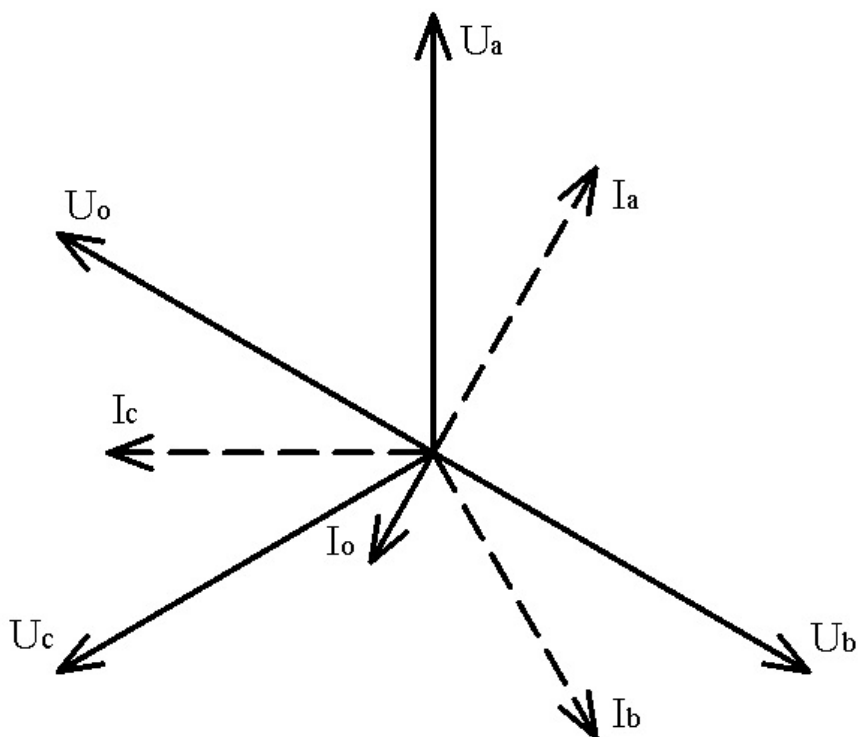
Neka je uslov reagovanja usmerenog releja pri kvaru faze A odvoda 1 $ps_{a1} < 0$ & $ps_{b1} < 0$ & $ps_{c1} > 0$. Ovaj uslov biće zadovoljen ako je fazni pomeraj φ između 0° i 60° (šrafirana površina na **Slikama 5.2** i **5.3**). U posmatranom slučaju ($\varphi = 30^\circ$) relej ima najveću osetljivost. Opseg od 60° je ujedno i maksimalni mogući, budući da je za pokrivanje kvarova ostale dve faze takođe neophodno po 60° . Ostalih 180° je rezervisano za tri faze susednog odvoda. Kao uslov reagovanja usmernog releja pri kvaru faze A odvoda 1 ravnopravno se može upotrebiti i $ps_{c1} > \sqrt{3}/2$.



Slika 5.4. Fazorski dijagram za slučaj kvara na fazi B odvoda 1 viđen sa mernog mesta

Prethodne konstatacije i zaključke treba potvrditi i pri kvarovima na ostalim fazama odvoda 1. Fazorski dijagram na **Slici 5.4** odgovara kvaru na fazi B odvoda 1 viđen sa mernog mesta 1, dok je isti kvar viđen sa mernog mesta 2 prikazan na **Slici 5.5**. Usvojen fazni stav između radnog napona i struje je i u ovom slučaju 30° .

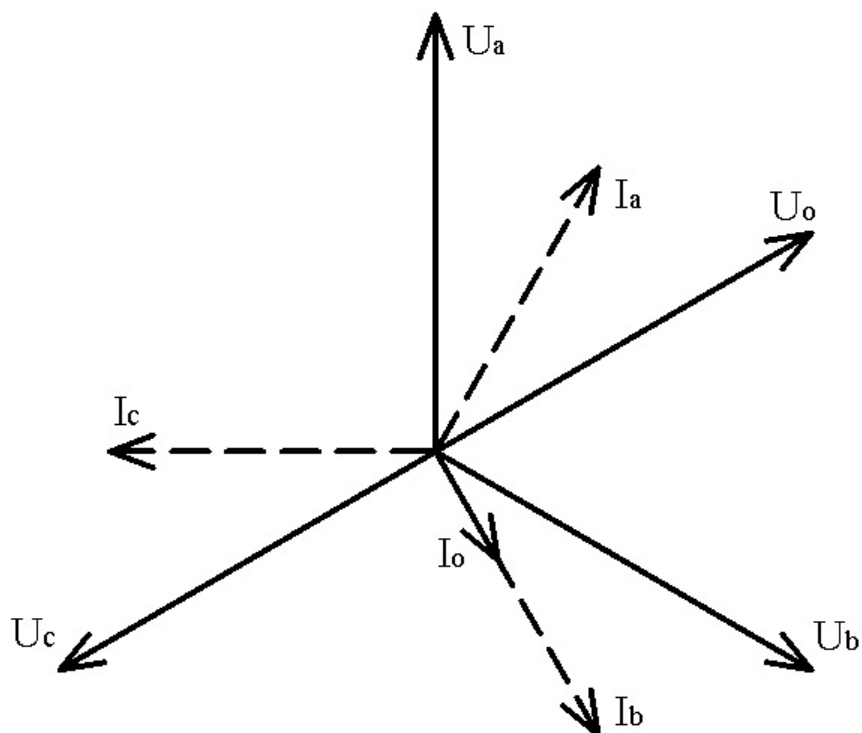
Za $\varphi=30^\circ$ i kvar na fazi B pokazatelj smera ps dobija sledeće vrednosti: $ps_{a1}=\cos(0^\circ)=1$, $ps_{b1}=\cos(120^\circ)=-0.5$, $ps_{c1}=\cos(-120^\circ)=-0.5$, $ps_{a2}=\cos(\pm 180^\circ)=-1$, $ps_{b2}=\cos(-60^\circ)=0.5$, $ps_{c2}=\cos(60^\circ)=0.5$. Na osnovu ovih brojnih vrednosti izvodi se sledeći zaključak: kvar u fazi B odvoda 1 određen je uslovom $ps_{a1}>0$ & $ps_{b1}<0$ & $ps_{c1}<0$ ili $ps_{a1} > \sqrt{3}/2$. Pri tome fazni stav između napona i struje može uzeti bilo koju vrednost između 0° i 60° .



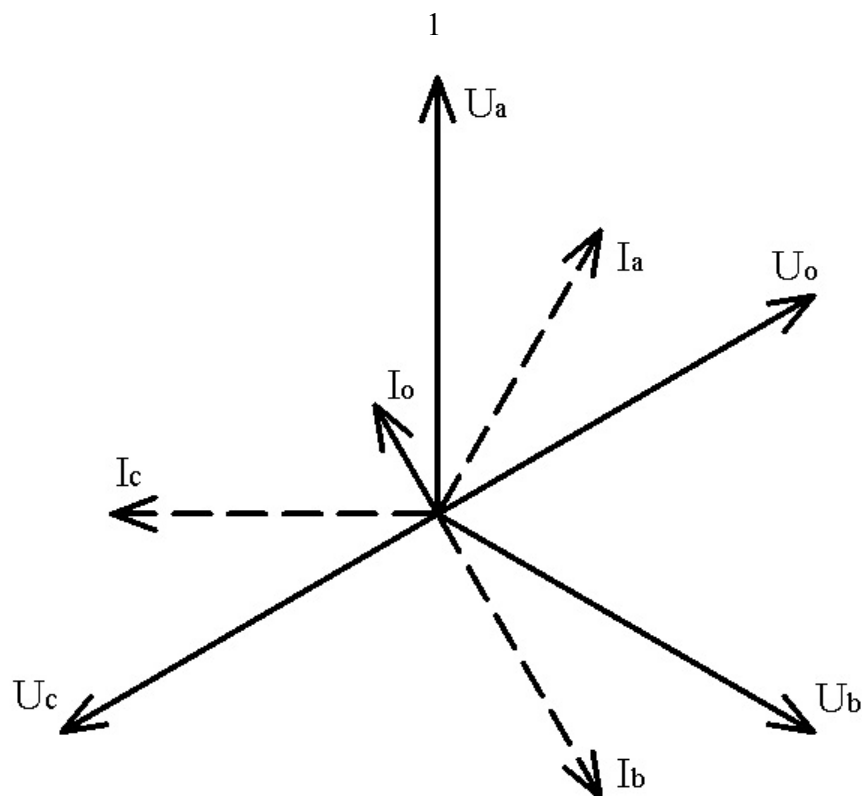
Slika 5.5. Fazorski dijagram za slučaj kvara na fazi B odvoda 1 viđen sa mernog mesta

2

Slični zaključci se mogu izvesti i za kvar u fazi C odvoda 1. Fazorski dijagrami koji odgovaraju mernom mestu broj 1, odnosno 2 prikazani su na **Slikama 5.6** i **5.7**, respektivno.



Slika 5.6. Fazorski dijagram za slučaj kvara na fazi C odvoda 1 viđen sa mernog mesta



Slika 5.7. Fazorski dijagram za slučaj kvara na fazi C odvoda 1 viđen sa mernog mesta

2

Po analogiji sa prethodnim analizama, kvar na fazi C odvoda 1 definisan je sa $ps_{a1} < 0 \ \& \ ps_{b1} > 0 \ \& \ ps_{c1} < 0$ ili $ps_{b1} > \sqrt{3}/2$.

Za kvar na nekoj od faza odvoda 2 dobili bi se istovetni rezultati kao i pri analizi adekvatnog kvara na odvodu 1, sa tom razlikom što bi indeksi zamenili mesta (ono što je važiilo za odvod 1, sada bi važiilo za odvod 2).

Radi preglednosti, u **Tabeli 5.1** su sistematski prikazani uslovi za detekciju različitih kvarova.

Tabela 5.1. Uslovi reagovanja usmerenog releja za $0^\circ < \varphi < 60^\circ$

zemljospoj faze	uslov reagovanja usmerenog releja
A	$ps_a < 0 \ \& \ ps_b < 0 \ \& \ ps_c > 0$
B	$ps_a > 0 \ \& \ ps_b < 0 \ \& \ ps_c < 0$
C	$ps_a < 0 \ \& \ ps_b > 0 \ \& \ ps_c < 0$

Uslovima u **Tabeli 5.1** pokrivaju se režimi kojima odgovara $0^\circ < \varphi < 60^\circ$. Ovaj opseg može se rotirati ka kapacitivnom ili induktivnom opterećenju uz promene uslova reagovanja. Imajući ovo u vidu, opterećenjima koje karakteriše $-30^\circ < \varphi < 30^\circ$ odgovaraju uslovi dati u **Tabeli 5.2**, dok induktivnim opterećenjima sa $30^\circ < \varphi < 90^\circ$ odgovaraju uslovi dati u **Tabeli 5.3**.

Tabela 5.2. Uslovi reagovanja usmerenog releja za $-30^\circ < \varphi < 30^\circ$

zemljospoj faze	uslov reagovanja usmerenog releja
A	$ps_b < -0.5 \ \& \ ps_c > 0.5$
B	$ps_a > 0.5 \ \& \ ps_c < -0.5$
C	$ps_a < -0.5 \ \& \ ps_b > 0.5$

Tabela 5.3. Uslovi reagovanja usmerenog releja za $30^\circ < \varphi < 90^\circ$

zemljospoj faze	uslov reagovanja usmerenog releja
A	$ps_a < -0.5 \ \& \ ps_c > 0.5$
B	$ps_a > 0.5 \ \& \ ps_b < -0.5$
C	$ps_b > 0.5 \ \& \ ps_c < -0.5$

Finu regulaciju opsega moguće je postići uvođenjem osetljivosti os , koja je u izrazima (5.3)-(5.8) izostavljena radi jednostavnosti. Ako se želi zaći u opseg kapacitivnih opterećenja, regulaciju osetljivosti treba vršiti preko radnih struja ($os > 0$), odnosno:

$$pS_a = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_a(k-os)i_0(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{a2}(k-os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{02}(k)|}, \quad (5.9)$$

$$pS_b = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_b(k-os)i_0(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_b(k-os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k)|}, \quad (5.10)$$

$$pS_c = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_c(k-os)i_0(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_c(k-os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k)|}. \quad (5.11)$$

Ako se želi zaći dublje u opseg induktivnih opterećenja, regulaciju osetljivosti treba vršiti preko nulte struje ($os < 0$), odnosno:

$$pS_a = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_a(k)i_0(k+os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_a(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k+os)|}, \quad (5.12)$$

$$pS_b = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_b(k)i_0(k+os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_b(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k+os)|}, \quad (5.13)$$

$$pS_c = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_c(k)i_0(k+os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_c(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k+os)|}. \quad (5.14)$$

Uvođenjem osetljivosti os u registre radnih struja (izrazi (5.9), (5.10) i (5.11)) može se kompenzovati i uticaj aktivne komponente struje kvara, koja je u dosadašnjoj analizi zanemarivana.

Na osnovu izloženog proističe da je potreban broj merenja po odvodu 3 fazne struje, pri čemu se nulta komponenta dobija sabiranjem trenutnih vrednosti faznih struja. U izolovanim mrežama nulta komponenta struje može biti jako mala, pa ovaj

postupak nije dovoljno pouzdan budući da zahteva strujne transformatore sa identičnim karakteristikama. Zato se u praksi za dobijanje nulte komponente struje koristi poseban obuhvatni transformator nulte komponente struje. Time broj potrebnih merenja po odvodu raste na 4. Međutim, kako se sada nulta komponenta struje dobija iz posebnog transformatora, prestaje potreba za merenjem sve tri fazne struje već je dovoljna samo jedna. Pokazatelji smera u ostalim fazama računaju se preko iste struje, prethodno fazno pomerene za $2\pi/3$ rad, odnosno $-2\pi/3$ rad. Stoga, minimalan broj merenja po odvodu postaje 2: jedna fazna struja kao referentna veličina i nulta struja kao radna veličina. Ovaj pristup je i bolji od polaznog (merenje struja u svim fazama), obzirom da se veštačkim kašnjenjem merene fazne struje zadržava fazna simetrija. U slučaju korišćenja originalnih faznih struja ova simetrija je narušena zbog uticaja struje kvara.

Osnovni nedostatak predložene tehnike je korektan rad na opsegu od 60° , odnosno, mora se unapred grubo poznavati karakter opterećenja. Ukoliko je režim opterećenja takav da izlazi iz pretpostavljenog opsega, postojaće lažno reagovanje. Ovaj nedostatak može se ublažiti na dva načina. Prvi je da se usmerenom releju umesto fazne struje dotičnog izvoda dovede fazna struja dovoda, budući da je ista manje osetljiva na karakter opterećenja pojedinih izvoda i struju zemljospoja. Drugi način je primenljiv u postrojenjima sa više od dva izvoda i podrazumeva postojanje jednostavne komunikacije između releja na odvodima. Ukoliko su prethodni uslovi zadovoljeni, opseg opterećenja za koje je algoritam primenljiv, proširuje se na 120° . Neka je uslov reagovanja usmerenog releja za zemljospoj na fazi A: $p_{sc} > 0.5$. Ovaj uslov biće ispunjen za opseg opterećenja od 120° . Međutim, ovakav uslov izazvaće lažno reagovanje releja na ostalim odvodima, koji će pokazati kvar u jednoj od ostale dve faze. Ukoliko postoji jednostavna komunikacija između releja, odvod i faza sa kvarom određeni su relejom čija je detektovana faza jedinstvena, odnosno ne poklapa sa detektovanom fazom releja ostalih odvoda.

I pored navedenih ograničenja, algoritam se može primeniti u sistemima gde naponski signali nisu dostupni i na taj način povećava upotrebljivost klasičnih prekostrujnih i zemljospojnih releja. Korak dalje u odnosu na klasičnu usmerenu zemljospojnu zaštitu predstavlja mogućnost izolovanja ne samo voda u kvaru već i faze pogođene kvarom.

5.1 Testiranje algoritma

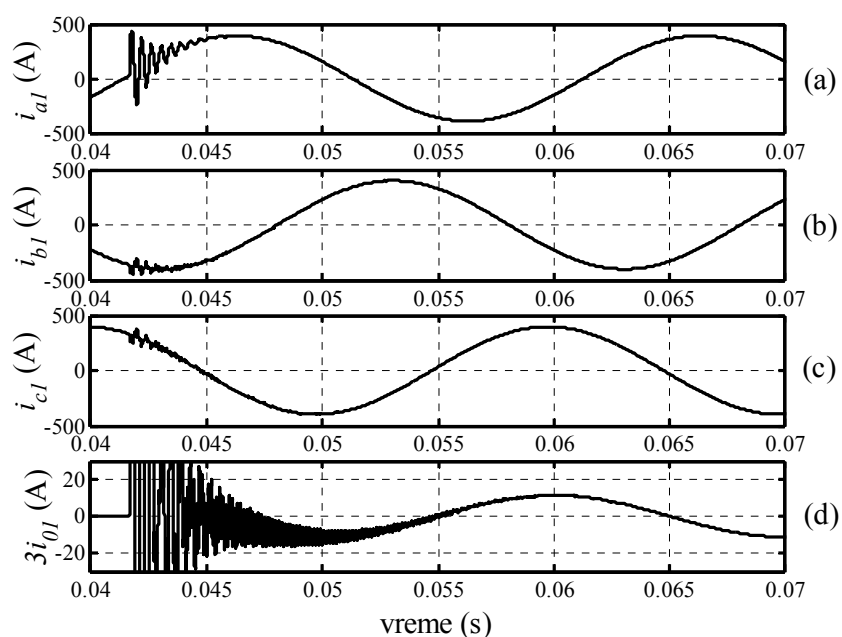
Verifikacija predloženog algoritama sprovedena je nizom simulacija prema modelu mreže prikaznom na **Slici 5.1**. Simulacije su izvršene pomoću dodatnog Matlab modula Simulink. Usvojeni su sledeći parametri izvora i mreže: $E = 10/\sqrt{3}$ kV, $R=0.01 \Omega$, $R_{v1}=0.3 \Omega$, $L_{v1}=0.6$ mH, $C_{o1}=1 \mu\text{F}$, $R_{v2}=0.4 \Omega$, $L_{v2}=0.9$ mH, $C_{o2}=1.5 \mu\text{F}$.

Bez podešavanja osetljivosti, algoritmom bi bila pokrivena potrošnja koja zadovoljava uslov $0^\circ < \varphi < 60^\circ$. U režimima koji su čisto aktivni ili pretežno aktivni, algoritam bi radio na granici upotrebljivosti. Imajući u vidu da su upravo ovi režimi najzastupljeniji neophodno je blago zaći u kapacitivnu oblast uvođenjem osetljivosti $os=1$. Pošto je usvojena frekvencija odabiranja 1000 Hz, ovakvim podešavanjem osetljivosti pokrivaju se opterećenja sa faznim pomerajem između -18° i 43° . Takođe, ovim setovanjem obezbeđuje se rezerva u slučaju da struja kvara sadrži i aktivnu komponentu.

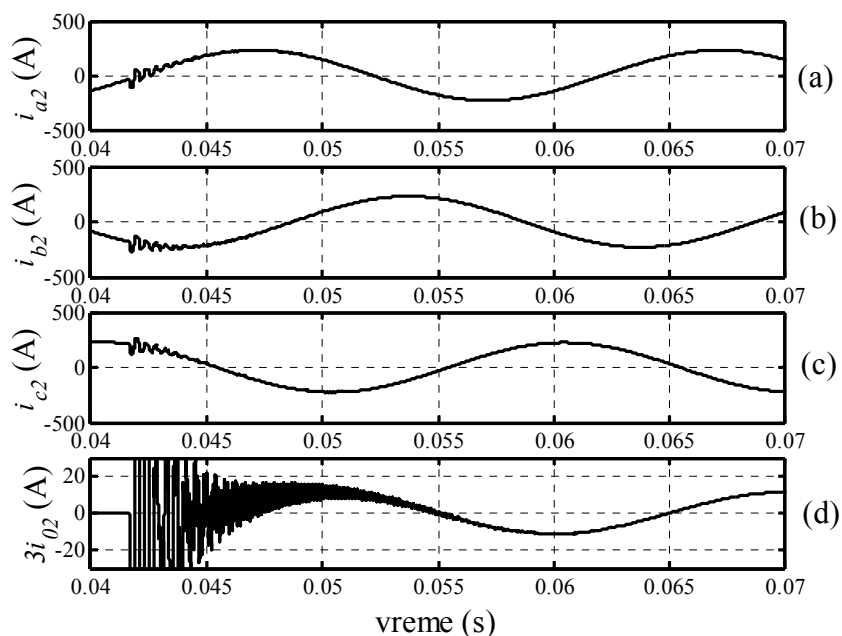
Najpre je testiran slučaj induktivne potrošnje: $R_{p1}=18 \Omega$, $L_{p1}=28$ mH ($\varphi_1=26^\circ$), $R_{p2}=27 \Omega$, $L_{p2}=70$ mH ($\varphi_2=39^\circ$). Trajanje simulacije je 0.1 s. Da bi se bolje sagledao uticaj prelaznog procesa koji nastaje kada se desi kvar, testovi su izvođeni za različite trenutke kvara: $2\frac{1}{24}T$, $2\frac{1}{12}T$, $2\frac{1}{8}T$, $2\frac{1}{6}T$, $2\frac{5}{24}T$ i $2\frac{1}{4}T$ ($T=20$ ms).

U prvom testu simuliran je kvar na fazi A odvoda broj 1. Trenutak kvara je $2\frac{1}{12}T$. Na **Slikama 5.8** i **5.9** prikazane su struje na mernim mestima 1 i 2, respektivno.

Vremenska osa zumirana je na period od 0.04 s do 0.07 s da bi prelazni proces bio uočljiviji. Takođe, prelazni procesi na **Slikama 5.8(d)** i **5.9(d)** nisu prikazani u celosti radi bolje preglednosti, pošto su struje $3i_{o1}$ i $3i_{o2}$ u ustaljenom periodu manje za red veličine.



Slika 5.8. Trenutne vrednosti struja na odvodu broj 1 pri kvaru faze A odvoda broj 1

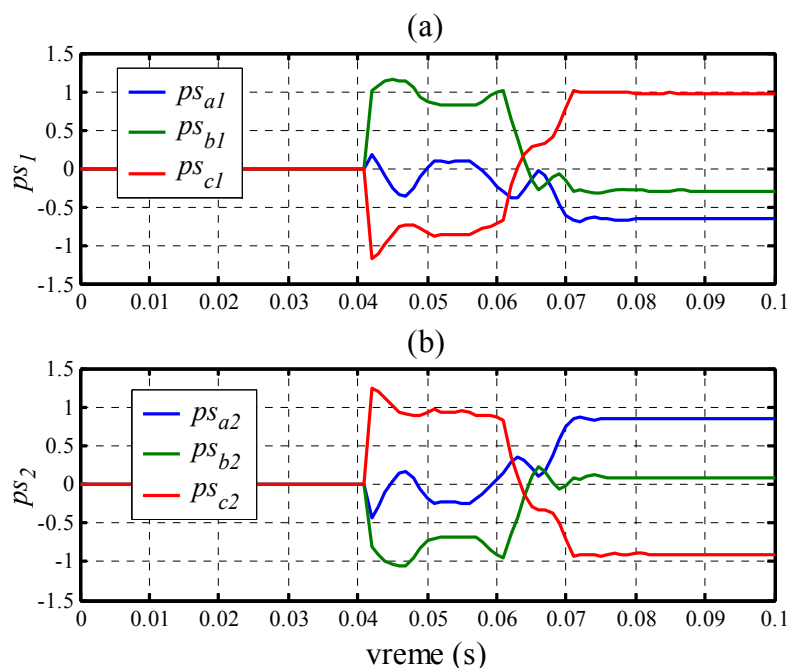


Slika 5.9. Trenutne vrednosti struja na odvodu broj 2 pri kvaru faze A odvoda broj 1

Kao što se sa slika može primetiti, pri nastanku kvara radne struje po odvodima 1 i 2 praktično ostaju nepromenjene tako da je opravdano koristiti ih kao referentne veličine za detekciju smeru. Nulte komponente struje $3i_{01}$ i $3i_{02}$, dobijene kao sume

trenutnih vrednosti radnih struja, na mernim mestima 1 i 2 su u protivfazi što daje mogućnost da se utvrdi "smer" kvara, odnosno odvod u kvaru.

Primenom opisanog algoritma, vremenske promene pokazatelja smera ps po odvodima i fazama prikazane su na **Slici 5.10**.

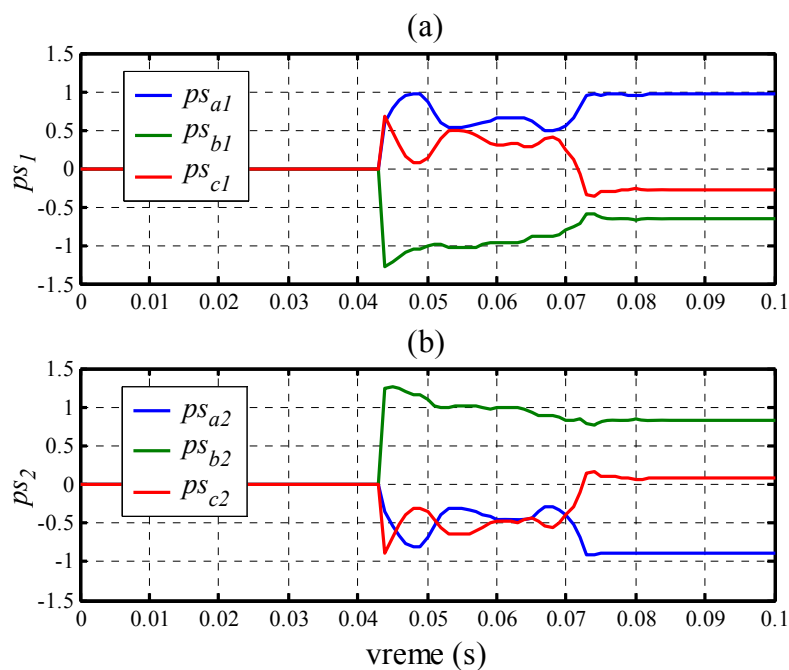


Slika 5.10. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi A odvoda 1

Kako je $ps_{a1} < 0$ & $ps_{b1} < 0$ & $ps_{c1} > 0$ algoritam uspešno detektuje odvod i fazu u kvaru (odvod 1, faza A). Ukupno vreme odziva algoritma, odnosno vreme donošenja odluke je oko 30 ms od trenutka kvara. Ovo vreme predstavlja zbirno vreme trajanja prelaznog procesa (10 ms) i konvergencije indikatora ps (20 ms).

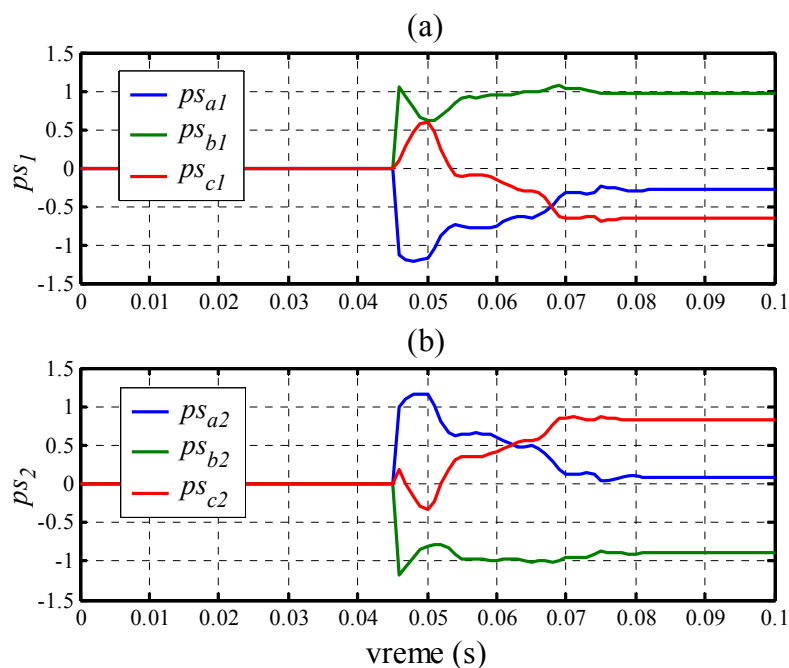
U naredna dva testa primenom istog modela simulirani su kvarovi na fazama B i C odvoda 1. Kao što se sa **Slike 5.11** može primetiti, po nastanku kvara indikator ps detektuje kvar faze B odvoda 1, jer važi $ps_{a1} > 0$ & $ps_{b1} < 0$ & $ps_{c1} < 0$. Usvojeni trenutak

kvara u ovom slučaju je $2\frac{1}{6}T$.

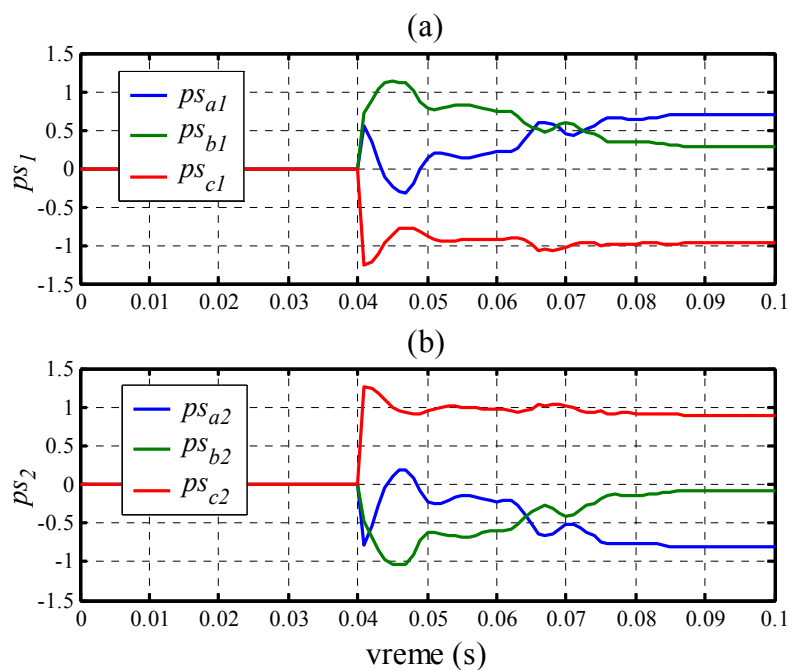


Slika 5.11. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi B odvoda 1

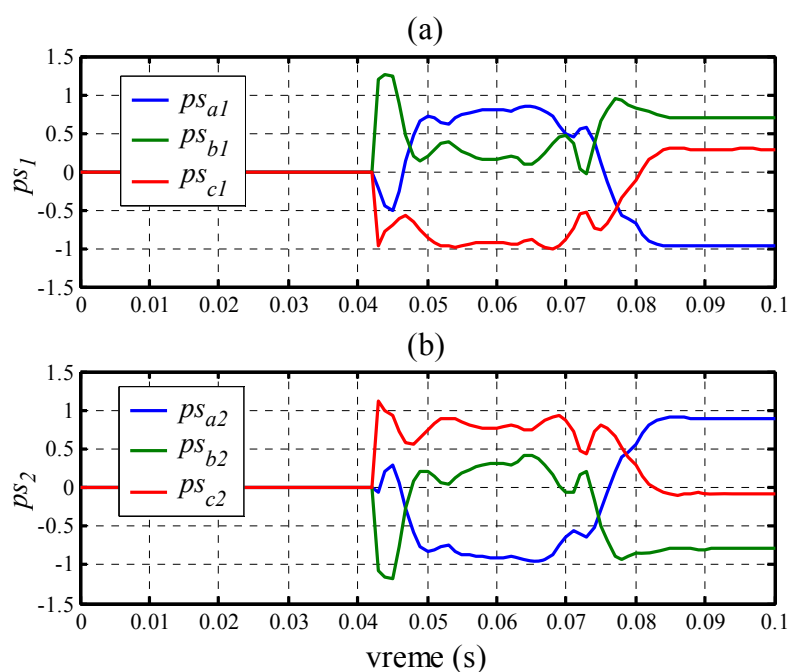
Slično prethodnoj situaciji, rezultati na **Slici 5.12** nedvosmisleno ukazuju na kvar faze C odvoda 1, budući da je $ps_{a1} < 0$ & $ps_{b1} > 0$ & $ps_{c1} < 0$. Rezultati na **Slici 5.12** odgovaraju trenutku kvara $2\frac{1}{4}T$.



Slika 5.12. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi C odvoda 1

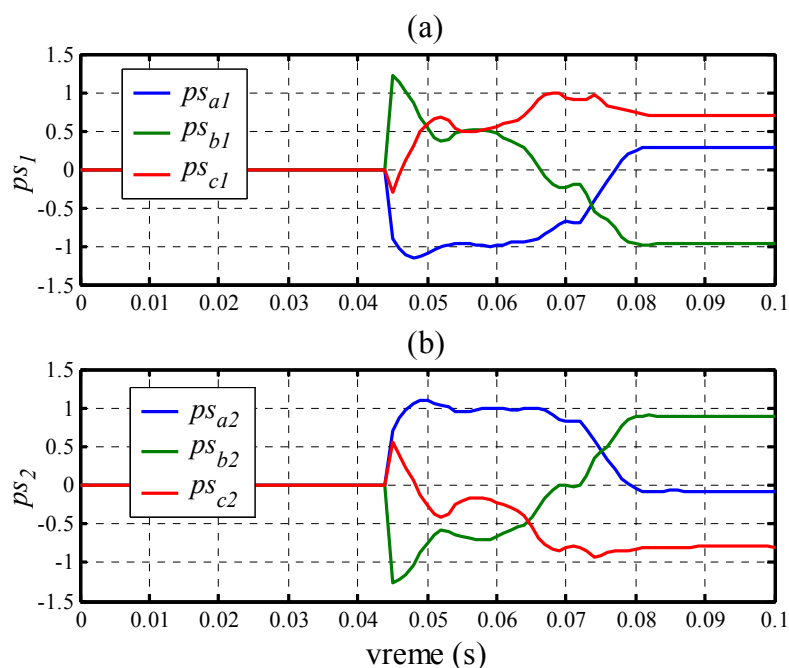


Slika 5.13. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi A odvoda 2



Slika 5.14. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi B odvoda 2

Zemljospojevi na fazama A, B, i C odvoda broj 2 simulirani su u naredna tri testa. Ovim kvarovima odgovaraju trenuci kvara $2\frac{1}{24}T$, $2\frac{1}{8}T$ i $2\frac{5}{24}T$, respektivno. Odgovarajuće trenutne vrednosti promenljive ps pri pomenutim kvarovima prikazane su redom na **Slikama 5.13, 5.14 i 5.15**.

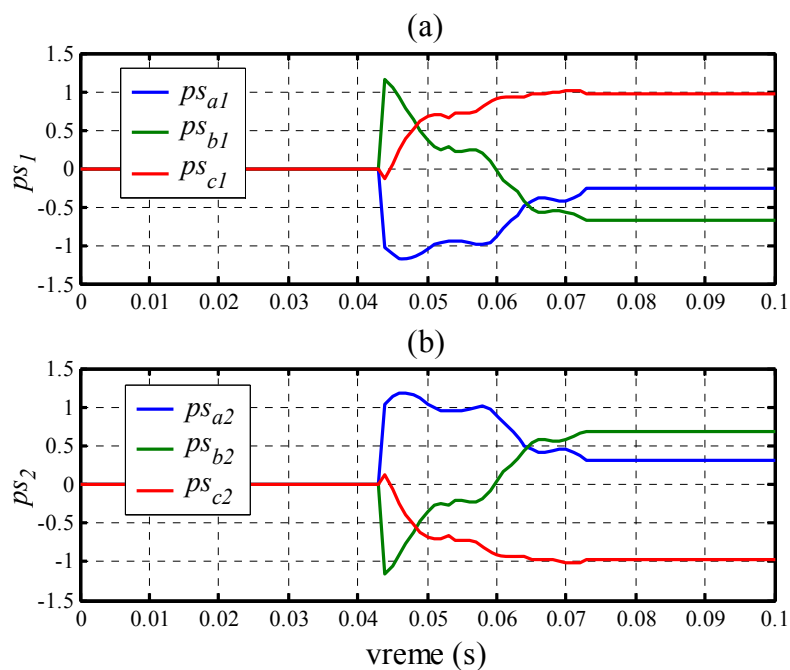


Slika 5.15. Trenutne vrednosti pokazatelja smeru za kvar na fazi C odvoda 2

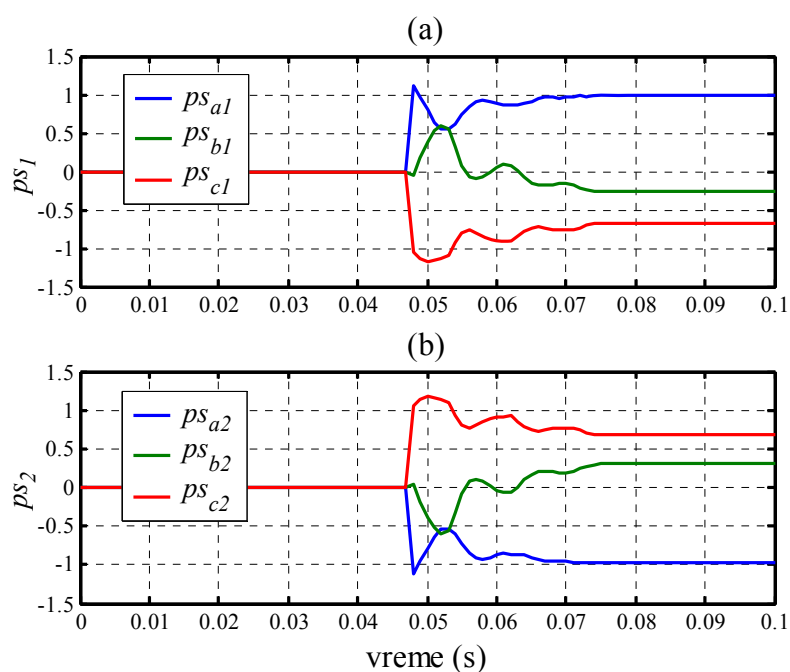
Upoređujući ove vrednosti sa vrednostima datim u **Tabeli 5.1**, može se potvrditi valjanost algoritma i pri zemljospojevima na odvodu broj 2. Ukupno vreme odziva algoritma je sada nešto duže i iznosi oko 40 ms od trenutka kvara i direktna je posledica dužeg trajanja prelaznog procesa (oko 20ms).

Rezultati simulacija za čisto omsko opterećenje dati su na **Slikama 5.16-5.21**.

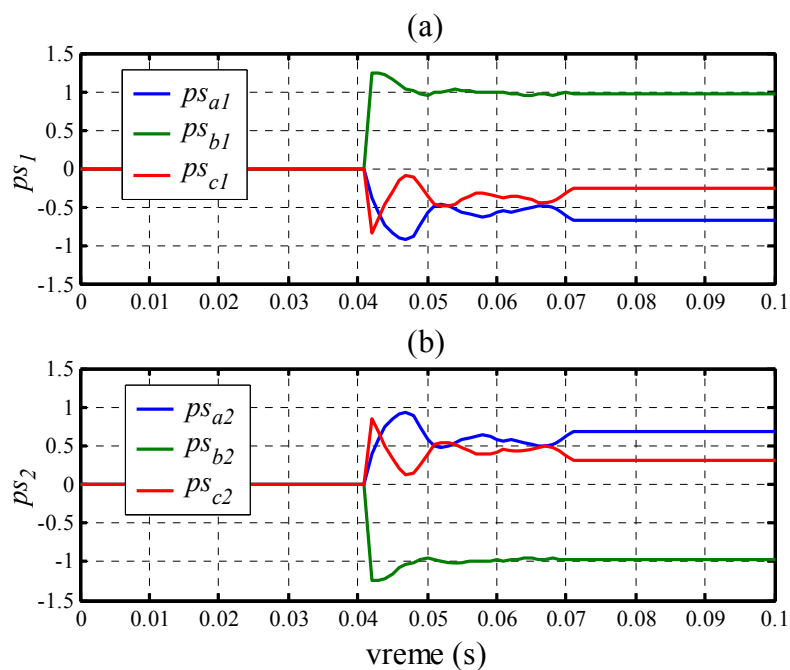
Kvarovi se dešavaju u trenucima $2\frac{1}{6}T$, $2\frac{1}{4}T$, $2\frac{1}{12}T$, $2\frac{5}{24}T$, $2\frac{1}{8}T$ i $2\frac{1}{24}T$, respektivno.



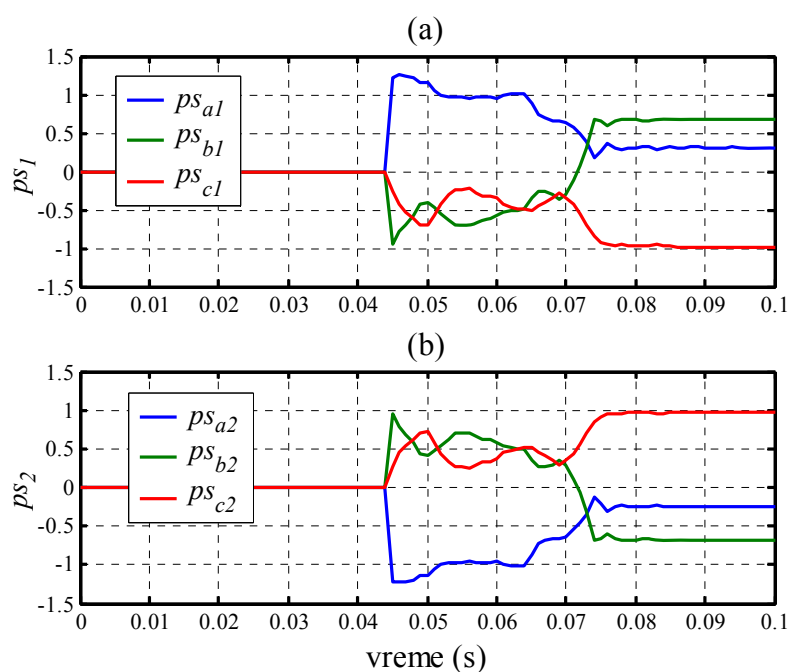
Slika 5.16. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi A odvoda 1



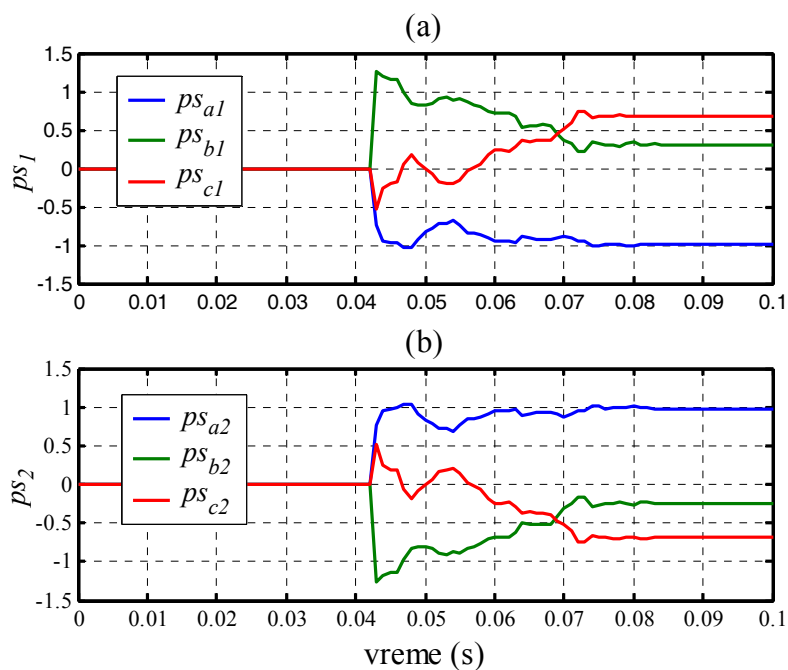
Slika 5.17. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi B odvoda 1



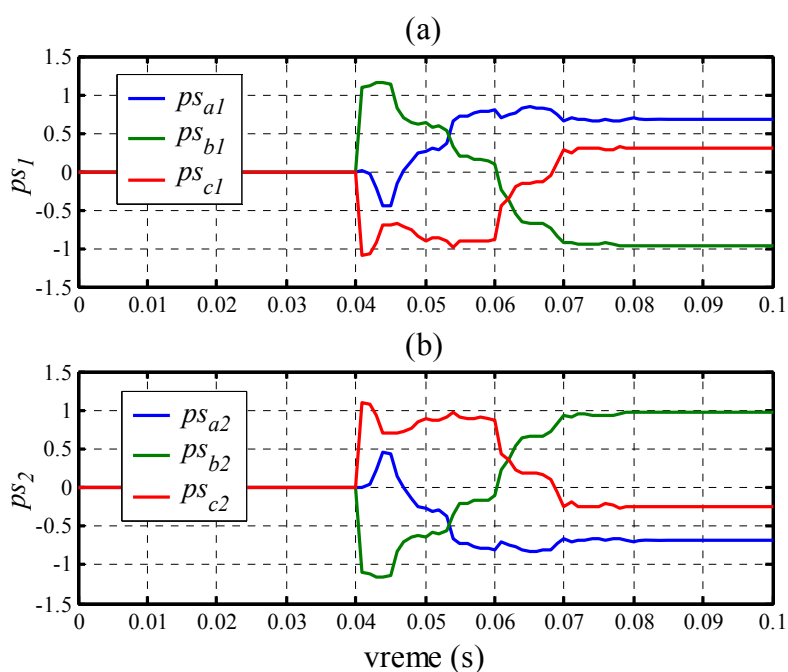
Slika 5.18. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi C odvoda 1



Slika 5.19. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi A odvoda 2



Slika 5.20. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi B odvoda 2



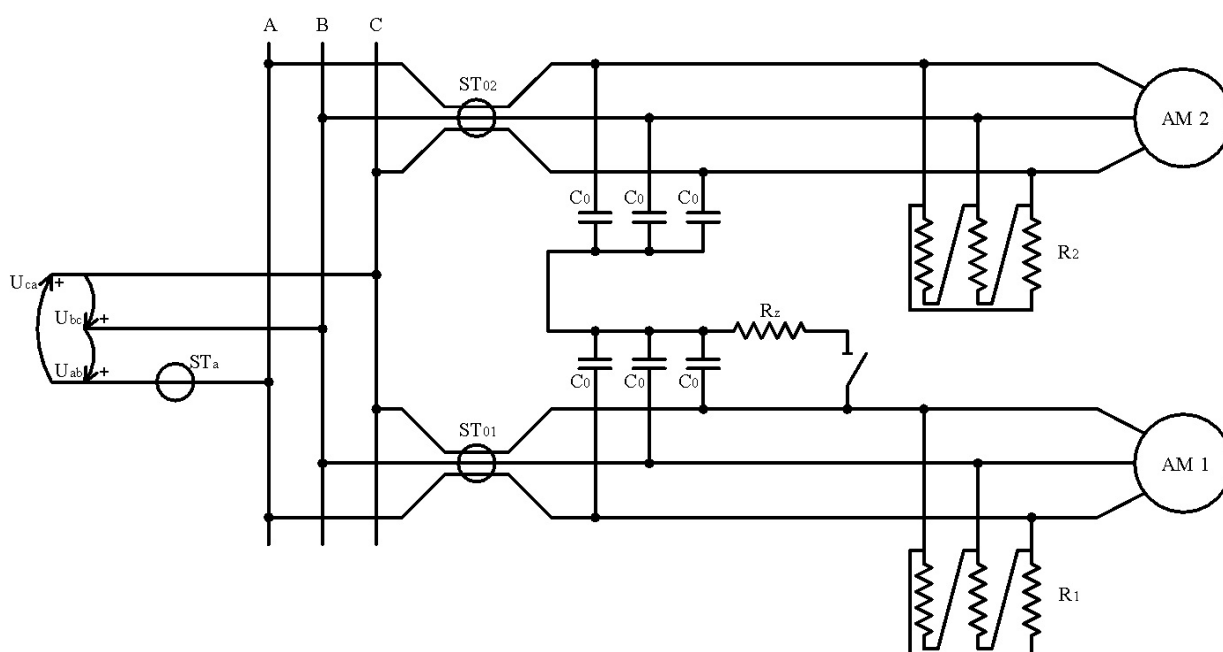
Slika 5.21. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi C odvoda 2

Pošto su ovi režimi bliži maksimalnoj osetljivosti releja, to su i rezultati u pogledu utvrđivanja smera očigledniji. Odgovarajući indikatori smera nakon konvergencije bliži su jedinici nego što je to bio slučaj kod induktivne potrošnje.

5.2 Eksperimentalni rezultati

Algoritam za usmereni relej bez naponskih ulaza verifikovan je i na fizičkom modelu izolovane mreže. Model je realizovan u laboratoriji za električna merenja Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Tropolna šema izolovane mreže sa dva odvoda prikazana je na **Slici 5.22**.

Šema sa **Slike 5.22** napaja se sa naizmenničnog izvora čiji je međufazni napon $U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}=230$ V. Struja zemljospoja zatvara se preko otočnih kapaciteta $C_0=11$ μ F i aktivne otpornosti $R_z=7$ Ω . Asinhroni motor AM₁ (VELOKS, namotan rotor, $U_n=206$ V, $I_n=8.5$ A, $n_n=1150$ o/min) je zakočen i koristi se kao prigušnica. Asinhroni motor AM₂ (SEVER, kavezni rotor, $P_n=5.5$ kW, sprega zvezda, $U_n=380$ V, $I_n=12$ A, $\cos\varphi_n=0.82$, $n_n=1450$ o/min) radi u praznom hodu. Kao aktivno opterećenje odvoda koriste se svetlosni izvori sa užarenom niti. Ukupna aktivna snaga po fazi potrošača R₁ je $5 \cdot 150$ W + 175 W = 925 W. U slučaju potrošača R₂, ukupna aktivna snaga po fazi iznosi 75 W + 90 W + 115 W + 150 W + 175 W = 605 W.



Slika 5.22. Tropolna šema izolovane mreže sa dva izvoda

Za snimanje signala upotrebljena je akviziciona kartica ED 300 [34] sa 16 analognih ulaza i 12-bitnim A/D konvertorom. Signali se pre analogno-digitalne konverzije prilagođavaju preko analognog priključnog modula ED 1770-AP [34]. Da bi se dobila zadovoljavajuća frekvencija odabiranja ($f_{od}=3000$ Hz) korišćena su samo tri analogna ulaza na kartici: jedan za faznu struju koja se dobija sa strujnog transformatora ST_a i dva za nulte struje odvoda koje se dobijaju sa strujnih transformatora ST_{01} i ST_{02} .

Opisana oprema, povezana prema trolejnoj šemi (Slika 5.22), prikazana je na Slici 5.23.



Slika 5.23. Veza opreme za dobijanje eksperimentalnih rezultata

Pošto se merenje radne struje vrši samo u fazi A na dovodu, pokazatelji smerova za faze B i C računaju se takođe preko ove struje, prethodno fazno pomerene za $2\pi/3$ rad, odnosno $4\pi/3$ rad. Da bi se to postiglo registar fazne struje je proširen za $2m/3$ odbiraka, te se za $os>0$ dobija:

$$ps_a = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_a(k+2m/3-os)i_0(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{a2}(k+2m/3-os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_{02}(k)|}, \quad (5.15)$$

$$ps_b = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_b(k+m/3-os)i_0(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_b(k+m/3-os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k)|}, \quad (5.16)$$

$$ps_c = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_c(k-os)i_0(k)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_c(k-os)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k)|}. \quad (5.17)$$

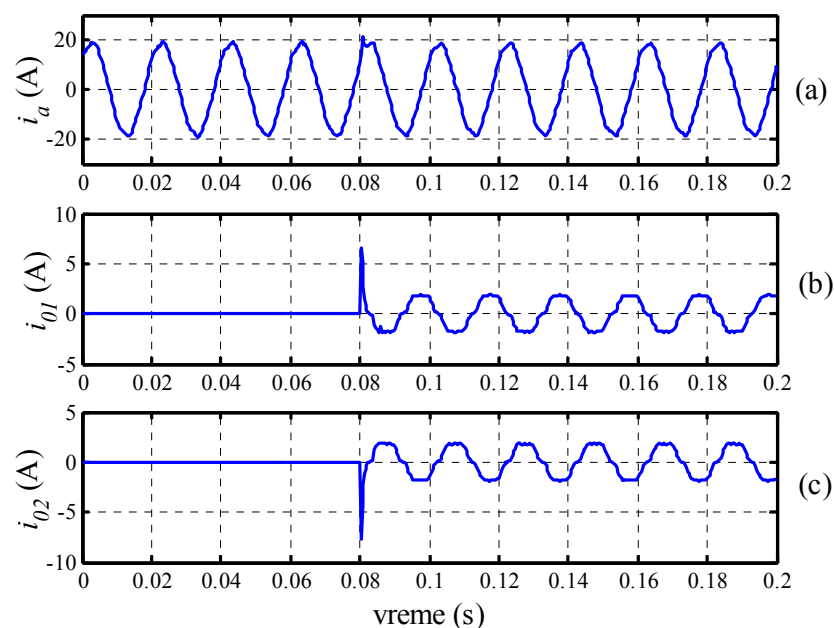
Za $os < 0$ regulaciju osetljivosti treba vršiti preko nulte struje, odnosno:

$$ps_a = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_a(k+2m/3)i_0(k+os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_a(k+2m/3)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k+os)|}, \quad (5.18)$$

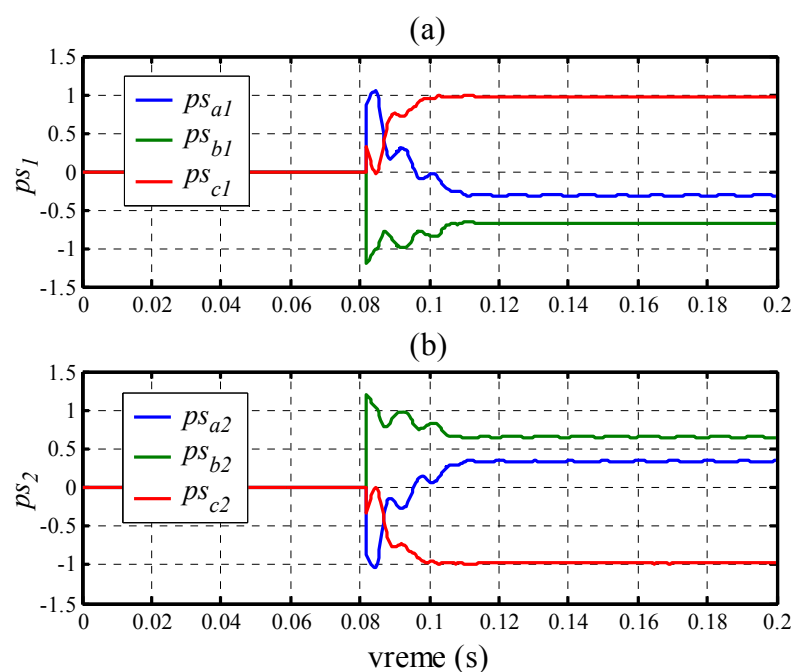
$$ps_b = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_b(k+m/3)i_0(k+os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_b(k+m/3)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k+os)|}, \quad (5.19)$$

$$ps_c = \frac{4m}{\pi^2} \frac{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} i_c(k)i_0(k+os)}{\sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_c(k)| \sum_{k=m/4+1}^{3m/4} |i_0(k+os)|}. \quad (5.20)$$

U prvom eksperimentu načinjen je zemljospoj faze A odvoda 1 pri punom opterećenju oba odvoda. Vremenske promene snimljenih signala prikazane su na **Slici 5.24**. Struja faze A na dovodu (**Slika 5.24a**) malo se menja po nastanku kvara te je opravdano koristiti je kao referentnu veličinu. Nulte struje odvoda (**Slike 5.24b i 5.24c**) su u protivfazi čime su i eksperimentalno potvrđene polazne pretpostavke za primenu algoritma za usmereni relej bez naponskih ulaza.



Slika 5.24. Vremenske promene snimljenih signala pri zemljospoju faze A odvoda 1

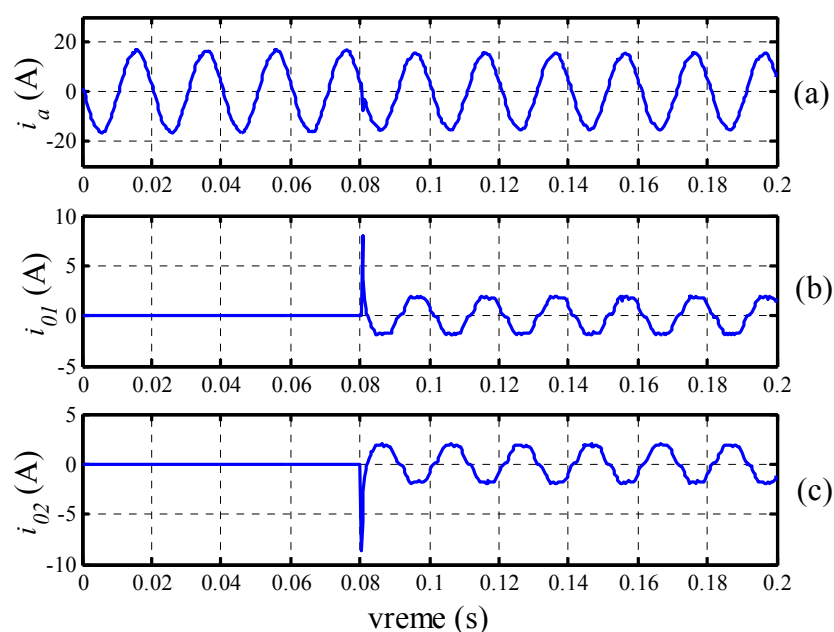


Slika 5.25. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi A odvoda 1

Osetljivost releja podešena je na 2 kako bi se blago zašlo i u kapacitivne režime rada. Pošto je na akvizicionoj kartici podešena frekvencija odabiranja $f_{od}=3000$ Hz,

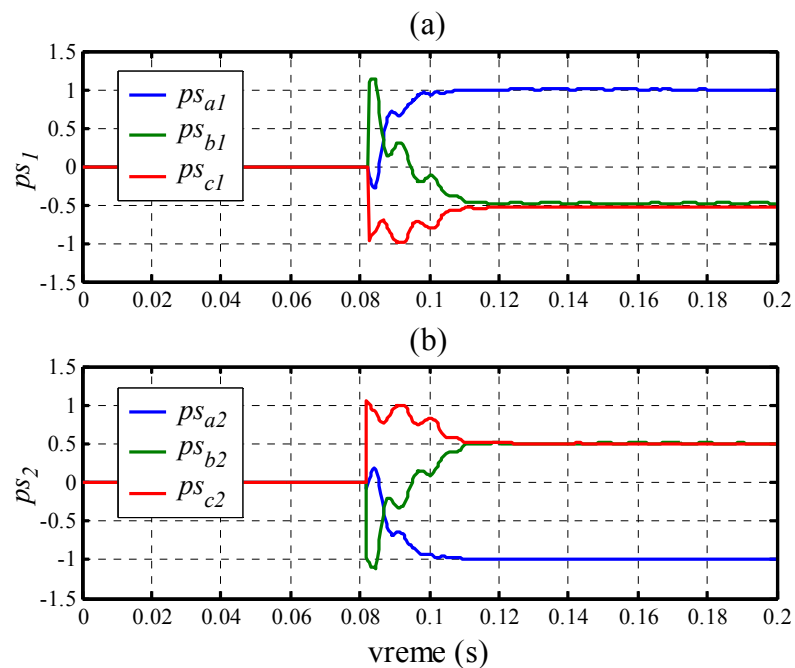
ovakvim izborom osetljivosti pokrivaju se opterećenja sa faznim pomerajem između -12° i 48° . Indikatori smera, sračunati prema izrazima (5.15)-(5.17), prikazani su na **Slici 5.25**. Pošto važi $ps_{a1} < 0$ & $ps_{b1} < 0$ & $ps_{c1} > 0$, algoritam uspešno detektuje odvod i fazu sa zemljospojem. Vreme konvergencije indikatora je oko 30 ms.

U narednom ogledu aktivna snaga potrošača R_1 smanjena je na $4 \cdot 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 775 \text{ W}$, a potrošača R_2 na $90 \text{ W} + 115 \text{ W} + 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 530 \text{ W}$. Na **Slici 5.26** prikazani su snimljeni signali pri zemljospoju faze B odvoda 1. Odgovarajući pokazatelji smera prikazani su na **Slici 5.27**. Pošto važi $ps_{a1} > 0$ & $ps_{b1} < 0$ & $ps_{c1} < 0$, algoritam uspešno prepoznaje kvar faze B na prvom odvodu.

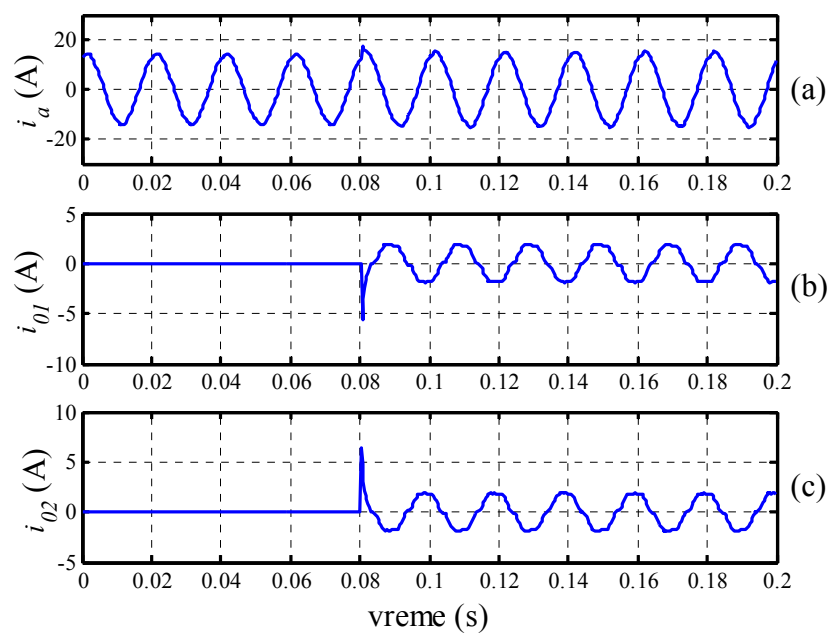


Slika 5.26. Vremenske promene snimljenih signala pri zemljospoju faze B odvoda 1

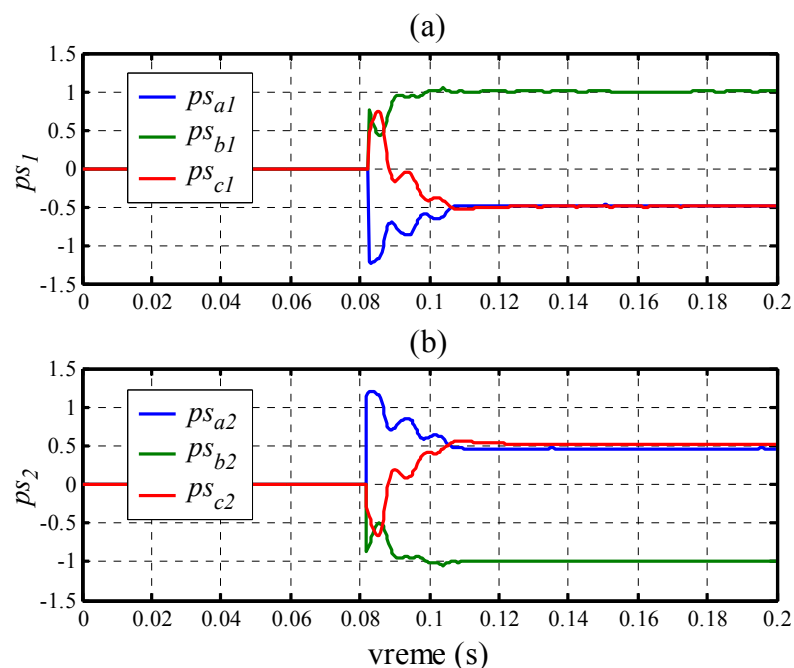
U trećem eksperimentu nastavljeno je sa trendom smanjivanja aktivne snage, pa snaga potrošača R_1 iznosi $3 \cdot 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 625 \text{ W}$, dok snaga potrošača R_2 iznosi $90 \text{ W} + 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 415 \text{ W}$. Na **Slici 5.28** prikazani su snimljeni signali pri zemljospoju faze C odvoda 1. Odgovarajući pokazatelji smera prikazani su na **Slici 5.29**. Pošto važi $ps_{a1} < 0$ & $ps_{b1} > 0$ & $ps_{c1} < 0$, algoritam uspešno detektuje kvar faze C na prvom odvodu.



Slika 5.27. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi B odvoda 1



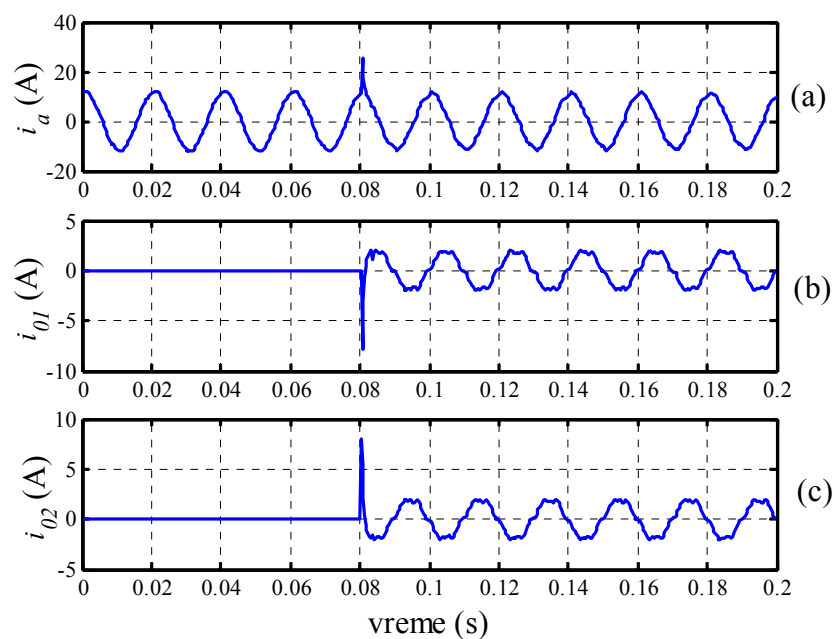
Slika 5.28. Vremenske promene snimljenih signala pri zemljospoju faze C odvoda 1



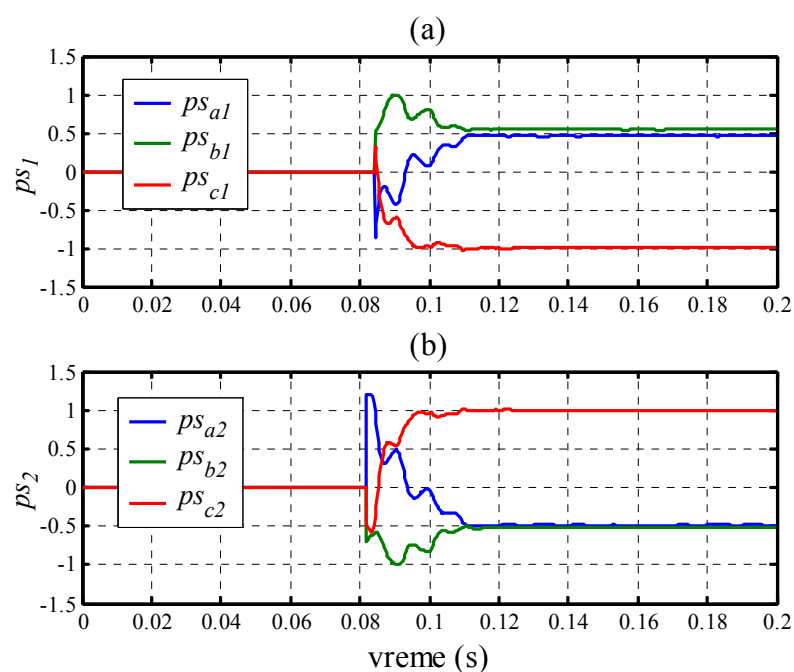
Slika 5.29. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi C odvoda 1

Snimljeni signali za zemljospoj faze A drugog izvoda prikazani su na **Slici 5.30**. U ovom ogledu aktivne snage potrošača R_1 i R_2 iznose $2 \cdot 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 475 \text{ W}$ i $150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 325 \text{ W}$, respektivno. Kako je sada zadovoljen uslov $ps_{a2} < 0$ & $ps_{b2} < 0$ & $ps_{c2} > 0$ (**Slika 5.31**), algoritam pravilno prepoznaje odvod i fazu pogodenu kvarom.

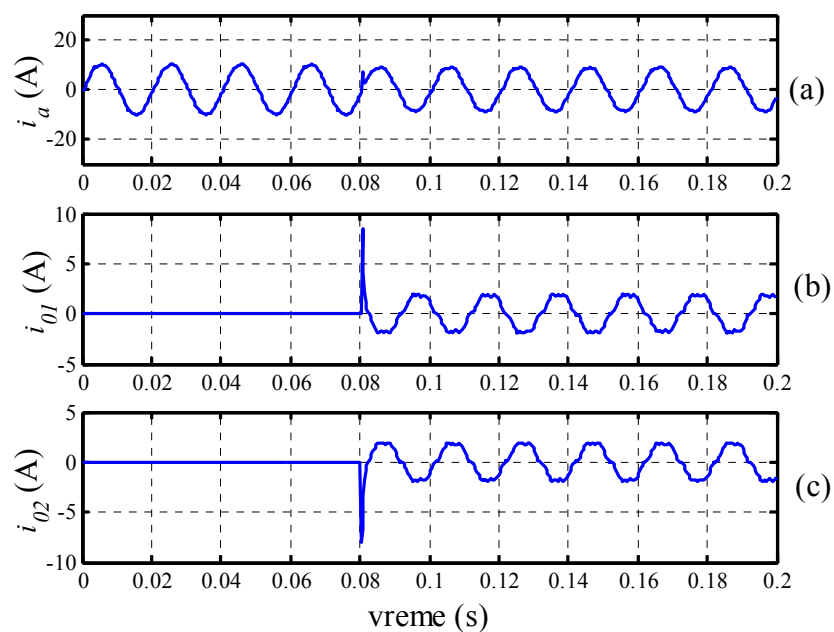
U petom eksperimentu motor M_1 je isključen, aktivna snaga potrošača R_1 povećana je na $3 \cdot 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 625 \text{ W}$, dok je potrošnja R_2 smanjena na 175 W . Na **Slici 5.32** prikazani su snimljeni signali pri zemljospoju faze B odvoda 2. Odgovarajući pokazatelji smera prikazani su na **Slici 5.33**. Pošto važi $ps_{a2} > 0$ & $ps_{b2} < 0$ & $ps_{c2} < 0$, algoritam uspešno prepoznaje kvar faze B na drugom odvodu.



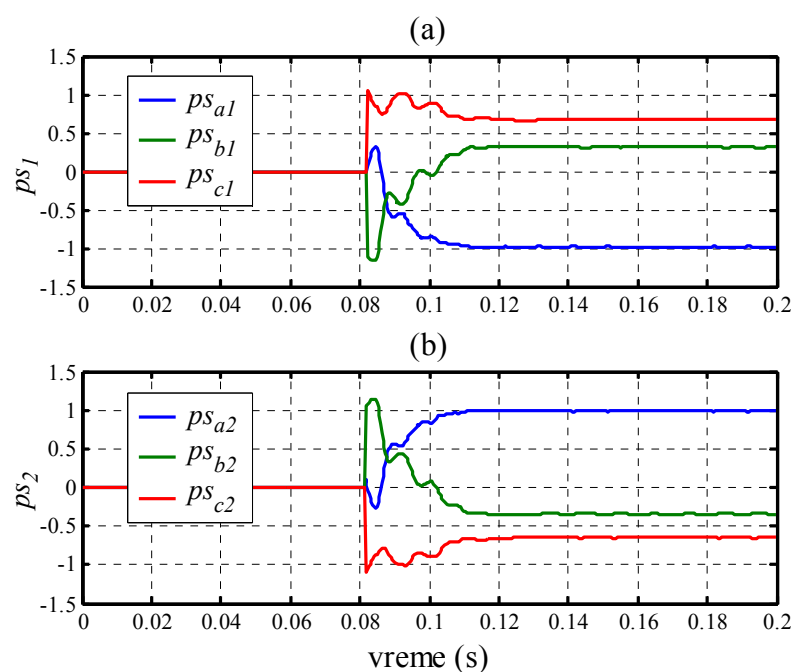
Slika 5.30. Vremenske promene snimljenih signala pri zemljospoju faze A odvoda 2



Slika 5.31. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi A odvoda 2



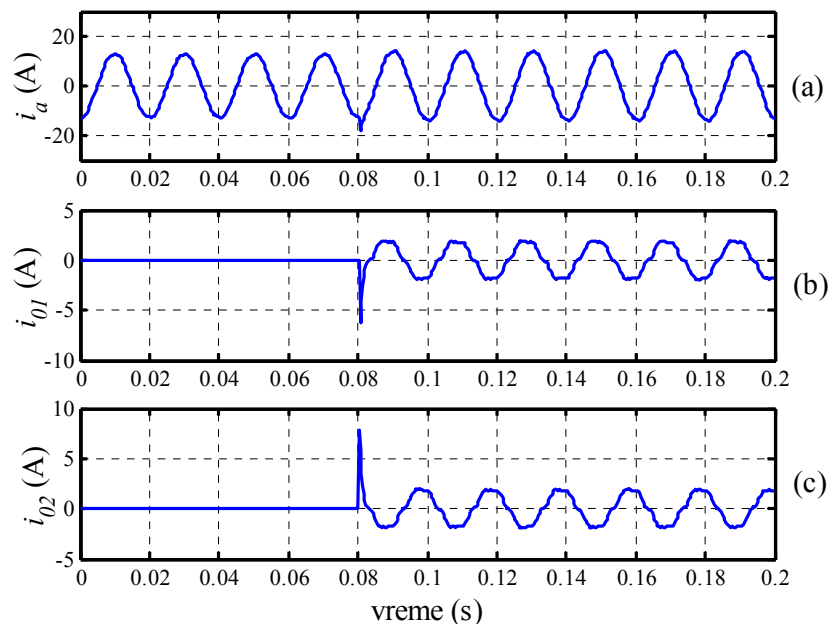
Slika 5.32. Vremenske promene snimljenih signala pri zemljospoju faze B odvoda 2



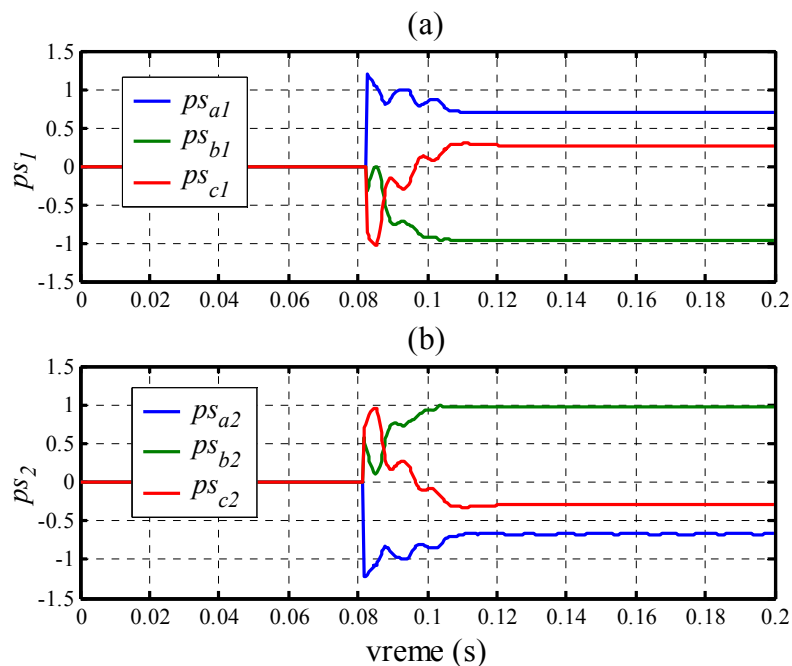
Slika 5.33. Trenutne vrednosti pokazatelja smera za kvar na fazi B odvoda 2

Na kraju je izveden i zemljospoj faze C odvoda 2. Pri tome, motor M_1 je isključen, aktivna snaga potrošača R_1 iznosi $5 \cdot 150 \text{ W} + 175 \text{ W} = 925 \text{ W}$, motor M_2 je u

pogonu, aktivna snaga potrošača R_2 iznosi $150\text{ W} + 175\text{ W} = 325\text{ W}$. Snimljeni signali prikazani su na **Slici 5.34**. Kako je sada zadovoljen uslov $ps_{a2} < 0$ & $ps_{b2} > 0$ & $ps_{c2} < 0$ (**Slika 5.35**), algoritam uspešno prepoznaje kvar faze C na odvodu 2.



Slika 5.34. Vremenske promene snimljenih signala pri zemljospoju faze C odvoda 2



Slika 5.35. Trenutne vrednosti pokazatelja smer za kvar na fazi C odvoda 2

6. ZAKLJUČAK

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljen je nov algoritam za usmereni relej baziran na digitalnoj faznoj komparaciji. Za realizaciju digitalnog faznog komparatora pošlo se od ideje da se ne računa fazni pomeraj između struje i referentnog napona, već energija odnosno integral trenutne snage signala na intervalu dužine polovine osnovne periode napona ili struje. Interval integracije je polovina osnovne periode jer je frekvencija trenutne snage dva puta veća u odnosu na frekvenciju ulaznih signala. Algoritam usmerenog releja koji se bazira na integralu trenutne snage signala ima osobine faznog komparatora.

Podešavanje maksimalne osetljivosti releja vrši se direktno iz naponskog ili strujnog registra. U odnosu na dosadašnja rešenja, ovakvim pristupom eliminisana je potreba za impedansom modela voda Z_m .

Izlaz koji generiše usmereni relej ograničen je na intervalu ± 1 , deljenjem srednje snage signala prividnom snagom. Na taj način omogućeno je jednostavno zadavanje praga reagovanja ili blokiranja releja, koji je različit od nule.

Opisani postupak u proračunima koristi samo jednostavne matematičke operacije (sabiranje, množenje i deljenje) zbog čega u maloj meri koristi procesorsko vreme.

Zbog postojanja viših harmonika i jednosmerne komponente u ulaznim signalima algoritam je u nastavku proširen digitalnim Fourierovim filtrom. To je otvorilo mogućnost regulacije osetljivosti releja korišćenjem sinusne i kosinusne komponente Fourierovog reda.

Brzina reagovanja releja zavisi od režima koji je prethodio kvaru i podešenog praga reagovanja. Kreće se od trenutnog dejstva do 10 ms, što relej svrstava u one sa brzim odzivom. Opisani algoritam može umesto trenutnih vrednosti signala da koristi njihove priraštaje čime se dobija ultrabrzi usmereni relej. Vreme odziva ovog releja je manje od 5 ms i nema zonu neosetljivosti.

U nastavku disertacije izloženo je nekoliko specifičnih primena digitalnog faznog komparatora na realnim problemima. Svaki od algoritama detaljno je testiran serijom računarski generisanih signala.

Kao prva primena predstavljen je algoritam za usmereni relej bez mrtve zone reagovanja. Osnovni nedostatak klasičnih usmerenih zaštita predstavlja postojanje zone neosetljivosti pri bliskim kratkim spojevima. Pri bliskim kvarovima napon na mestu ugradnje releja postaje toliko mali da je praktično neupotrebljiv za ispravan rad releja. Ovaj problem rešen je uvođenjem kašnjenja po naponu koji se koristi u proračunima. Pri tome, posebna pažnja posvećena je problemu sinhronizacije kada stvarna frekvencija sistema odstupa od naznačene. Za sinhronizaciju odbiraka koji ulaze u proračun korišćena je metoda prolaska signala kroz nulu (Zero-crossing).

U nastavku je razvijena trofazna varijanta usmerenog releja baziranog na digitalnom faznom komparatoru. Usmerena funkcija kombinovana je sa prekostrujnom i distantnom zaštitom kako bi bili izvedeni konkretni uslovi reagovanja za sve vrste kratkih spojeva u mreži: jednofazni kratak spoj, dvofazni kratak spoj, dvofazni kratak spoj sa zemljom i trofazni kratak spoj.

Na kraju, predstavljen je i algoritam za usmereni relej bez naponskih ulaza namenjen radu u izolovanim, radijalnim mrežama. Ovaj relej, umesto nultog napona kao referentne veličine, koristi radne struje budući da se iste praktično ne menjaju pri pojavi jednostrukog zemljospoja. Predložena tehnika može se primeniti u sistemima gde naponski signali nisu dostupni i na taj način povećava upotrebljivost klasičnih prekostrujnih releja. Korak dalje u odnosu na klasičnu usmerenu zemljospojnu zaštitu predstavlja mogućnost izolovanja ne samo voda u kvaru već i faze pogođene kvarom. Ovaj algoritam verifikovan je i kroz eksperiment na fizičkom modelu izolovane mreže sa dva izvoda.

7. LITERATURA

- [1] W. Chan, O. P. Malik, X. Yin, D. Chen, Z. Zhang, "Study of wavelet based ultra high speed directional transmission line protection", IEEE Transactions on Power Delivery 18 (2003) 1134 – 1139.
- [2] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, D. Sutanto, "High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and rms conversion", IEEE Transactions on Power Delivery 20 (2005) 2065 – 2071.
- [3] T. S. Sidhu, H. Singh, M.S. Sachdev, "Design, implementation and testing of an artificial neural network based fault direction discriminator for protecting transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery 10 (1995) 697 – 706.
- [4] M. Sanaye-Pasand, O. P. Malik, "High speed transmission system directional protection using an Elman network", IEEE Transactions on Power Delivery 13 (1998) 2065 – 2071.
- [5] M. Chamia S. Liberman, "Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines - development, design and application", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec 1978.
- [6] M. Vitins, "A fundamental concept for high speed relaying", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, January 1981.
- [7] A. T. Johns, M. A. Martin, A. Barker, E. P. Walker, P. A. Crossley, "A new approach to E. H. V. Direction comparison protection using digital signal processing techniques", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, April 1986.
- [8] S. J. Rose, P. A. Crossley, E. P. Walker, A. T. Johns, M. A. Martin, D. Peck, "Disturbance monitoring/fault test evaluation of a directional comparison protection on the UK 400 kV transmission system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988.
- [9] M. M. Mansour, G. W. Swift, "A multi-microprocessor based travelling wave relay – theory and realization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 1, January 1986.

- [10] M. M. Mansour, G. W. Swift, "Design and testing of a multi-microprocessor travelling wave relay", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, October 1986.
- [11] Gabriel Benmouyal, Simon Chano, "Characterization of phase and amplitude comparators in UHS directional relays", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997.
- [12] F. Engler, O.E. Lanz, M. Hanggli, G. Bacchini, "Transient signals and their processing in an ultra high-speed directional relay for EHV/UHV transmission line protection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985.
- [13] P. G. McLaren SM, G. W. Swift SM, Z. Zhang, E. Dirks, R. P. Jayasinghe, I. Fernando, "A new directional element for numerical distance relays", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995.
- [14] Gabriel Benmouyal, Jean Mahseredjian, "A combined directional and faulted phase selector element based on incremental quantities", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001.
- [15] K. S. Prakash, O. P. Malik, G. S. Hope, "Amplitude comparator based algorithm for directional comparison protection of transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989.
- [16] K. S. Prakash, O. P. Malik, G. S. Hope, G. C. Hancock, K. K. Wong, "Laboratory investigation of an amplitude comparator based directional comparison digital protection scheme", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [17] Z. Gan, S. Elangovan, A. C. Liew, "Microcontroller based overcurrent relay and directional overcurrent relay with ground fault protection", Electric Power Systems Research 38 (1996) 11 – 17.
- [18] Milenko B. Djuric, Zeljko R. Djuric, "Frequency measurement of distorted signals using Fourier and zero crossing techniques", Electric Power Systems Research 78 (2008) 1407 – 1415.
- [19] A. Gomez Exposito, J. A. Rosendo Macias, J. L. Ruis Macias, "Discrete Fourier transform computation for digital relaying", International Journal of Electrical Power and Energy Systems 25 (2003) 229 – 233.

- [20] M. S. Sachdev, M. Nagpal, "A recursive least error squares algorithm for power system relaying and measurement applications", *IEEE Transactions on Power Delivery* 6 (1991) 1008 – 1015.
- [21] V. Terzija, M. Djuric, B. Kovacevic, "A new self-tuning algorithm for the frequency estimation of distorted signals", *IEEE Transactions on Power Delivery* 10 (1995) 1779 – 1785.
- [22] V. Terzija, M. Djuric, "Direct estimation of voltage phasor, frequency and its rate of change using Newton's iterative method", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 16 (1994) 423-428.
- [23] M. B. Djuric, V. V. Terzija, "An algorithm for frequency relaying based on the Newton-Raphson method", *Electric Power Systems Research* 31 (1994) 119-124.
- [24] Vladimir V. Terzija, Milenko B. Djuric, Nenad Z. Jeremic, "A recursive Newton type algorithm for digital frequency relaying", *Electric Power Systems Research* 36 (1996) 67-72.
- [25] M. I. Gilany, O.P. Malik, G.S. Hope, "A digital protection technique for parallel transmission lines using a single relay at each end", *Transactions on Power Delivery* 7 (1992) 118 – 125.
- [26] M. I. Gilany, O. P. Malik, G. S. Hope, "A laboratory investigation of a digital protection technique for parallel transmission lines", *IEEE Transactions on Power Delivery* 10 (1995) 187 – 193.
- [27] M. M. Eissa, O. P. Malik, "A new digital directional transverse differential current protection", *IEEE Transactions on Power Delivery* 11 (1996) 1285 – 1291.
- [28] A. K. Pradhan, A. Routray, S. Madhan Gudipalli, "Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current", *IEEE Transactions on Power Delivery* 22 (2007) 2065 – 2071.
- [29] Milenko Đurić, "Relejna zaštita", Beopres, Beograd 2008.
- [30] Z. Stojanovic, M. Djuric, "The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator", *Electric Power Systems Research*, volume 81, issue 2, pages: 377-383, February 2011.

- [31] M. Đurić, Z. Radojević, Ž. Đurišić, V. Terzija, "Algoritmi za digitalne zaštite elektroenergetskih sistema", Beopres, Beograd 2007.
- [32] P. G. McLaren, K. Mustaphi, G. Benmouyal, S. Chano, A. Girgis, C. Henville, M. Kezunovic, L. Kojovic, R. Marttila, M. Meisinger, G. Michel, M. S. Sachdev, V. Skendzic, T. S. Sidhu, D. Tziouvaras, "Software Models for Relays", IEEE Transactions on Power Delivery 16 (2001) 238-45.
- [33] G. Dotlić, "Elektroenergetika kroz standarde, zakone, pravilnike i tehničke preporuke", SMEITS, Beograd 2006.
- [34] G. Pernić, "Sistem za akviziciju podataka i merenje i izrada interfejsnog mernog modula za akviziciju", Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, mentor prof. dr Milenko Đurić, 2003.

8. BIOGRAFIJA AUTORA

Zoran N. Stojanović rođen je 22.07.1979. godine u Požarevcu. Gimnaziju opšteg smera završio je 1998. godine u Svilajncu. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu – Energetski odsek je upisao 1998. godine. Diplomirao je 21.11.2003. godine na istom fakultetu, na smeru Elektroenergetski sistemi, sa prosečnom ocenom 8.86. Po završetku redovnih studija upisao je poslediplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu – smer Visokonaponska oprema i postrojenja, gde je 27.04.2009. godine odbranio magistarsku tezu pod nazivom "Procena stanja metaloksidnog odvodnika prenapona primenom metoda zasnovanih na analizi struje odvođenja pri radnom naponu mreže".

Godinu dana radio je u projektnom birou Energoprojekt-Hidroinženjeringa. Od 2005. godine zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu kao asistent-pripravnik. U zvanje asistenta izabran je 13.10.2009.

Poseduje licence Inženjerske komore Srbije za odgovornog projektanta elektroenergetskih instalacija visokog i srednjeg napona, kao i elektroenergetskih instalacija niskog i srednjeg napona. Učestvovao je u izradi više studija i naučnih projekata, idejnih i glavnih elektro-projekata, kao i tehničkih kontrola. Koautor je jednog udžbenika, jednog rada publikovanog u međunarodnom časopisu, tri rada publikovana u domaćim časopisima, jednog rada publikovanog na međunarodnoj konferenciji i tri rada publikovana na domaćim konferencijama.

Dobitnik je godišnje nagrade Privredne komore Beograda za najbolju magistarsku tezu za 2009 godinu. Dobitnik je nagrade za najzapaženiji rad u STK C4 – Tehničke performanse EES na 30. Savetovanju JUKO CIGRE.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Зоран Н. Стојановић

број уписа _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УСМЕРЕНИ РЕЛЕЈИ БАЗИРАНИ НА
ДИГИТАЛНОМ ФАЗНОМ КОМПРАТОРУ

- 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, 8.5.2012. године

Зоран Стојановић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Зоран Н. Стојановић

Број уписа _____

Студијски програм _____

Наслов рада УСМЕРЕНИ РЕЛЕЈИ БАЗИРАНИ НА ДИГИТАЛНОМ ОБАЗНОМ
КОНПАРАТОРУ

Ментор РЕД. ПРОФ. ДР МИЛЕНКО ЂУРИЋ

Потписани Зоран Н. Стојановић

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, 8.5.2012. Године

Зоран Стојановић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

УСМЕРЕНИ РЕЧЕЈИ БАЗИРАНИ НА
ДИГИТАЛНОМ ФАЗНОМ КОМПАРАТОРУ

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).

У Београду, 8. 5. 2012. Године

Потпис докторанда

Зоран Стојановић