

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Tomislav D. Rajić

NOVI PRISTUP U REALIZACIJI PODUŽNE  
DIFERENCIJALNE ZAŠTITE NADZEMNIH  
VODOVA

doktorska disertacija

Beograd, 2020

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Tomislav D. Rajić

NEW APPROACH IN REALIZATION OF  
LONGITUDINAL DIFFERENTIAL PROTECTION  
OF OVERHEAD LINES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

## **PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

### **Mentor:**

dr Zoran Stojanović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### **Član komisije:**

dr Zlatan Stojković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### **Član komisije:**

dr Žarko Janda, viši naučni saradnik, Elektrotehnički institut Nikola Tesla

### **Član komisije:**

dr Željko Đurišić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### **Član komisije:**

dr Jelisaveta Krstivojević, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### **Datum odbrane:**

# ZAHVALNICA

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru koji mi je svojim idejama, profesionalnim i ljudskim savetima pomogao da savladam prepreke i realizujem ovaj poduhvat. Zahvalan sam mu za izuzetno zalaganje i podršku. Veliko hvala članovima komisije na savetima kojima su doprineli da disertacija dobije na kvalitetu.

Zahvalan sam posebnim osobama u mom životu: roditeljima i devojci. Hvala im na rečima ohrabrenja u svakoj fazi izrade disertacije. Zahvalnost dugujem zbog bezrezervne vere u mene i što ni u jednom momentu nisu dozvolili da odustanem. Hvala im što su uvek bili uz mene i podrškom mi pomogli da prevaziđem mnogobrojne izazove tokom celog puta koji sam izabrao.

Hvala i svim drugim kolegama, prijateljima i članovima šire porodice koji nisu ovde eksplicitno pomenuti, ali su bili podjednako važan deo ovog procesa.

# Novi pristup u realizaciji podužne diferencijalne zaštite nadzemnih vodova

## Rezime

U ovoj doktorskoj disertaciji, predstavljen je nov algoritam za podužnu diferencijalnu zaštitu voda.

Osnovni algoritam za podužnu diferencijalnu zaštitu nadzemnih vodova, ogleda se u tome da se na osnovu struja sa suprotnih strana voda vrši proračun diferencijalne i stabilizacione struje. Na osnovu tih struja, određuje se da li relej ima uslov za reagovanje. Postoji nekoliko negativnih uticaja na selektivan rad diferencijalne zaštite. Najveći problem mogu praviti zasićenja strujnih transformatora. Zasićenje izaziva izobličenje sekundarnih struja, te takve struje nisu verna kopija struje na primarnoj strani. Velike dužine štice vodova, za posledicu imaju velike kapacitivne struje. Posledica toga je povećanje diferencijalne struje i neželjeno reagovanje zaštite. Struja kvara može biti značajno smanjena, ako se pojavi prelazna otpornost na mestu kvara. Time bi i konvergencija algoritma bila sporija, pa bi i odziv releja bio odložen. Izolovano zvezdište i uzemljenje preko aktivne otpornosti, radi ograničenja struje jednofaznog kratkog spoja, imaju isti efekat. Srednjenaponske mreže obično imaju tako realizovano uzemljenje neutralne tačke, što se odražava na rad diferencijalne zaštite.

Cilj istraživanja, bio je da se razvije novi algoritam koji bi prevazišao sve navedene probleme. Novonastali algoritam je predviđen za implementaciju na digitalnoj generaciji releja.

Algoritam zasnovan na faznoj diferencijalnoj zaštiti, radi sa trenutnim vrednostima struja i time se izbegavaju komplikovane računске operacije i obrade signala. Signali se uzimaju sa obe strane voda, kao što je u osnovi podužne diferencijalne zaštite, ali je velika razlika u odnosu na osnovni princip u tome, što se potpuno izbacuje stabilizaciona struja i uvodi nova veličina. Ta nova veličina naziva se indikator smera.

U svakom trenutku odabiranja releju se dovode po jedan odbirak strujnog signala sa leve i sa desne strane voda, za svaku fazu posebno (tri odbirka sa leve strane voda i tri sa desne). Trenutna vrednost diferencijalne struja, računa se kao razlika ovih odbiraka, a trenutna vrednost indikatora smera kao njihov proizvod. Za realizaciju algoritma, neohodno je formirati šest registara, po dva za svaku fazu. U jedan registar, smeštaju se odbirci trenutne vrednosti diferencijalne struje, a u drugi vrednosti indikatora smera struja. Učitavanjem novog odbirka, u registrima se vrši pomeranje, tako da se prvi element registra odbacuje (najstariji odbirak), a novi odbirak zauzima poslednje mesto. Na osnovu tekućeg sadržaja registara vrši se proračun efektivne vrednosti diferencijalne struje i srednje vrednosti indikatora smera.

Korišćenjem efektivnih i srednjih vrednosti umesto trenutnih vrednosti, povećava se sigurnost, odnosno sprečava lažno reagovanje releja zbog smetnji, šumova i prelaznog procesa tokom kvara.

Relej će reagovati, ako su zadovoljena dva uslova. Jedan je da diferencijalna struja bude veća od unapred definisane vrednosti, a drugi je, da indikator smera bude manji ili jednak nuli.

Prvim uslovom, dobija se na brzini reagovanja, jer nema uticaja stabilizacije i relej praktično radi kao prekostrujna zaštita sa definisanom strujom reagovanja. Nepotrebno reagovanje prilikom kvara van štice deonice, izbegnuto je drugim uslovom. Razlog za ovakvo rešenje, leži u činjenici da su struje koje se dovode releju sa različitih strana voda istog smera u režimu bez kvara ili ako je kvar van zone zaštite, odnosno suprotnog smera, ako je kvar unutar zone zaštite. U prvom slučaju, srednja vrednost indikatora smera će imati pozitivnu vrednost, a u drugom slučaju, negativnu.

Minimalna struja reagovanja zavisi od mnogo faktora. Najveći uticaj ima kapacitivna struja odvođenja. Na osnovu podataka o dužini i naponskom nivou voda, računa se minimalna struja prorade releja.

Algoritam za faznu diferencijalnu zaštitu je potpuno neosetljiv na zasićenje strujnih transformatora i daje izuzetno brz odziv. Međutim, i ovaj algoritam, kao i sve druge algoritme za diferencijalnu zaštitu, karakteriše sporija konvergencija pri zemljospojevima u radijalnim mrežama. Ovaj problem se prevazilazi uvođenjem dodatnog modula. Drugi modul, suštinski radi na istom principu, kao i prvi i zasnovan je na diferencijalnoj metodi. Razlika je jedino u tome, što se proračuni vrše sa trenutnim vrednostima nultih komponentni struja. Upotrebom nultog komponentnog sistema struja, povećava se osetljivost i brzina reagovanja releja u mrežama sa malim ili ograničenim strujama jednofaznog kratkog spoja.

Ispitivanje algoritama relejne zaštite, izvršeno je na softverskom modelu nadzemnog voda. Izvršavanje programskih kodova algoritama relejne zaštite se odvija u realnom vremenu simulacije. Proračun, obrada i prikaz rezultata, izvršeni su primenom programskog paketa MATLAB. Proračun prelaznih procesa, izvršen je i pomoću softverskog paketa EMTP/ATP koji je specijalizovan za brze elektromagnetske prelazne procese.

Verifikacija novog algoritma, ostvarena je na fizičkom modelu jednostrukog voda u laboratorijskim uslovima. Takođe, algoritam je testiran na osnovu strujnih signala zapisanih pomoću releja, koji se nalaze u pogonu elektroenergetskog sistema Srbije.

**Ključne reči:** relejna zaštita, digitalni releji, poduzna diferencijalna zaštita, nadzemni vod

**Naučna oblast:** Tehničke nauke - Elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** Elektroenergetski sistemi

**UDK:**

# **New approach in realization of longitudinal differential protection of overhead lines**

## **Abstract**

A new algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines is presented in this doctoral dissertation.

The basic algorithm for longitudinal differential protection of overhead lines uses differential and stabilizing currents. Calculations are based on signals from opposite sides of the line. These currents determine whether the relay has a trip condition. There are several situations that affect the selective operation of differential protection. Saturation of current transformers may be the biggest problem. Saturation causes distortion of the secondary currents and such currents are not a true copy of the current on the primary side. Long lines lead to enlarged capacitive currents. The consequence is an increase in differential current and an undesired protection response. The fault current can be significantly reduced if transient resistance occurs at the fault location. This would also make the algorithm convergence slower and delay the relay response. Isolated star point and grounding via active resistance for the purpose of limiting single-phase short circuits have the same effect. Medium voltage networks typically have a neutral point grounding realized in this way, which is reflected in the operation of the differential protection.

The aim of the research was to develop a new algorithm that would overcome all mentioned problems. This algorithm was designed for implementation on digital relay generation.

The phase differential protection algorithm uses instantaneous current values, thus avoiding complicated computational operations and signal processing. Signals are received from both sides of the line, such as the base of the longitudinal differential protection, but difference with the basic principle is that it completely rejects the stabilizing current and introduces a new size-the direction indicator.

At each moment of selection, one relay of the current signal from the left and right sides of the lines is supplied to the relay, for each phase separately (three selections on the left side of the lines and three on the right). Differential current is calculated as the difference between these deductions and the current value of the direction indicators as their product. For implementation of the algorithm, it is necessary to form six registers, two for each phase. One register stores the current value of the differential current, and in the other stores the value of the current direction indicator. By loading a new sample, a shift is made in the registers, so that the first element of the register is rejected (the oldest sample) and the new one takes the last place. Based on the current contents of the registers, the effective value of the differential current and the mean value of the direction indicator are calculated.

Using effective and intermediate values instead of current values increases safety, that is, prevents the relay from reacting incorrectly due to interference, noise, transient during failure, etc.

The relay will respond if two conditions are met. One if the differential current is over predefined value and the other if the direction indicator is less than or equal to zero.

The first condition is obtained at the response rate, since there is no stabilization effect and the relay practically acts as overcurrent protection with a defined response current. Unnecessary response in the event of a failure outside the protected section is avoided by another condition. The reason for this solution lies in the fact that the currents supplied to the relay from different sides of the line are in the same direction in the faultless mode or if the fault is outside the protection zone, or in the opposite direction if the fault is within the protection zone. In the first case the mean value of the direction indicator will have a positive value and in the second case a negative one.

The minimum response current depends on many factors. The large influence is the capacitive discharge current. Based on length and voltage level data, the minimum relay output current was calculated.

Phase differential protection algorithm is completely insensitive to saturation of current transformers and gives extremely fast response. However, this algorithm, like all other differential protection algorithms, is characterized by slower convergence at earth faults in radial networks. This problem is overcome by introducing an additional module. The second module would essentially work on the same principle as the first and would be based on the differential principle. The only difference would be that the calculations would be made with the current values of zero component currents. Using a zero component system of currents increases the sensitivity and response rate of relays in networks with small or limited currents of single phase short circuits.

Testing of relay protection algorithms was performed on the overhead line software model. Execution of program codes of relay protection algorithms takes place in real-time simulation. The calculation, processing and presentation of the results were performed using the MATLAB software package. The calculation of transient processes was performed using the EMTP / ATP software package.

Verification of the new algorithm was achieved on a single-line physical model under laboratory conditions. Also, the algorithm was tested on the basis of current signals recorded by relays in the power system of Serbia.

**Keywords:** relay protection, digital relay, longitudinal differential protection, overhead line

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

**Specific scientific field:** Power Systems

**UDK:**



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. DIGITALNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA VODOVA.....	4
2.1. Osnovni princip podužne diferencijalne zaštite .....	4
2.2. Faktori koji utiču na preciznost rada digitalne diferencijalne zaštite .....	6
3. ALGORITMI PRIMENJENI U PRAKSI I PUBLIKOVANI U LITERATURI.....	8
3.1. Princip dodatne stabilizacije .....	8
3.2. Princip zasnovan na inverznoj komponenti struje.....	9
3.3. Rešenja koja se pominju u novijim radovima .....	10
3.3.1. Računanje snage .....	10
3.3.2. Alfa oblast .....	10
3.3.3. S transformacija .....	12
3.3.4. Putujući talasi .....	12
4. PREDLOŽENI ALGORITAM.....	14
4.1. Predloženi algoritam - fazna diferencijalna zaštita.....	14
4.2. Predloženi algoritam - nulta diferencijalna zaštita .....	15
4.3. Uticaj kašnjenja u komuikacionom kanalu .....	18
5. MODELOVANJE SISTEMA POTREBNOG ZA SIMULACIJU POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA –MATLAB/SIMULINK .....	19
5.1. Modelovanje releja .....	19
5.2. Strujni transformatori za zaštitu .....	19
5.3. Modelovanje voda naponskog nivoa 110 kV .....	21
5.4. Modelovanje voda naponskog nivoa 35 kV .....	22
6. PRIKAZ REZULTATA SIMULACIJA IZVRŠENIH POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA MATLAB/SIMULINK.....	23
6.1. 110 kV mreža .....	23
6.1.1. Uticaj otpornosti luka, dužine voda i snage izvora .....	41
6.2. 35 kV mreža .....	48

6.3.	Automatsko ponovno uključenje prekidača .....	61
7.	LABORATORIJSKI TESTOVI .....	74
7.1.	Dvostrano napajano mesto kvara .....	77
7.2.	Radijalna mreža.....	88
7.3.	Dodatna testiranja za radijalnu mrežu .....	99
8.	SNIMAK KVARA.....	110
9.	PRIKAZ REZULTATA SIMULACIJA IZVRŠENIH POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA EMTP/ATP .....	117
9.1.	Frekvencijski zavisni parametri .....	117
9.2.	Rezultati simulacija .....	119
10.	ZAKLJUČAK.....	127

# 1. UVOD

Da bi se postigla veća pouzdanost elektroenergetskog sistema, neophodno je postojanje relejne zaštite. Elektroenergetski sistem je podložan kvarovima i havarijama i stoga je potrebno da se neregularan rad, što je moguće brže prepozna i da se element pogođen kvarom isključi. Da bi se pouzdanost elektroenergetskog sistema podigla na viši nivo, brza detekcija kvara od strane relejne zaštite je jedan od njenih najbitnijih zadataka. Zadaci relejne zaštite su da bude selektivna i osetljiva. Osim toga što bi trebalo da prepozna element koji je pogođen kvarom, relejna zaštita mora da prepozna opasna radna stanja koja mogu prerasti u kvar. Isključenjem takvog elementa, sprečava se pojava samog kvara i minimizira šteta koja bi mogla nastati [1-3].

Vodovi su među najvažnijim elementima elektroenergetskog sistema jer omogućavaju prenos električne energije od proizvođača do potrošača [4, 5]. Ukoliko bi kvarovi na vodovima relativno dugo trajali, bila bi ugrožena stabilnost samog elektroenergetskog sistema.

Najjednostavnija zaštita, realizovana u svrhu zaštite vodova je neusmerena prekostrujna zaštita sa definisanim vremenom reagovanja. Ona se ogleda u jednostavnosti, kako samog rada, tako i implementacije. Ukoliko se javi struja veća od podešene vrednosti, relej će isključiti vod. Mana ovakve zaštite je njena primena samo u radijalnim mrežama i povećanje vremena isključenja kvara sa primicanjem mesta kvara izvornoj tački, odnosno jakoj mreži. Drugi nedostatak je prevaziđen prekostrujnom zaštitom sa inverznom  $I-t$  karakteristikom. Logika rada ove zaštite je da se vreme isključenja kvara smanjuje ako se struja kvara povećava. Glavna mana ovakve zaštite je njena neprimenljivost na kratkim deonicama. Prva mana prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja i ovde je na snazi. Da bi se prevazišlo ograničenje upotrebe prekostrujnih zaštita samo u radijalnim mrežama, uvedeni su usmereni prekostrujni releji. Smer struje se određuje na osnovu druge veličine, a to je najčešće napon. Na osnovu toga, može se zaključiti da li se kvar desio sa desne ili sa leve strane releja. Iako je upotreba ovakve zaštite proširena na dvostrano napajane vodove, ipak se ne može obezbediti selektivnost u petljastim, višestranu napajanim mrežama. Takođe, na kratkim vodovima, mala je promena vrednosti struje kvara sa promenom mesta samog kvara [1-3].

Veliki pomak u relejnoj zaštiti, desio se pojavom distantnih releja. Distantni releji se najčešće koriste za zaštitu vodova i poseduju strujne i naponske ulaze, poput usmerenih prekostrujnih releja. Razlika je u tome, što ovi releji na osnovu strujnih i naponskih signala dolaze do informacije o udaljenosti (distanci) kvara od releja. Upotreba je proširena na sve mreže, gde usmerena prekostrujna nije mogla da obezbedi selektivnost. Međutim, tokom eksploatacije, uočeni su negativni uticaji u sistemu koji mogu prouzrokovati neadekvatan rad distantnog releja. Pojava prelazne otpornosti na mestu kvara, može izazvati grešku u proračunu impedanse, pa samim tim i do pogrešnog reagovanja ili nereagovanja. Distantni releji su posebno osetljivi na oscilovanje snage u sistemu. Ukoliko duž deonice postoji međunapajanje, greška distantnog releja je praktično neminovna. Još jedan nedostatak je velika verovatnoća sistemske greške, ako postoji velika skoncentrisana impedansa između dva voda, kao što je transformator. Time se ne mogu na odgovarajući način odrediti zone distantne zaštite [1-3].

Kao posebna zaštita za kratke i važne vodove, realizovana je diferencijalna zaštita. Ova zaštita je samo u početku bila orijentisana i ograničena na kratke vodove zbog neophodne upotrebe pilot vodova. Osnovna ideja je da se releju dovode struje sa leve i desne strane voda i da se na osnovu toga donosi odluka o reagovanju releja. Na osnovu tih struja, vrši se proračun diferencijalne i stabilizacione struje i donosi zaključak, da li postoji kvar i da li je on unutar ili van šticiene deonice.

Štićena deonica je određena položajem strujnih transformatora. Diferencijalna zaštita se odlikuje brzinom i osetljivošću. Upotrebom OPGW užadi i digitalnim prenosom signala sa jedne na drugu stranu voda, primena diferencijalne zaštite se proširila i na dugačke vodove [1-3].

Osnovni algoritam podužne diferencijalne zaštite, poseduje izvesne nedostatke. Najveći problem mogu praviti zasićenja strujnih transformatora [6, 7]. Zasićenje izaziva izobličenje sekundarnih struja. Prilikom kvara van štice deonice, što za posledicu ima povećanje diferencijalne struje, može se izazvati nepotrebno reagovanje zaštite. Neželjeno reagovanje može biti rezultat još nekoliko faktora. Dugački vodovi imaju velike kapacitivne struje odvođenja duž voda i unose osetnu razliku između struja sa jedne i druge strane voda. Posledica toga je povećanje diferencijalne struje. Kvarovi sa prelaznim otpornostima smanjuju struju kvara i utiču na osetljivost diferencijalnog releja. Izolovano zvezdište i uzemljenje preko aktivne otpornosti radi ograničenja struje jednofaznog kratkog spoja imaju isti efekat. Srednjenaponske mreže obično imaju tako realizovano uzemljenje neutralne tačke, što se odražava na rad diferencijalne zaštite [1-3, 8-11].

U novijim radovima, mogu se naći različita rešenja kojima se prevazilaze neki od pomenutih problema na interkonektivnim vodima. Algoritmi za realizaciju diferencijalne zaštite mogu koristiti fazore [12, 13], što podrazumeva komplikovaniju obradu signala, i trenutne vrednosti struja [14]. Pojedini autori su bolju selektivnost postigli u dodatku naponskih ulaza [15-18]. Time se automatski povećava broj analognih priključaka releja. Svoju primenu u diferencijalnoj zaštiti, našla je i nova metoda koja se sve češće pojavljuje u literaturi - S transformacija [19]. Pošto u osnovi obuhvata Furijeovu transformaciju, tu se svakako koriste fazorske veličine. Kvar na vodu može se detektovati izdvajanjem inverzne komponente struje [20] ili posmatranjem promene faznog stava direktne komponente struje [21], što opet ima za cilj određivanje fazora željene veličine. U posebnu kategoriju mogu se svrstati algoritmi zasnovani na putujućim talasima [22, 23]. Primena ovakvog algoritma iziskuje naprednije performanse releja čime mu raste cena. Takođe, nova tehnika koja se koristi jeste primena tzv. alfa oblasti ( $\alpha$  plane) [24] i neuralnih mreža [25].

Kao što se može primetiti, značajan je broj radovi na ovu temu proteklih godina. Postoje radovi gde se komentariše rad diferencijalne zaštite kada je mreža radijalna i gde se daje osvrt na način uzemljenja neutralne tačke [26-29]. Posebno i detaljno biće objašnjena dva algoritma koji su implementirana u praksi. Jedan je realizovan na bazi inverzne komponente struje [30, 31], dok drugi koristi tzv. dodatnu stabilizaciju [32, 33].

Cilj ovog istraživanja bio je da se razvije nov algoritam za podužnu diferencijalnu zaštitu voda koji je primenljiv na digitalnim uređajima. Predviđeno je da algoritam radi sa trenutnim vrednostima struja i da se izbegnu komplikovane računarske operacije i obrade signala [34-36]. Osnovni princip rada diferencijalne zaštite bio bi promenjen u smislu što bi se umesto stabilizacione struje koristila nova veličina-indikator smera. Na osnovu te veličine moglo bi se jednostavno doći do informacije o smerovima struja na oba kraja voda bez upotrebe naponskih signala [34]. Informacija o smerovima dobija se množenjem odbiraka strujnih signala sa oba strane voda, za svaku fazu posebno. Ideja potiče od činjenice da su merene fazne struje na suprotnim krajevima voda istog smera pri stanjima bez kvara ili pri kvaru van štice zone, odnosno različitog smera pri kvaru unutar zone zaštite. Množenjem strujnih signala, u prvom slučaju dobila bi se pozitivna vrednost, a u drugom negativna.

Algoritam se sastoji od dva dela. Jedan deo posmatra trenutne vrednosti faznih struja, a drugi deo je usmeren ka trenutnim vrednostima nultih komponenti struja. Drugi deo suštinski radi na istom principu kao i prvi. Razlika je jedino u tome što se proračuni vrše sa trenutnim vrednostima nultih komponentni struja. Upotrebom nultog komponentnog sistema struja povećava se osetljivost i brzina reagovanja releja u mrežama sa malim ili ograničenim strujama jednofaznog kratkog spoja [37, 38].

Cilj je da se prevaziđu svi problemi koji mogu imati uticaj na diferencijalnu zaštitu vodova. Algoritam je potpuno neosetljiv na zasićenje strujnih transformatora i ima brz odziv u svim situacijama i za sve vrste kvarova unutar zone zaštite.

Ispitivanje algoritama relejne zaštite izvršeno je na modelu nadzemnog voda sa raspodeljenim parametrima, koji je zasnovan na Beržeronovoj metodi putujućih talasa. Trenutne vrednosti električnih signala se određuju numeričkim rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina, koje opisuju stanja korišćenih modela. Vremenske promene veličina od značaja, analizirane su u okviru simulacija sa kontrolisanim izmenama modela sistema. Proračun, obrada i prikaz rezultata, izvršeni su primenom programskih paketa MATLAB i EMTP/ATP [39].

Verifikacija novog algoritma, ostvarena je na fizičkom modelu jednostrukog voda u laboratorijskim uslovima. Algoritam je testiran i na osnovu strujnih signala zapisanih pomoću releja koji se nalaze u pogonu, čime je algoritam verifikovan i pri kvarovima u realnoj mreži.

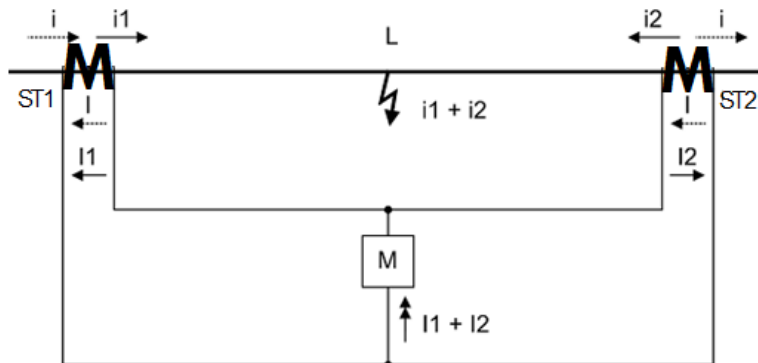
## 2. DIGITALNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA VODOVA

### 2.1. Osnovni princip podužne diferencijalne zaštite

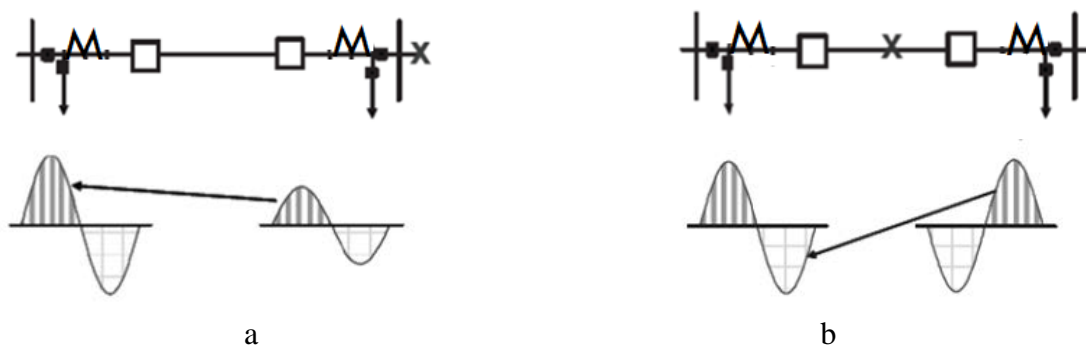
Osnovni princip podužne diferencijalne zaštite jeste obrada strujnih signala iz svake faze sa obe strane voda. Zona zaštite podužne diferencijalne zaštite je određena položajem strujnih transformatora. Zadatak releja je da reaguje ukoliko se kvar desi unutar zone. Sa druge strane, relej ne sme reagovati ako je kvar izvan štice deonice. Na Slici 2.1 može se videti šematski prikaz osnovnog principa po kome funkcioniše diferencijalna zaštita.

Analogna diferencijalna zaštita je iziskivala postojanje pilot vodova pomoću kojih se ostvaruje prenos signala struje sa jedne na drugu stranu voda. Tako bi jedan relej na jednoj strani i drugi relej na drugoj strani imali informaciju o sekundarnim strujama na suprotnim krajevima voda. Pilot vodovi su razlog zašto se podužna diferencijalna zaštita primenjivala jedino na kratkim deonicama.

Ideja u osnovi jeste da se napravi razlika kada je pogon bez kvara ili kada je kvar van zone zaštite odnosno kada se desi kvar unutar zone zaštite. U prvom slučaju, struje na suprotnim krajevima voda su bliske po faznom stavu, što svakako nije slučaj ukoliko se desi kvar na vodu. Tada su struje suprotnih smerova. Ovu promenu smera treba da detektuje podužna diferencijalna zaštita voda. Struje na suprotnim stranama voda u pogonu bez kvara svakako ne bi bile identične zbog mnogo faktora. Jedan od njih je kapacitivno odvođenje struje duž voda. Na Slici 2.2 mogu se uočiti talasni oblici struja koji se mere na različitim krajevima voda pri kvaru van i unutar štice zone [1-3].



Slika 2.1: Osnovni princip rada diferencijalne zaštite voda sa dva kraja



Slika 2.2: Talasni oblici struja koje se mere na suprotnim stranama voda  
a) kvara izvan zone zaštite

b) kvara unutar zone zaštite

Na osnovu struja sa obe strane voda, a za svaku fazu posebno, može se zaključiti da će razlika fazora struja sa različitih krajeva voda biti različita od nule ako je kvar unutar zone zaštite. Ova konstatacija prikazana je izrazom 2.1:

$$\underline{I}_L - \underline{I}_D \neq 0 \quad (2.1)$$

gde su  $\underline{I}_D$  i  $\underline{I}_L$  fazori osnovnog harmonika struja koje se dovode releju sa desne i sa leve strane voda respektivno. Ako bi se kvar desio van zone zaštite važio bi izraz 2.2:

$$\underline{I}_L - \underline{I}_D = 0 \quad (2.2)$$

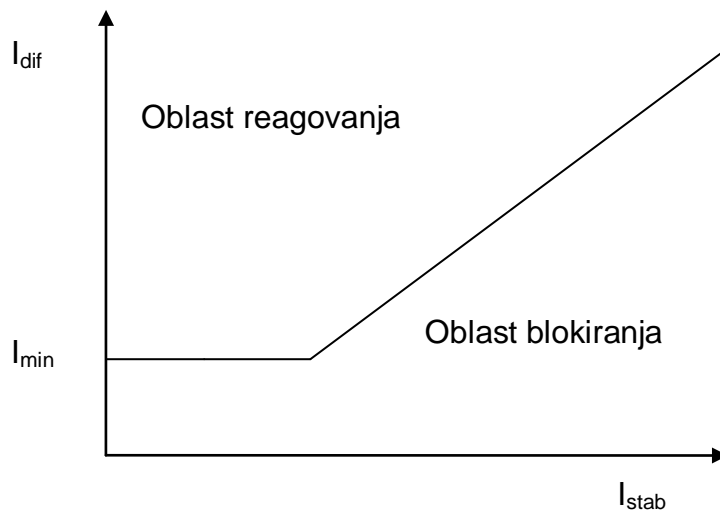
Treba napomenuti da osnovni princip podužne diferencijalne zaštite obuhvata izdvajanje osnovnog harmonika struje kvara. Samo se tako može dobiti informacija o fazorima koji se pominju u izrazima 2.1 i 2.2.

Na osnovu struja sa leve i desne strane voda vrši se proračun dve veličine koje su relevantne za rad podužne diferencijalne zaštite. To su diferencijalna i stabilizaciona struja. Diferencijalna struja ( $I_{dif}$ ) dobija se oduzimanjem fazora osnovnog harmonika sa leve i desne strane voda (izraz 2.3) dok se stabilizaciona struja ( $I_{stab}$ ) dobija kao zbir modula ovih struja (izraz 2.4) [1-3]:

$$I_{dif} = |\underline{I}_L - \underline{I}_D| \quad (2.3)$$

$$I_{stab} = |\underline{I}_L| + |\underline{I}_D| \quad (2.4)$$

Diferencijalna i stabilizaciona struja, u svakom trenutku, određuju radnu tačku. Na osnovu položaja radne tačke donosi se odluka o reagovanju ili nereagovanju zaštite. Na Slici 2.3 prikazana je linija koja razdvaja oblasti reagovanja i nereagovanja (blokiranja) zaštite. Ova linija sastoji se iz dva linearna dela. Prvi deo određuje minimalna struja reagovanja ( $I_{min}$ ). Ovo je zapravo prag osetljivosti i mora biti veći od struje debalansa koja je posledica toga da diferencijalna struja nije idealno jednaka nuli u realnim uslovima. Minimalna struja reagovanja se obično podešava na 20% do 50% nazivne sekundarne struje strujnih transformatora.



Slika 2.3: Proradna karakteristika releja

Drugi deo karakteristike postavljen je pod određenim uglom u odnosu na horizontalnu osu. Ovaj deo se dodaje da bi se izbeglo neželjeno reagovanje zaštite pri kvarovima van šticiene zone. U takvim situacijama, struje su velike, pa se povećava greška strujnih transformatora. To može izazvati pojavu velike struje debalansa.

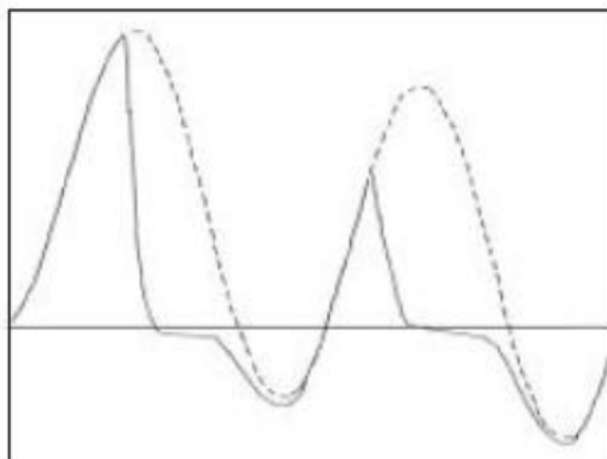
## 2.2. Faktori koji utiču na preciznost rada digitalne diferencijalne zaštite

U nastavku će biti reči o nekoliko faktora koji mogu imati uticaj na selektivan rad diferencijalne zaštite.

Glavni izvor mernih grešaka je zasićenje strujnih transformatora za zaštitu. Pri kvarovima unutar zone zaštite, zasićenje ne predstavlja veliki problem. Problem se može javiti ako se zasićenje jezgra strujnih transformatora za zaštitu pojavi prilikom kvara van štice deonice [6, 7].

Zasićenje uzrokuje preslikavanje struja na sekundarnu stranu koje nisu verne kopije primarnih struja. Na Slici 2.4 može se videti izobličenje sekundarne struje kao posledica zasićenja. U takvim uslovima, diferencijalna struja može dostići veliku vrednost i izazvati neselaktivno reagovanje releja. Upotreba klasične stabilizacije nije dovoljna da bi se izbeglo nepotrebno reagovanje zaštite ako dođe do zasićenja strujnih transformatora prilikom kvara van štice deonice.

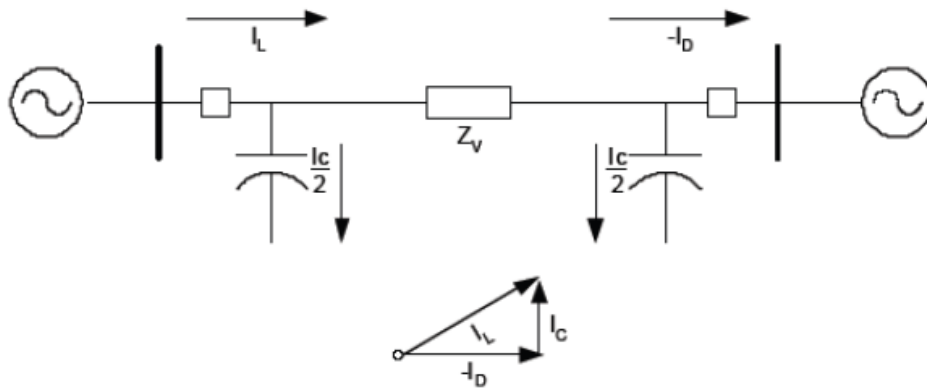
Strujni transformatori mogu predstavljati problem i u režimima bez kvara ukoliko im se razlikuju struje magnećenja. Pri normalnim simetričnim režimima strujni transformatori su daleko od granice zasićenja, te su struje magnećenja i struja debalansa male. Struja debalansa nastaje zbog različitih struja magnećenja strujnih transformatora. Da bi se struja debalansa ograničila potrebno je da strujni transformatori rade na nezasićenom delu karakteristike i da imaju jednake karakteristike magnećenja.



Slika 2.4: Primarna (isprekidana linija) i sekundarna struja svedena na primar (puna linija) pri zasićenju strujnih mernih transformatora

Sledeći fenomen koji ima veliki uticaj na eksploataciju podužne diferencijalne zaštite je kapacitivna struja odvođenja duž voda. Ona je posledica kapacitivnosti faza voda prema zemlji ali i kapacitivnosti jedne faze prema drugim fazama. Ove struje su uzrok razlike struja na krajevima voda. Uticaj ovih struja je veći kod kablova jer je tu i kapacitivnost veća. U režimima bez kvara, kapacitivne struje se mogu smatrati konstantnim jer zavise samo od napona i kapacitivnosti. Na Slici 2.5 objašnjena je pojava kapacitivne struje voda. Sa slike se jasno vidi zašto struje na različitim stranama voda (struja sa leve strane  $I_L$  i struja sa desne strane voda  $I_D$ ) nisu identične ni u normalnom radnom režimu. Što je veća dužina voda, veća je i kapacitivna struja odvođenja što ima direktan uticaj na podužnu diferencijalnu zaštitu [4-5, 12].





Slika 2.5: Kapacitivna struja voda

Prelazna otpornost na mestu kvara takođe ima negativan uticaj na rad podužne diferencijalne zaštite. Pojavom prelazne otpornosti, smanjuje se struja kvara. Male vrednosti struje kvara vode ka sporijoj konvergenciji algoritma ili čak ka nereagovanju zaštite. U novijim radovima, velika pažnja se posvećuje ovom fenomenu i teži se da se ona prevaziđe [13-15].

Slična situacija je i sa načinom uzemljenja neutralne tačke mreže. Retko gde se komentariše rad diferencijalne zaštite kada je mreža radijalna [26-29]. Osetljivost klasičnog principa diferencijalne zaštite u radijalnim mrežama dovodi se u pitanje pri specijalnim situacijama kada su struje kvara izrazito male ili ograničene. Zemljospojevi za posledicu imaju male vrednosti struja i napona sa strane potrošnje što može prouzrokovati spor odziv releja ili čak njegovo nereagovanje. Algoritmi koji koriste i naponske ulaze [15-18], ne mogu biti previše pouzdani u ovakvim uslovima jer naponi sa strane potrošnje mogu imati male vrednosti. Drugi algoritmi [12, 13, 20-25] iziskuju komplikovaniju obradu signala što ima direktan uticaj na brzinu konvergencije ali i na cenu releja.

### 3. ALGORITMI PRIMENJENI U PRAKSI I PUBLIKOVANI U LITERATURI

U ovom poglavlju biće objašnjeni algoritmi koji su našli svoju primenu u praksi i koji se pominju u literaturi. Detaljno će biti objašnjeni principi koje koriste renomirani proizvođači relejne zaštite.

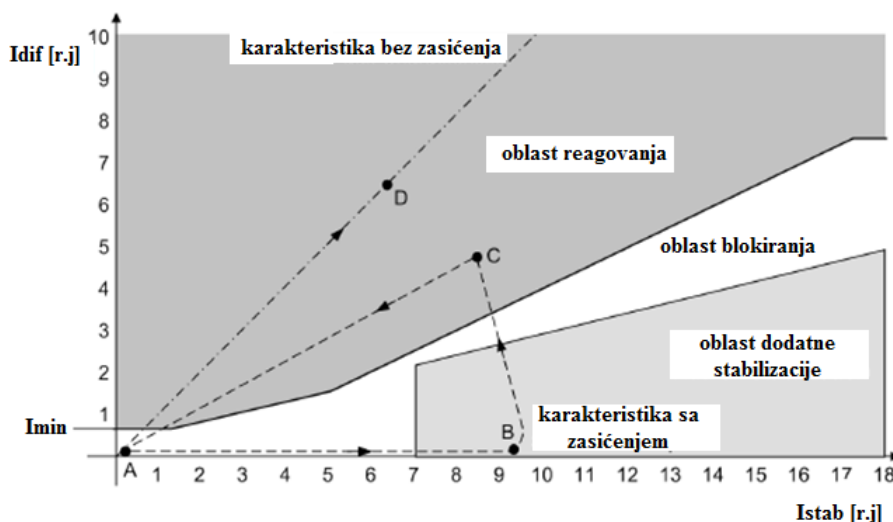
Najveća pažnja posvećuje se problemu zasićenja strujnih transformatora za zaštitu. Problem kod klasičnog algoritma za poduznu diferencijalnu zaštitu može nastati ukoliko dođe do zasićenja strujnih transformatora prilikom kvara van štice deonice. Posledica ove pojave jeste nepotrebno reagovanje relejne zaštite. Vodeći proizvođači relejne zaštite imaju različite metode za prevazilaženje ovog problema. U nastavku će biti objašnjeni principi zasnovani na dodatnoj stabilizaciji i inverznoj komponenti struje.

#### 3.1. Princip dodatne stabilizacije

Kompanija SIEMENS koristi klasičnu logiku za diferencijalnu zaštitu dopunjenu principom dodatne stabilizacije.

Za proračun stabilizacione i diferencijalne struje, za svaku fazu posebno, koriste se izrazi (2.3) i (2.4) [3, 32-33]:

Na Slici 3.1 prikazane su karakteristične radne tačke u zavisnosti od mesta kvara (u smislu da li je kvar unutar ili van zone zaštite) [32]. Radnu tačku definišu efektivne vrednosti diferencijalne i stabilizacione struje releja. Tačka A odgovara radnom režimu bez kvara. Ako se kvar desi unutar zone zaštite i to, recimo, na sredini voda, diferencijalna i stabilizaciona struja praktično postaju jednake. Nova radna tačka nalaziće se na liniji koja je postavljena pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na apscisnu osu. Ova linija je prikazana kao crta-tačka-crta, a nova radna tačka je obeležena slovom D. Ovakav scenario dovodi do pravilnog reagovanja releja [3, 32].



Slika 3.1: Karakteristika reagovanja diferencijalne zaštite sa primenom dodatne stabilizacije [32].

Na Slici 3.1, isprekidnom linijom, prikazano je kretanje radne tačke tokom kvara van zone zaštite, pri kome dolazi do zasićenja strujnih transformatora. Ubrzo nakon nastanka kvara radna tačka se premešta u položaj označen sa B. Tek nakon toga, radna tačka pređe u oblast reagovanja

releja, na poziciju označenu sa C. Relej detektuje ovu trajektoriju i blokira ukoliko ustanovi da je radna tačka najpre zašla u oblast dodatne stabilizacije, pa tek onda u oblast reagovanja zaštite. Blokada releja ukida se posle podešene vremenske zadržke (nekoliko osnovnih perioda) ili kada merena diferencijalna struja padne ispod struje prorade [3, 32].

Problem se može javiti kada se desi zasićenje strujnih transformatora i naizmeničnom komponentom struje prilikom kvara van zone zaštite. To može biti uzrok nepotrebnog reagovanja releja, jer blokada releja prestane nakon podešene vremenske zadržke, a relej ostaje pobuđen zbog zasićenja naizmeničnom komponentom struje kvara.

### 3.2. Princip zasnovan na inverznoj komponenti struje

Princip zasnovan na inverznoj komponenti struje, kao dopuna klasičnom pristupu diferencijalne zaštite, u cilju sprečavanja nepotrebnog reagovanja pri kvarovima van zone zaštite, koriste releji firme ABB.

Diferencijalna struja računa se prema izrazu (2.3), za svaku fazu posebno, dok se za univerzalnu stabilizacionu struju (stabilizaciona struja za sve faze) uzima maksimalna vrednost svih faznih struja koje se dovode releju sa leve i desne strane voda [30, 31]:

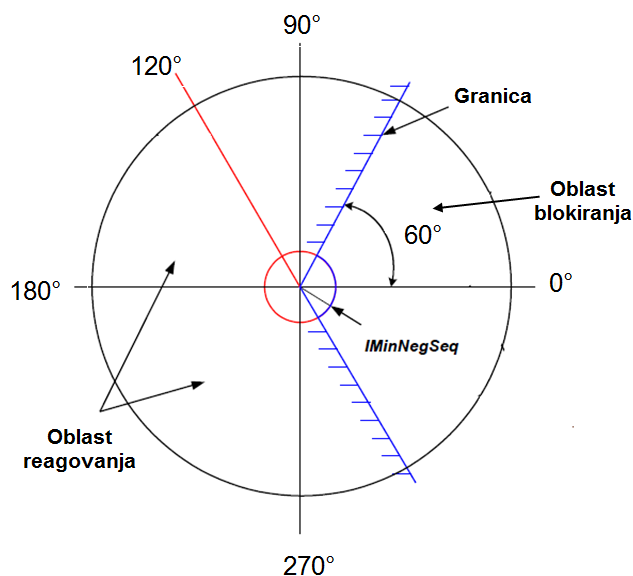
$$I_{stab} = \max \left\{ \underline{I}_L^A, \underline{I}_D^A, \underline{I}_L^B, \underline{I}_D^B, \underline{I}_L^C, \underline{I}_D^C \right\} \quad (3.1)$$

Princip zasnovan na inverznoj komponenti struje temelji se na pretpostavci da se izdvajanjem ove komponente može utvrditi da li je kvar unutar ili izvan štice deonice.

Relej paralelno vrši više provera. Prva provera je klasična diferencijalna zaštita koja radi na principu proračuna diferencijalne i stabilizacione struje. Druga analiza je izdvajanje drugog i trećeg harmonika ali ova funkcija je u većini slučajeva neaktivna. Treća i najbitnija analiza sa stanovišta nepotrebnog reagovanja releja jeste zasnovana na inverznoj komponenti struje. Ideja je da se na osnovu tri fazne struje na oba kraja voda zasebno izdvoje fazori inverznih komponenti. Ako je razlika faznih stavova ove dve struje veća od  $60^\circ$  smatra se da je kvar unutar zone zaštite i šalje se signal za aktiviranje prekidača. U suprotnom, signal neće biti poslat. Da bi se sprečilo donošenje pogrešnog zaključka, moduli inverznih komponenti struja moraju biti veći od minimalne podešene vrednosti. Obično minimalna vrednost iznosi 4% od bazne vrednosti ( $I_{bazno}$ ). Za baznu vrednost se uzima naznačena sekundarna struja strujnih transformatora. Ako je  $I_{stab}$  veće od 150% bazne vrednosti, onda se minimalna vrednosti računa kao zbir  $0,04 \times I_{bazno} + 0,1 \times I_{stab}$ . Ako je makar jedna inverzna komponenta po modulu manja od podešene, relej ne uzima u obzir treću analizu. Relej raguje ako rezultati svih analiza ukazuju da je kvar unutar zone zaštite, što ponekad dovodi do dodatnog kašnjenja u reagovanju od 6 ms [30, 31].

Relej na osnovu fazora inverzne komponente struje, za svaku fazu posebno, određuje da li je kvar unutar ili van zone zaštite. Upoređuju se fazori na oba kraja voda. Ako je fazni stav između ta dva fazora manji od  $60^\circ$ , onda se smatra da je kvar van zone zaštite i relej blokira. Ukoliko je fazni pomeraj veći od  $60^\circ$ , smatra se da je kvar unutar zone i relej reaguje. Obe komponente inverzne struje moraju biti veće od minimalne vrednosti ( $I_{MinNegSeq}$ ). Ukoliko to nije slučaj, smatra se da je ugao između fazora inverznih komponenti struja na suprotnim krajevima voda  $120^\circ$  i ova provera po inverznoj komponenti struje se ne uzima u obzir prilikom donošenja konačne odluke o reagovanja releja. Na Slici 3.2 prikazane su obalsit reagovanja i nereagovanja (blokiranja) relaja.

S obzirom da je metod zasnovan na inverznoj komponenti struje, može se javiti bespotrebno reagovanje zaštite prilikom trofaznog kratkog spoja van štice zone ukoliko je prisutno jako zasićenje strujnih transformatora jer se može pojaviti greška u određivanju inverzne komponente struje.



Slika 3.2: Oblasti reagovanja i blokiranja releja za inverznu komponentu struje

### 3.3. Rešenja koja se pominju u novijim radovima

Pojavom OPGW užadi, komunikacija između releja na suprotnim krajevima voda je olakšana. Do sada je primena diferencijalne zaštite bila ograničena na kratke vodove zbog korišćenja pilot vodova. Sada i dugački vodovi mogu biti zaštićeni brzom i pouzdanom zaštitom kakva je podužna strujna diferencijalna zaštita. Ova zaštita je često predmet interesovanja velikog broja autora. U literaturi se opisuju različita i veoma zanimljiva rešenja. Ovde će biti navedena neka od njih.

Najčešće su novi algoritmi zasnovani sledećim principima:

- Računanje snage [16–18]
- Alfa oblast [34]
- S transformacija [19]
- Putujući talasi [22, 23]

#### 3.3.1. Računanje snage

Pored klasičnog pristupa, koji koristi isključivo strujne signale, postoje rešenja koji zahtevaju i naponske ulaze [16–18]. Kapacitivna struja odvođenja tretira se kao glavni uzrok nepravilnog rada diferencijalnog releja u mnogim radovima. Ova struja se može kompenzovati principom diferencijalne snage. Ovaj metod predlaže merenje struja i napona na oba kraja voda. Originalni diferencijalni princip se zadržava. Upoređuju se dve vrednosti, reagovanja i blokiranja, ali um

Može se javiti pogrešno reagovanje releja prilikom kvarova sa prelaznom otpornošću, što je glavni nedostatak pomenutog principa.

#### 3.3.2. Alfa oblast

Princip zaštite vodova, zasnovan na alfa oblasti, svodi se na poređenje struja i njihovih faznih stavova sa obe strane voda. Na osnovu ovih vrednosti, formira se novi vektor  $\underline{r}$  (njegov moduo i fazni stav). Veličina  $\underline{r}$  određuje se prema sledećoj formuli:

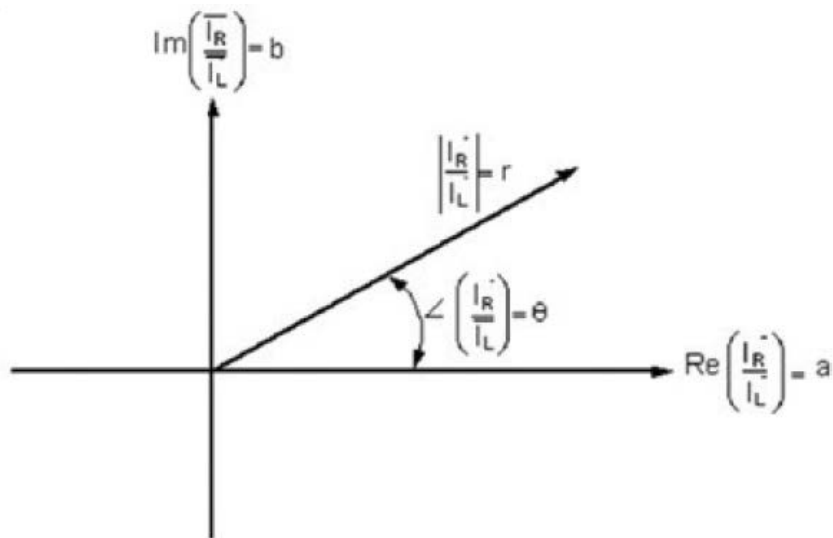
$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_D}{\underline{I}_L} \quad (3.2)$$

gde su:

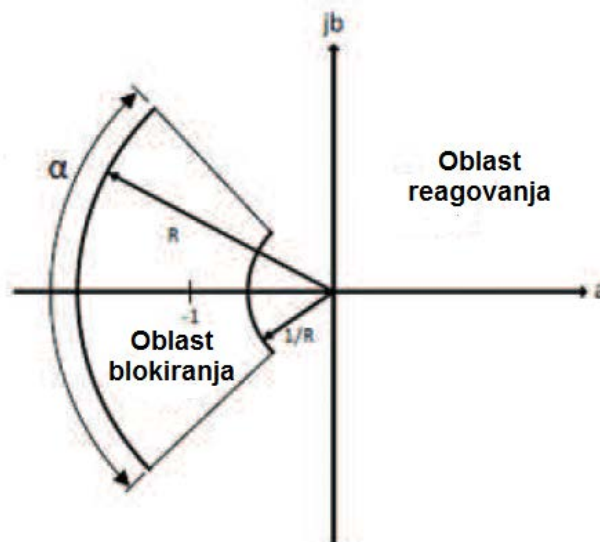
$\underline{I}_D$  – Fazor fazne struje sa desne strane voda,

$\underline{I}_L$  – Fazor fazne struje sa leve strane voda,

Na Slici 3.3 prikazan je vektor  $\underline{r}$  u R-X ravni. Oblast reagovanja ( $\alpha$ ) u istoj ravni, obeležena je na Slici 3.4 [34].



Slika 3.3: Vektor  $\underline{r}$  u R-X ravni



Slika 3.4: Oblast reagovanja ( $\alpha$ ) i oblast blokiranja u R-X ravni

Alfa oblast određena je podešavanjem ugla  $\alpha$  [°] i radijusa  $R$ . Prvi parametar uvažava grešku strujnog transformatora, a drugi ima uticaj na osetljivost.

Kao i u prethodnom slučaju, kvarovi sa prelaznom otpornošću, mogu biti uzrok greške. Dugački vodovi takođe nisu pogodni za ovakav način šticećenja, zbog velike kapacitivne struje odvođenja.

### 3.3.3. S transformacija

U poslednje vreme, popularna je primena S-transformacije. U pitanju je nova brza *Furijeova* diskretna transformacija. Na brz način se dobija informacija o fazorima struja i to ovu transformaciju čini primenljivom u relejnoj zaštiti. Ova transformacija je kombinacija *Furijeove* transformacije i *wavelet* transformacije. U osnovi je zadržan bazični princip diferencijalne zaštite (proračun diferencijalne i stabilizacione struje) [19].

S-transformacija analognog  $x(t)$  signala predstavlja se sledećim izrazom:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \left\{ \frac{|f|}{\alpha \sqrt{2 \cdot \pi}} \right\} \cdot e^{\left( \frac{-f^2 \cdot (\tau-t)^2}{2 \cdot \alpha^2} \right)} \cdot e^{(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)} dt \quad (3.3)$$

gde je:

$f$  – frekvencija,

$t$  – vreme

$\tau$  – parametar koji definiše poziciju Gausovog prozora podataka na vremenskoj osi

Koeficijent  $\alpha$  definiše vremensku i frekvencijsku rezoluciju transformacije. Manja vrednost ovog koeficijenta znači veću vremensku rezoluciju. Na osnovu rada [19], zaključuje se da je prihvatljiva vrednost za ovaj koeficijent u opsegu  $0,2 \leq \alpha \leq 1$ .

Takođe važi i izraz:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau = X(f) \quad (3.4)$$

gde je  $X(f)$  je fazor vektora dobijen *Furijeovom* transformacijom.

Diskretna verzija S-transformacije je prikazana izrazom 3.5:

$$S(i, n) = \sum_{m=0}^{N-1} X(m+n) \cdot e^{\left( \frac{-2 \cdot \pi^2 \cdot m^2 \cdot \alpha^2}{n^2} \right)} \cdot e^{(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot m \cdot i)} \quad (3.5)$$

i važi:

$i=1 \dots N-1$ ;

$n=0, 1 \dots N-1$ .

Ovde  $i$  i  $n$  predstavljaju vremenski odbirak i korak promene frekvencije respektivno, dok se  $X(n)$  određuje kao:

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot k)} \quad (3.6)$$

Na ovaj način se određuju fazori struja na suprotnim stranama voda. Na osnovu njih se vrši proračun diferencijalne i stabilizacione struje i donosi odluka o reagovanju odnosno blokiranju releja.

### 3.3.4. Putujući talasi

Razvojem uređaja i tehnološkim napretkom, otvorila su se nove opcije u relejnoj zaštiti sa stanovišta algoritama za detekciju kvarova. Brže odabiranje u analogno-digitalnoj konverziji i veća osetljivost uređaja, otvorilo je prostor za nova rešenja. Metoda zasnovana na putujućim talasima (*traveling wave method* – TW) svakako je najnovija metoda koja se pominje u radovima. Ova

metoda ne bi mogla biti primenjena bez upotrebe savremene opreme koja dodatno povećava cenu releja kao uređaja. TW metoda koristi pojavu visokofrekventnih talasa koji se generišu na mestu kvara. Primena TW metode za detekciju kvara zahteva upotrebu: osetljivog uređaja za merenje, filtera i pojačavača. Merenje treba da se obavlja u mikrosekundnom području. Primena ove metode je olakšana uvođenjem komunikacije preko satelita. Sve u svemu, zahteva se specijalno brza i osetljiva tehnologija što znači da trenutno implementirani releji nisu u stanju da omoguće primenu ovakvog algoritma [22-23].

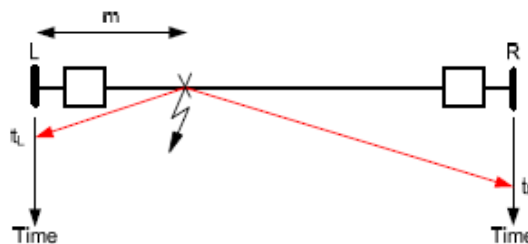
U nastavku je objašnjen teorijski osnov za ovakvo razmišljanje.

Prilikom pojave kvara unutar zaštitne zone, odnosno na vodu, na samom mestu kratkog spoja, generiše se strujni talas visoke frekvencije koji se prostire u oba smera, ka krajevima voda (Slika 3.5).



Slika 3.5: Prostiranje visokofrekventnog talasa po vodu prilikom nastanka kvara

Ovakvi talasi se detektuju na oba kraja voda i samim tim se ima informacija o mestu kvara. Rastojanje releja do mesta kvara se određuje pod pretpostavkom da se talas prostire brzinom svetlosti. Na Slici 3.6 prikazano je određivanje mesta kvara na osnovu TW metode.



Slika 3.6: Određivanje mesta kvara na osnovu TW metode

Relej sa leve strane voda, detektovao kvar nakon vremena  $t_L$  dok će relej sa desne strane voda isti kvar detektovati nakon vremena  $t_D$  od nastanka istog. Toliko vremena treba da dva talasa, koji se kreću po vodu u različitim smerovima, stignu do releja na suprotnim stranama voda. Oba releja koriste zajedničko, apsolutno vreme, što ne predstavlja problem upotrebom satelita i GPS (*Global Position System*).

Udaljenost mesta kvara od releja na levom kraju voda, izračunava se prema izrazu 3.7:

$$m = \frac{1}{2} \cdot [l + (t_L - t_D) \cdot c] \quad (3.7)$$

gde su:

$l$  – dužina štice vodovoda;

$t_L$  – vreme dolaska visokofrekventnog talasa do levog kraja voda;

$t_D$  – vreme dolaska visokofrekventnog talasa do desnog kraja voda;

$c$  – brzina prostiranja talasa po vodu, odnosno brzina svetlosti.

## 4. PREDLOŽENI ALGORITAM

Predloženi, novi algoritam se sastoji od dva dela. Jedan deo posmatra trenutne vrednosti faznih struja, a drugi deo je usmeren ka trenutnim vrednostima nultih komponenti struja. Drugi deo suštinski radi na istom principu kao i prvi. Razlika je jedino u tome što se proračuni vrše sa trenutnim vrednostima nultih komponentni struja. Upotrebom nultog komponentnog sistema struja povećava se osetljivost i brzina reagovanja releja u mrežama sa malim ili ograničenim strujama jednofaznog kratkog spoja.

### 4.1. Predloženi algoritam - fazna diferencijalna zaštita

Novi pristup za realizaciju podužne diferencijalne zaštite voda koristi dve veličine: efektivna vredost diferencijalne struje ( $I_{dif}$ ) i indikator smera struja ( $IND$ ).

U svakom trenutku odabiranja releju se dovode po jedan odbirak strujnog signala sa leve ( $i_L$ ) i sa desne strane voda ( $i_D$ ). Trenutna vrednost diferencijalne struja ( $i_{dif}$ ) računa se kao razlika ovih odbiraka, a trenutna vrednost indikatora smera ( $ind$ ) kao njihov proizvod, kako je i prikazano izrazima (4.1) i (4.2) [37]:

$$i_{dif} = i_L - i_D \quad (4.1)$$

$$ind = i_L \times i_D \quad (4.2)$$

Za realizaciju algoritma, neohodno je formirati šest registara, po dva za svaku fazu. U jedan registar smeštaju se odbirci trenutne vrednosti diferencijalne struje, a u drugi vrednosti indikatora smera struja. Učitavanjem novog odbirka, u registrima se vrši pomeranje, tako da se prvi element registra odbacuje (najstariji odbirak), a novi odbirak zauzima poslednje mesto. Na osnovu tekućeg sadržaja registara vrši se proračun efektivne vrednosti diferencijalne struje i srednje vrednosti indikatora smera. Proračun ovih veličina prikazan je izrazima (4.3) i (4.4) [37]:

$$I_{dif} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m i_{dif}(n)^2}{m}} \quad (4.3)$$

$$IND = \frac{\sum_{n=1}^m ind(n)}{m} \quad (4.4)$$

gde su:

$i_{dif}$ -  $n$ -ti odbirak diferencijalne struje,

$ind$ -  $n$ -ti odbirak indikatora smera struje,

$m$  - broj odbiraka u osnovnoj periodi signala  $T$ , odnosno prozoru podataka ( $m=T/T_{od}$ ),

$T_{od}$ - perioda odabiranja.

Korišćenjem efektivnine i srednje vrednosti umesto trenutnih vrednosti, povećava se sigurnost, odnosno sprečava lažno reagovanje releja zbog smetnji, šumova, prelaznog procesa tokom kvara, itd.

Relej će reagovati ako su zadovoljena oba uslova prikazana izrazima (4.5) i (4.6) [37]:

$$I_{dif} > I_{min} \quad (4.5)$$



$$IND \leq 0 \quad (4.6)$$

Uslov prikazan izrazom (4.5) znači da efektivna vrednost diferencijalne struje mora biti veća od struje kojom je definisan najniži prag reagovanja releja. Time se dobija na brzini reagovanja jer relej praktično radi kao prekostrujna zaštita sa definisanom strujom reagovanja. Nepotrebno reagovanje prilikom kvara van štice deonice izbegnito je uslovom (4.6). Razlog za ovakvo rešenje leži u činjenici da su struje koje se dovode releju sa različitih strana voda istog smera u režimu bez kvara ili ako je kvar van zone zaštite, odnosno suprotnog smera ako je kvar unutar zone zaštite. U prvom slučaju  $IND$  će imati pozitivnu vrednost, a u drugom slučaju negativnu. U izrazu (4.6) koristi se znak  $\leq$  za slučaj da je struja koja se dovodi releju sa jedne strane voda jednaka nuli, što odgovara režimu praznog hoda voda.

Minimalna struja reagovanja ( $I_{min}$ ) zavisi od mnogo faktora. Najveći uticaj ima kapacitivna struja odvođenja. Kapacitivna struja odvođenja računa se na osnovu pogonske kapacitivnosti [32, 37]:

$$I_c = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{3}} \times U_n \times f_n \times C' \times L \times 10^{-6} \quad (4.7)$$

gde su:

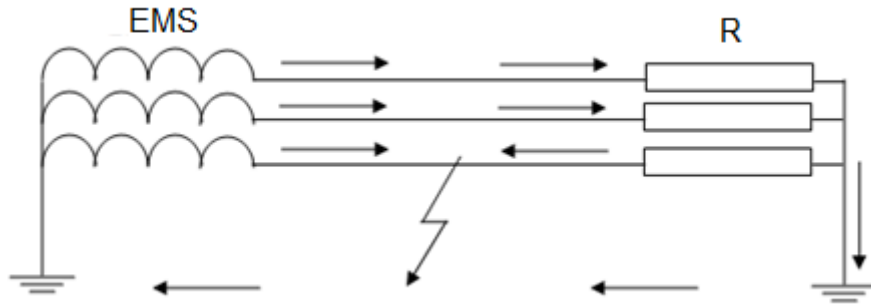
- $I_c$ -kapacitivna struja odvođenja u A (na primarnoj strani),
- $U_n$ -nominalni napon mreže u kV,
- $f_n$ - nominalna frekvencija u Hz,
- $C'$ -podužna pogonska kapacitivnost u nF/km,
- $L$ - dužina voda u km.

Ovim se obezbeđuje dovoljan prag reagovanja kojim se eliminiše negativan uticaj postojanja kapacitivne struje odvođenja duž voda.

Navedeni algoritam za faznu diferencijalnu zaštitu radi sa trenutnim vrednostima struja i nema potrebe za komplikovanom obradom signala. Pri tome, neosetljiv je na zasićenje strujnih transformatora i daje izuzetno brz odziv. Međutim, i ovaj algoritam, kao i sve druge algoritme za diferencijalnu zaštitu, karakteriše sporija konvergencija pri zemljospojevima u radijalnim mrežama. Algoritam za nultu diferencijalnu zaštitu ima brži odziv za kvarove sa zemljom i predstavlja dopunu algoritma za faznu diferencijalnu zaštitu.

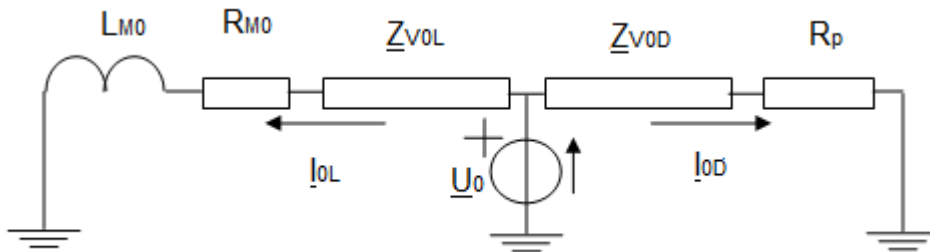
## 4.2. Predloženi algoritam - nulta diferencijalna zaštita

Prilikom kvara sa zemljom, u radijalnoj mreži, vrednosti struja u fazama zavise od načina uzemljenja neutralne tačke. Struja u fazi koja je pogođena kvarom, sa strane potrošnje, može biti značajno smanjena. To prouzrokuje sporu konvergenciju algoritama ili pak nereagovanje fazne diferencijalne zaštite. Na Slici 4.1 prikazana je raspodela faznih struja prilikom jednofaznog kvara u radijalnoj mreži (pretpostavljeno je da je potrošnja čisto rezistivna). Prikazan je slučaj koji je opštiji. Ideja je da se objasni raspodela struja po fazama prilikom kvara. Inače, u praksi se zvezdište potrošnje ne uzemljuje u praksi. Kada je zvezdište neuzemljeno, nulta struja sa strane potrošnje ne postoji i struja u fazi sa kvarom je jednaka zbiru struja u druge dve faze.



Slika 4.1: Prikaz raspodele faznih struja prilikom jednofaznog kvara u radialnoj mreži

Algoritam koji će biti objašnjen u nastavku može se koristiti samo za kvarove sa zemljom i predstavlja dopunu algoritma za faznu diferencijalnu zaštitu. Osnova za istraživanje leži u tome da iako je jedna fazna struja mala, trostruka nulta struja sa strane potrošnje i sa strane mreže, imaju značajne vrednosti. Ideja je da se na ovim strujama primeni diferencijalni metod. Za kvar na vodu, očekuje se da smerovi nultih struja budu suprotni. Na Slici 4.2 prikazana raspodela nultih struja prema metodi simetričnih komponenti (*Forteskije*).



Slika 4.2: Prikaz raspodele nultih struja prema metodi simetričnih komponenti

Oznake na Slici 4.2 pripadaju nultom komponentnom sistemu i imaju sledeća značenja:

$L_{M0}$ - nulta induktivnost aktivne mreže

$R_{M0}$ - nulta rezistansa aktivne mreže

$Z_{V0L}$ ,  $Z_{V0D}$  – nulte impedanse voda sa leve odnosno desne strane kvara

$R_p$ - potrošnja modelovana rezistansom

$\underline{U}_0$ - nulta komponenta napona

$\underline{I}_{0L}$  i  $\underline{I}_{0D}$  – nulte komponente struje levo odnosno desno od kvara

Algoritam za nultu diferencijalnu zaštitu takođe radi sa trenutnim vrednostima struja. U svakom trenutku odabiranja releju se dovode po jedan odbirak strujnog signala sa leve ( $i_L$ ) i sa desne strane voda ( $i_D$ ), za svaku fazu posebno (tri odbirka sa leve strane voda i tri sa desne). Trenutne vrednosti trostrukih nultih struja ( $3i_{0L}$  i  $3i_{0D}$ ) računaju se kao zbrovi tri odbirka sa leve, odnosno tri odbirka sa desne strane, kako je prikazano izrazima (4.8) i (4.9) [38]:

$$3i_{0L} = i_L^A + i_L^B + i_L^C \quad (4.8)$$

$$3i_{0D} = i_D^A + i_D^B + i_D^C \quad (4.9)$$

Za implementaciju algoritma neohodno je formirati dva registra, jedan za proračun nulte diferencijalne struje i drugi za proračun indikatora smera. Učitavanjem novog odbirka, u registrima se vrši pomeranje, tako da se prvi element registra odbacuje (najstariji odbirak), a novi odbirak

zauzima poslednje mesto. Na osnovu tekućeg sadržaja registara vrši se proračun efektivne vrednosti nulte diferencijalne struje ( $I_{0dif}$ ) i srednje vrednosti indikatora smeru ( $IND_0$ ). Proračun ovih veličina prikazan je izrazima (4.10) i (4.11) [38]:

$$I_{0dif} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m (3i_{0L}(n) - 3i_{0D}(n))^2}{m}} \quad (4.10)$$

$$IND_0 = \frac{\sum_{n=1}^m (3i_{0L}(n) \cdot 3i_{0D}(n))}{m} \quad (4.11)$$

gde su:

$3i_{0L}(n)$  -  $n$ -ti odbirak trenutne vrednosti trostruke nulte struje sa leve strane voda,

$3i_{0D}(n)$  -  $n$ -ti odbirak trenutne vrednosti trostruke nulte struje sa desne strane voda,

$m$  - broj odbiraka u osnovnoj periodi signala  $T$ , odnosno prozoru podataka ( $m=T/T_{od}=20$  za  $T_{od}=1$  ms).

Releji će reagovati ako su zadovoljena oba uslova prikazana izrazima (4.12) i (4.13) [38]:

$$I_{0dif} > I_{0min} \quad (4.12)$$

$$IND_0 \leq 0 \quad (4.13)$$

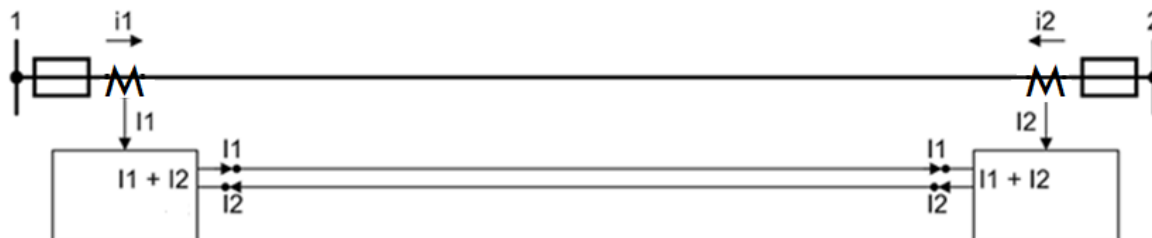
Uslov prikazan izrazom (4.12) znači da efektivna vrednost nulte diferencijalne struje mora biti veća od struje kojom je definisan najniži prag reagovanja releja. Time se dobija na brzini reagovanja jer nema uticaja stabilizacije, odnosno relej praktično radi kao brza prekostrujna zaštita. S obzirom da algoritam radi sa nultim strujama, minimalna struja reagovanja ( $I_{0min}$ ) može se podesiti niže nego kod fazne diferencijalne zaštite, jer u ovom slučaju ne postoji komponenta struje debalansa koja je posledica struje odvođenja duž voda. U struji debalansa sada postoji samo komponenta koja je posledica nejednakih karakteristika strujnih transformatora, zahvaljujući čemu se dobija osetljivija zaštita, što je naročito bitno kod zemljospojeva u neefiksano uzemljenim mrežama ili kod kvarova sa velikom prelaznom otpornošću.

Jedan od ključnih doprinosa rada jeste što podešavanje zaštite nije zavisno od mnoštva parametara o kojima se mora voditi računa kod fazne diferencijalne zaštite kao što je dužina voda. Kod predloženog algoritma se sabiraju fazne struje sa leve i sa desne strane voda nezavisno. To znači da struja u jednoj fazi, merena na levoj strani voda ne dolazi ni u kakvu korelaciju sa strujom u istoj fazi, merenoj na suprotnoj strani voda. Podešenje jedino zavisi od karakteristika strujnih transformatora. To isto važi i za nultu prekostrujnu zaštitu. Brzina i jednostavnost opisanog algoritma ogleda se u svođenju diferencijalne zaštite na prekostrujnu sa definisanim vremenom reagovanja. Za nultu prekostrujnu zaštitu se u literaturi preporučuje prag reagovanja od 20% naznačene struje strujnih transformatora [1-3]. S obzirom da se novim algoritmom upoređuju samo nulte struje na dva kraja voda, i da struja oticanja duž voda ne igra nikakvu ulogu, ovaj prag se može još spustiti. Za prag reagovanja izabrana je vrednost od 10% naznačene sekundarne struje strujnih transformatora. Takođe, ne postoji potreba za prepodešavanjem zaštite prilikom primene na različitim vodovima, različitim parametara.

Promenljiva  $IND_0$  pre kvara ima vrednost nula. Ako se kvar desi unutar zone zaštite, trostruke nulte struje koje se dovode releju sa suprotnih krajeva voda imaće različite smerove, dok će se za vreme kvara van zone zaštite njihovi smerovi podudarati. U prvom slučaju  $IND_0$  će imati negativnu vrednost, a u drugom slučaju pozitivnu. U izrazu (4.13) koristi se znak  $\leq$  za slučaj da je trostruka nulta struja koja se dovodi releju sa jedne strane voda jednaka nuli, što odgovara situaciji kad je neko od zvezdišta (na strani izvora ili potrošnje) neuzemljeno.

### 4.3. Uticaj kašnjenja u komunikacionom kanalu

Za zaštitu jednog voda, koriste se dva diferencijalna releja koji su instalirani na suprotnim krajevima voda. Svaki relej mora imati informacije o strujama na suprotnoj strani voda. To znači da mora biti ostvarena brza razmena podataka između releja. Na Slici 4.3 prikazan je princip razmene podataka između releja na suprotnim stranama voda.



Slika 4.3: Diferencijalna zaštita voda sa dva kraja

Vodi imaju važnu ulogu u prenosu električne energije od proizvođača do krajnjih potrošača. Analogna podužna diferencijalna zaštita primenjuje se na kraćim, jednostrukim vodovima. Primenom OPGW užadi, dužina voda prestaje da bude ograničavajući faktor. U elektroenergetskim mrežama često se javljaju dugački vodovi koji povezuju razvodna postrojenja sa udaljenim potrošačima. Obezbeđivanjem komunikacije pomoću OPGW užadi između releja na suprotnim stranama voda, upotreba diferencijalne zaštite postaje realna opcija.

Za pomenuti algoritam, od velike je važnosti da se usklade vremena odabiranja signala, odnosno da se svaki odbirak na jednoj strani uporedi sa odgovarajućim odbirkom na drugoj strani voda. Pouzdanost zaštite povećava se korišćenjem releja s mogućnošću zapisa vremenske značke uzorku struje za upoređivanje, odnosno korišćenjem komunikacija na principu "tačka – tačka". Sve računate vrednosti struja se obeležavaju tzv. "vremenskom markicom" pre nego što se proslede drugom releju. Ova markica označava trenutak proračuna vrednosti. Relej koji prima podatke može na osnovu markice da odredi vremenski trenutak proračuna i da uporedi primljene vrednosti sa svojim vrednostima koje su proračunate u istom vremenskom trenutku. Zahteva se da časovnici na relejima budu precizni na nivou 1 ms [40].

Može se pojaviti kašnjenja signala u dva pravca - slanje i primanje. Ova kašnjenja su ponekad različita. Jedna tehnika za prevazilaženje ovog problema, takozvani "ping-pong", uključuje merenje kašnjenja kanala preko kojeg se vrši razmena podataka. Razlike kašnjenja komunikacije su tipično manje od 2 ms. Naravno, za ispravnu kompenzaciju kašnjenja potrebno je tačno meriti vreme kašnjenja signala. Sve dok su "ping" i "pong" vremena ista, tj. dok je kašnjenje simetrično, nema opasnosti od pojave prividne diferencijalne struje, izuzimajući manje inherencije zbog konačnog vremena odabiranja [41, 42].

Najmodernije prevazilaženje ovog problema je korišćenje sistema pod nazivom *Global Position System (GPS)*. To je svemirsko pozicioniranje, navigacija i merenje vremena. Za razmenu informacija, koriste se sateliti. Budući da *GPS* prijemnik omogućava vremensku sinhronizaciju s tačnošću  $\pm 1 \mu\text{s}$ , ovo je sasvim zadovoljavajuća brzina razmene podataka između releja [40].

U disertaciji nije razmatrano kašnjenje signala zbog komunikacionog kanala. Time su svi testirani algoritmi ravnopravni po pitanju vremena detektovanja kvara.

## 5. MODELOVANJE SISTEMA POTREBNOG ZA SIMULACIJU POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA –MATLAB/SIMULINK

Simulacija diferencijalne zaštite najpre je izvršena uz pomoć programskog paketa *MATLAB*.

Program *MATLAB* prilagođen je rešavanju matematičkih problema. Unutar programa integrisana je numerička analiza, matematički račun, obrada podataka i grafički prikaz. Osnovna karakteristika je numeričko rešavanje svih matematičkih problema. Prednost ovog softvera je u jednostavnom izražavanju matematičkih problema, na odgovarajući način kako se pišu u matematici. Time se gubi potreba za tradicionalnim programiranjem. Ovim se pomenuti softver probio u vrh prema primenljivost među inženjerima, naročito energetičarima [39].

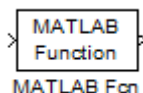
Softver *MATLAB* poseduje veliki broj modula koji su prilagođeni različitim inženjerskim strukama. Za inženjere energetike od najvećeg značaja je modul *Simulink*. Ovim modulom se može verno, matematički, predstaviti elektroenergetski sistem sa svim svojim elementima. Time je omogućeno inženjerima da dobiju odgovore na pitanja i svest o veličinama struja, napona i snaga u sistemu prilikom nekih poremećaja, konkretno kvarovima [39].

U istraživanju su iskorišćene sve prednosti pomenutog modela da bi se što realnije predstavio sistem i dinamičke promene unutar njega. Formirana je mreža za testiranje algoritma za poduznu diferencijalnu zaštitu voda. U ovom delu se koriste modeli za mreže naponskog nivoa 110 kV i 35 kV.

Posebna pažnja u modelovanju posvećena je strujnim transformatorima. Zasićenje jezgra strujnih transformatora za zaštitu ima veliki uticaj na rad poduzne diferencijalne zaštite.

### 5.1. Modelovanje releja

Relej se modeluje pomoću posebnog bloka, tzv. *MATLAB* funkcije (*MATLAB function*). U svakom trenutku odabiranja (podešeno je vreme 1 ms) šalje se odbirak sa sekundarne strane strujnog transformatora na ulaz ovog bloka. S obzirom da postoji šest strujnih transformatora (za svaku fazu po dva) to znači da se releju dovodi šest signala. Sa svake strane voda nalazi se po jedan relej. Svakom releju se dovodi po šest istih signala. Izlaz iz releja je signal za uključenje ili isključenje prekidača (1 ili 0). Kada su zadovoljeni uslovi za reagovanje, izlaz bloka deluje na kontrolne ulaze tri monofazna prekidača i otvara ih. Drugi relej kontroliše tri prekidača sa druge strane voda. U svakom trenutku odabiranja strujnih signala, ovaj blok poziva funkciju kojom se obrađuju ti odbirci signala prema isprogramiranom algoritmu. Time je isprogramiran rad diferencijalne relejne zaštite. Za periodu odabiranja, dovoljno je uzeti vrednost  $T_{od}=1$  ms. Na Slici 5.1 prikazan je blok kojim je implementiran rad releja [11].



Slika 5.1: Prikaz bloka *MATLAB* funkcije

### 5.2. Strujni transformatori za zaštitu

Osnovna uloga strujnih transformatora jeste da proizvedu srazmerno smanjenu kopiju primarne struje, sa tačnošću koja zavisi od toga u koju se svrhu koriste. Razlikuju se strujni

transformatori za zaštitu i za merenje. Jezgra strujnog transformatora za merenje moraju imati veliku tačnost tokom normalnog radnog režima, dok je kod jezgara za zaštitu tačnost važna u režimima sa kvarom.

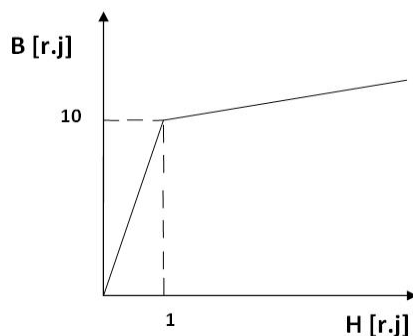
Pod tačnošću se podrazumeva vrednost amplitude i fazni stav izmerene veličine u odnosu na tačnu vrednost. Složena greška obuhvata strujnu i faznu grešku, kao i uticaj jednosmerene i višeharmoničnih komponenti u struji.

Standardne vrednosti naznačene sekundarne struje su 1 A i 5 A. Strujni transformatori sa naznačenom strujom 1 A upotrebljavaju se u slučaju većih udaljenosti između strujnih transformatora i priključenih releja, kako bi, uz iste gubitke, bila omogućena upotreba poveznih vodova manjeg preseka. Standardne vrednosti naznačenih snaga za strujne transformatore za zaštitu su: 10, 15, 30, 45 i 60 VA [7].

Za strujne transformatora za zaštitu definišu se faktor tačnosti i klasa tačnosti. Faktor tačnosti predstavlja umnožak primarne struje pri kojoj složena greška strujnog transformatora na prelazi dozvoljenu vrednost složene greške. Standardne vrednosti faktora tačnosti su: 5, 10, 15, 20 i 30. Klasa tačnosti predstavlja graničnu vrednost apsolutne strujne greške u (%). U oznaci klase tačnosti strujni transformatori i jezgra za zaštitu imaju simboj "P" (od reči *Protection*-zaštita). Standardne klase tačnosti strujnih transformatora za zaštitu su 5P i 10P. Primera radi, simbol 5P10, označava da složena greška strujnog transformatora za zaštitu nije veća od 5 % pri primarnoj struji 10 puta većoj od naznačene vrednosti [7].

Pomoću programskog paketa *MATLAB/Simulink*, formirani su modeli strujnih transformatora. Cilj je da se pokaže kako zasićenje strujnih transformatora može izazvati nepotrebno reagovanje zaštite za kvarove van štice zone ako nema korišćenja stabilizacione struje. U tu svrhu formirani su modeli strujnih transformatora na oba kraja voda pri čemu se njihove karakteristike razlikuju. Unutar bloka kojim se predstavlja strujni transformator mogu se zadati parametri transformatora i njihova kriva magnećenja.

Radi jednostavnosti, implementirana je linearna karakteristika magnećenja (Slika 5.2). Na Slici 5.1 prikazana je karakteristika magnetskog jezgara strujnog transformatora za zaštitu koja poseduje dva linearna dela. Ukoliko bi se ovaj model koristio za strujni transformator sa sledećim karakteristikama: prenosni odnos 100/1 A/A, snaga 10 VA, faktor tačnosti 10 i klasa tačnosti 10 (10P10), prvom delu karakteristike odgovarala bi složena greška od 10% ( $H$ ), koju strujni transformator čini za primarne struje do  $10I_n$  ( $B$ ). Drugom delu karakteristike odgovara praktično horizontalna poluprava, kojom je modelovano duboko zasićenje strujnog transformatora.



Slika 5.2: Karakteristika magnećenja strujnih transformatora

Na ovaj način se jednostavno može formirati bilo koji model strujnog transformatora koji bi bio implementiran u šemi. Strujni transformator se praktično zamenjuje svojom "T" šemom. Najbitniji parametri su induktivnost grane magnećenja i prenosni odnos. Induktivnosti rasipanja

primara i sekundara se zanemaruju (podešavaju na vrednost nula) isto kao i sve otpornosti u zamenskoj šemi.

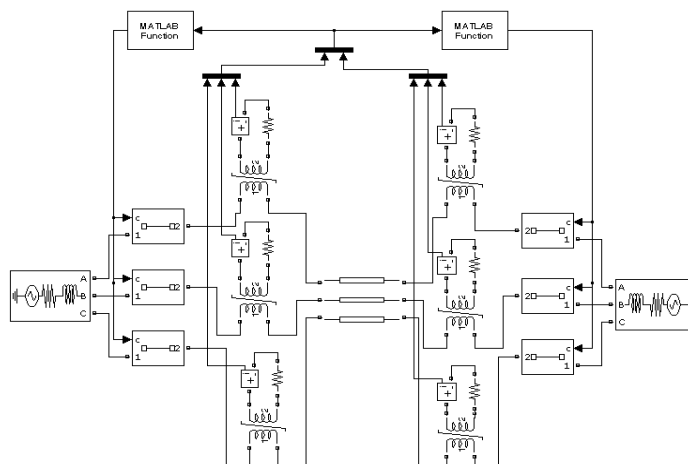
### 5.3. Modelovanje voda naponskog nivoa 110 kV

Da bi se problem sagledao što realnije, odnosno da bi se bolje simuliralo stanje duž voda, za modelovanje voda izabrana je trofazna šema voda sa raspodeljenim parametrima. Ovim je uzeta u obzir i međusobna induktivnost i kapacitivnost faza voda. Ove induktivnosti i kapacitivnosti stvaraju izražene prelazne procese pri manipulacijama prekidačem i može da se izazove nepotrebno reagovanje zaštite.

Formirana je mreža koja uključuje:

- Aktivne mreže sa obe strane voda
- Štićeni vod
- Modele 6 strujnih transformatora
- Blokove za simulaciju kvarova

Model 110 kV mreže za testiranje algoritma prikazan je na Slici 5.3. Podužni pogonski i nulti parametri voda pregledno su prikazani u Tabeli 5.1. Snaga trolnog kratkog spoja mreže je 5000 MVA, a odnos reaktanse i rezistanse je  $X/R=10$ . Za dužinu voda uzeta je vrednost  $L=60$  km, dok se sa leve i desne strane posmatranog voda nalaze i deonice od po 5 km sa istim parametrima. Moduli mreža sa leve i desne strane štićenog voda su podešeni na vrednosti 113 kV i 108 kV respektivno.



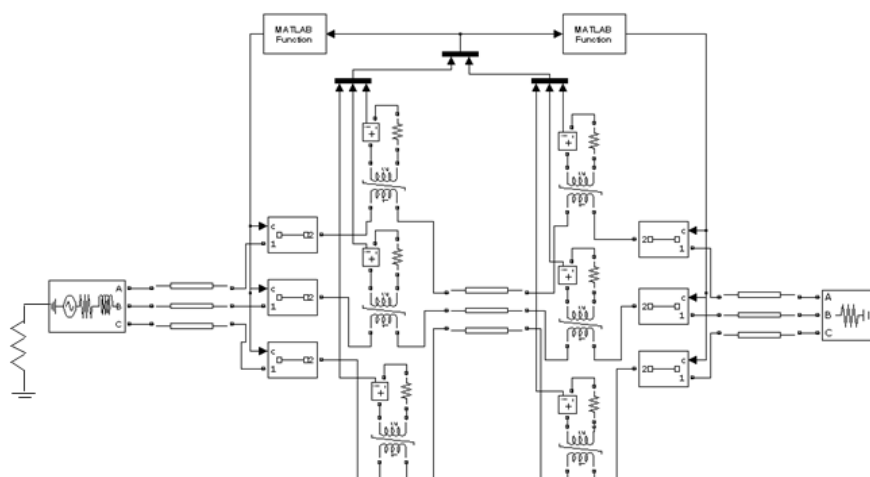
Slika 5.3: Model voda 110 kV sa strujnim transformatorima za testiranje podužne diferencijalne zaštite dalekovoda

Tabela 5.1: Parametri 110 kV voda

$r_d$ [ $\Omega$ /km]	$l_d$ [mH/km]	$c_d$ [nF/km]	$r_o$ [ $\Omega$ /km]	$l_o$ [mH/km]	$c_o$ [nF/km]
0,12	1,3	8,9	0,32	4,1	5

## 5.4. Modelovanje voda naponskog nivoa 35 kV

Model 35 kV mreže za testiranje algoritma formiran je pomoću programskog paketa MATLAB/Simulink i prikazan je na Slici 5.4. Podužni pogonski i nulti parametri voda pregledno su prikazani u Tabeli 5.2. Snaga trofaznog kratkog spoja mreže je 150 MVA, a odnos reaktanse i rezistanse je  $X/R=1$ . Mreža je uzemljena preko otpornika od  $70 \Omega$  dok je snaga potrošnje 8 MW sa faktorom snage 1. Za dužinu voda uzeta je vrednost  $L=20$  km, dok se sa leve i desne strane posmatranog voda nalaze i deonice od po 5 km sa istim parametrima. Strujni transformatori su prenosnih odnos 200/5 A/A, snaga 10 VA i klase 10P30. Moduo napona mreža sa leve strane šticekog voda je podešen na vrednosti 37 kV.



Slika 5.4: Model voda 35 kV sa strujnim transformatorima za testiranje podužne diferencijalne zaštite dalekovoda

Tabela 5.2: Parametri 35 kV voda

$r_d$ [ $\Omega$ /km]	$l_d$ [mH/km]	$c_d$ [nF/km]	$r_o$ [ $\Omega$ /km]	$l_o$ [mH/km]	$c_o$ [nF/km]
0,38	1,4	9	0,53	3,9	6,5



## 6. PRIKAZ REZULTATA SIMULACIJA IZVRŠENIH POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA MATLAB/SIMULINK

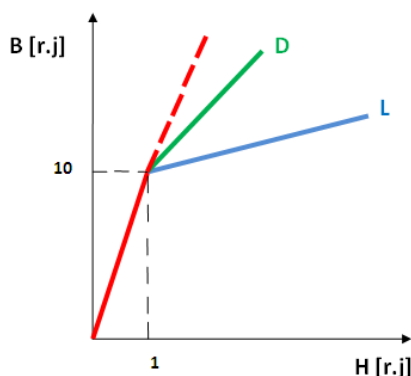
Novi algoritam testiran je pomoću softverskog paketa MATLAB/Simulink za mrežu 110 kV, kao reprezent dvostrano napajanog voda i za mrežu 35 kV kao reprezenta radijalne mreže sa ograničenom strujom zemljospoja.

### 6.1. 110 kV mreža

U ovom poglavlju biće prikazani rezultati simulacija u 110 kV mreži. Pretpostavlja se da se sa obe strane voda nalaze jake mreže kao što je opisano u poglavlju 5.3. S obzirom na to, u ovom poglavlju neće biti razmatrana nulta diferencijalna zaštita. Njen doprinos će se videti u poglavlju 6.3 kada bude bila diskutovana radijalna distributivna mreža. Ovde su prikazani rezultati za tri algoritma: dva koja su prmanjena u praksi (algoritmi zasnovani na dodatnoj stabilizaciji i inverznoj komponenti) i novi algoritam za faznu diferencijalnu zaštitu. Za komercijalne algoritme usvojen je nagib karakteristike od  $20^\circ$  [3, 22-25].

Biće diskutovan slučaj kada nema zasićenja strujnih transformatora i kada se javlja zasićenje na obe strane voda prilikom kvara. U prvom slučaju, karakteristike strujnih transformatora na obe strane voda imaju identičnu linearnu karakteristiku koja se poklapa sa crvenom linijom na Slici 6.1. U drugom slučaju, na obe strane štice voda formirani su modeli strujnih transformatora sa sledećim karakteristikama: prenosni odnos 100/1 A/A, snaga 10 VA, strujna (složena) greška 10 i granični faktor tačnosti 10 (10P10).

Prvom delu karakteristike odgovara greška od 10%, koju strujni transformator čini za primarne struje do  $10I_n$ . Ukoliko se pojavi struja veća od  $10I_n$ , transformatori ulaze u zasićenje i izlaze iz definisane klase tačnosti. Drugi deo karakteristike definisan je različito za strujne transformatore sa leve i desne strane voda. Karakteristike su prikazane na Slici 6.1. Drugi deo karakteristike strujnih transformatora koji se nalaze sa leve strane voda odgovara približno horizontalno postavljena poluprava. Strujni transformatori koji se nalaze sa desne strane voda imaju drugi deo karakteristike koji odstupa od produžetka prvog dela karakteristike za  $15^\circ$ .



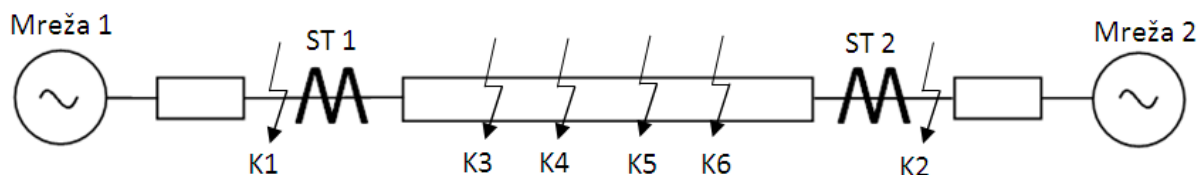
Slika 6.1: Karakteristike magnećenja strujnih transformatora sa leve (L) i desne strane voda (D)

Na sekundarnoj strani svih strujnih transformatora nalazi se rezistivno opterećenje od  $10 \Omega$  čime se uzima u obzir impedansa releja i otpornost sekundarnih veza. Ovakvo opterećenje izabrano

je kako bi se simuliralo zasićenje strujnih transformatora i jednosmernom komponentom struje kvara, ali i naizmeničnom komponentom pošto se jednosmerna komponenta priguši.

Poznavajući parametre voda, može se odrediti minimalna struja reagovanja releja ( $I_{min}$ ). Uzimajući u obzir varijacije napona i frekvencije, podešena vrednost treba da bude 2 do 3 puta veća od izračunate kapacitivne struje odvođenja. Za ovaj slučaj (ovu vrstu nadzemnog voda, dužinu, parametre)  $I_c$  iznosi 10,6 A (0,106 A na sekundarnoj strani). Granica reagovanja od 0,2 A je sasvim dovoljna. Pomenuta granica iznosi 20% od naznačene struje strujnog transformatora (1 A).

Pomoću formiranog modela simulirani su različiti kvarovi. Jednopolna šema, sa naznačenim mestima pravljenih kvarova, prikazana je na Slic 6.2.



Slika 6.2: Jednopolna šema mreže sa naznačenim mestima kvarova

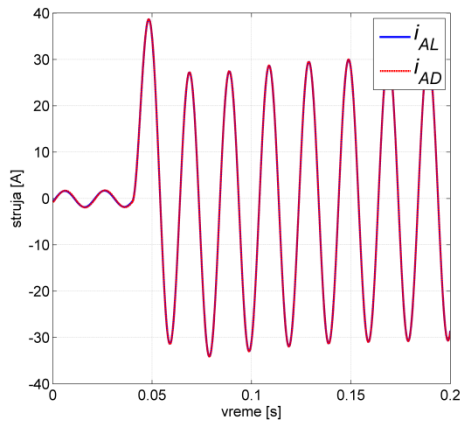
Na Slici 6.2 mogu se videti mesta gde su simulirani kvarovi. Kvarovi  $K1$  i  $K2$  nalaze se van zone zaštite, za razliku od kvarova  $K3 - K6$  koji se nalaze unutar zone zaštite određene položajem strujnih transformatora  $ST1$  i  $ST2$ . Sa leve i desne strane nalaze se mreže 1 i 2. Između mreža i strujnih transformatora ubačene su dve kratke deonice voda od po 5 km. U Tabeli 6.1 pregledno su prikazani tipovi kvarova i trenuci kada su oni simulirani.

Tabela 6.1: Podaci o kvarovima i o strujnim transformatorima

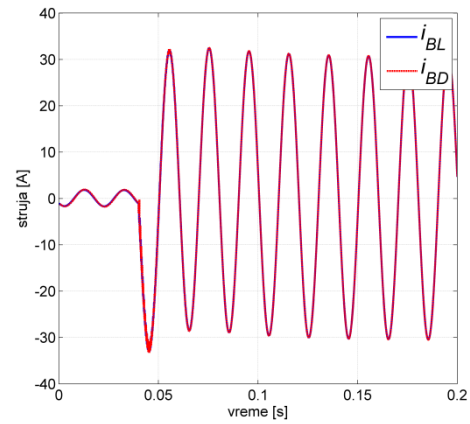
Redni broj kvara	Tip kvara	Pozicija kvara [%]*	Trenutak nastanka kvara [ms]	Strujni transformatori
Kvar 1	ABC	Ispred $ST1$	40	Nisu zasićeni
Kvar 2	ABC	Iza $ST2$	40	Zasićeni su
Kvar 3	A-N	20	42	Zasićeni su
Kvar 4	BC	40	44	Zasićeni su
Kvar 5	AC-N	60	46	Zasićeni su
Kvar 6	ABC	80	48	Zasićeni su

\*Procenat od cele dužine voda gledano sa leve strane

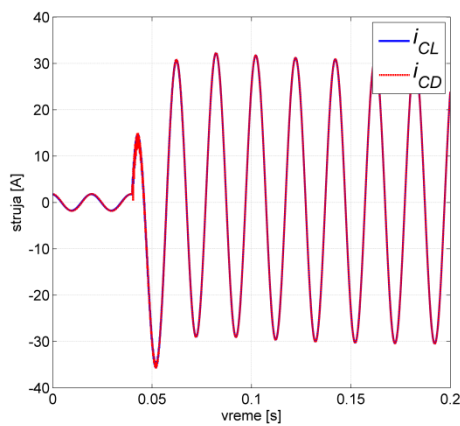
Za kvarove van zone zaštite ( $K1$  i  $K2$ ) razmatrani su trofazni kratki spojevi odmah iza strujnih transformatora, kao najkritičniji, jer generišu najveće struje kvara sa malom inverznom komponentom struje. Nije uvaženo kašnjenje signala prilikom prenosa podataka sa jednog na drugi kraj voda. Time su svi algoritmi ravnoparni po pitanju brzine konvergencije. Ako bi se uvažilo kašnjenje prilikom prenosa signala, svi algoritmi bi bili sporiji za to vreme, koliko je potrebno za prenos. Na Slikama 6.3-6.5 prikazane su struje po fazama koje se dovode releju pri kvaru  $K1$ . U ovom slučaju nema zasićenja strujnih transformatora i struje sa leve i desne strane voda u svakofazi se skoro podudaraju.



Slika 6.3: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri kvaru K1



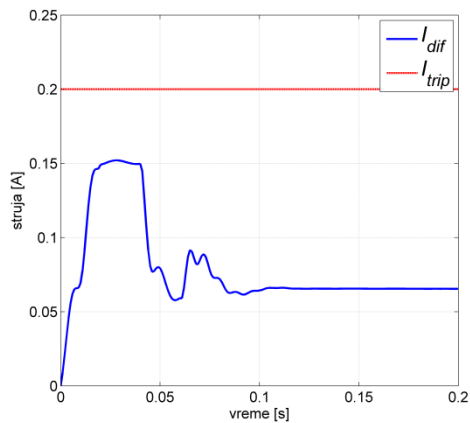
Slika 6.4: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi B pri kvaru K1



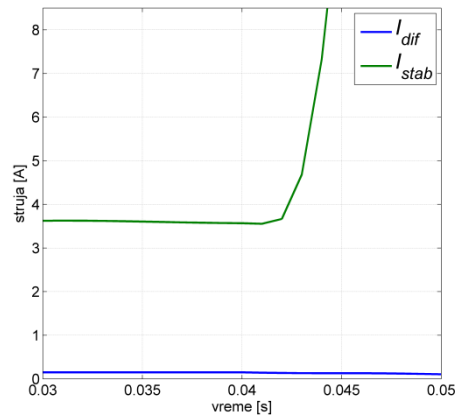
Slika 6.5: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi C pri kvaru K1

Prikazani su rezultati za ABB, SIEMENS i novi algoritam kao i struje po fazama, sa obe strane voda, koje se dovode releju.

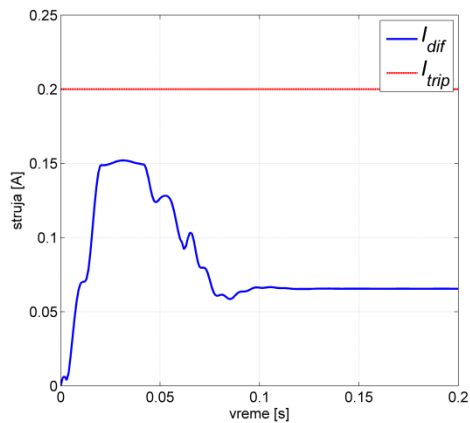
Na Slikama 6.6-6.11 prikazane su stabilizaciona struja ( $I_{stab}$ ), diferencijalna struja ( $I_{dif}$ ) i diferencijalna struje prorade releja ( $I_{trip}$ ) pri kvaru K1 za svaku fazu posebno. Ovo su relevantne veličine za algoritam zasnovan na dodatnoj stabilizaciji (SIEMENS). Diferencijalnom strujom prorade predstavljena je karakteristika reagovanja releja na Slici 2.3. Releji će reagovati kada efektivna vrednost diferencijalne struje bude veća od efektivne vrednosti diferencijalne struje prorade. Slike 6, 8 i 10 imaju skraćenu vremensku osu da bi se lakše uočio prelazni proces nakon nastanka kvara.



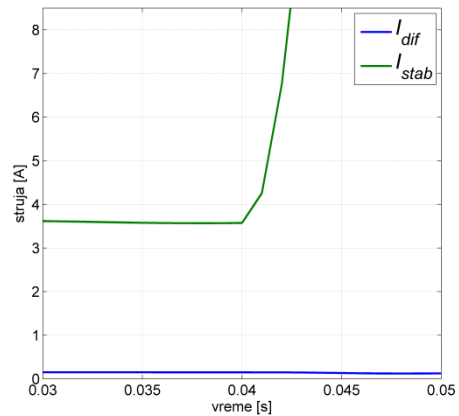
Slika 6.6: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K1 (SIEMENS)



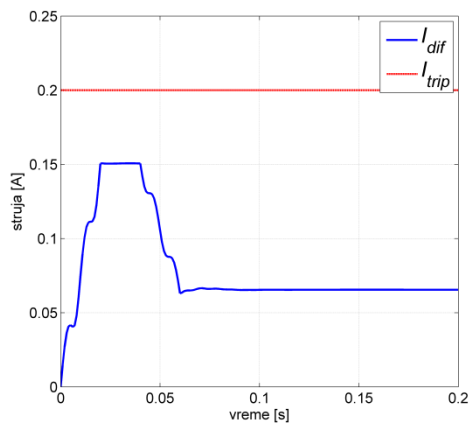
Slika 6.7: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu A pri kvaru K1- zumirano (SIEMENS)



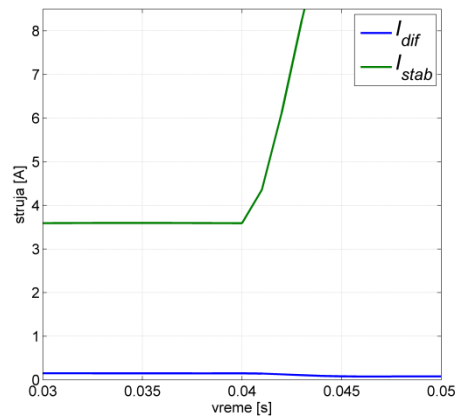
Slika 6.8: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K1 (SIEMENS)



Slika 6.9: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu B pri kvaru K1- zumirano (SIEMENS)



Slika 6.10: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K1 (SIEMENS)



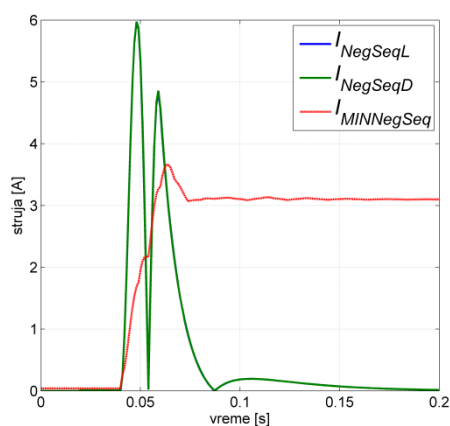
Slika 6.11: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu C pri kvaru K1- zumirano (SIEMENS)

Ni u jednom slučaju fazne diferencijalne struje ne postaju veće od praga reagovanja. Nakon nastanka kvara, diferencijalna struja zadržava malu vrednost, što je i očekivano, jer se struje sa obe

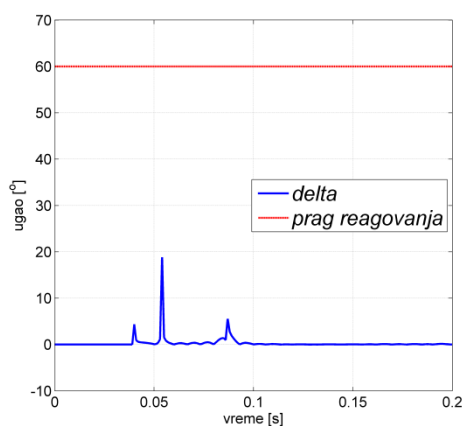
strane voda praktično poklapaju. Stabilizaciona postaje veća. Ni u jednoj fazi nema uslova za reagovanje zaštite.

Na Slikama 6.12-6.16 mogu se videti relevantne veličine za algoritam koji se oslanja na inverznu komponentu struje (ABB).

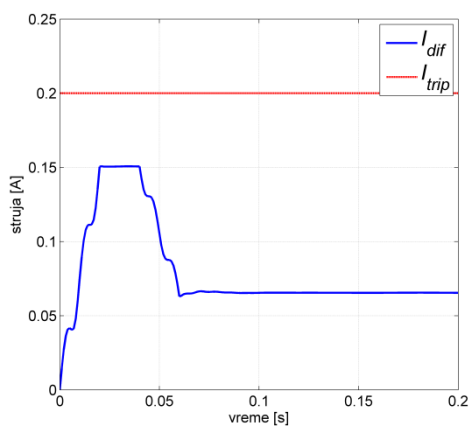
Sa Slike 6.12 može se videti da u trenutku  $t=0,042$  s vrednost inverzne komponente struja sa leve ( $I_{NegSeqL}$ ) i desne ( $I_{NegSeqD}$ ) strane voda veće su od minimalne vrednosti ( $I_{MINNegSeq}$ ). Nakon prelaznog procesa, u trenutku  $t=0,071$  s inverzne komponente postaju po modulu manje od  $I_{MINNegSeq}$ , tako da tada nema poređenja faznih stavova. Slika 6.13 prikazuje vremensku promenu faznog pomeraja ( $delta$ ) između fazora inverznih komponenti struja  $I_{NegSeqL}$  i  $I_{NegSeqD}$ . Ni u jednom trenutku vrednost faznog pomeraja između ove dve komponente ne prelazi prag reagovanja od  $60^\circ$ . Zaključak je da deo zaštite zasnovan na inverznoj komponenti struje neće generisati signal reagovanja. Sa druge strane, na Slikama 6.4-6.16 vidi se da fazna diferencijalna struja ni u jednoj fazi ne prelazi prag reagovanja. To znači da relej neće imati uslov za reagovanje.



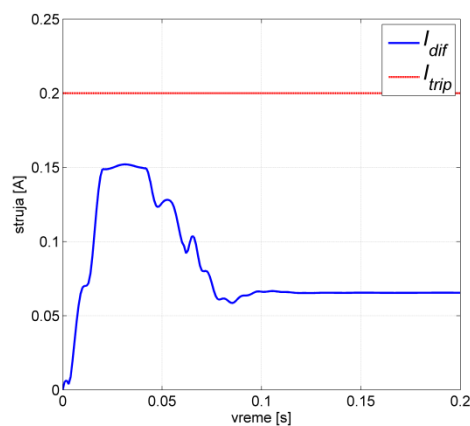
Slika 6.12: Moduli inverznih komponenti struja na oba kraja i minimalna vrednost pri kvaru K1 (ABB)



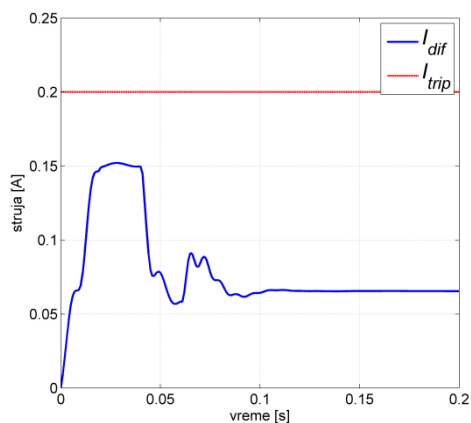
Slika 6.13: Ugaona razlika između fazora inverznih komponenti i usvojena granica pri kvaru K1 (ABB)



Slika 6.14: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K1(ABB)

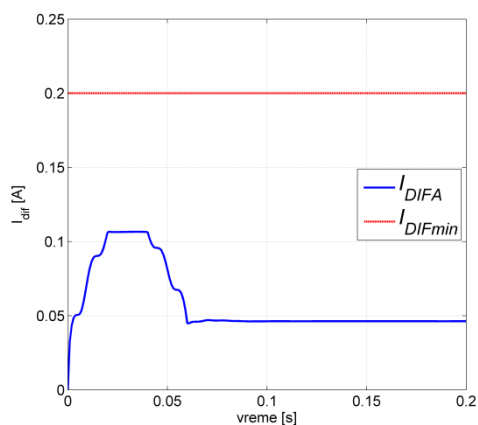


Slika 6.15: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K1(ABB)

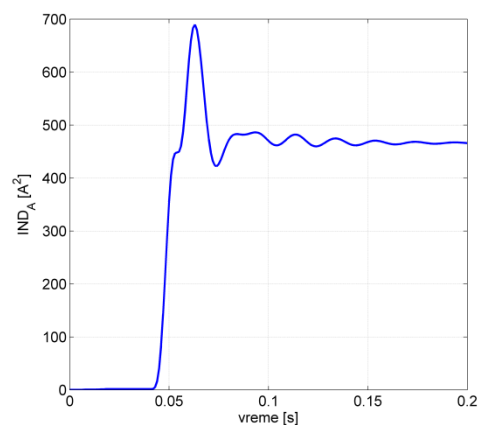


Slika 6.16: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K1(ABB)

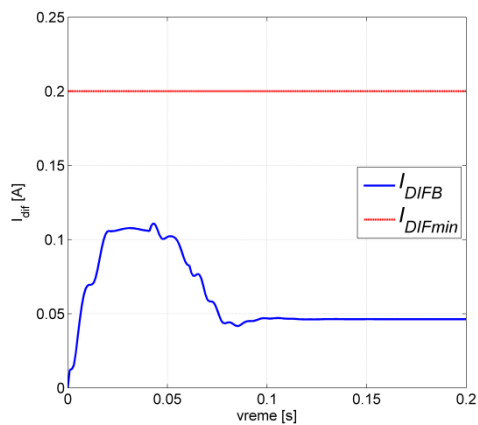
Na Slikama 6.17-6.22 date su veličine od interesa za novoformirani algoritam. Može se videti da je fazna diferencijalna struja u svim fazama manja od minimalne struje reagovanja i da je indikator smera pozitivan. To navodi na zaključak da nema nepotrebnog reagovanja zaštite za kvar van zone.



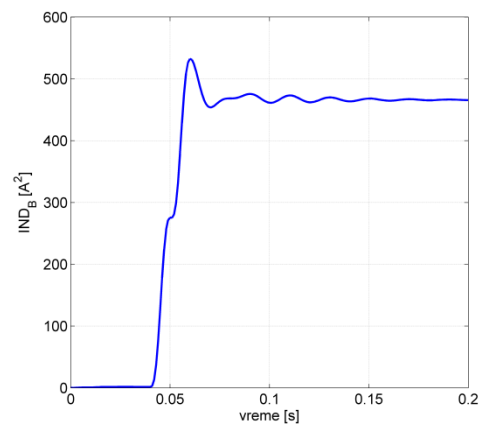
Slika 6.17: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K1 (novi algoritam)



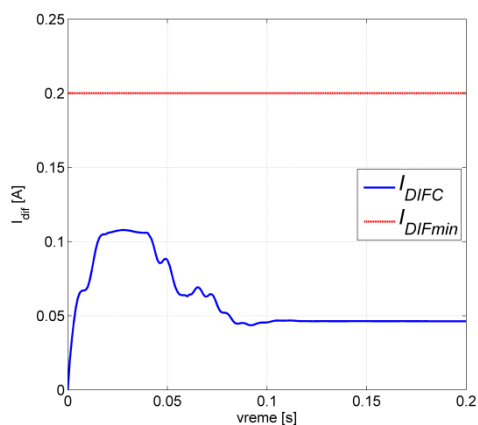
Slika 6.18: Indikator smera za fazu A pri kvaru K1 (novi algoritam)



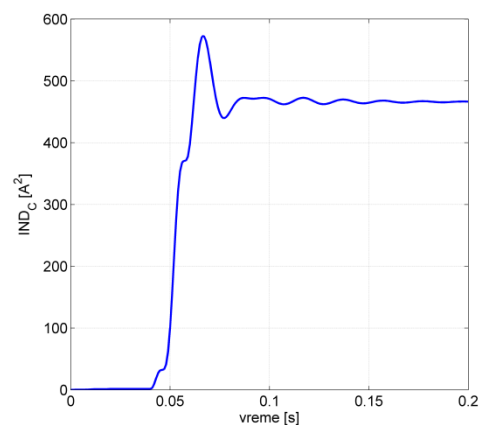
Slika 6.19: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K1 (novi algoritam)



Slika 6.20: Indikator smera za fazu B pri kvaru K1 (novi algoritam)

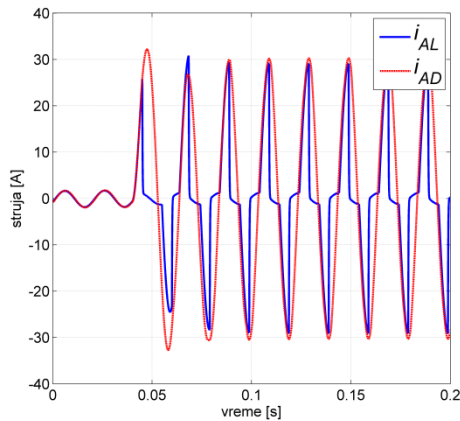


Slika 6.21: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K1 (novi algoritam)

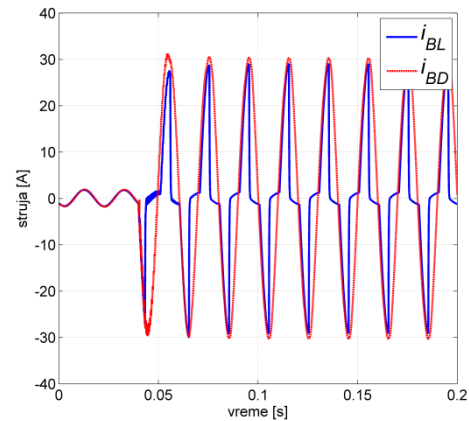


Slika 6.22: Indikator smera za fazu C pri kvaru K1 (novi algoritam)

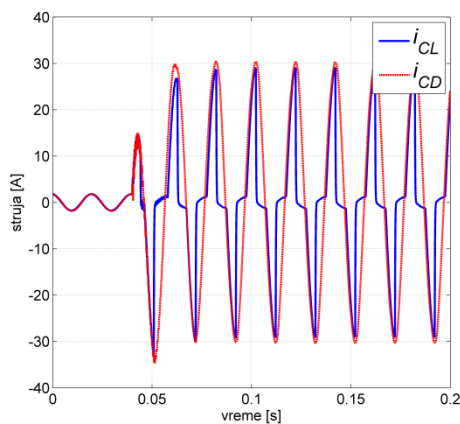
Na Slikama 6.23-6.25 prikazane su struje po fazama koje se dovode releju pri kvaru K2. U ovom slučaju ima zasićenja strujnih transformatora. Izobličenost je uočljivija na talasnim oblicima struja sa leve strane voda jer su karakteristike strujnih transformatora u drugom linearnom delu više horizontalne.



Slika 6.23: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri kvaru K2



Slika 6.24: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi B pri kvaru K2



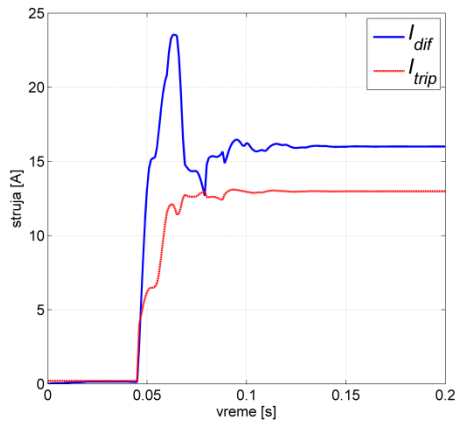
Slika 6.25: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi C pri kvaru K2

Na Slikama 6.26-6.31 prikazane su relevantne veličine za algoritam zasnovan na dodatnoj stabilizaciji (SIEMENS).

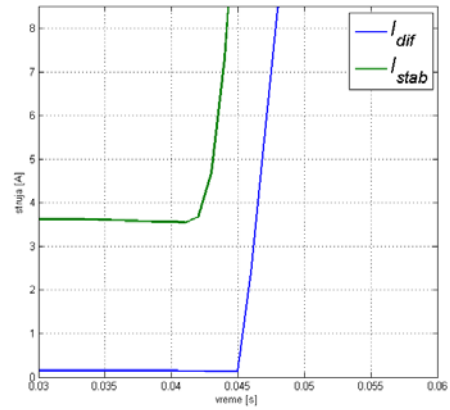
Na Slici 6.26 može se uočiti da u trenutku  $t=0,048$  s diferencijalna struja postaje veća od diferencijalne struje prorade, iako se radi o kvaru van štice zone kada relej ne bi trebalo da reaguje. Međutim, sa Slike 6.27 može se primetiti da kada stabilizaciona struja ( $I_{stab}$ ) postane izrazito velika (veća od  $7 \cdot I_n$ ), a to je trenutak  $t=0,043$  s, diferencijalna struja još izvesno vreme ostaje mala, čime je ispunjen uslov blokade releja, ako se koristi princip dodatne stabilizacije. Ovom vremenskom trenutku odgovara radna tačka obeležena slovom B na Slici 3.1. Diferencijalna struja postaje veća od diferencijalne struje prorade u trenutku  $t=0,046$  s i ostaje veća nadalje. Razlog za ovo leži u činjenici da zasićenje strujnih transformatora ostaje prisutno i nakon iščezavanja jednosmerne komponente struje kvara. Zaključak je da će relej koji koristi dodatnu stabilizaciju, posle isteka vremena blokade, ostati pobuđen i nepotrebno reagovati u fazi A.

Sličan zaključak je i za druge dve faze u kojima će doći do neželjenog reagovanja u trenucima  $t=0,047$  s i  $t=0,051$  s za faze B i C respektivno.

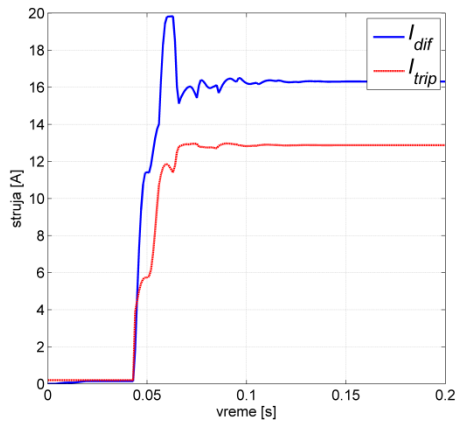




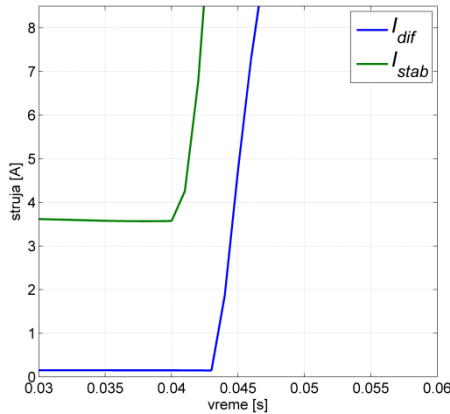
Slika 6.26: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K2 (SIEMENS)



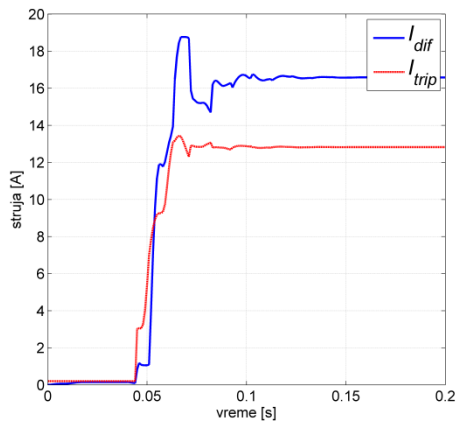
Slika 6.27: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu A pri kvaru K2- zumirano (SIEMENS)



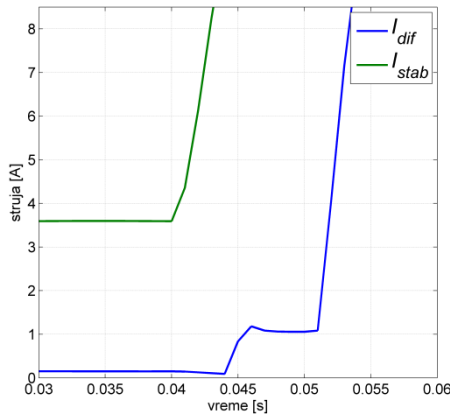
Slika 6.28: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K2 (SIEMENS)



Slika 6.29: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu B pri kvaru K2- zumirano (SIEMENS)



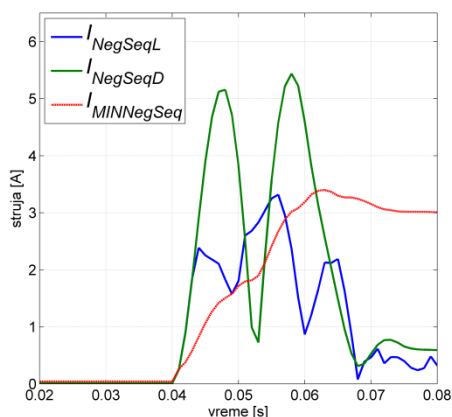
Slika 6.30: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K2 (SIEMENS)



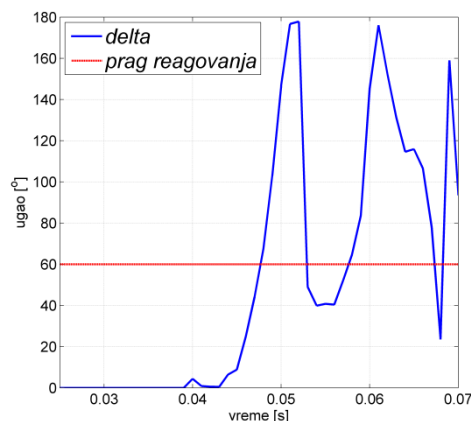
Slika 6.31: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu C pri kvaru K2- zumirano (SIEMENS)

Na Slikama 6.32-6.36 prikazani su rezultati simulacije kada se za blokadu koristi inverzni komponentni sistem struja (ABB). Sa Slike 6.34 može se videti da u trenutku  $t=0,048$  s vrednost

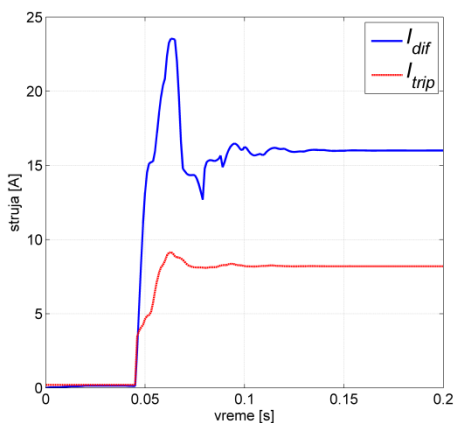
diferencijalne struje postaje veća od diferencijalne struje prorade u fazi A. Inverzne komponente struja sa leve ( $I_{NegSeqL}$ ) i desne ( $I_{NegSeqD}$ ) strane voda veće su od minimalne vrednosti ( $I_{MINNegSeq}$ ) u dva vremenska intervala: 0,043-0,052 s i 0,054-0,057 s (Slika 6.32). U ostalim vremenskim intervalima bar jedna od dve inverzne komponente po modulu je manja od  $I_{MINNegSeq}$ , tako da tada nema poređenja faznih stavova. Slika 5c prikazuje vremensku promenu faznog pomeraja ( $delta$ ) inverznih komponenti struja  $I_{NegSeqL}$  i  $I_{NegSeqD}$ . U intervalu vremena od 0,48 do 0,54 s razlika faznih stavova veća je od usvojene granice od  $60^\circ$ . Zaključak je da će u trenutku  $t=0,48$  s zaštita zasnovana na inverznoj komponenti struje generisati signal reagovanja i nepotrebno isključila vod, jer su tada inverzne komponente struja veće od minimalnih, a njihov fazni pomeraj postaje veći od  $60^\circ$ . Sličan zaključak je i za druge dve faze.



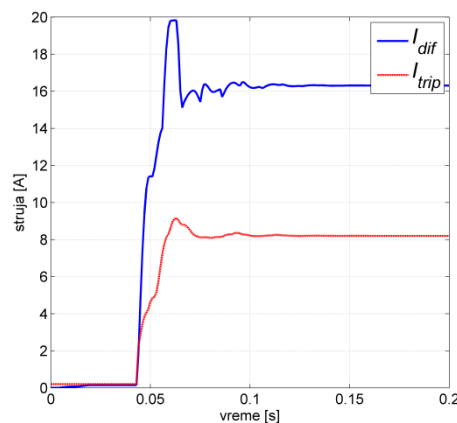
Slika 6.32: Moduli inverznih komponenti struja na oba kraja i minimalna vrednost pri kvaru K2 (ABB)



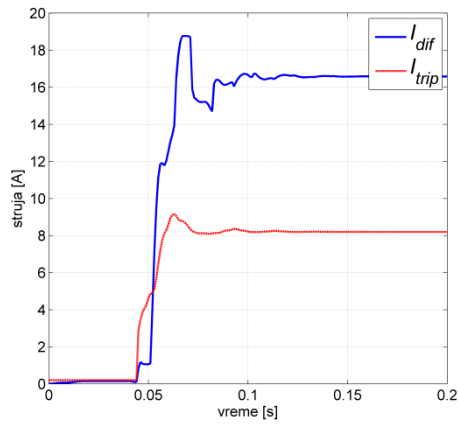
Slika 6.33: Ugaona razlika između fazora inverznih komponenti i usvojena granica pri kvaru K2 (ABB)



Slika 6.34: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K2(ABB)

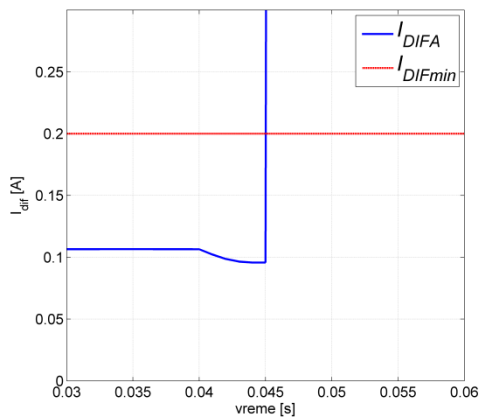


Slika 6.35: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K2(ABB)

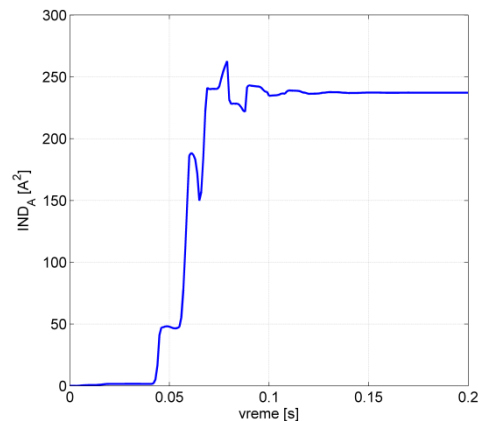


Slika 6.36: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K2(ABB)

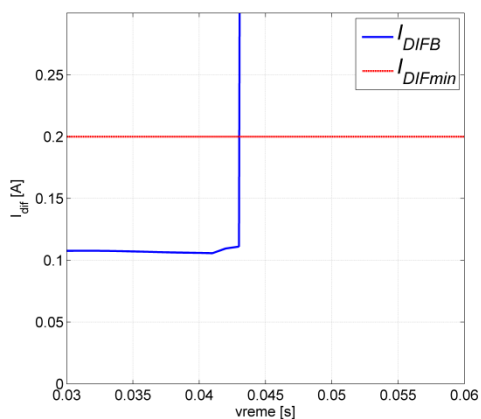
Promena efektivne vrednosti diferencijalne struje i srednje vrednosti indikatora smera za nov algoritam, mogu se videti na Slikama 6.37-6.42. Zbog preglednosti, diferencijalna struja prikazana je na užem vremenskom intervalu na Slikama 6.37, 6.39, 6.41. Može se uočiti da je indikator smera i pre i nakon nastanka kvara veći od 0 i na taj način blokira zaštitu.  $I_{dif}$  postaje veće od  $I_{min}$  u trenutku 0,045 s. Međutim, zaštita je preko uslova  $IND > 0$  već blokirana i nema nepotrebnog isključenja voda. Za  $I_{min}$  usvojena je vrednost od 0,2 A, odnosno 20% naznačene sekundarne struje strujnog transformatora. U druge dve faze je sličan scenario i nema nepotrebnog reagovanja zaštite.



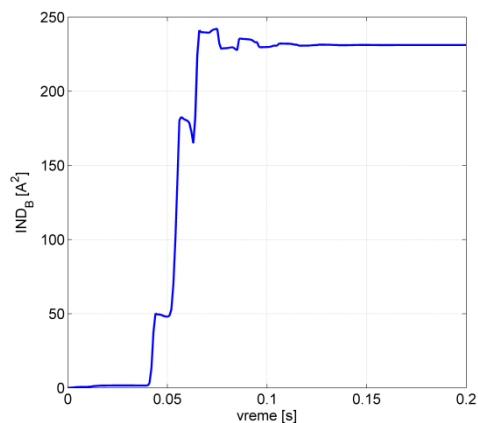
Slika 6.37: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K2 (novi algoritam)



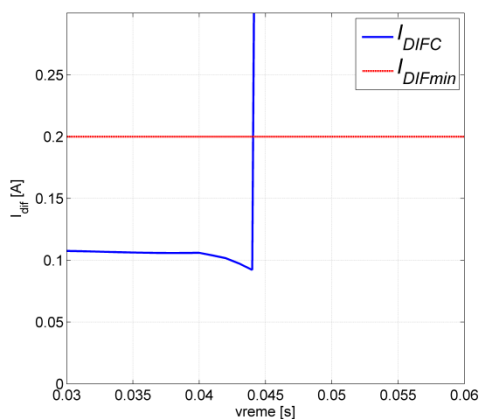
Slika 6.38: Indikator smera za fazu A pri kvaru K2 (novi algoritam)



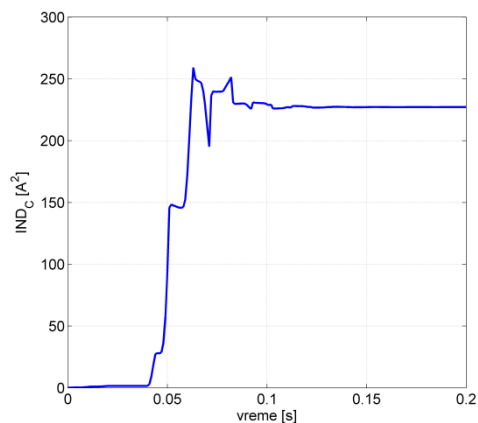
Slika 6.39: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K2 (novi algoritam)



Slika 6.40: Indikator smera za fazu B pri kvaru K2 (novi algoritam)

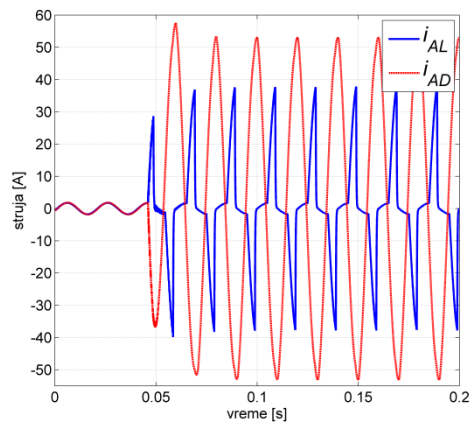


Slika 6.41: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K2 (novi algoritam)

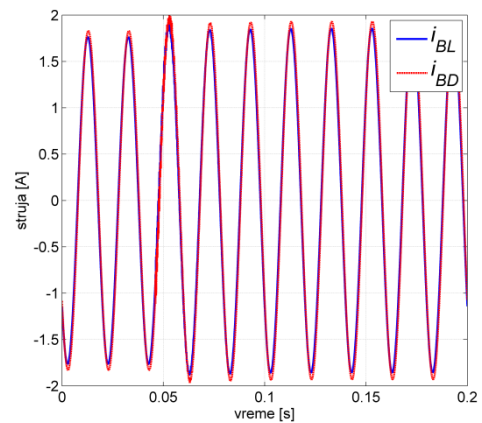


Slika 6.42: Indikator smera za fazu C pri kvaru K2 (novi algoritam)

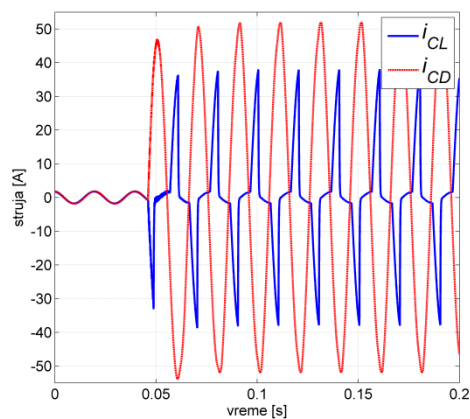
Kako se ne bi opterećivao tekst, neće biti prikazani svi talasni oblici za sve preostale kvarove. U pitanju su kvarovi unutar zone zaštite. Biće samo prikazane relevantne veličine za kvar K5. Za sve kvarove biće uzet model strujnih transformatora kao za kvar K2, odnosno kada strujni transformatori ulaze u zasićenje po nastanku kvara. Na Slikama 6.43-6.45 mogu se uočiti talasni oblici struja u sve tri faze koje se dovode releju. Jasno su vidljiva izobličenja struja.



Slika 6.43: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri kvaru K5

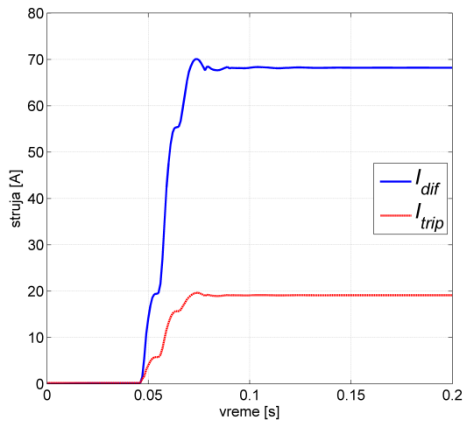


Slika 6.44: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi B pri kvaru K5

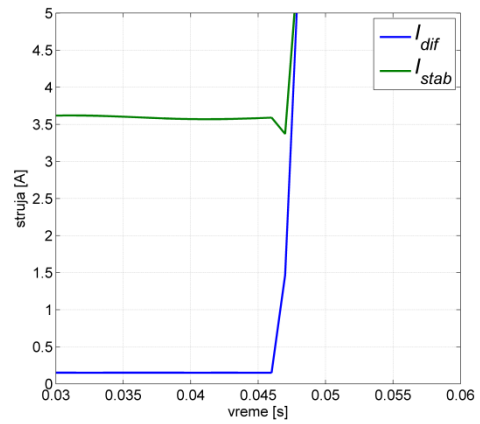


Slika 6.45: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi C pri kvaru K5

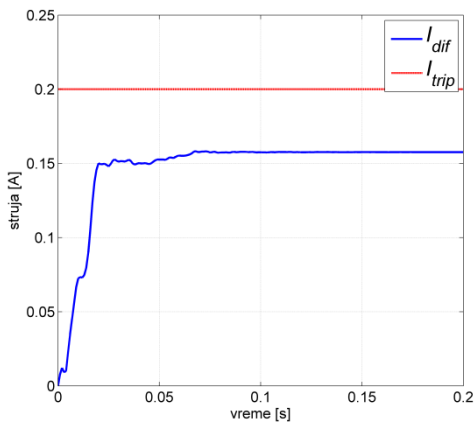
Na Slikama 6.46-6.51 mogu se videti veličine na osnovu kojih SIEMENS-ov algoritam donosi odluku o reagovanju. Kvar se detektuje već posle 2 ms u obe faze pogođene kvarom (A i C). Na Slici 6.46 vidi se da diferencijalna struja odmah po nastanku kvara dobija veliku vrednost. Stabilizaciona struja ni u fazi A ni u fazi C ne zalazi u oblast dodatne stabilizacije, što znači da nema blokade zaštite. U fazi B nema uslova za reagovanje jer diferencijalna struja ne prelazi struju reagovanja.



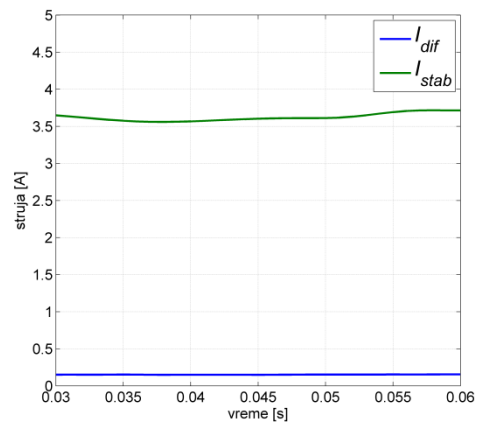
Slika 6.46: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K5 (SIEMENS)



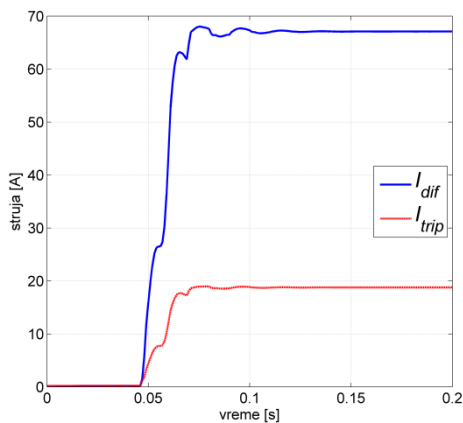
Slika 6.47: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu A pri kvaru K5- zumirano (SIEMENS)



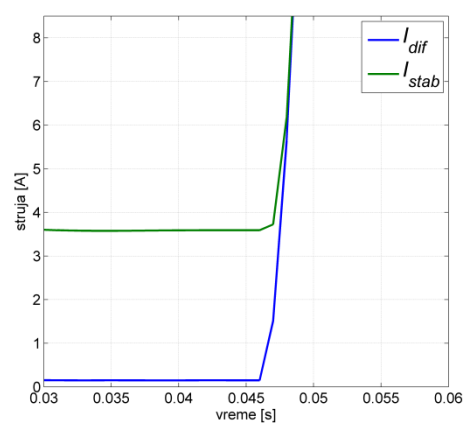
Slika 6.48: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K5 (SIEMENS)



Slika 6.49: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu B pri kvaru K5- zumirano (SIEMENS)



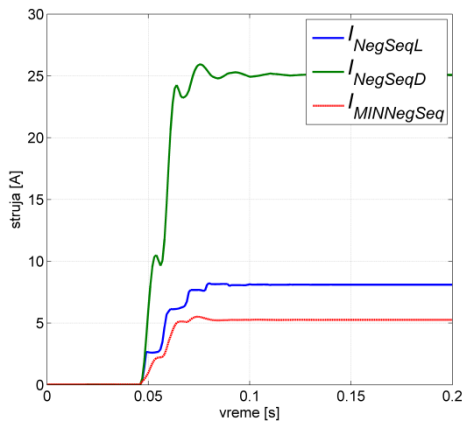
Slika 6.50: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K5 (SIEMENS)



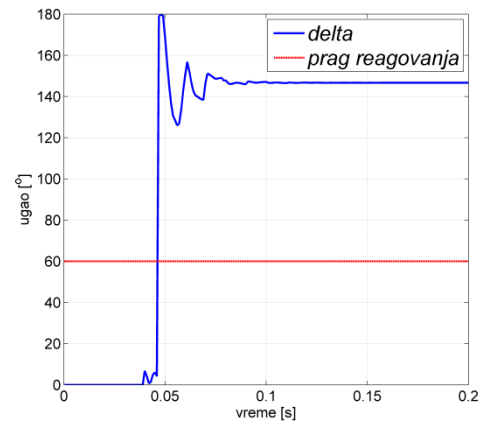
Slika 6.51: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu C pri kvaru K5- zumirano (SIEMENS)

Na Slikama 6.52-6.56 nalaze se relevantne veličine ABB-ovog algoritma. Na osnovu diferencijalne struje (Slik 6.54) relej ima prvi uslov za reagovanje 2 ms nakon kvara u fazi A.

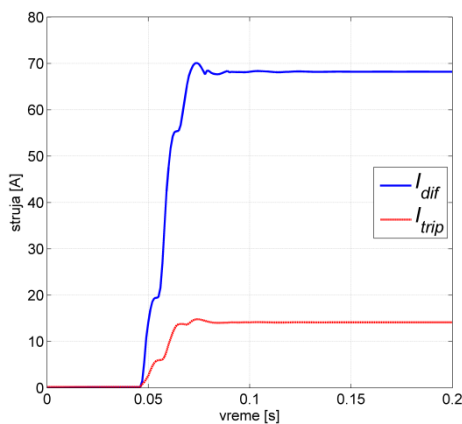
Analiza inverzne komponente struja (Slike 6.52 i 6.53) samo 1 ms nakon kvara detektuje da se on nalazi unutar zone zaštite (moduli inverznih komponenti na obe strane voda su veći od minimalne vrednosti i ugao između njih je veći od  $60^\circ$ ). Zaključak je da nema blokade i relej reaguje 2 ms nakon kvara i u fazi A i u fazi C.



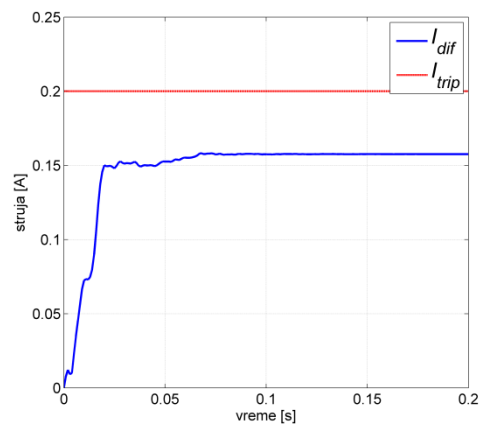
Slika 6.52: Moduli inverznih komponenti struja na oba kraja i minimalna vrednost pri kvaru K5 (ABB)



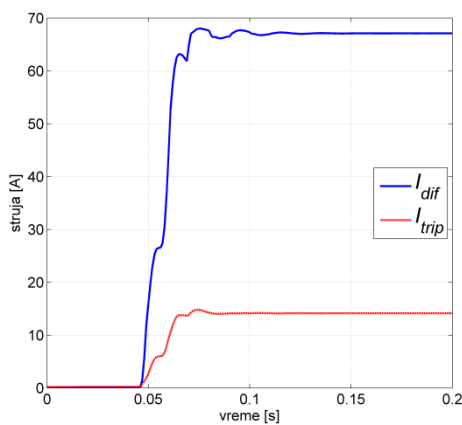
Slika 6.53: Ugaona razlika između fazora inverznih komponenti i usvojena granica pri kvaru K5 (ABB)



Slika 6.54: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K5(ABB)

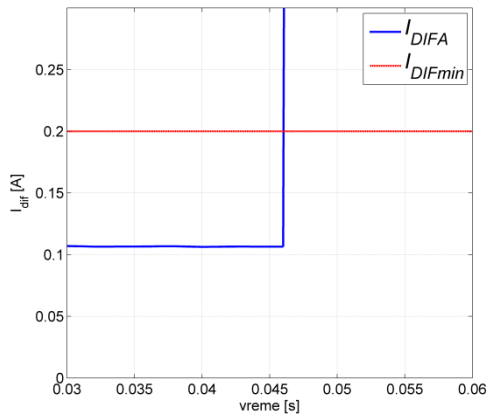


Slika 6.55: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K5(ABB)

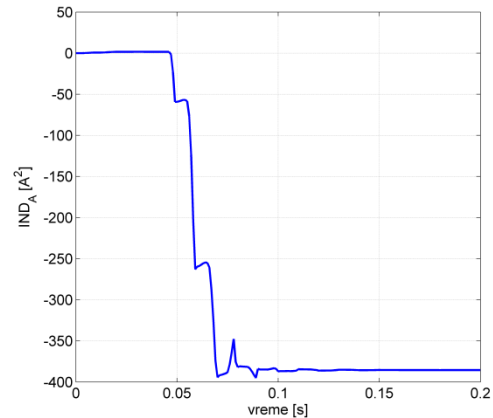


Slika 6.56: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K5(ABB)

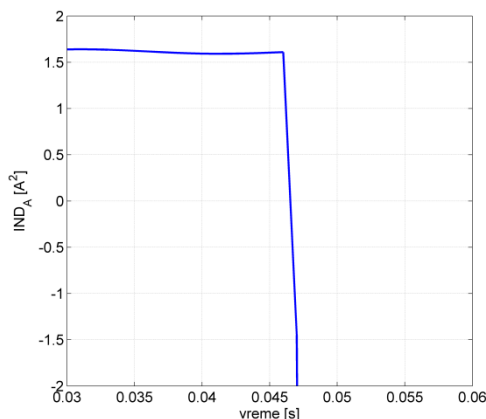
Na Slikama 6.57-6.64 prikazane su veličine koje koristi novi algoritam pri *Kvaru 5*. Ubrzo nakon nastanka kvara, diferencijalna struja postaje veća od  $I_{min}$  i prvi uslov za reagovanje je zadovoljen. Nešto kasnije i indikator smera postaje negativan pa je i drugi uslov ispunjen za fazu A. Releji reaguje već posle 1 ms. Da bi se lakše uočio promena znaka indikatora smera, prikazana je ista veličina ali sa uveličanom vremenskom osom. Za fazu A to je Slika 6.59. Sličan zaključak je i za fazu C, dok u fazi B nema uslova za reagovanje jer je diferencijalna struja manja od praga reagovanja, a indikator smera sve vreme ima pozitivnu vrednost.



Slika 6.57: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K5 (novi algoritam)

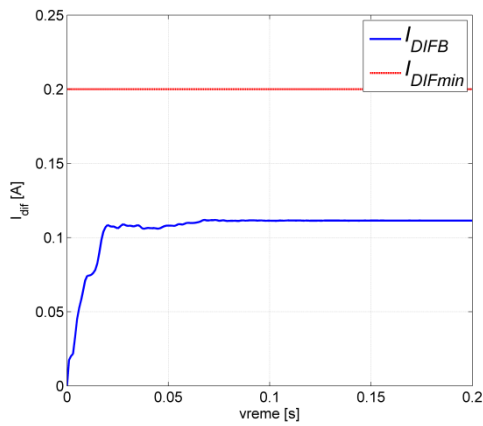


Slika 6.58: Indikator smera za fazu A pri kvaru K5 (novi algoritam)

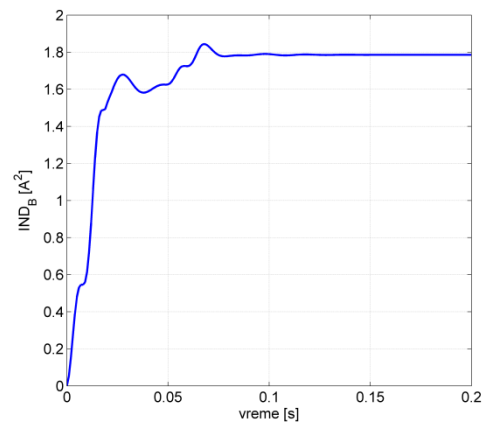


Slika 6.59: Indikator smera za fazu A pri kvaru K5 (novi algoritam)-zumirano

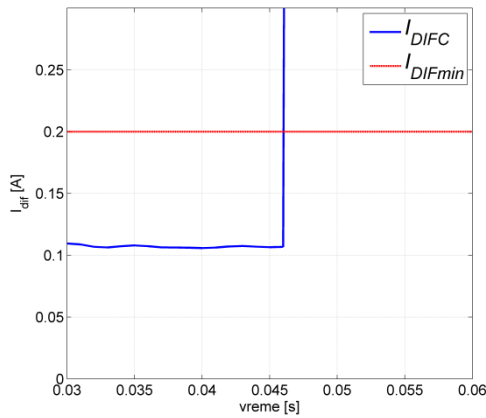




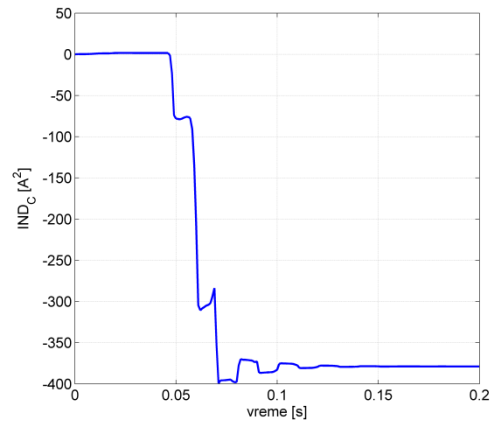
Slika 6.60: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K5 (novi algoritam)



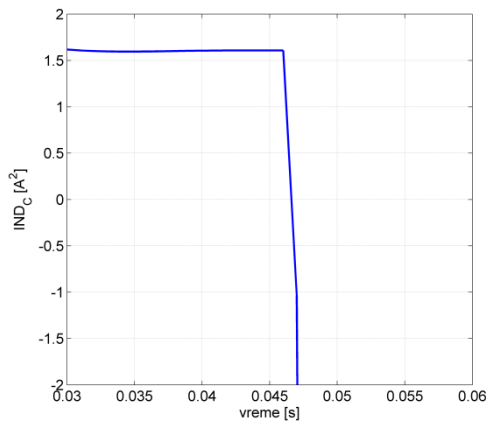
Slika 6.61: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K5 (novi algoritam)



Slika 6.62: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K5 (novi algoritam)



Slika 6.63: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K5 (novi algoritam)



Slika 6.64: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K5 (novi algoritam)-zumirano

U Tabeli 6.2 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve testirane kvarove na modelu 110 kV nadzemnog voda.

Tabela 6.2: Trenuci prepoznavanja kvarova na 110 kV vodu bez uvažavanja vremenskog kašnjenja pri prenosu signala sa jednog na drugi kraj voda

Kvar K1-van zone Trenutak nastanka kvara 40 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	-	-	-	-	-	
B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	
Kvar K2-van zone Trenutak nastanka kvara 40 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	6	8	5	-	-	
B	7	8	3	-	-	
C	11	11	4	-	-	
Kvar K3-u zoni Trenutak nastanka kvara 42 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	3	3	2	2	2	
B	-	-	-	-	-	
C	-	-	-	-	-	
Kvar K4-u zoni Trenutak nastanka kvara 44 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	-	-	-	-	-	
B	3	3	2	2	2	
C	3	3	2	2	2	
Kvar K5-u zoni Trenutak nastanka kvara 46 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	2	2	1	1	1	
B	-	-	-	-	-	
C	2	2	1	1	1	

Kvar K6-u zoni  
Trenutak nastanka kvara 48 ms

faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam		Ukupno
			Diferencijalna struja	Indikator smera	
A	3	3	1	1	1
B	3	3	1	1	1
C	4	4	2	1	2

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

### 6.1.1. Uticaj otpornosti luka, dužine voda i snage izvora

Diferencijalna zaštita je osetljiva na prelazne otpornosti na mestu kvara. Ovakva pojava dovodi do sporijeg reagovanja releja ili čak do njegovog nereagovanja. Osim toga, velika dužina voda ima slične uticaje na brzinu konvergencije algoritma. Novi algoritam je testiran u četiri različite situacije. Prva situacija je sa velikom otpornošću na mestu kvara, druga je kada je u pitanju dugačak vod, a treća kada je sa jedne strane voda jak izvor, a sa druge slab izvor. Četvrta situacija uzima u obzir sve navedene okolnosti. Peta simulacija predstavlja slučaj kada je kvar u blizini elektrane. Tabela 6.3 prikazuje glavne parametre simulacija. U svim simulacijama su korišćeni modeli strujnih transformatora kao za kvarove K2-K6.

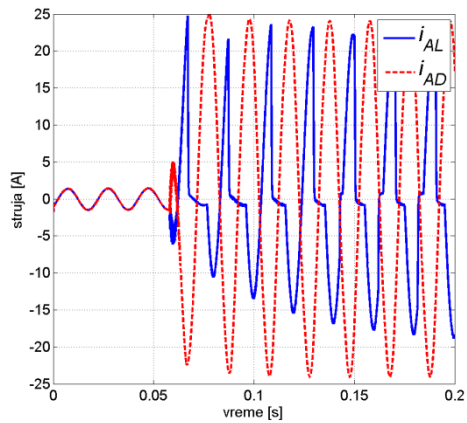
Tabela 6.3: Podešeni parametri simulacija

Redni broj kvara	Trenutak nastanka kvara [s]	Pozicija kvara [%]*	Tip kvara	Prelazna otpornost luka [ $\Omega$ ]	Dužina voda [km]	Snaga trofaznog kratkog spoja mreže sa leve strane voda [MVA]	Snaga trofaznog kratkog spoja mreže sa desne strane voda [MVA]
Kvar 7	50	20	ABC	0	150	5000	5000
Kvar 8	52	40	AB	50	60	5000	5000
Kvar 9	54	60	B-N	0	60	5000	200
Kvar 10	56	80	BC-N	50	150	5000	200
Kvar 11	58	50	ABC	0	20	200	5000

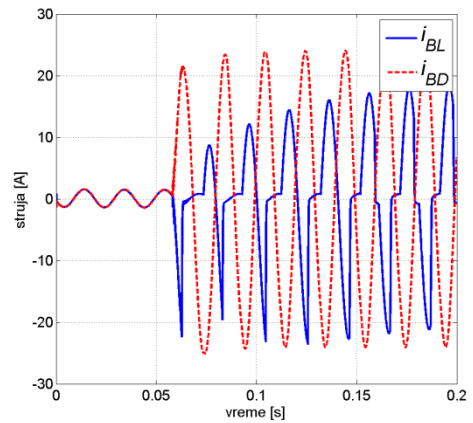
\*Procenat od cele dužine voda gledano sa leve strane

Potrebno je napomenuti da je samo za slučajeve kada je dužina voda 150 km, prepodešena drugačija vrednost za minimalnu struju reagovanja ( $I_{min}$ ). Ova vrednost se mora proračunati na osnovu izraza (10). Za vod dugačak 150 km,  $I_c$  iznosi 26,6 A (0,266 A na sekundarnoj strani). Granica od 0,4 A je sasvim dovoljna. Ovo je 40% od naznačene sekundarne struje strujnih transformatora (1 A). Menjana je pozicija kvara i trenutak njegovog nastanka.

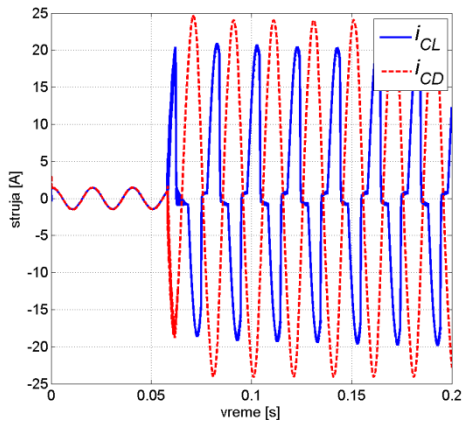
U nastavku će biti prikazani rezultati za sve algoritme pri *Kvaru 11*. Slike 6.65-6.67 prikazuju talasne oblike struja u sve tri faze. Ovaj kvar je simuliran da bi se proverila brzina algoritma za detektovanje kvarova u blizini elektrane. U tom slučaju je izražena jednpsmerna komponenta u struji kvara sa strane elektrane što je uočljivo. Za snagu elektrane je usvojeno 300 MW.



Slika 6.65: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri kvaru K11

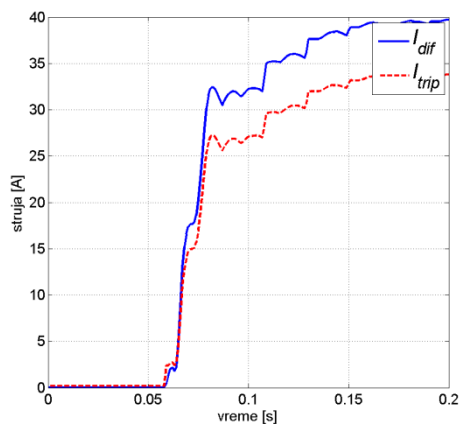


Slika 6.66: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi B pri kvaru K11

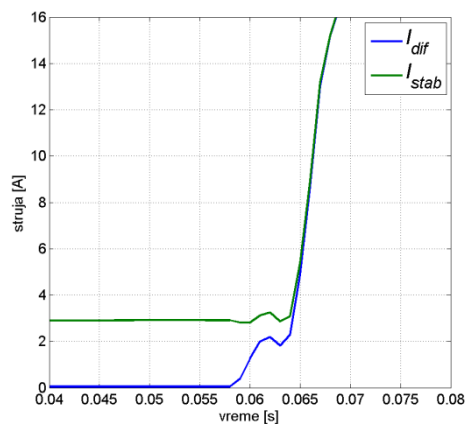


Slika 6.67: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi C pri kvaru K11

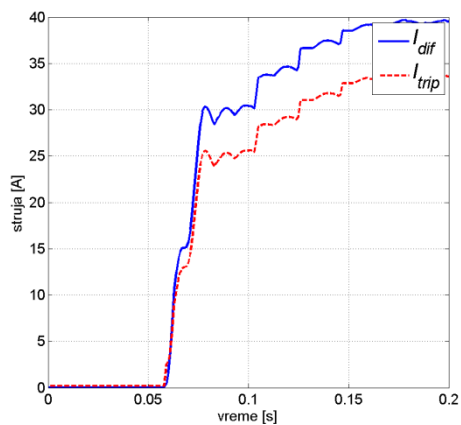
Na Slikama 6.68-6.73 mogu se videti veličine na osnovu kojih Siemens-ov algoritam donosi odluku o reagovanju. Kvar se najsporije prepoznaje u fazi A. Releju je potrebno 5 ms. U fazi B, kvar se detektuje nakon 3 ms. Za fazu C odziv releja je brži za 1 ms. Stabilizaciona struja ni u fazi B, ni u fazi C ne zalazi u oblast dodatne stabilizacije, što znači da nema blokade zaštite.



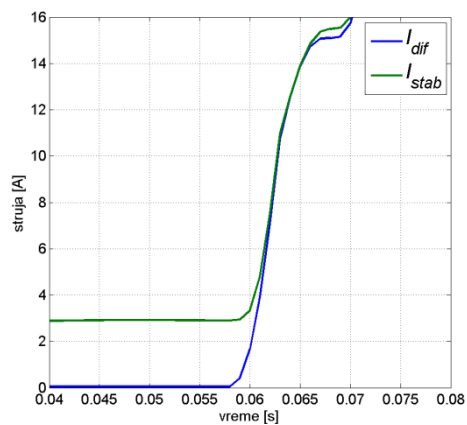
Slika 6.68: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K11 (SIEMENS)



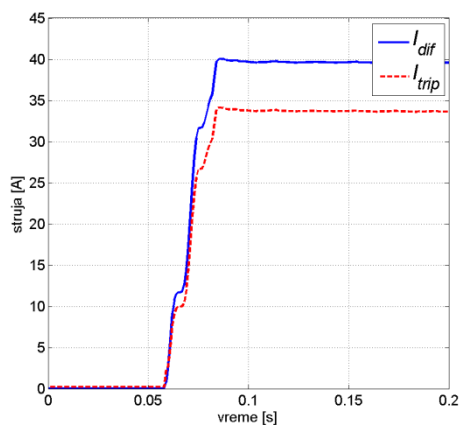
Slika 6.69: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu A pri kvaru K11- zumirano (SIEMENS)



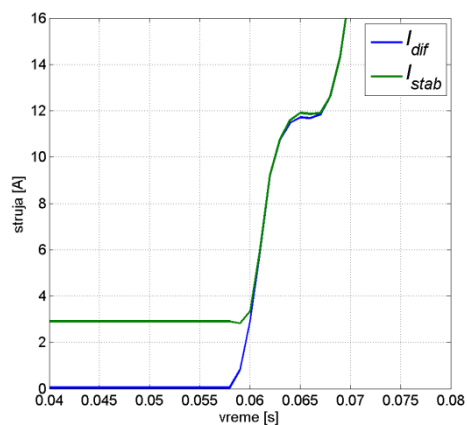
Slika 6.70: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K11 (SIEMENS)



Slika 6.71: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu B pri kvaru K11- zumirano (SIEMENS)



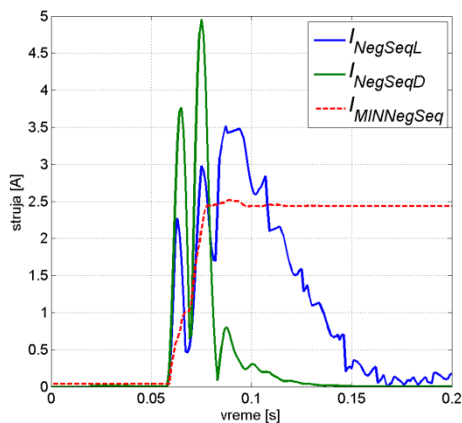
Slika 6.72: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K11 (SIEMENS)



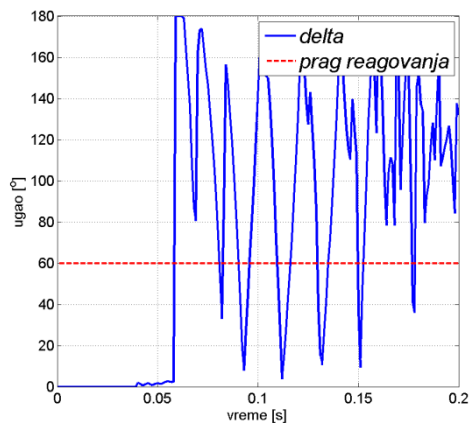
Slika 6.73: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu C pri kvaru K11- zumirano (SIEMENS)

Na Slikama 6.74-6.6.78 nalaze se relevantne veličine algoritma koji je zasnovan na inverznoj komponenti struje. Inverznom komponentom struje, kvar se detektuje nakon 1 ms. Diferencijalna

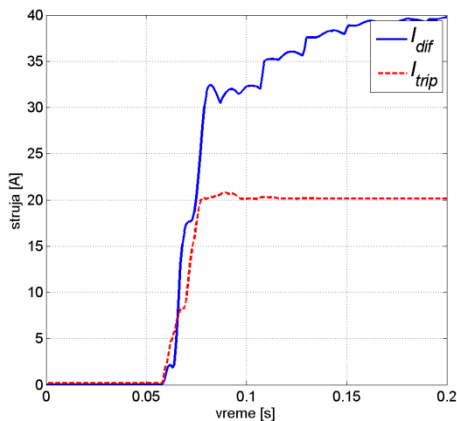
struja u fazi A postaje veća od struje reagovanja nakon 5 ms. U fazi B signal za isključenje prekidača se šalje 3 ms nakon kvara. U fazi C je najrži odziv. Kvar se detektuje posle 1 ms.



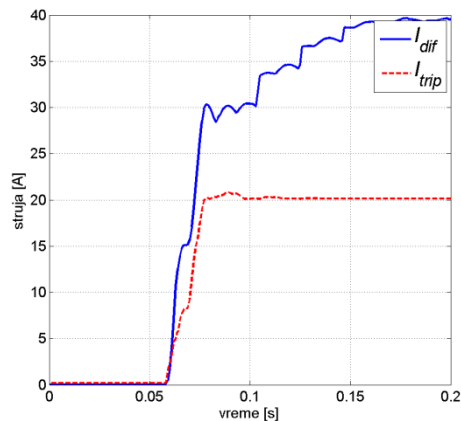
Slika 6.74: Moduli inverznih komponenti struja na oba kraja i minimalna vrednost pri kvaru K11 (ABB)



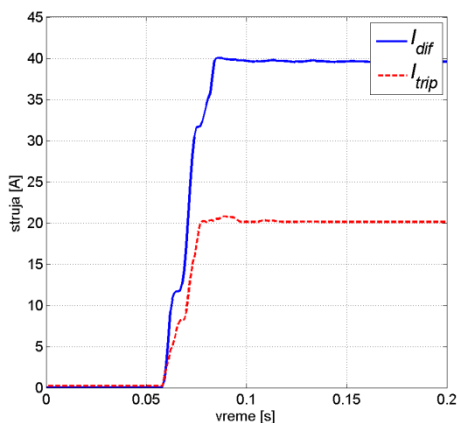
Slika 6.75: Ugaona razlika između fazora inverznih komponenti i usvojena granica pri kvaru K11 (ABB)



Slika 6.76: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K11(ABB)



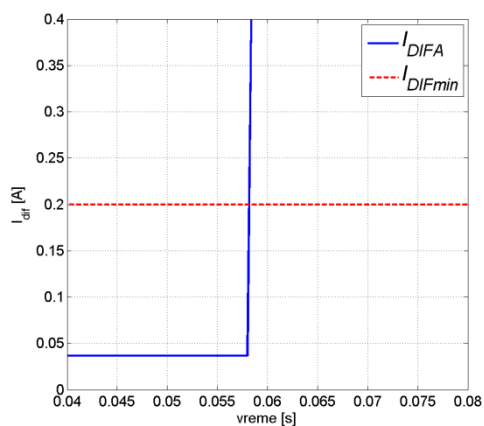
Slika 6.77: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K11(ABB)



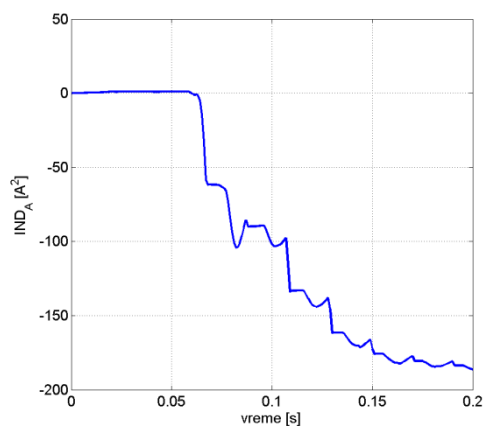
Slika 6.78: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K11(ABB)

Slike 6.79-6.87 prikazuju veličine koje koristi novi algoritam pri *Kvaru 11*. Kvar je prepoznat u svim fazama. U svim fazama uslov za reagovanje 2 ms nakon nastanka istog.

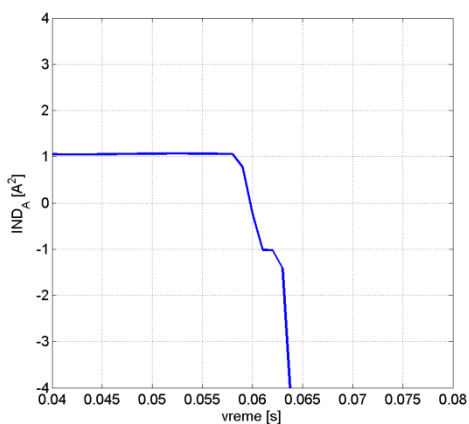
Slike 6.81, 6.84 i 6.87 prikazuju indikatore smera u fazama A, B odnosno C sa uvećanom vremenskom osom kako bi se lakše uočila promena znaka date veličine.



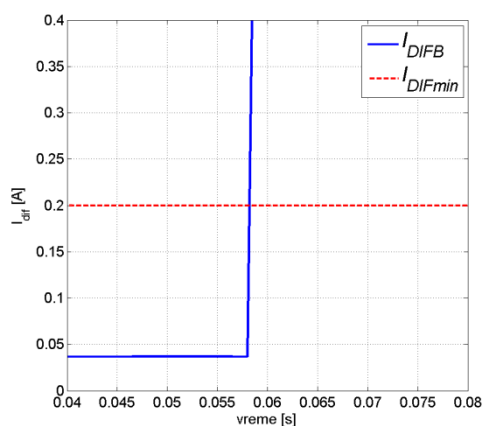
Slika 6.79: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K11 (novi algoritam)-zumirano



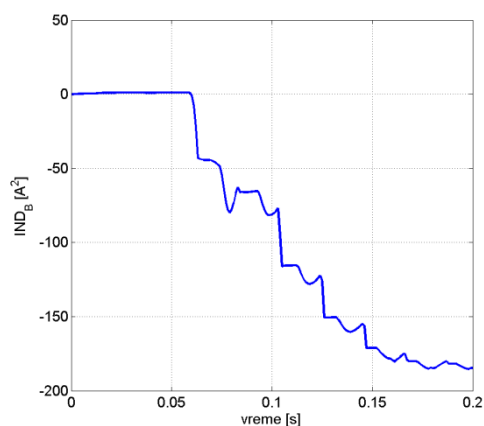
Slika 6.80: Indikator smera za fazu A pri kvaru K11 (novi algoritam)



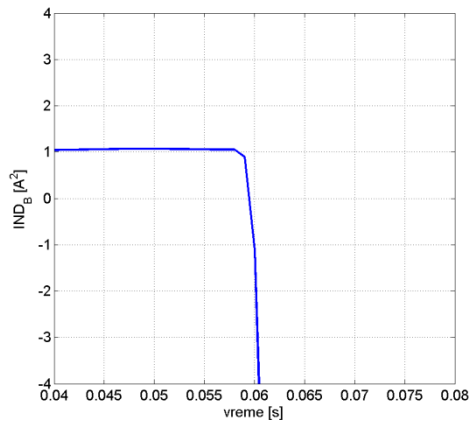
Slika 6.81: Indikator smera za fazu A pri kvaru K11 (novi algoritam)-zumirano



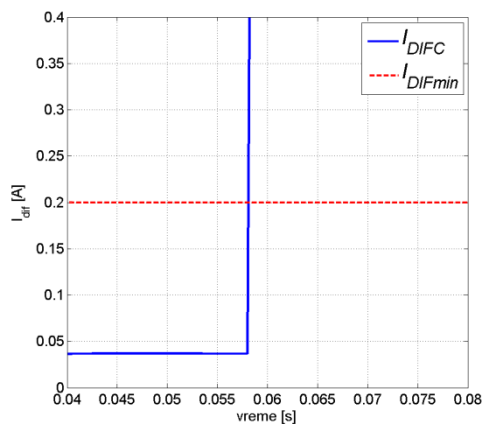
Slika 6.82: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K11 (novi algoritam)-zumirano



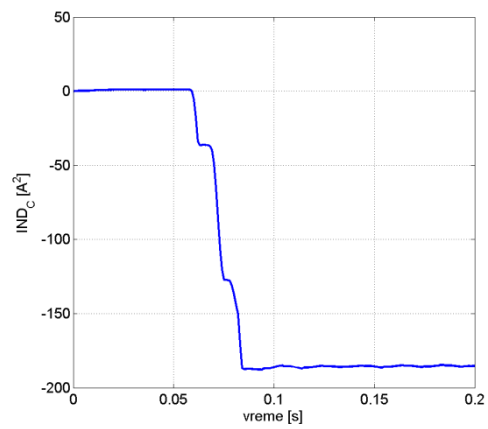
Slika 6.83: Indikator smera za fazu B pri kvaru K11 (novi algoritam)



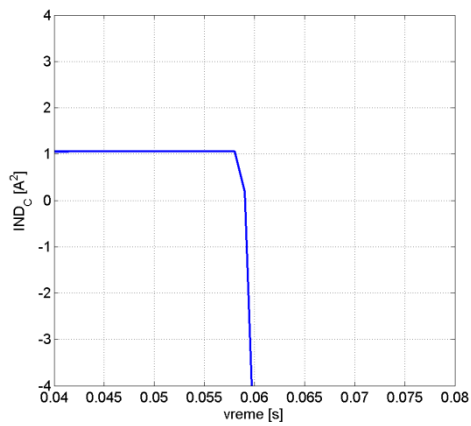
Slika 6.84: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K11 (novi algoritam)-zumirano



Slika 6.85: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K11 (novi algoritam)-zumirano



Slika 6.86: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K11 (novi algoritam)



Slika 6.87: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K11 (novi algoritam)-zumirano

U Tabeli 6.4 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve pomenute kvarove.



Tabela 6.4: Trenuci prepoznavanja kvarova bez uvažavanja vremenskog kašnjenja pri prenosu signala sa jednog na drugi kraj voda

Kvar K7-u zoni Trenutak nastanka kvara 50 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	3	3	1	2	2	
B	3	3	1	2	2	
C	4	4	1	2	2	
Kvar K8-u zoni Trenutak nastanka kvara 52 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	4	4	1	2	2	
B	4	4	1	3	3	
C	-	-	-	-	-	
Kvar K9-u zoni Trenutak nastanka kvara 54 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	-	-	-	-	-	
B	5	5	1	3	3	
C	-	-	-	-	-	
Kvar K10-u zoni Trenutak nastanka kvara 56 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	-	-	-	-	-	
B	3	2	1	2	2	
C	3	3	1	2	2	
Kvar K11-u zoni Trenutak nastanka kvara 58 ms						
faza	SIEMENS	ABB	Diferencijalna struja	Nov algoritam Indikator smera	Ukupno	
A	5	5	1	2	2	
B	3	3	1	2	2	
C	2	1	1	2	2	

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

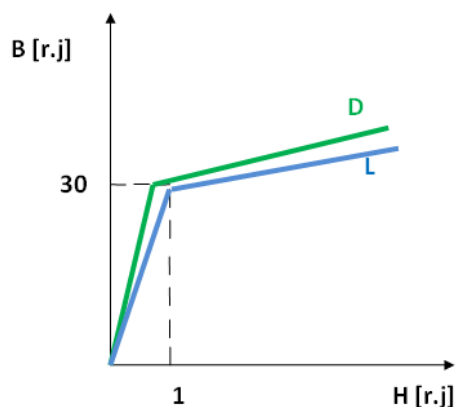
## 6.2. 35 kV mreža

U literaturi se pominju situacije koje mogu da izazovu sporiji odziv releja. Neke od takvih su navedene u prethodnom poglavlju, a to su: prelazna otpornost na mestu kvara, dužina voda i izrazita razlika u snagama aktivnih mreža sa dve strane voda. Međutim, uočeno je da se pri kvarovima sa zemljom, u radijalnim mrežama, može javiti isti uticaj na brzinu konvergencije algoritma [26-29]. Zemljospojevi za posledicu imaju male vrednosti struja i napona sa strane potrošnje što može prouzrokovati spor odziv releja ili čak njegovo nereagovanje.

Pokazano je da je algoritam za podužnu diferencijalnu zaštitu pouzdan uz brz odziv za dvostrano napajane vodove, ali se ispostavlja da je nešto sporiji za zemljospojeve u radijalnim mrežama. Taj nedostatak prevaziđen je dodatnim algoritmom koji će biti opisan u ovom poglavlju.

Osnovna ideja ogleda se u tome da se umesto stabilizacione struje koristi smer nultih struja koje se dovode releju. Smer nultih struja određuje se faznom komparacijom opisanom u [34, 35]. Prednost predloženog pristupa je u tome što se dobija brži odziv uz minimalan broj računskih operacija.

Na obe strane štice vodova formirani su modeli strujnih transformatora sa sledećim karakteristikama: prenosni odnos 200/1 A/A, snaga 10 VA, strujna (složena) greška 10 i granični faktor tačnosti 30 (10P30). Prvom delu karakteristike odgovara greška od 10%, koju strujni transformator čini za primarne struje do  $30I_n$ . Prvi delovi obe karakteristike se ne poklapaju kako bi se simulirala veća struja debalansa u režimu bez kvara. Na sekundarnoj strani svih strujnih transformatora nalazi se rezistivno opterećenje od  $5 \Omega$  čime se uzima u obzir impedansa releja i otpornost sekundarnih veza. Drugi delovi karakteristika se skoro poklapaju. Na Slici 6.88 prikazane su karakteristike magnećenja strujnih transformatora sa leve i desne strane voda.

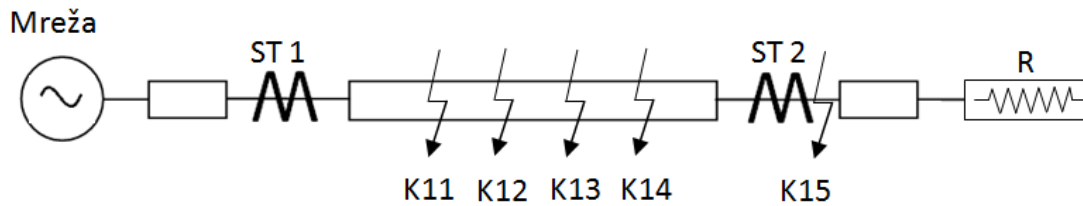


Slika 6.88: Karakteristike magnećenja strujnih transformatora sa leve (L) i desne strane voda (D)

Model mreže je 35 kV nivoa i ima ograbičenu struju zemljospoja na 300 A kao što je objašnjeno u poglavlju 5.4.

Za granicu reagovanja uzeta je vrednost od 0,2 A, što predstavlja 4 % od naznačene struje strujnog transformatora (5 A).

Pomoću formiranog modela simulirani su različiti kvarovi. Jednopolna šema, sa naznačenim mestima pravljenih kvarova, prikazana je na Slici 6.89.



Slika 6.89: Jednopolna šema mreže sa naznačenim mestima kvarova

Razmatrani su posebni problemi koji mogu uticati na brzinu i pouzdanost zaštite kao što je otpornost na mestu kvara. Algoritam je testiran i za slučajeve kada je mreža izolovana ili neefikasno uzemljena. Postupak je upoređen sa konvencionalnim rešenjima, koja su našla primenu u praksi. Ovoga puta usvojen je nagib karakteristike od  $40^\circ$  [3, 22-25]. Biće prikazani i rezultati za faznu i za nultu diferencijalnu zaštitu predložene novim algoritmom kako bi se jasno uporedile njihove performanse za zemljospojeve u ovakvim mrežama.

Kvarovi *K12-K15* su unutar zone zaštite, dok je kvar *K16* van zone zaštite. S obzirom da je struja zemljospoja ograničena, strujni transformatori ne ulaze u zasićenje. U Tabeli 6.5 navedeni su parametri različitih simulacija. Formirane su sve moguće kombinacije uzemljenja neutralne tačke na strani potrošnje, odnosno mreže. Jasno je da se uzemljenje neutralne tačke sa strane potrošnje praktično ne javlja u praksi na srednjem naponu, ali su ovde komentarisani i takvi slučajevi kako bi se apostrofirala prednost algoritma baziranog na nultim komponentnim strujama. Osim toga, i 110 kV mreža može biti radijalna.

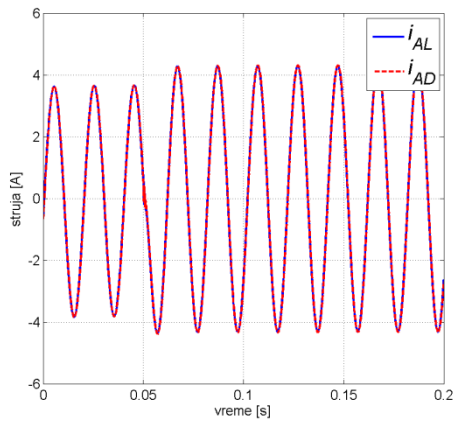
Tabela 6.5: Podaci o kvarovima i o strujnim transformatorima

Redni broj kvara	Tip kvara	Pozicija kvara [%]*	Trenutak nastanka kvara [ms]	Otpornost na mestu kvara [ $\Omega$ ]	Zvezdište mreže	Zvezdište potrošnje
Kvar 12	C-N	20	50	-	Preko otpornika	Direktno uzemljeno
Kvar 13	AB-N	40	52	50	Preko otpornika	Direktno uzemljeno
Kvar 14	B-N	60	54	-	Neuzemljeno	Direktno uzemljeno
Kvar 15	AC-N	80	56	-	Preko otpornika	Neuzemljeno
Kvar 16	C-N	Iza ST2	58	-	Preko otpornika	Direktno uzemljeno

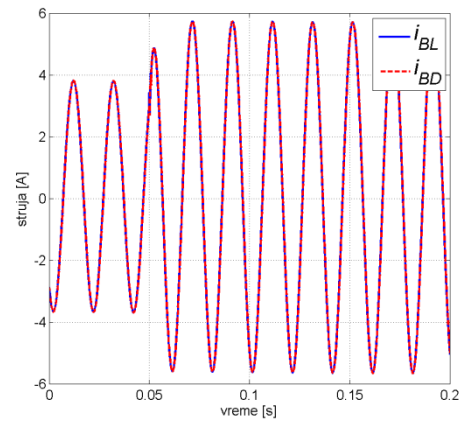
\*Procenat od cele dužine voda gledano sa leve strane

Biće prikazani talasni oblici struja i relevantnih veličina samo samo za kvarove *K12* i *K16*. Ostali rezultati biće tabelarno prikazani na kraju poglavlja.

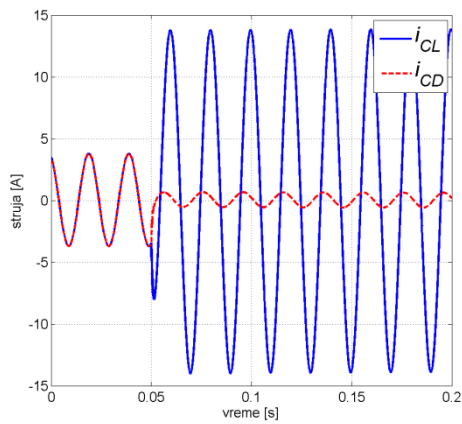
Na Slikama 6.90-6.92 prikazane su struje po fazama koje se dovode releju pri kvaru *K12*. Kao što je napomenuto, nema zasićenja te nema ni izobličenja struja na sekundarnim stranama strujnih transformatora.



Slika 6.90: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri kvaru K12

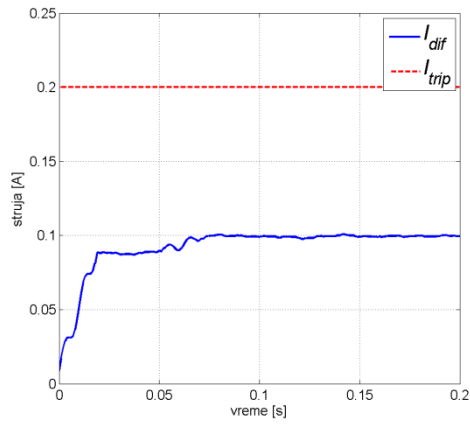


Slika 6.91: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi B pri kvaru K12

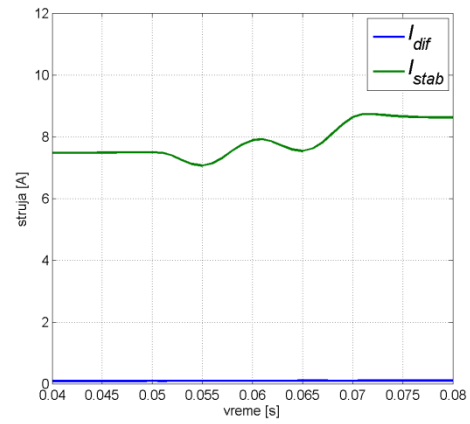


Slika 6.92: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi C pri kvaru K12

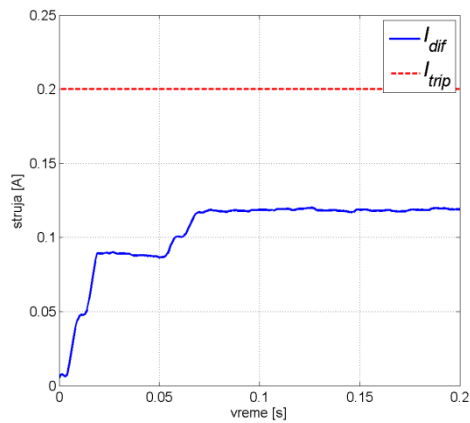
Na Slikama 6.93-6.98 mogu se videti relevantne veličine za algoritam firme SIEMENS. Uočljivo je jasno da je konvergencija sporija. Kvar se detektuje u fazi C tek 18 ms po njegovom nastanku.



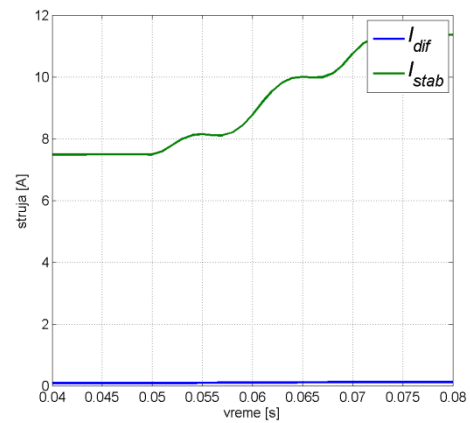
Slika 6.93: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K12 (SIEMENS)



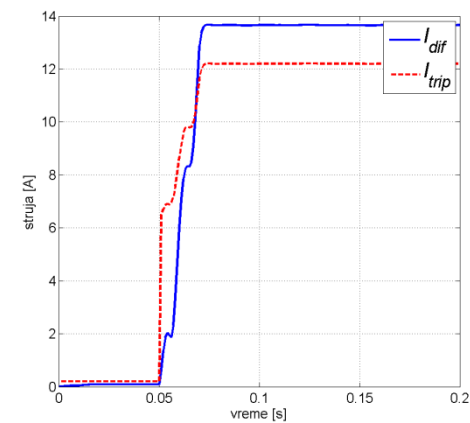
Slika 6.94: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu A pri kvaru K12- zumirano (SIEMENS)



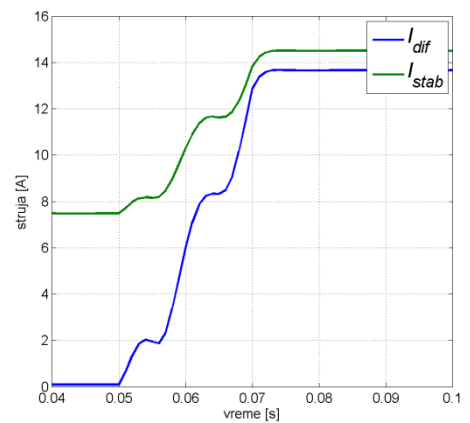
Slika 6.95: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K12 (SIEMENS)



Slika 6.96: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu B pri kvaru K12- zumirano (SIEMENS)

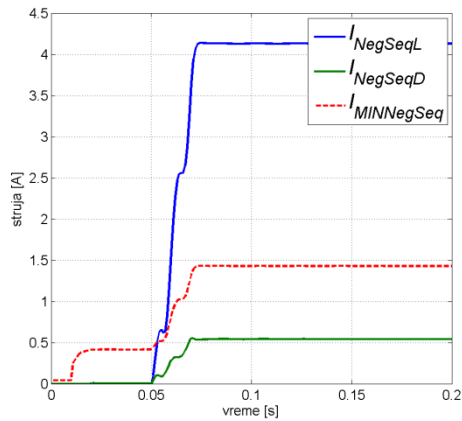


Slika 6.97: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K12 (SIEMENS)

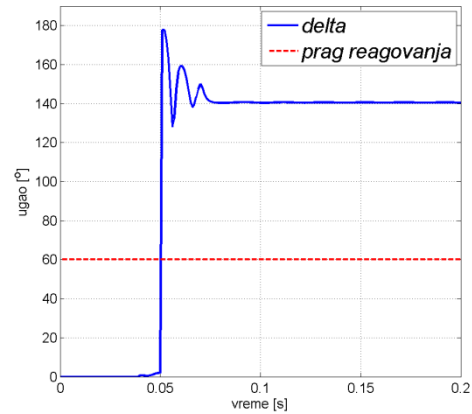


Slika 6.98: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu C pri kvaru K12- zumirano (SIEMENS)

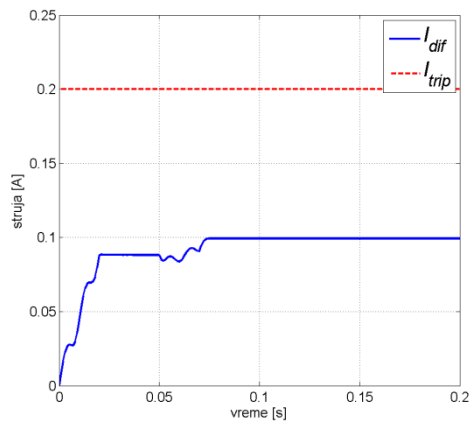
Na Slikama 6.99-6.103 mogu se videti relevantne veličine za algoritam firme ABB. Takođe se vidi spora konvergencija algoritma, pa se kvar detektuje tek za 17 ms.



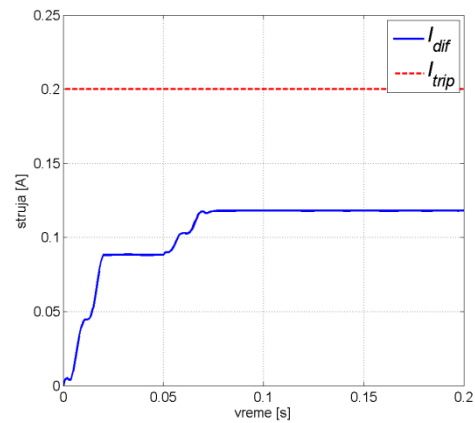
Slika 6.99: Moduli inverznih komponenti struja na oba kraja i minimalna vrednost pri kvaru K12 (ABB)



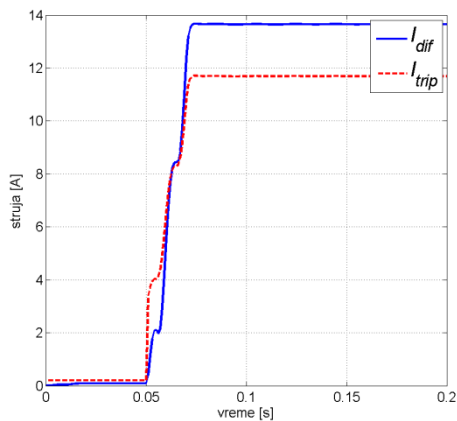
Slika 6.100: Ugaona razlika između fazora inverznih komponenti i usvojena granica pri kvaru K12 (ABB)



Slika 6.101: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K12 (ABB)



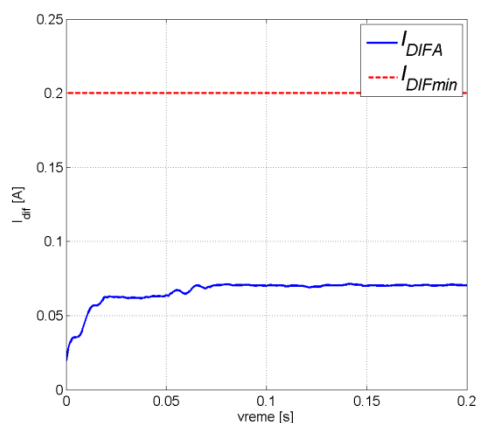
Slika 6.102: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K12 (ABB)



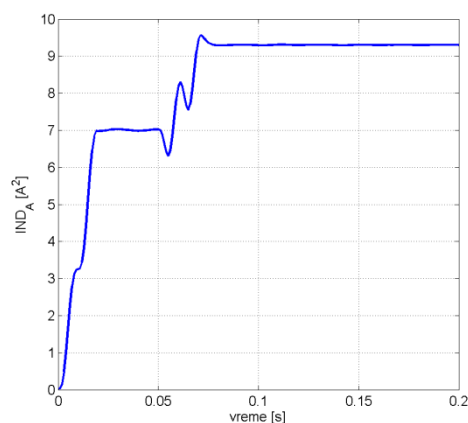
Slika 6.103: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K12 (ABB)

Interesantni su rezultati za faznu diferencijalnu zaštitu realizovanu novim algoritmom. Rezultati za taj algoritam prikazani su na Slikama 6.104-6.109. Sa Slike 6.107 uočljivo je da fazna diferencijalna struja vrlo brzo prelazi prag reagovanja, ali za konačan signal ka prekidaču, potrebno

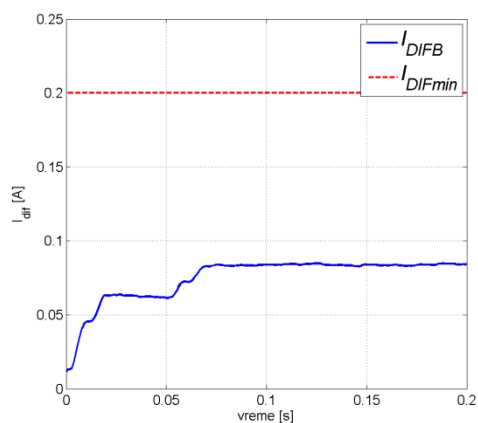
je i da indikator smeru za fazu C dobije negativnu vrednost. Međutim, to se ne dešava u ovom slučaju i time ne postoji uslov za reagovanje zaštite.



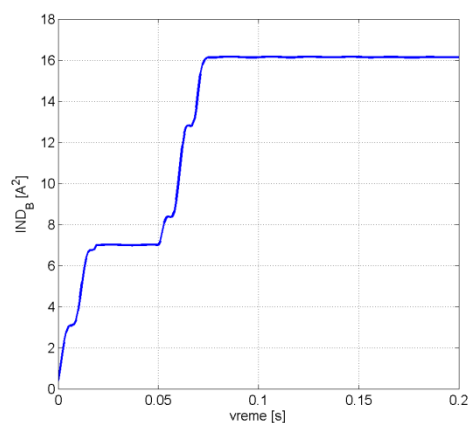
Slika 6.104: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K12 (novi algoritam)



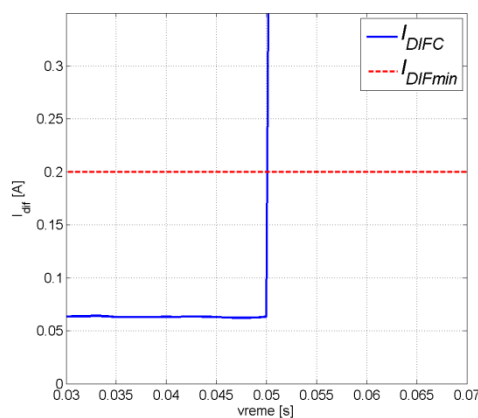
Slika 6.105: Indikator smeru za fazu A pri kvaru K12 (novi algoritam)



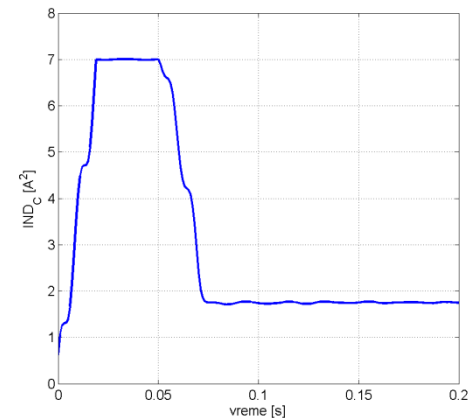
Slika 6.106: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K12 (novi algoritam)



Slika 6.107: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K12 (novi algoritam)

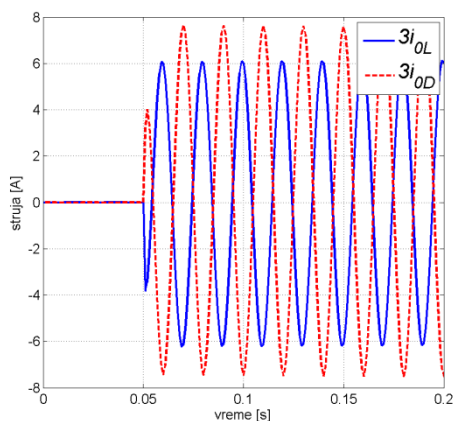


Slika 6.108: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K12 (novi algoritam)-zumirano

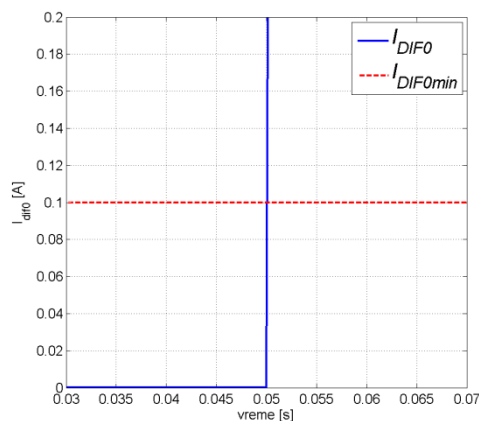


Slika 6.109: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K12 (novi algoritam)

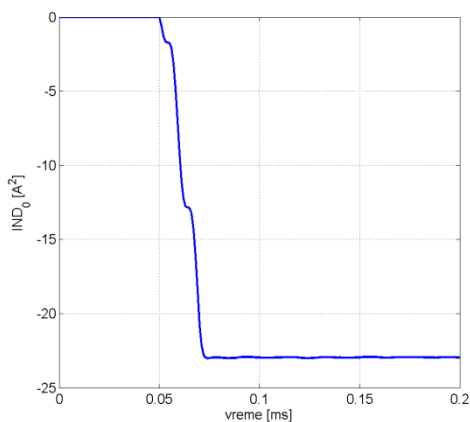
Slike 6.110-6.113 prikazuju rezultate za nultu diferencijalnu zaštitu. Nulta diferencijalna struja je pre kvara praktično nula. Zbog toga se minimalna struja reagovanja može sniziti u odnosu na prethodne algoritme, čime se povećava osetljivost releja. Usvojena je vrednost od 0,1 A. Indikator smeru je pre kvara jednak nuli, a nakon kvara je manji od nule sve vreme. Nulta diferencijalna struja postaje veća od minimalne struje reagovanja u trenutku  $t=0,051$  s što znači da su uslovi definisani izrazima (4.12) i (4.13) zadovoljeni i zaštita reaguje već 1 ms nakon nastanka kvara. Jedini nedostatak nulte diferencijalne zaštite je ne selektivnost faza pogođenih kvarom. U 35 kV mrežama, koje su i radijalne, to ne predstavlja problem jer prekidači upravo imaju opruge koje deluju u sve tri faze jednovremeno, čime se svakako, pri bilo kom kvaru, prekidaču sve tri fazne struje.



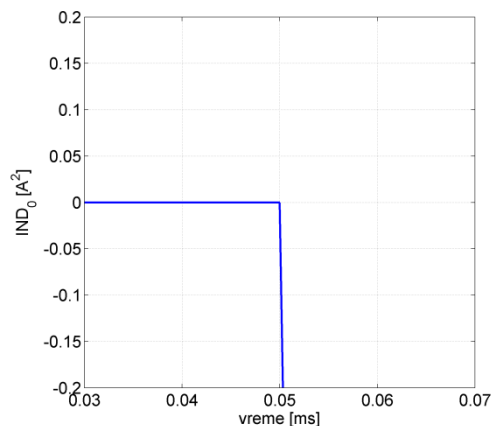
Slika 6.110: Trostruke nulte struje sa obe strane voda pri kvaru K12



Slika 6.111: Nulta diferencijalna struja pri kvaru K12 - zumirano



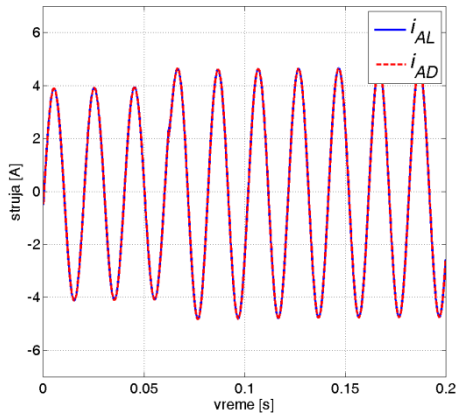
Slika 6.112: Indikator smeru trostruke nulte struje pri kvaru K12



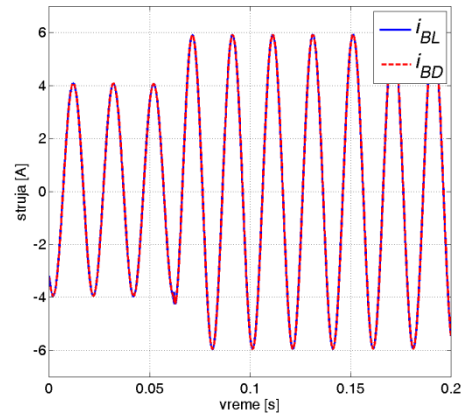
Slika 6.113: Indikator smeru trostruke nulte struje pri kvaru K12 - zumirano

Struje u fazama A, B i C na sekundarnoj strani strujnih transformatora pri kvaru K16, van zone zaštite, predstavljene su na Slikama 6.114-6.116. Ovim bi trebalo da se prikaže selektivnost nulte diferencijalne zaštite.

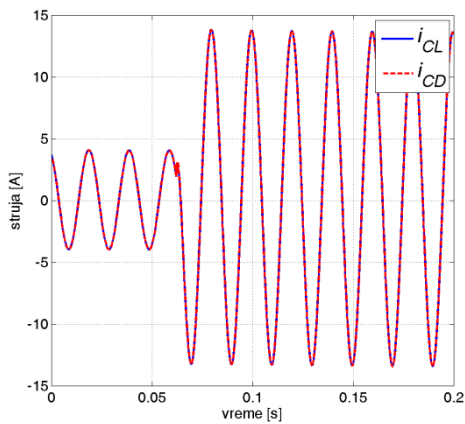




Slika 6.114: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi A pri kvaru K16

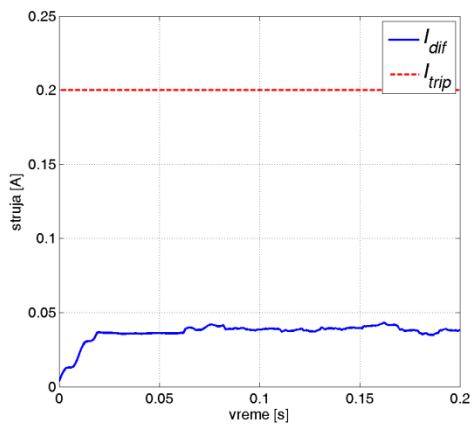


Slika 6.115: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi B pri kvaru K16

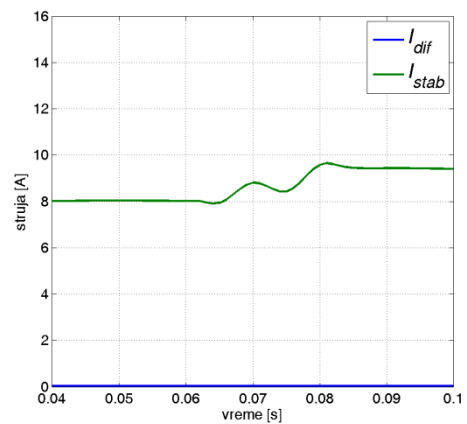


Slika 6.116: Sekundarne struje strujnih transformatora u fazi C pri kvaru K16

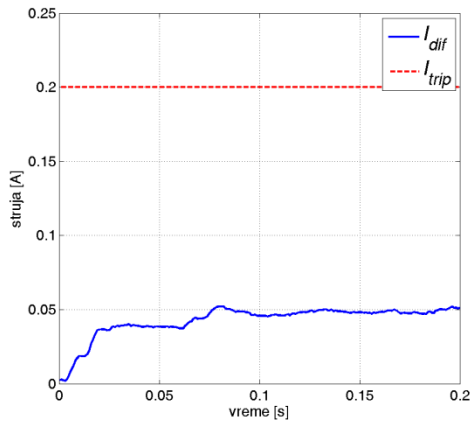
Veličine potrebne za reagovanje releja pri korišćenju SIEMENSov-og algoritma vide se na Slikama 6.117-6.122. U ovom slučaju nema uslova za reagovanje i algoritam je selektivan za kvarove van zone zaštite.



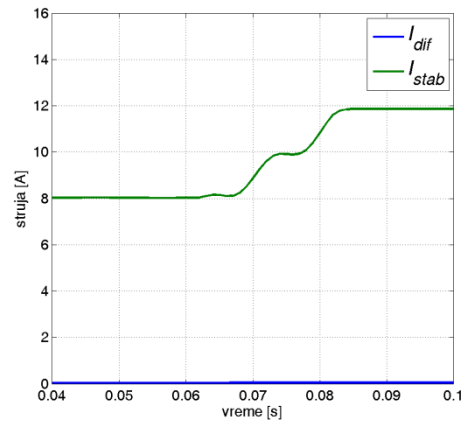
Slika 6.117: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K16 (SIEMENS)



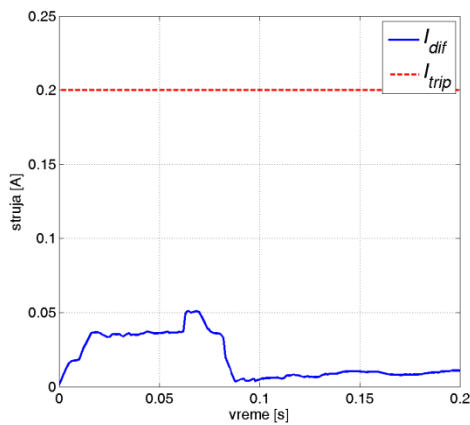
Slika 6.118: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu A pri kvaru K16-zumirano (SIEMENS)



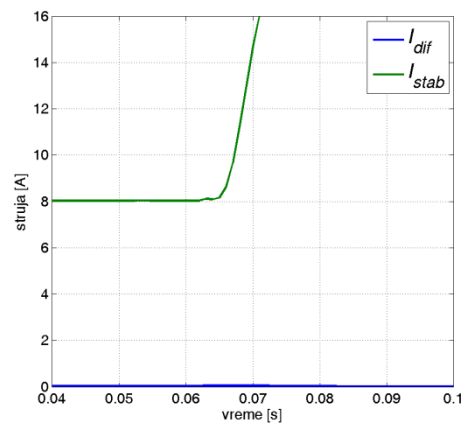
Slika 6.119: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K16 (SIEMENS)



Slika 6.120: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu B pri kvaru K16-zumirano (SIEMENS)

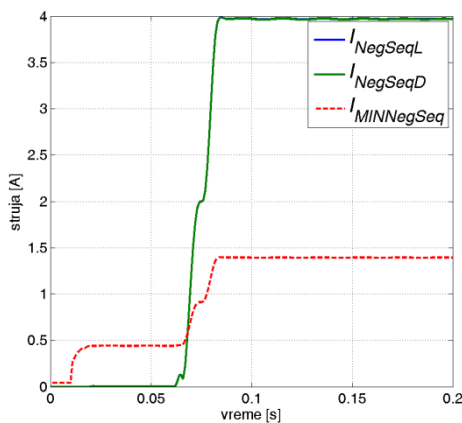


Slika 6.121: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K16 (SIEMENS)

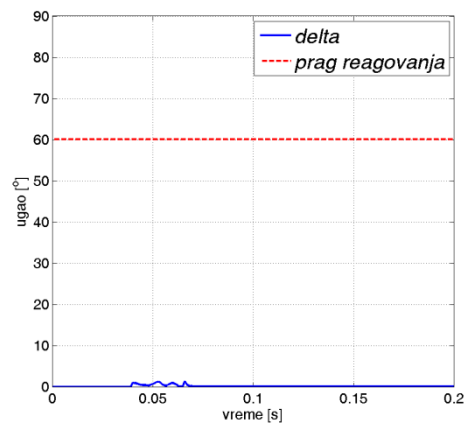


Slika 6.122: Diferencijalna struja i stabilizaciona struja za fazu C pri kvaru K16-zumirano (SIEMENS)

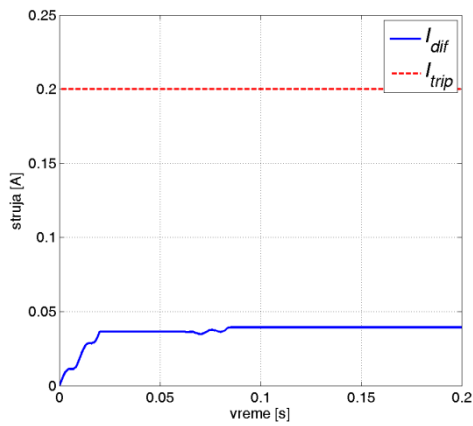
ABB-ov algoritam testiran je za isti kvar. Takođe nema uslova za nepotrebno reagovanje zaštite. To dokazuju veličine na Slikama 6.123-6.127.



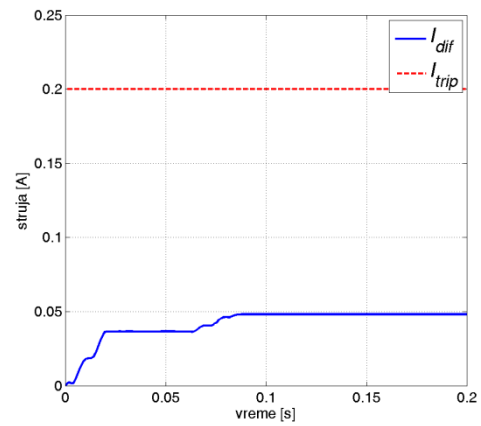
Slika 6.123: Moduli inverznih komponenti struja na oba kraja i minimalna vrednost pri kvaru K16 (ABB)



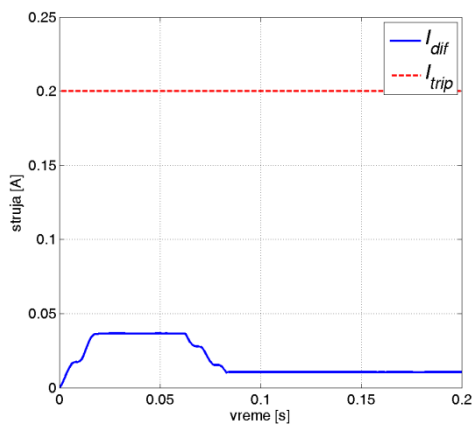
Slika 6.124: Ugaona razlika između fazora inverznih komponenti i usvojena granica pri kvaru K16 (ABB)



Slika 6.125: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K16(ABB)

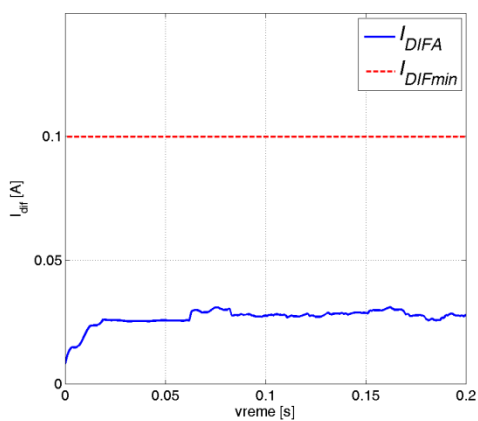


Slika 6.126: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K16(ABB)

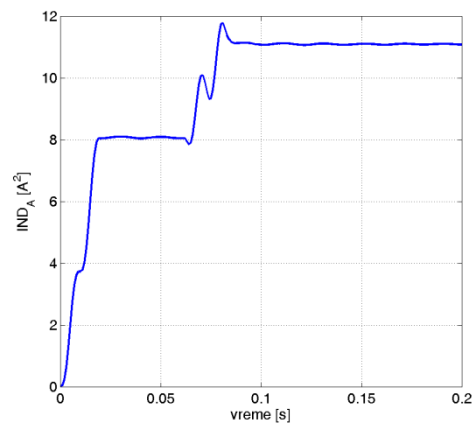


Slika 6.127: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K16(ABB)

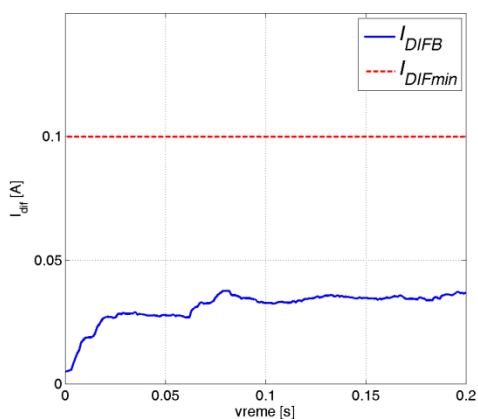
Fazna diferencijalna zaštita koja obuhvata nov algoritam, takođe je selektivna pri kvaru *K16*. Na Slikama 6.128-6.133 mogu se videti promene diferencijalne struje i indikatori smera za svaku fazu posebno.



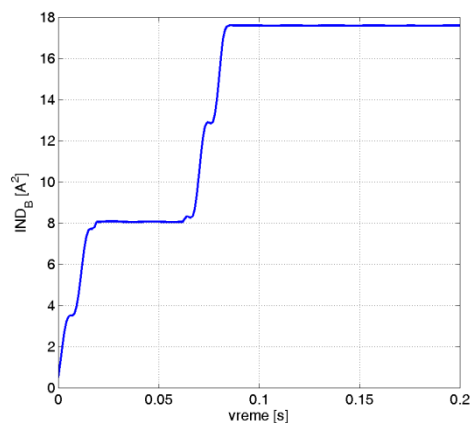
Slika 6.128: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K16 (novi algoritam)



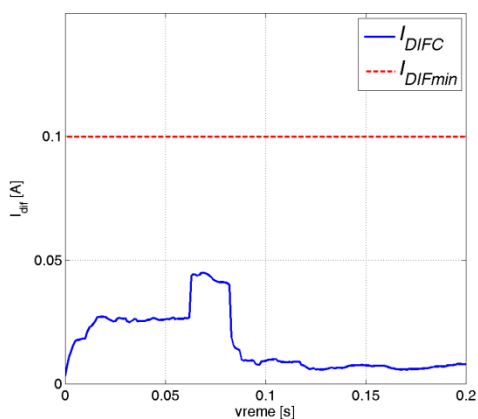
Slika 6.129: Indikator smera za fazu A pri kvaru K16 (novi algoritam)



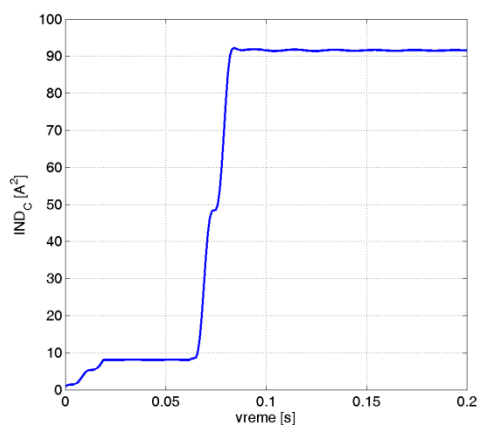
Slika 6.130: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K16 (novi algoritam)



Slika 6.131: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K16 (novi algoritam)

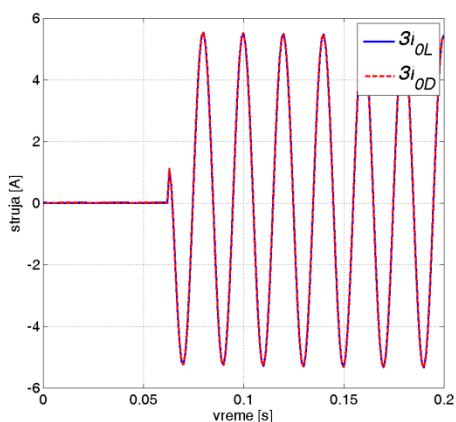


Slika 6.132: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K16 (novi algoritam)

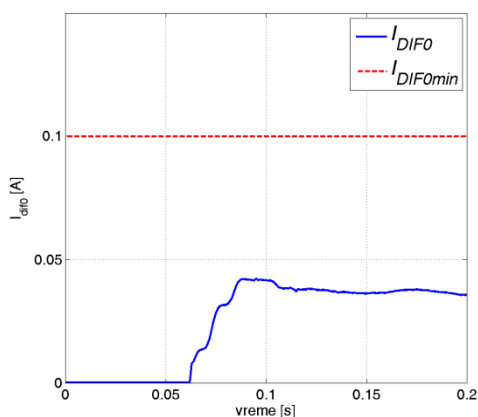


Slika 6.133: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K16 (novi algoritam)

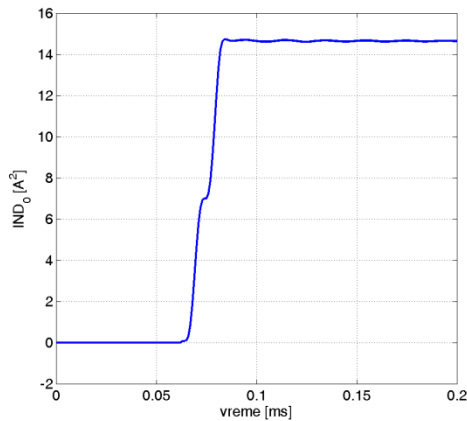
Konačno, nulta diferencijalna zaštita donosi odluku o reagovanju releja na osnovu trostrukih nultih struja, prikazanih na Slici 6.134. I ova zaštita je selektivna, nulta diferencijalna struja je manja od praga reagovanja i indikator smeru je pozitivan.



Slika 6.134: Trostruke nulte struje sa obe strane voda pri kvaru K16



Slika 6.135: Nulta diferencijalna struja pri kvaru K16



Slika 6.136: Indikator smeru trostruke nulte struje pri kvaru K16

U Tabeli 6.6 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve testirane kvarove kada je mreža radijalna. Treba napomenuti da je pri kvarovima *K13* i *K14*, indikator smeru trostrukih nultih struja uvek jednak nuli, jer je bar jedno zvezdište neuzemljeno (bilo zvezdište aktivne mreže, bilo zvezdište potrošnje). Time je drugi uslov za reagovanje nulte diferencijalne zaštite automatski ispunjen. Kada nulta diferencijalna struja pređe prag reagovanja (0,1 A) relej šalje signal za isključenje prekidača.

Tabela 6.6: Trenuci prepoznavanja kvarova bez uvažavanja vremenskog kašnjenja pri prenosu signala sa jednog na drugi kraj voda

Kvar K12-u zoni Trenutak nastanka kvara 50 ms								
faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smeru	Ukupno	Dif. struja	Indikator smeru	Ukupno
A	-	-	-	-	-			
B	-	-	-	-	-	1	1	1
C	18	17	1	-	-			
Kvar K13-u zoni Trenutak nastanka kvara 52 ms								
faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smeru	Ukupno	Dif. struja	Indikator smeru	Ukupno
A	-	-	1	-	-			
B	-	-	1	-	-	1	1	1
C	-	-	-	-	-			

Kvar K14-u zoni  
Trenutak nastanka kvara 54 ms

faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smera	Ukupno	Dif. struja	Indikator smera	Ukupno
A	-	-	-	-	-	-	-	-
B	16	16	1	-	-	1	1	1
C	-	-	-	-	-	-	-	-

Kvar K15-u zoni  
Trenutak nastanka kvara 56 ms

faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smera	Ukupno	Dif. struja	Indikator smera	Ukupno
A	17	18	1	10	10	-	-	-
B	-	-	-	-	-	2	1	2
C	17	17	1	-	-	-	-	-

Kvar K16-u zoni  
Trenutak nastanka kvara 58 ms

faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smera	Ukupno	Dif. struja	Indikator smera	Ukupno
A	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

Iako su zemljospojevi najčešći kvarovi, ipak treba komentarisati algoritme i u drugačijim situacijama. Izvršena su još dva dodatna testa. U pitanju su simulacije kada bi se u radijalnim mrežama pojavio kvar koji ne uključuje kontakt sa zemljom (dvofazni bez zemlje i trofazni kvarovi). Da se tekst ne bi opterećivao, rezultati ovih simulacija biće prikazani samo tabelarno. Tabela 6.7 sadrži vremena reagovanja svakog do sada komentaranog algoritma. Prvi kvar je dvofazan bez kontakta sa zemljom između faza A i C (Kvar K17), dok je drugi trofazan (Kvar K18). Oba kvara su simulirana u mreži sa istim parametrima kao i Kvar K12. To znači da je korišćen model mreže sa Slike 5.4, bez dodatnih otpornosti na mestu kvara i kada je struja zemljospoja ograničena na 300 A. Pozicija oba kvara je tačno na polovini voda.

Tabela 6.7: Trenuci prepoznavanja kvarova bez uvažavanja vremenskog kašnjenja pri prenosu signala sa jednog na drugi kraj voda

Kvar K17-u zoni								
Trenutak nastanka kvara 60 ms								
faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smer	Ukupno	Dif. struja	Indikator smer	Ukupno
A	12	12	1	12	12			
B	-	-	-	-	-	-	-	-
C	13	11	1	14	14			

Kvar K18-u zoni								
Trenutak nastanka kvara 62 ms								
faza	SIEMENS	ABB	Nov algoritam – fazna diferencijalna			Nov algoritam – nulta diferencijalna		
			Dif. struja	Indikator smer	Ukupno	Dif. struja	Indikator smer	Ukupno
A	12	14	1	26	26			
B	11	13	1	20	20	-	-	-
C	12	13	1	23	23			

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

U ovakvim situacijama bolje performanse imaju komercijalni algoritmi. Oni brže detektuju faze pogođene kvarom u odnosu na novi algoritam. Problem novog algoritma predstavlja indikator smer, jer je očigledno da fazna diferencijalna zaštita veoma brzo (za 1 ms) pređe prag reagovanja. Signal za isključenje prekidača se šalje sa zakašnjenjem u odnosu na sve dosadašnje simulacije jer je potrebno vreme da indikator smer iskonvergira ka negativnoj vrednosti. Nulta diferencijalna je u ovakvim situacijama potpuno neupotrebljiva jer nulta struja ne postoji ni pre, ali ni nakon kvara jer nema kontakta sa zemljom.

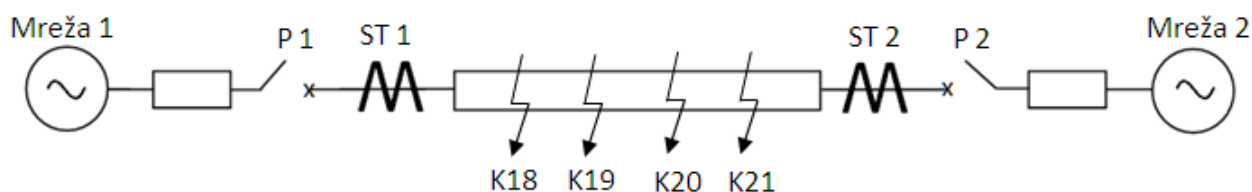
### 6.3. Automatsko ponovno uključenje prekidača

Prilikom pojave prolaznih kvarova na vodu, ne postoji potreba da se vod isključuje trajno. Tu se u potpunosti vidi ideja primene APU. Upotreba ovog sistema je testirana i na novom algoritmu. Nije potrebno menjati podešavanja ili dodavati nova. Princip proračuna relevantnih komponenti je identičan kao što je i opisano. U svakom novom trenutku odabiranja, elementi registara se pomeraju ulevo i novi odbirak postaje poslednji u nizu. Primenjena je i fazna i nulta diferencijalna zaštita.

Predviđeno je da APU ima dva ciklusa. Prva beznaponska pauza je brza i u radu je usvojeno da traje tri periode 50 Hz signala (60 ms). Nakon toga se prekidači u fazi sa kvarom, na oba kraja voda, uključuju. Ukoliko se ponovo prepozna kvar, prekidači se isključuju i nastaje druga, duža, beznaponska pauza. Za trajanje duže beznaponske pauze, usvojeno je vreme ekvivalentno trajanju 5 perioda (100 ms). Nakon isteka druge beznaponske pauze, prekidači se ponovo uključuju. Ako algoritam ponovo prepozna kvar, sledi trajno isključenje sve tri faze voda.

Neophodno je napomenuti da stvarne dužine trajanja beznaponskih pauza nisu ovakve, već naprotiv, znatno duže. Usvojene su kraća vremena iz razloga da bi se jasnije prikazale struje tokom celog ciklusa automatskog ponovnog uključenja.

Na Slici 6.137 može se videti jednopolna šema mreže od interesa, sa naznačenim mestima kvarova. Analizira se 110 kV mreža. Takođe, karakteristike strujnih transformatora su izabrane da kao i na Slici 6.1. To znači da će prilikom kvarova doći do zasićenja strujnih transformatora u fazama koje su njima obuhvaćene. Signali ka prekidačima se ne šalju odmah po prepoznavanju kvarova već je predviđeno odlaganje od 60 ms. To je vreme koje je usvojeno za reagovanje prekidača. Time je celokupna simulacija još više prilagođena realnim situacijama. U Tabeli 6.8 pregledno su prikazani tipovi kvarova i trenuci kada su oni simulirani. Simulirani su i trajni i prolazni kvarovi. Za prolazne kvarove je usvojeno da je vreme trajanja kvara 5 perioda, odnosno 100 ms.



Slika 6.137: Jednopolna šema mreže sa naznačenim mestima kvarova

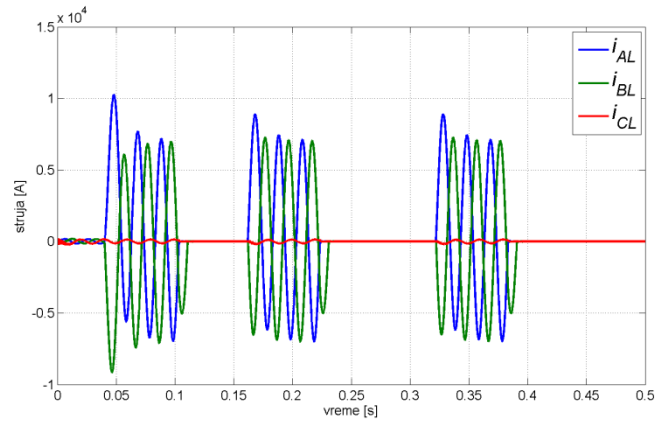
Tabela 6.8: Podaci o kvarovima i o strujnim transformatorima

Redni broj kvara	Tip kvara	Prolaznost kvara	Pozicija kvara [%]*	Trenutak nastanka kvara [ms]
Kvar 19	ABN	trajan	20	40
Kvar 20	CN	prolazan	40	42
Kvar 21	BC	prolazan	60	44
Kvar 22	AN	trajan	80	46

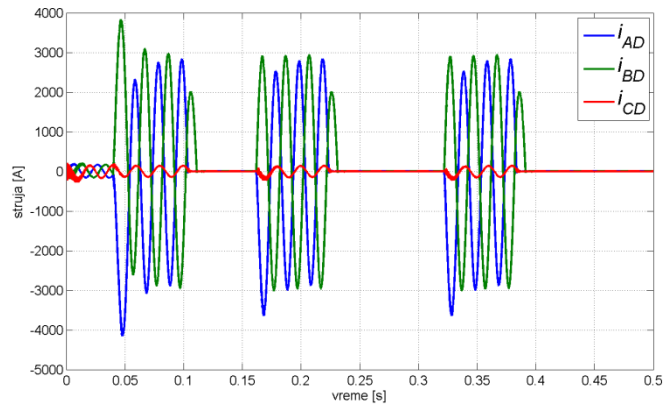
\*Procentat od cele dužine voda gledano sa leve strane

Prvi kvar koji je simuliran obuhvata faze A i B. U pitanju je i kvar pri kontaktu sa zemljom. Na Slikama 6.138 i 6.139 mogu se videti struje prilikom ovog kvara i primene APU. Prikazane su struje u svim fazama sa leve i desne strane voda primarno, kao i za svaku fazu posebno, sekundarno. Može se jasno videti kako struje u fazama A i B rastu, pa nakon isteka vremena predviđenog za akciju isključenja prekidača padaju na nulu. Struja u fazi C se takođe isključuje jer pri dvofaznom kvaru dolazi do isključenja u sve tri faze. Pošto je kvar trajan, odrađena su oba ciklusa APU. Nakon isteka druge beznaponske pauze i ponovnog prepoznavanja dvofaznog kvara sa zemljom, svi prekidači se isključuju i struje u sve tri faze postaju nula.

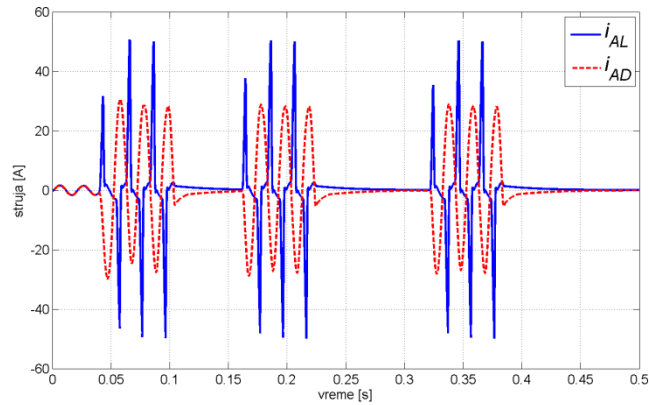




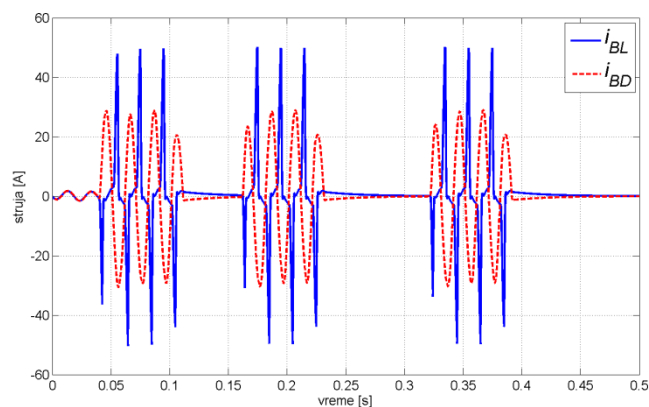
Slika 6.138: Struje u sve tri faze sa leve strane voda pri kvaru K19-primarno



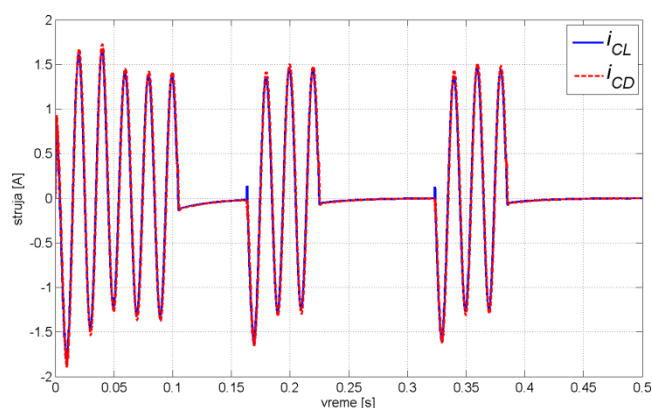
Slika 6.139: Struje u sve tri faze sa desne strane voda pri kvaru K19-primarno



Slika 6.140: Struje u fazi A sa obe strane voda pri kvaru K19-sekundarno



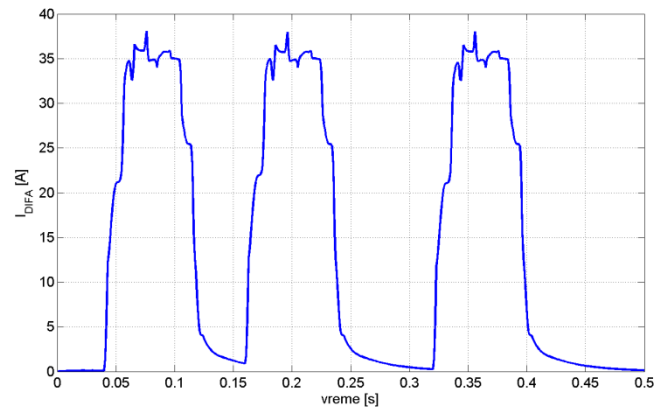
Slika 6.141: Struje u fazi B sa obe strane voda pri kvaru K19-sekundarno



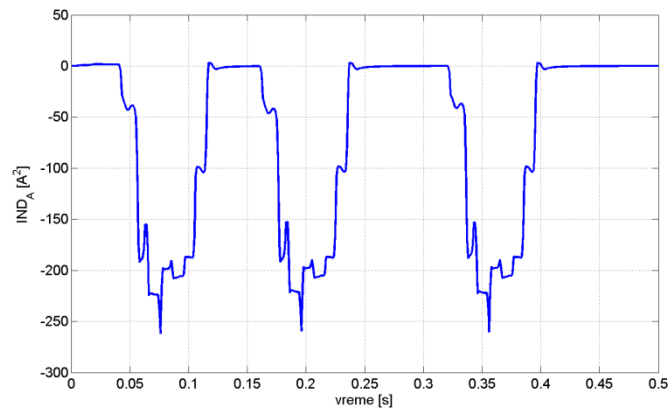
Slika 6.142: Struje u fazi C sa obe strane voda pri kvaru K19-sekundarno

Na Slikama 6.140 i 6.141 mogu se uočiti zasićenja strujnih transformatora u fazama A i B. Tokom trajanja beznaponskih pauza, struje opadaju na nulu sa određenom vremenskom konstantom. To je posledica induktivnosti sekundarnog kola strujnih transformatora. Na Slici 6.142 vide se talasni oblici sekundarnih struja strujnih transformatora u fazi C sa obe strane voda. Na kraju ciklusa sve struje trajno padaju na nulu.

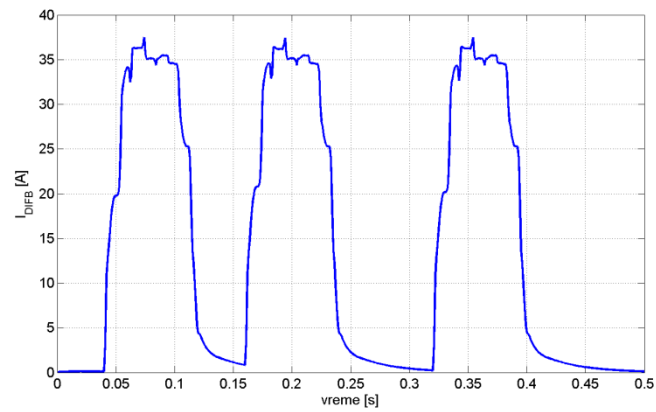
Na Slikama 6.143-6.148 prikazane su diferencijalne struje i indikatori smera za svaku fazu posebno.



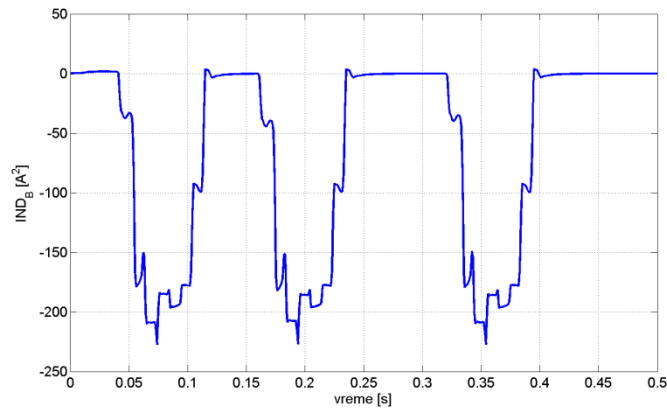
Slika 6.143: Diferencijalna struja u fazi A pri kvaru K19



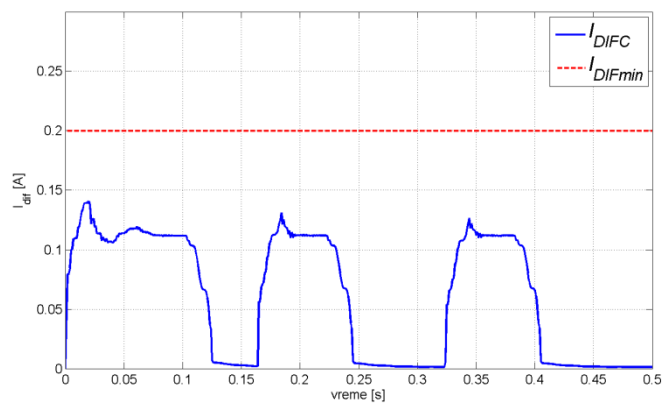
Slika 6.144: Indikator smeru u fazi A pri kvaru K19



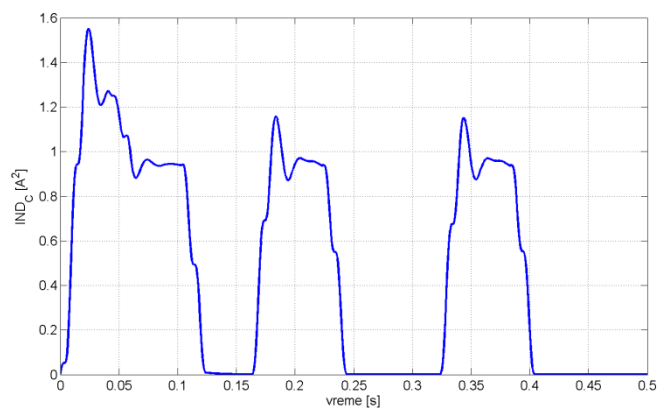
Slika 6.145: Diferencijalna struja u fazi B pri kvaru K19



Slika 6.146: Indikator smera u fazi B pri kvaru K19



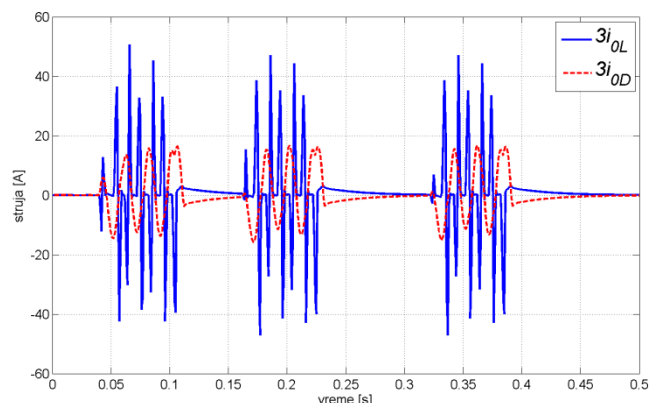
Slika 6.147: Diferencijalna struja u fazi C pri kvaru K19



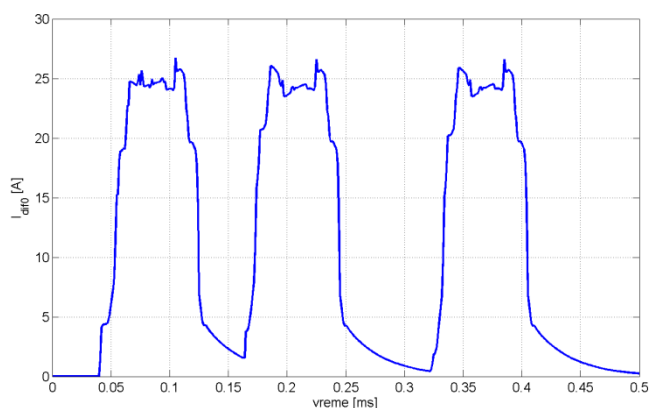
Slika 6.148: Indikator smera u fazi C pri kvaru K19

Na osnovu Slika 6.143-6.148 jasno je da je kvar prepoznat u fazama A i B. U fazi C ne postoji uslov za reagovanje fazne diferencijalne zaštite (Slike 6.147 i 6.148). Niti je diferencijalna struja veća od praga reagovanja, niti indikator smera ima vrednost manju ili jednaku nuli. Vreme prepoznavanja kvara u fazi A je 2 ms, a u fazi B je 3 ms.

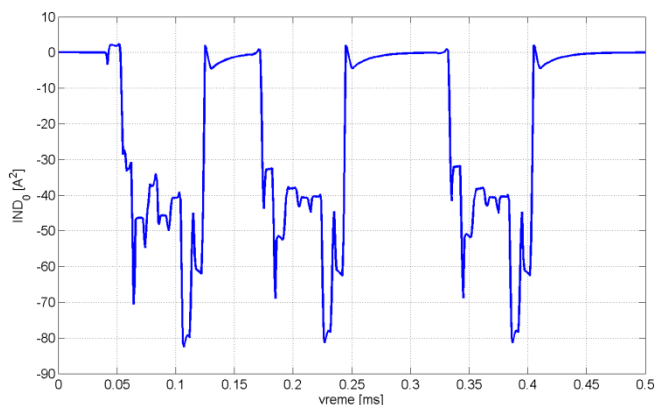
Na Slici 6.149 prikazane su trostruke nulte struje koje meri relej na oba kraja voda, dok Slike 6.150 i 6.151 prikazuju relevantne veličine za nultu diferencijalnu zaštitu (nulta diferencijalna struja i indikator smere nultih struja).



Slika 6.149: Nulte struje na obe strane voda pri kvaru K19



Slika 6.150: Nulta diferencijalna struja kvaru K19

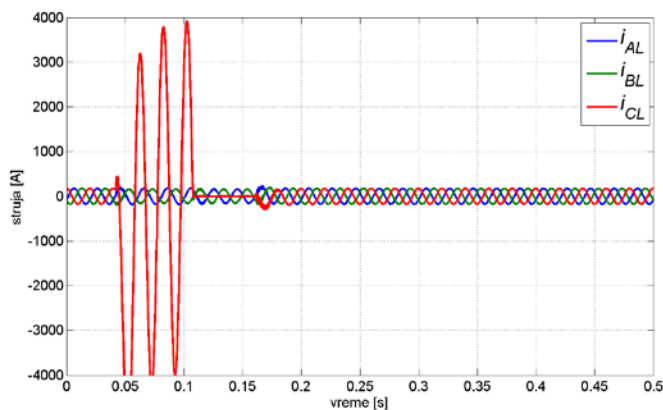


Slika 6.151: Indikator smera nultih struja pri kvaru K19

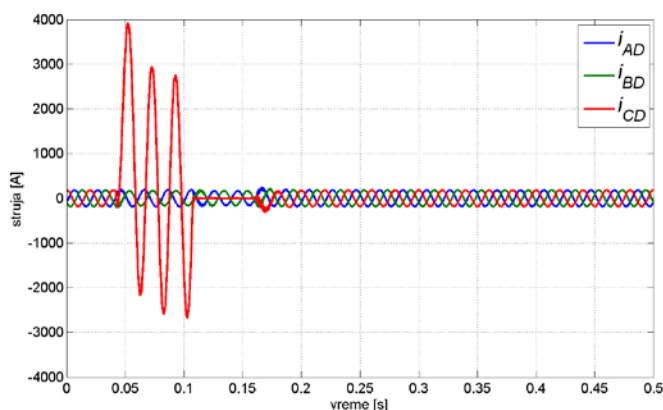
Uočava se da će i nulta diferencijalna zaštita imati uslov za reagovanje. Taj uslov će biti zadovoljen 1 ms nakon nastanka kvara. Ipak, s obzirom da se radi o visokonaponskoj mreži, i da se signali šalju za prekidače u svakoj fazi zasebno, mora se izvršiti selekcija faza u kojima se desio kvar. Faze u kojima se desio kvar se određuju na osnovu fazne diferencijalne struje. Tek kada one

postanu veće od praga reagovanja, onda se može utvrditi u kojim fazama se desio kvar. To znači da će signali za isključenje prekidača u fazama A i B biti poslani nakon 2 ms jer u obe faze fazna diferencijalna tada postaje veća od praga reagovanja.

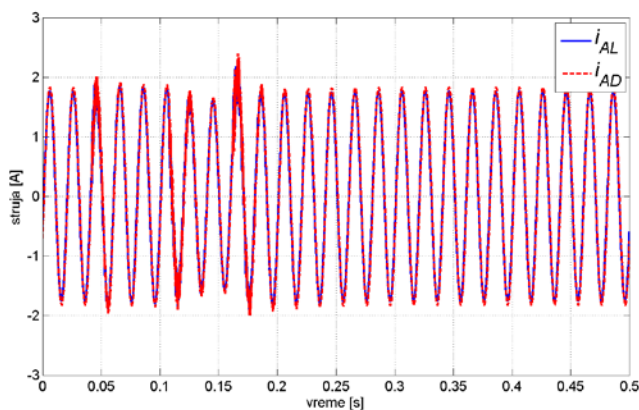
Na Slikama 6.152-6.156 mogu se videti fazne struje prilikom kvara K20. Pošto je u pitanju kvar koji prolazi tokom trajanja prve beznaponske pauze, nema potreba za drugom beznaponskom pauzom. Nakon uključjenja prekidača u fazi C, sistem nastavlja normalno da funkcioniše.



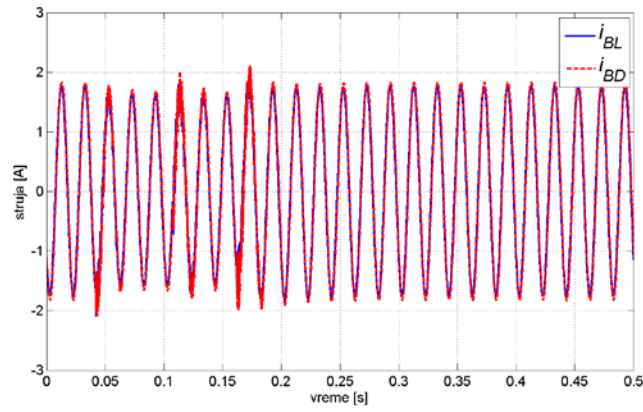
Slika 6.152: Struje u sve tri faze sa leve strane voda pri kvaru K20-primarno



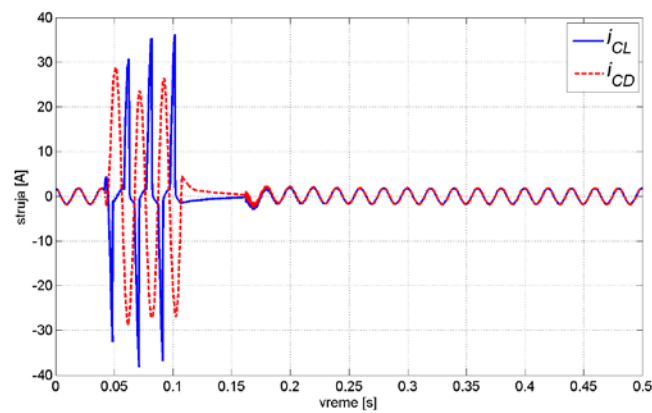
Slika 6.153: Struje u sve tri faze sa desne strane voda pri kvaru K20-primarno



Slika 6.154: Struje u fazi A sa obe strane voda pri kvaru K20-sekundarno

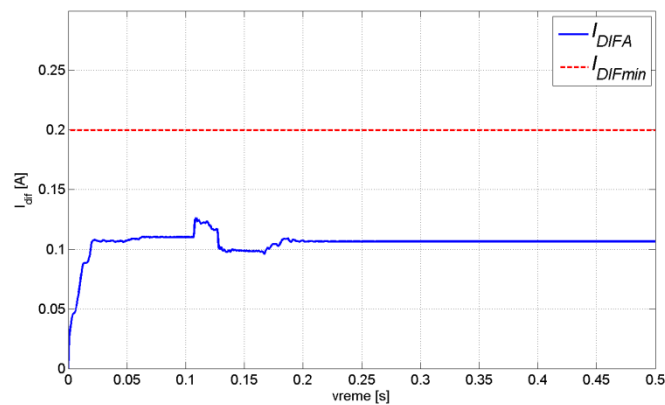


Slika 6.155: Struje u fazi B sa obe strane voda pri kvaru K20-sekundarno

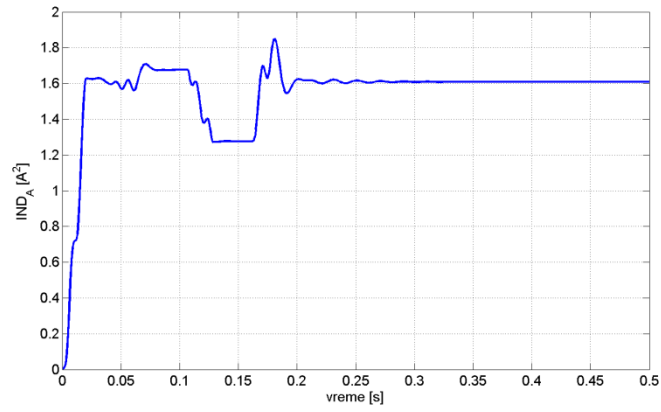


Slika 6.156: Struje u fazi C sa obe strane voda pri kvaru K20-sekundarno

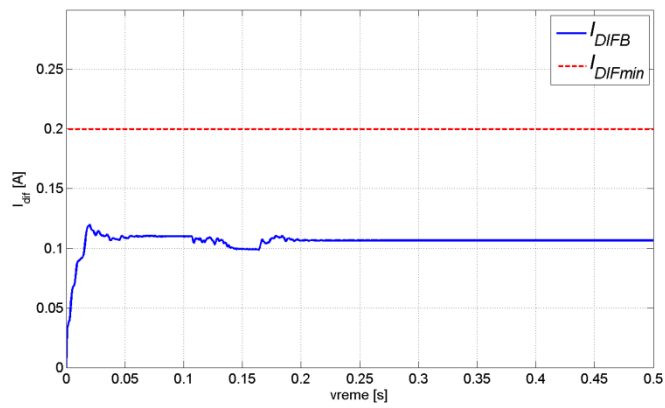
Na Slikama 6.157-6.162 vide se relevantne veličine fazne diferencijalne zaštite za svaku fazu posebno.



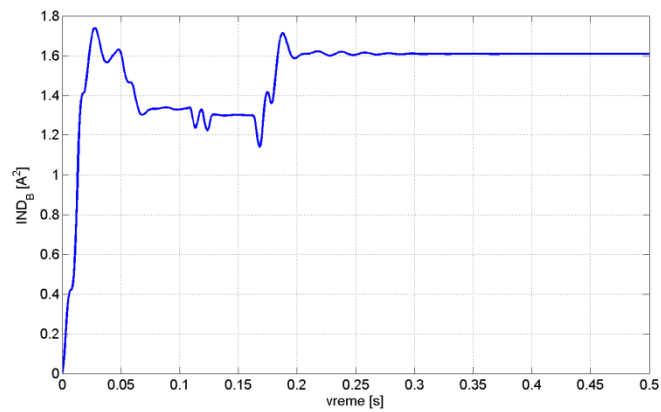
Slika 6.157: Diferencijalna struja u fazi A pri kvaru K20



Slika 6.158: Indikator smera u fazi A pri kvaru K20

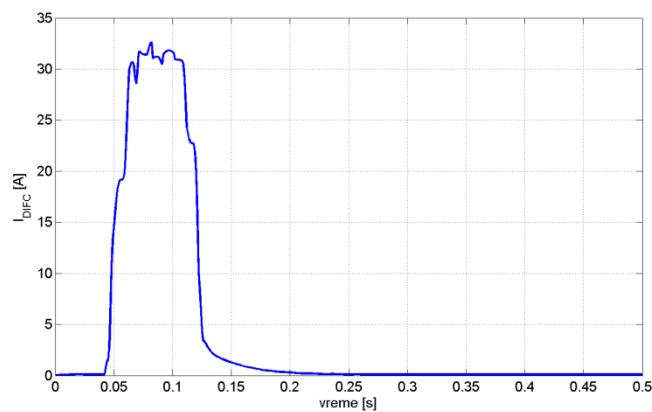


Slika 6.159: Diferencijalna struja u fazi B pri kvaru K20

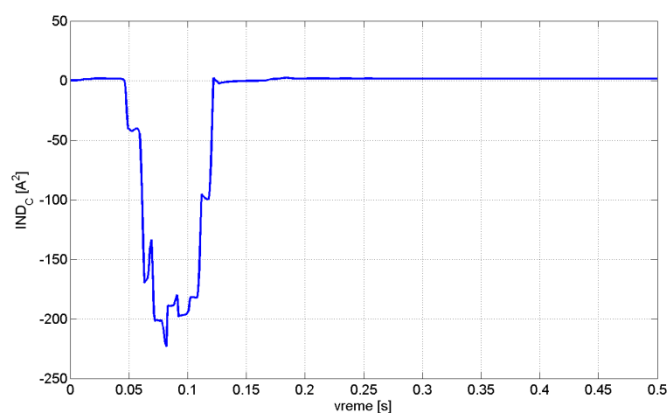


Slika 6.160: Indikator smera u fazi B pri kvaru K20





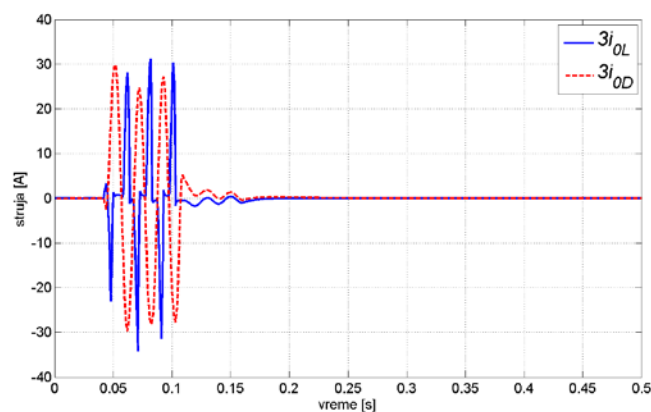
Slika 6.161: Diferencijalna struja u fazi C pri kvaru K20



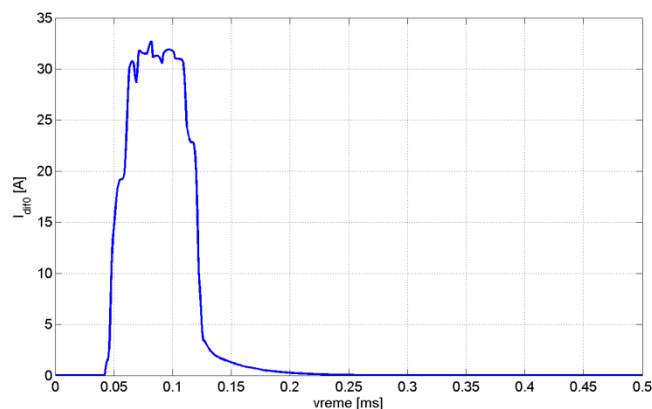
Slika 6.162: Indikator smera u fazi C pri kvaru K20

Kvar u fazi C je prepoznat nakon 2 ms na osnovu veličina fazne diferencijalne zaštite.

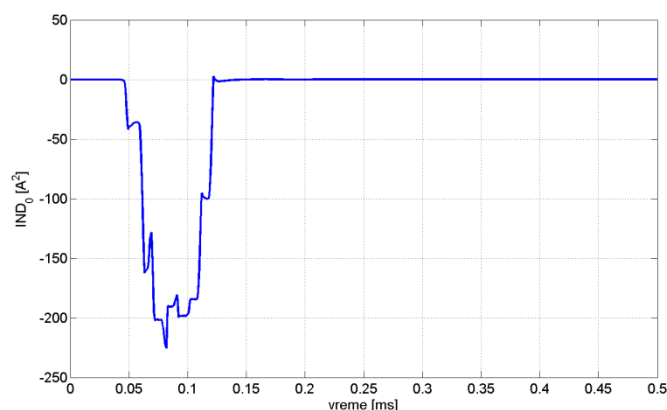
Na Slikama 6.163-6.165 vide se trenutne vrednosti trostrukih nultih struja na obe strane voda i relevantne veličine za nultu diferencijalnu zaštitu. Ova zaštita bi reagovala za 1 ms.



Slika 6.163: Nulte struje na obe strane voda pri kvaru K20



Slika 6.164: Nulta diferencijalna struja kvaru K20



Slika 6.165: Indikator smeru nultih struja pri kvaru K20

U Tabeli 6.9 pregledno su prikazana vremena prepoznavanja kvarova za svaku fazu posebno.

Tabela 6.9: Trenuci prepoznavanja kvarova bez uvažavanja vremenskog kašnjenja pri prenosu signala sa jednog na drugi kraj voda

Kvar K19		Kvar K20	
Trenutak nastanka kvara 40 ms		Trenutak nastanka kvara 42 ms	
faza	detektovanje kvara [ms]	faza	detektovanje kvara [ms]
A	42	A	-
B	42	B	-
C	-	C	43
vremena nakon prve beznaponske pauze		vremena nakon prve beznaponske pauze	
A	162	A	-
B	162	B	-
C	-	C	-
vremena nakon druge beznaponske pauze		vremena nakon druge beznaponske pauze	
A	322	A	-
B	322	B	-
C	-	C	-

Kvar K21  
Trenutak nastanka kvara 44 ms

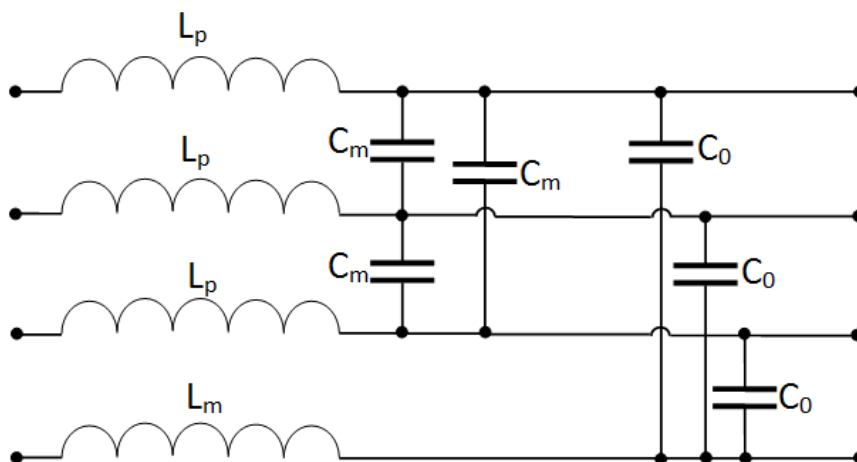
faza	detektovanje kvara [ms]
A	-
B	48
C	48
vremena nakon prve beznaponske pauze	
A	-
B	-
C	-
vremena nakon druge beznaponske pauze	
A	-
B	-
C	-

Kvar K22  
Trenutak nastanka kvara 46 ms

faza	detektovanje kvara [ms]
A	47
B	-
C	-
vremena nakon prve beznaponske pauze	
A	167
B	-
C	-
vremena nakon druge beznaponske pauze	
A	327
B	-
C	-

## 7. LABORATORIJSKI TESTOVI

Testiranje algoritma izvršeno je u laboratoriji Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Korišćen je već postojeći model voda oformljen pomoću kondenzatora i kalemova. Rezistivnosti koje se pojavljuju su obuhvaćene kalemima. U pitanju je model koji bi po svojim parametrima odgovarao predstavi 110 kV voda. Redna i paralelna veza je ostvarena na taj način da se uz pomoć raspregnutog modela (ne postoji međusobna induktivnost) dobije sistem koji matematički predstavlja zapravo spregnut sistem. Postoji šest deonica voda koje su redno vezane. Na Slici 7.1 prikazana je jedna takva deonica, a na Slici 7.2 fizički model voda sa svih šest deonica u drvenom kućištu.



Slika 7.1: Jedna od šest deonica laboratorijskog modela voda

Oznake na Slici 7.1 su:

$L_p$ - pogonska induktivnost

$L_m$ - međusobna induktivnost

$C_0$ - nulta kapacitivnost

$C_m$ - međusobna kapacitivnost

U Tabeli 7.1 date su vrednosti navedenih parametara modela

Tabela 7.1: Parametri laboratorijskog modela voda

Oznaka	Vrednost induktivnosti [mH]	Sopstvena otpornost [ $\Omega$ ]
$L_p$	10	0,12
$L_m$	2,2	0,3
Oznaka	Vrednost kapacitivnosti [ $\mu$ F]	
$C_0$	1,2	
$C_m$	0,47	

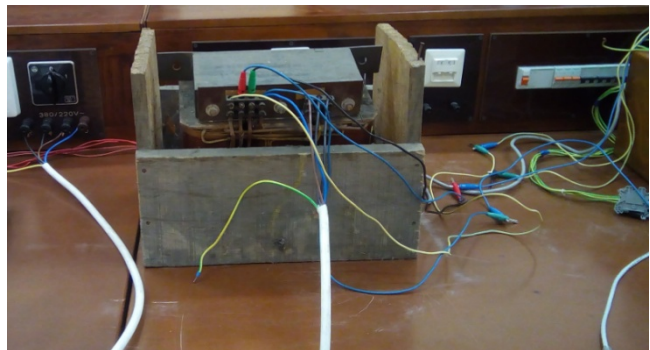


Slika 7.2: Fizički model voda sa šest deonica u drvenom kućištu

Napajanje šeme obezbeđeno je pomoću autotransformatora. Na red sa njim nalazi se galvanski izolovan transformator prenosnog odnosa 220/100 V/V. Ova veza je obezbeđena kako bi se izbegao direktna povezanost osetljivog modela sa naponom mreže. Autotransformator i galvanski izolovani transformator prikazani su na Slici 7.3.



a)



b)

Slika 7.3: Laboratorijska oprema za napajanje modela voda.

a) Autotransformator

b) Trofazni galvanski izolovan dvonamotajni transformator prenosnog odnosa 220/100 V/V

Za snimanje talasnih oblika struja, korišćen je relej firme ABB tipa RET 620. Relej vrši odabiranje 32 puta u toku jedne periode od 20 ms. Relej je prikazan na Slici 7.4. U releju je implementirana diferencijalna zaštita transformatora. Najniži prag reagovanja je spušten na 20% od naznačene struje koja iznosi 1 A ( $I_n=5$  A). Takođe je izabrano da nakon trigerovanja releja, počne snimanje. Relej bi, nakon reagovanja zapamtio 50 perioda. Od punog proja perioda, 1/2 bi bila pre nastanka kvara (*predtriger*).



Slika 7.4: Releji firme SIEMENS tipa RET 620

Na kraju voda nalaze se otpornici od po  $10\ \Omega$  za svaku fazu posebno. Otpornici su prikazane na Slici 7.5. Na Slici 7.6 može se videti kontaktor kojim su pravljene kratki spojevi. Celokupna povezana oprema je vidljiva na Slici 7.7. Za preuzimanje snimaka sa releja, korišćen je PC računar.



Slika 7.5: Otpornosti od  $10\ \Omega$  za svaku fazu



Slika 7.6: Kontaktor za simuliranje kratkih spojeva

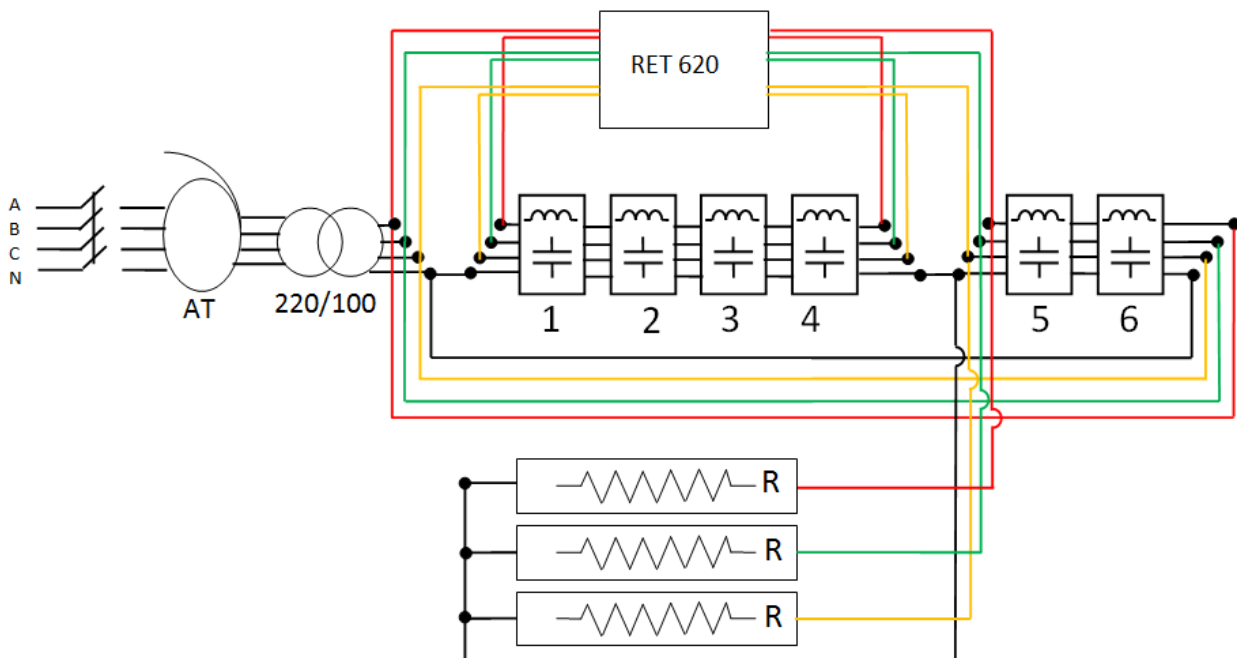


Slika 7.7: Celokupna šema opreme za laboratorijsko testiranje algoritma

Formirane su dve šeme za testiranje algoritma. Jedna kada je mesto kvara dvostrano napajano, a drugi kada je mreža radijalna.

### 7.1. Dvostrano napajano mesto kvara

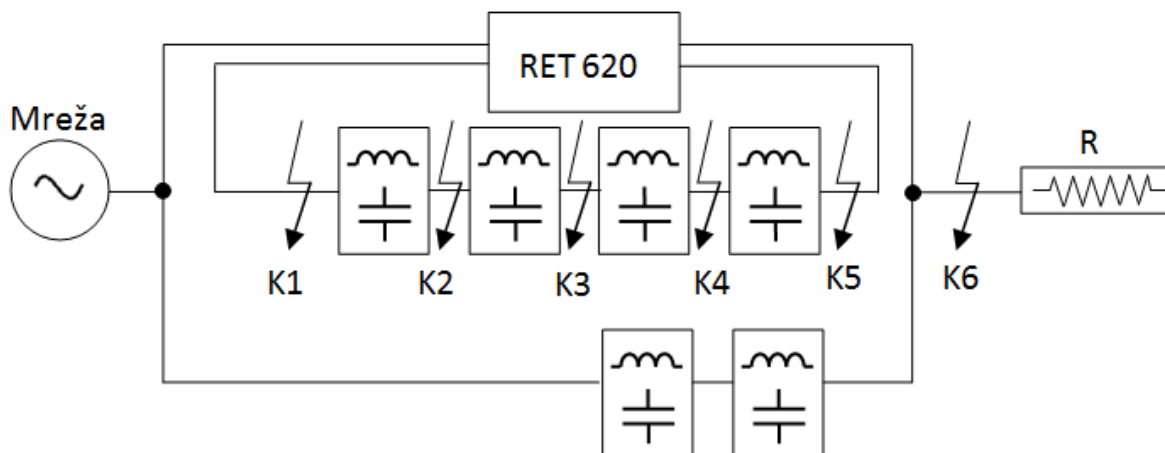
Na Slici 78 prikazana je blok šema kojom je simulirano dvostrano napajanje mesta kvara na vodu. Četiri deonice su iskorišćene da predstavljaju štice vod, a preostale dve deonice su prevezane u paralelnu vezu sa prve četiri. Time će u pogonu bez kvara, smer energije će biti od mreže ka otpornostima, a pilikom kvara, samo mesto kvara biće napajano dvostrano. Ovim je praktično napravljena upetljena mreža. S obzirom da se simulira visokonaponska mreža, napon napajanja modela voda biće veća u ovom nego u narednom slučaju kada se simulira radijalna, srednjenaponska mreža. Za slučaj upetljane mreže, napon napajanja modela voda je obezbeđeno faznim naponom od 35 V. Fazna struja za svaku fazu iznosi 0,5 A.



Slika 7.8: Blok šema kada je vod dvostrano napajan

Na blok šemi su naznačeni redni brojevi deonica voda. Releji RET 620 vezan je praktično primarno. Mere se i snimaju struje koje prolaze kroz kolo. Struje se mere pre prve i posle četvrtdeonice voda jer su prve četiri deonice uzete kao model štice vod. Kvarovi su simulirani ispred

prve deonice, a unutar štice zone, i posle svake od četiri deonice modela voda. Slika 7.9 prikazuje jednopolnu šemu modela sa naznačenim mestima na kojima su pravljene različiti kvarovi. Kvar *K6* je izvan zone zaštite.



Slika 7.9: Jednopolna šema dvostrano napajanog modela voda sa naznačenim mestima na kojima su pravljene kvarovi

U Tabeli 7.2 nalazi se pregled kvarova koji su formirani pomoću kontaktora.

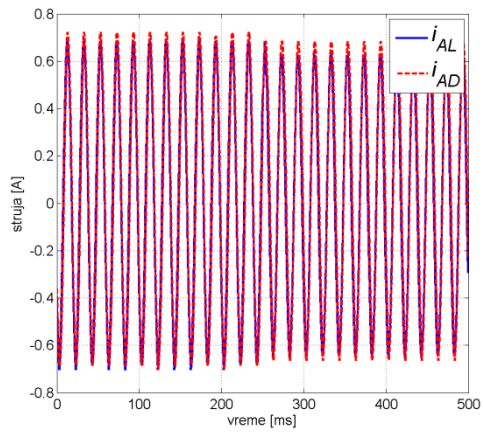
Tabela 7.2: Podaci o tipovima kvarova

Redni broj kvara	Tip kvara	Pozicija kvara*
Kvar 1	A-N	Ispred 1. deonice
Kvar 2	C-N	Iza 1. deonice
Kvar 3	ABC	Iza 2. deonice
Kvar 4	AC	Iza 3. deonice
Kvar 5	B-N	Iza 4. deonice u zoni
Kvar 6	AB	Iza 4. deonice van zone

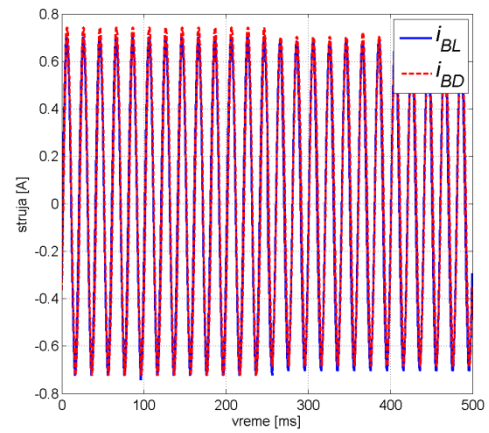
\*Redni broj deonice gledano sa leve strane

Da se ne bi opterećivao tekst, neće biti prikazani svi rezultati. Slike 7.10-7.12 prikazuju talasne oblike faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara *K2*.

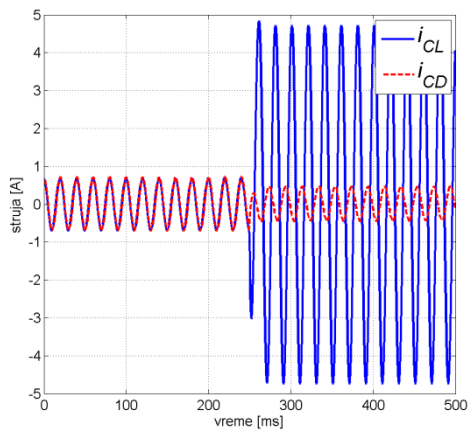




Slika 7.10: Struje u fazi A pri kvaru K2

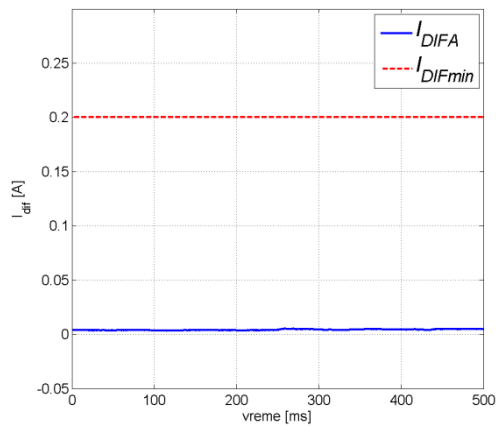


Slika 7.11: Struje u fazi B pri kvaru K2

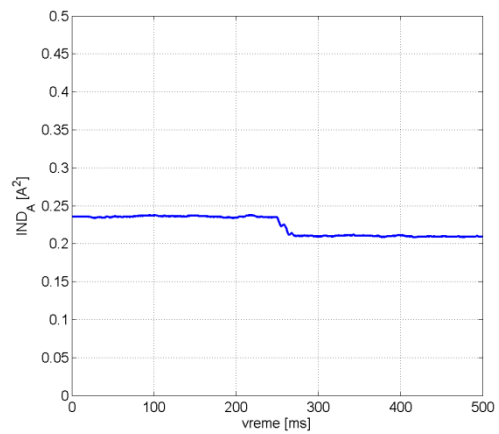


Slika 7.12: Struje u fazi C pri kvaru K2

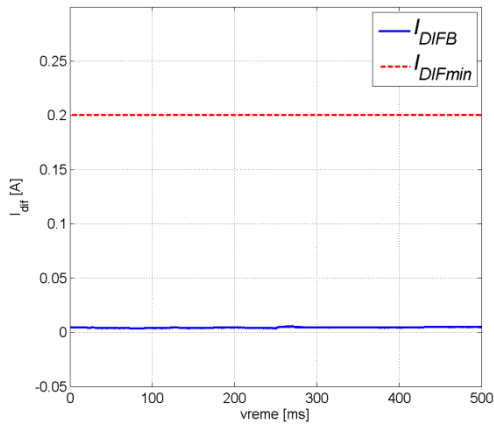
Primetno je da se samo u fazi C povećala struja. Diferencijalne struje i indikatori smera za svaku fazu posebno, prikazani su na Slikama 7.13-7.18.



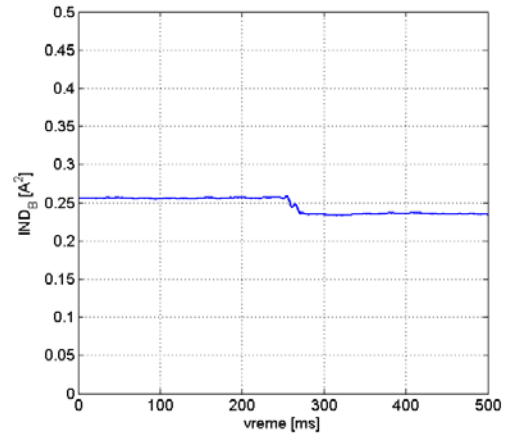
Slika 7.13: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K2



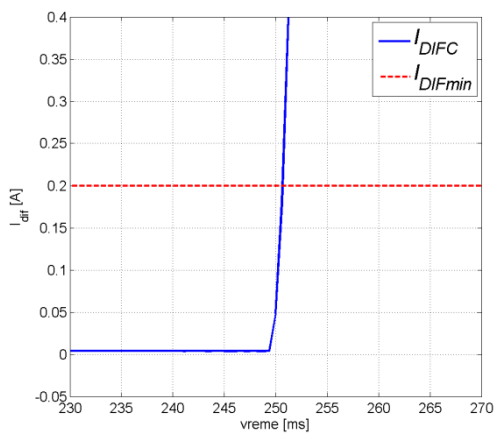
Slika 7.14: Indikator smera za fazu A pri kvaru K2



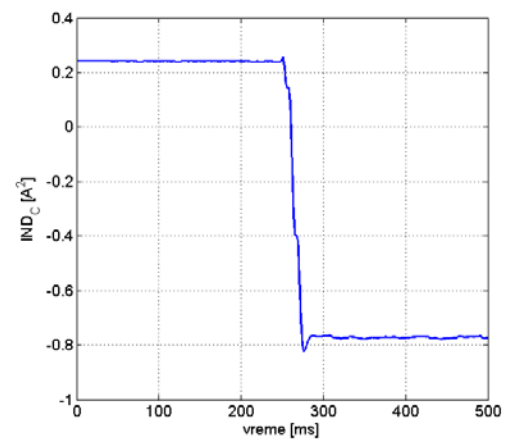
Slika 7.15: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K2



Slika 7.16: Indikator smera za fazu B pri kvaru K2

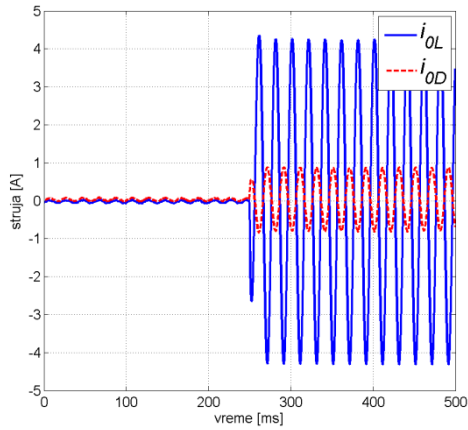


Slika 7.17: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K2 - zumirano

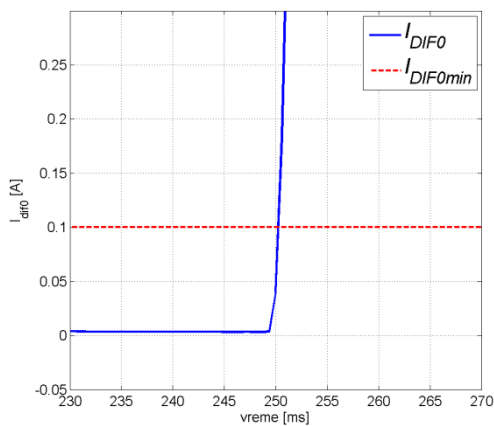


Slika 7.18: Indikator smera za fazu C pri kvaru K2

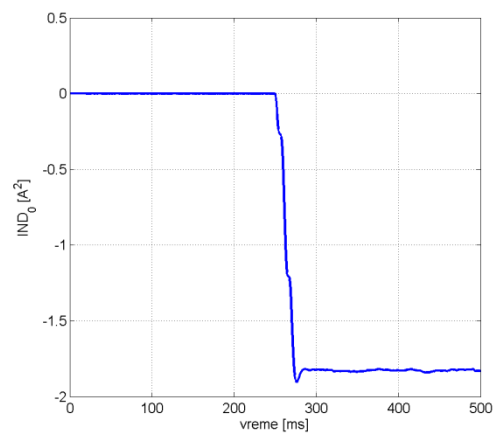
U fazama A i B ne postoji uslov za reagovanje, dok u fazi C postoji. Kvar je nastao u trenutku  $t_1=249$  ms. Diferencijalna struja prelazi prag reagovanja u trenutku  $t_1=251$  ms. Da bi relej odreagovao, potrebno je i da indikator smera u fazi C postane negativan. To se dešava u trenutku  $t_3=260$  ms. Zaključak je da fazna diferencijalna zaštita stiže uslov za reagovanje 11 ms nakon nastanka kvara. Na Slici 7.19 mogu se videti nulte struje na oba kraja voda pri istom kvaru, a na Slikama 7.20 i 7.21 nulta diferencijalna struja i indikator smera nulte struje.



Slika 7.19: Nulte struje pri kvaru K2



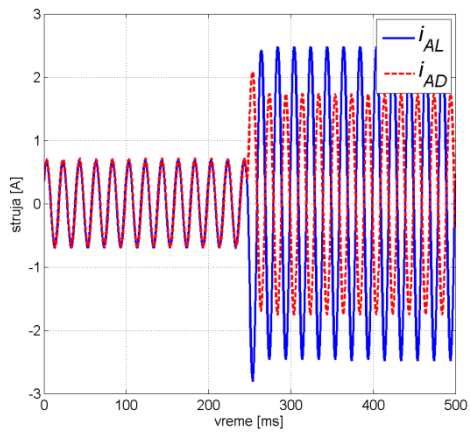
Slika 7.20: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K2 - zumirano



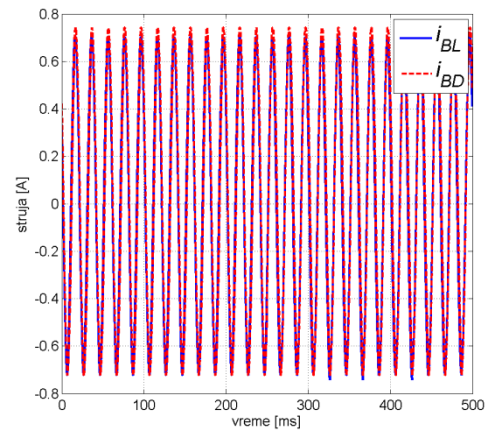
Slika 7.21: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K2

Uočava se da je nulta diferencijalna zaštita brža, jer je indikator smeru  $i$  pre kvara jednak nuli. Nulta diferencijalna struja prelazi prag reagovanja u trenutku  $t=250$  ms. Tada se i stiče uslov za reagovanje ove zaštite. Pošto se u ovom slučaju pretpostavlja da se zaštita koristi na 110 kV naponskom nivou, ovaj uslov nije dovoljan za reagovanje zaštite. Mora se sačekati da se odrede faze koje su pogođene kvarom. Diferencijalna struja u fazi C prekoračuje prag reagovanja 1 ms nakon nulte diferencijalne zaštite jer je njen prag reagovanja veći za 0,1 A. Zaključak je da se u trenutku  $t=251$  ms već može poslati signal za otvaranje prekidačaa u fazi C.

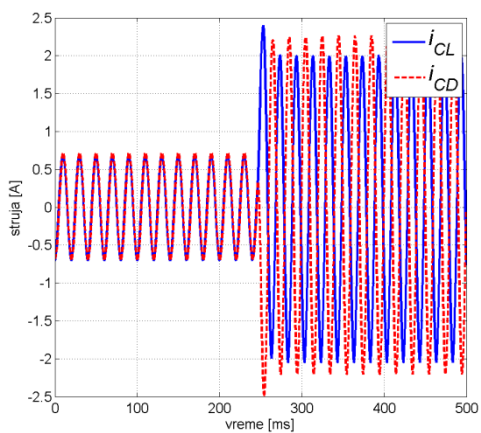
Na Slikama 7.22-7.24 vide se talasni oblici faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara  $K4$ .



Slika 7.22: Struje u fazi A pri kvaru K4

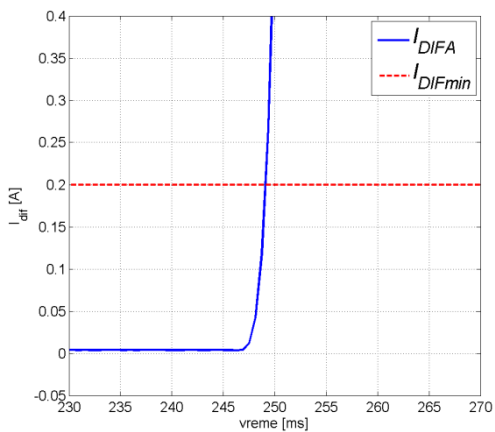


Slika 7.23: Struje u fazi B pri kvaru K4

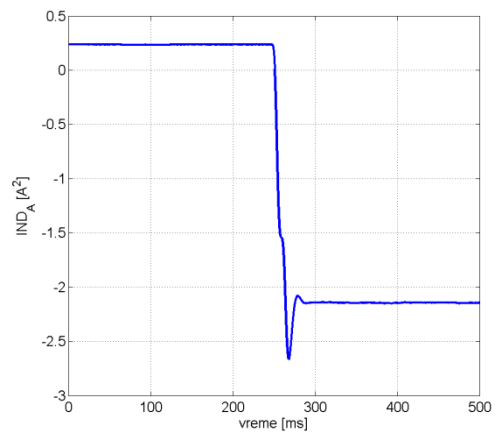


Slika 7.24: Struje u fazi C pri kvaru K4

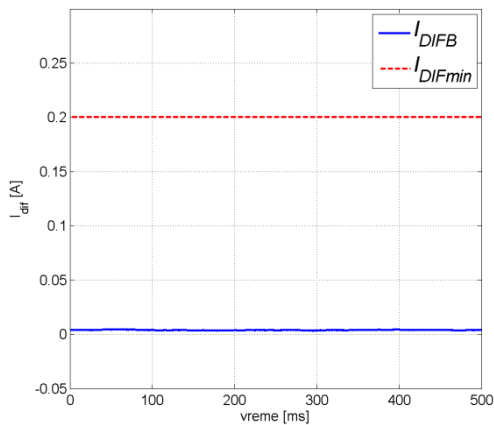
Povećale su se struje u fazi A i C. Relevantne veličine za faznu diferencijalnu zaštitu za svaku fazu posebno, prikazani su na Slikama 7.25-7.30.



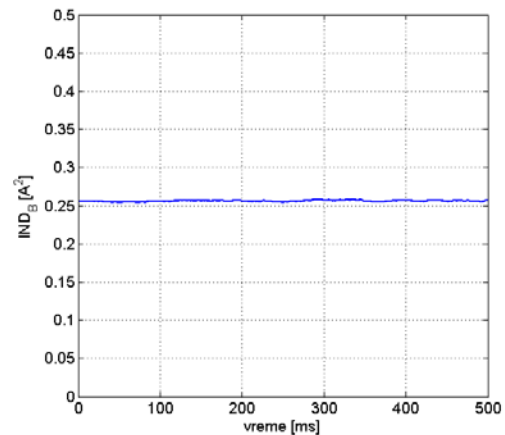
Slika 7.25: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K4 - zumirano



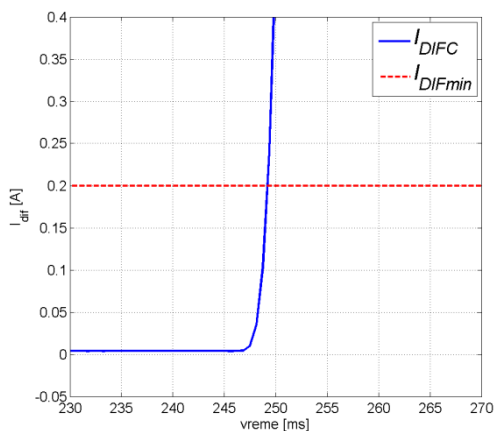
Slika 7.26: Indikator smeru za fazu A pri kvaru K4



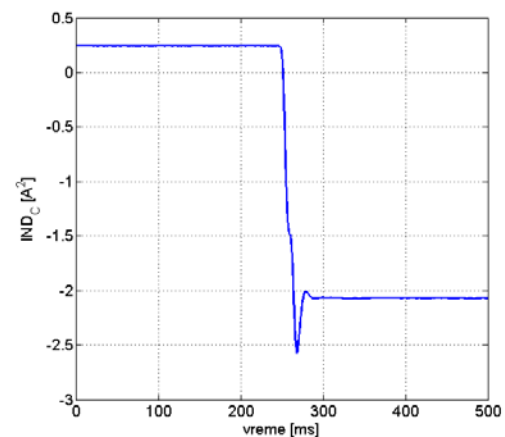
Slika 7.27: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K4



Slika 7.28: Indikator smera za fazu B pri kvaru K4

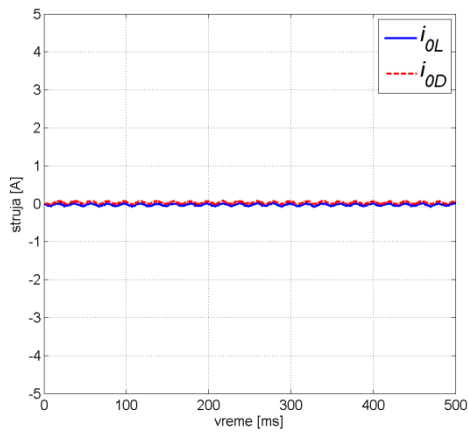


Slika 7.29: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K4 - zumirano

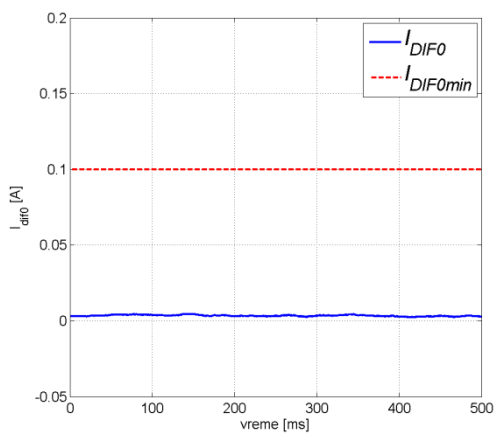


Slika 7.30: Indikator smera za fazu C pri kvaru K4

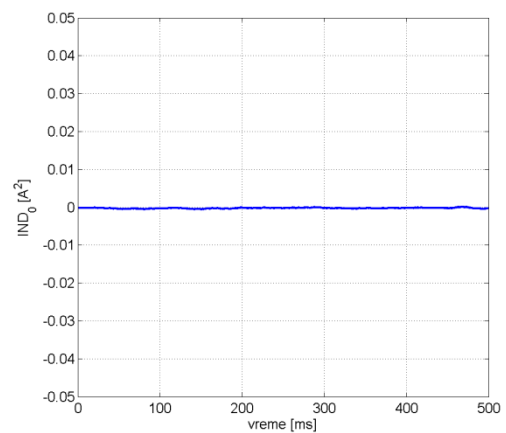
Uslov za reagovanje se stiče u fazama A i C i to 3 ms i 4 ms nakon nastanka kvara, respektivno. Trostruke nulte struje i veličine od interesa za nultu diferencijalnu zaštitu, vide se na Slikama 7.31-7.33. Kao što se može i primetiti na pomenutim slikama, nulta diferencijalna zaštita nema uslov za reagovanje, što je i očekivano, jer je u pitanju dvofazni kvar bez kontakta sa zemljom.



Slika 7.31: Nulte struje pri kvaru K4

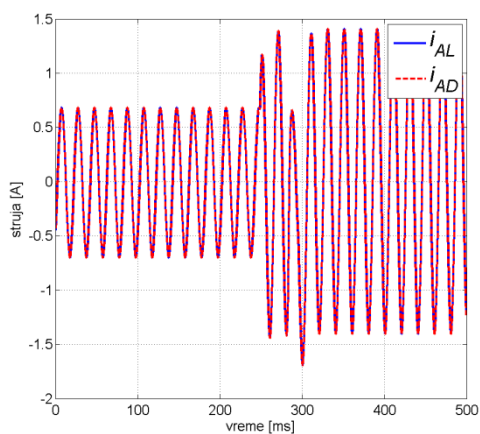


Slika 7.32: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K4

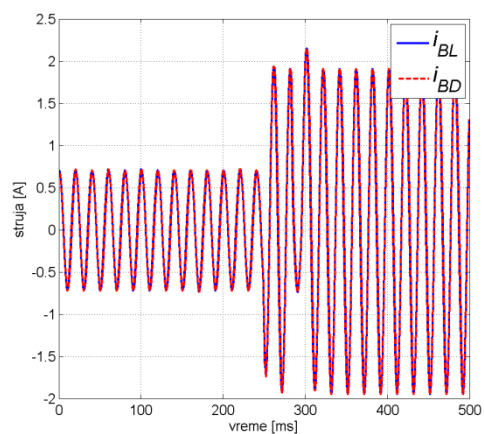


Slika 7.33: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K4

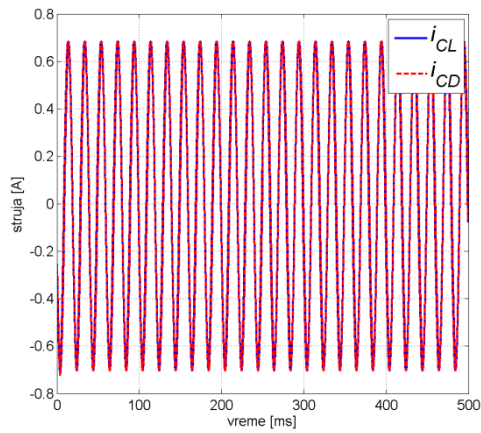
Biće prikazani samo još talasni oblici struje i proračunatih veličina za kar van zone zaštite (kvar K6). Slike 7.34-7.36 prikazuju struje u svim fazama sa obe strane štice deonice.



Slika 7.34: Struje u fazi A pri kvaru K6

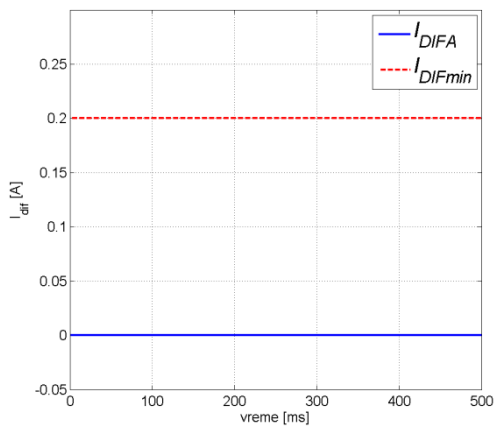


Slika 7.35: Struje u fazi B pri kvaru K6

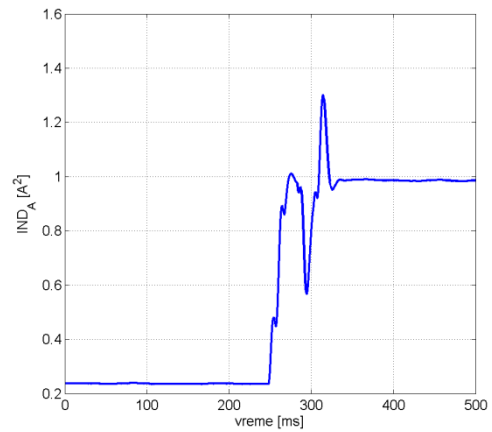


Slika 7.36: Struje u fazi C pri kvaru K6

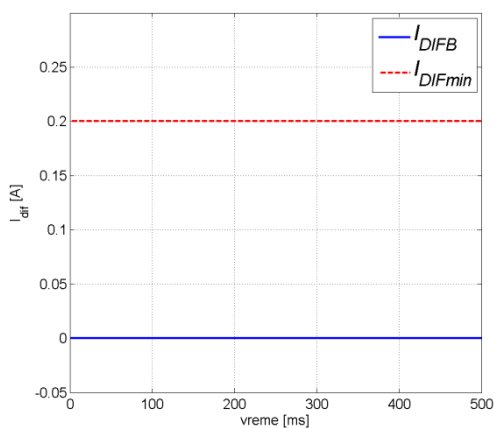
Struje u fazama A i B su porasle, dok se struja u fazi C nije promenila. Veličine od interesa za faznu diferencijalnu zaštitu prikazane su na Slikama 7.37-7.42.



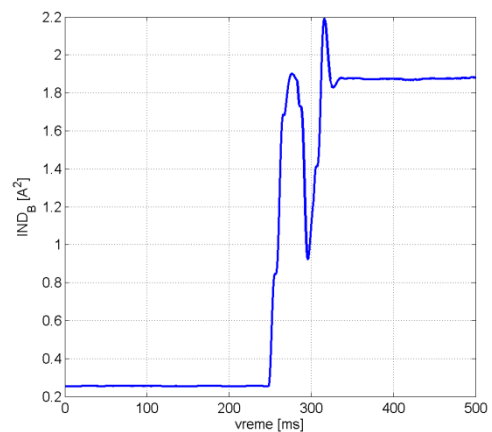
Slika 7.37: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K6



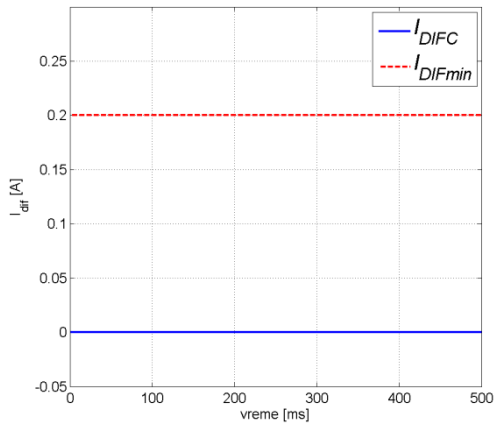
Slika 7.38: Indikator smeru za fazu A pri kvaru K6



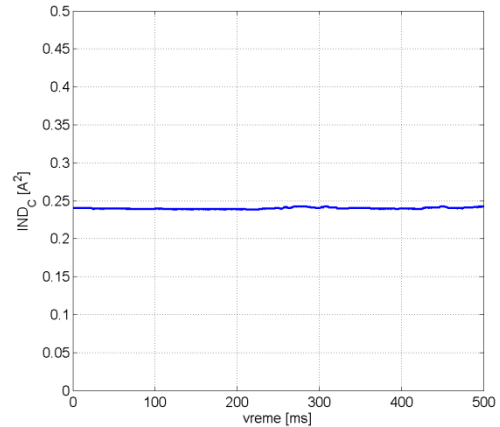
Slika 7.39: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K6



Slika 7.40: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K6



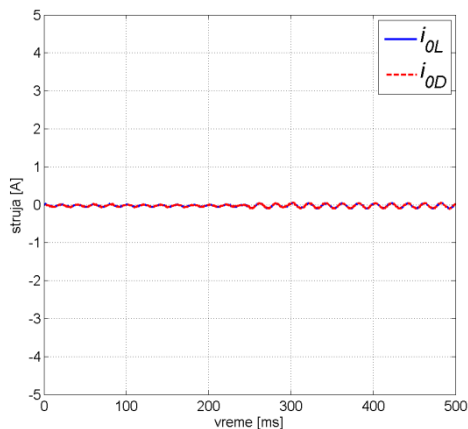
Slika 7.41: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K6



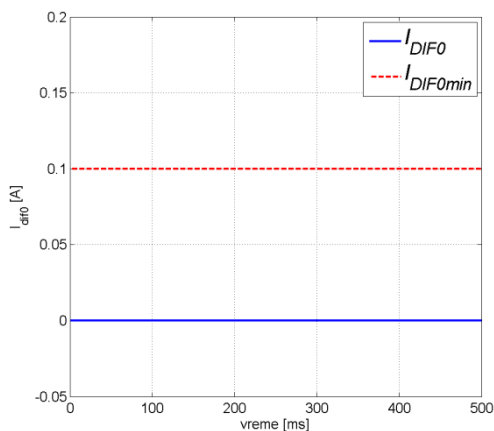
Slika 7.42: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K6

Indikator smeru za faze pogođene kvarom su značajno porasli nakon nastanka kvara, ali su sve vreme pozitivni. Diferencijalne struje su manje od praga reagovanja. Zaključak je da nema uslova za reagovanje zaštite.

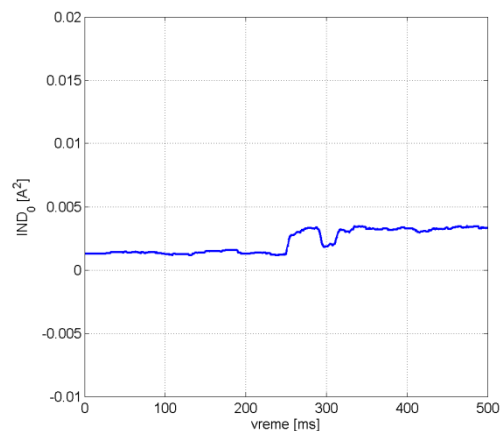
Nulta diferencijalna takođe ne bi imala uslov za reagovanje. Rezultati se mogu videti na Slikama 7.43-7.45.



Slika 7.43: Nulte struje pri kvaru K6



Slika 7.44: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K6



Slika 7.45: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K6



U Tabeli 7.3 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve testirane kvarove kada je mesto kvara dvostrano napajano.

Tabela 7.3: Trenuci prepoznavanja kvarova

Kvar K1					
Trenutak nastanka kvara 251 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-	-	-
B	-	B	-	-	-
C	-	C	-	-	-
Kvar K2					
Trenutak nastanka kvara 249 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-	-	-
B	-	B	-	1	-
C	2	C	11	-	2
Kvar K3					
Trenutak nastanka kvara 248 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	2	A	3	-	3
B	2	B	3	-	3
C	3	C	4	-	4
Kvar K4					
Trenutak nastanka kvara 249 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	2	A	3	-	3
B	-	B	-	-	-
C	3	C	4	-	4

Kvar K5  
Trenutak nastanka kvara 237 ms

Fazna diferencijalna		Nulta		Ukupno
Diferencijalna struja	Indikator smer	diferencijalna		
faza	detektovanje kvara* [ms]	faza	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]
A	-	A	-	-
B	3	B	5	2
C	-	C	-	3

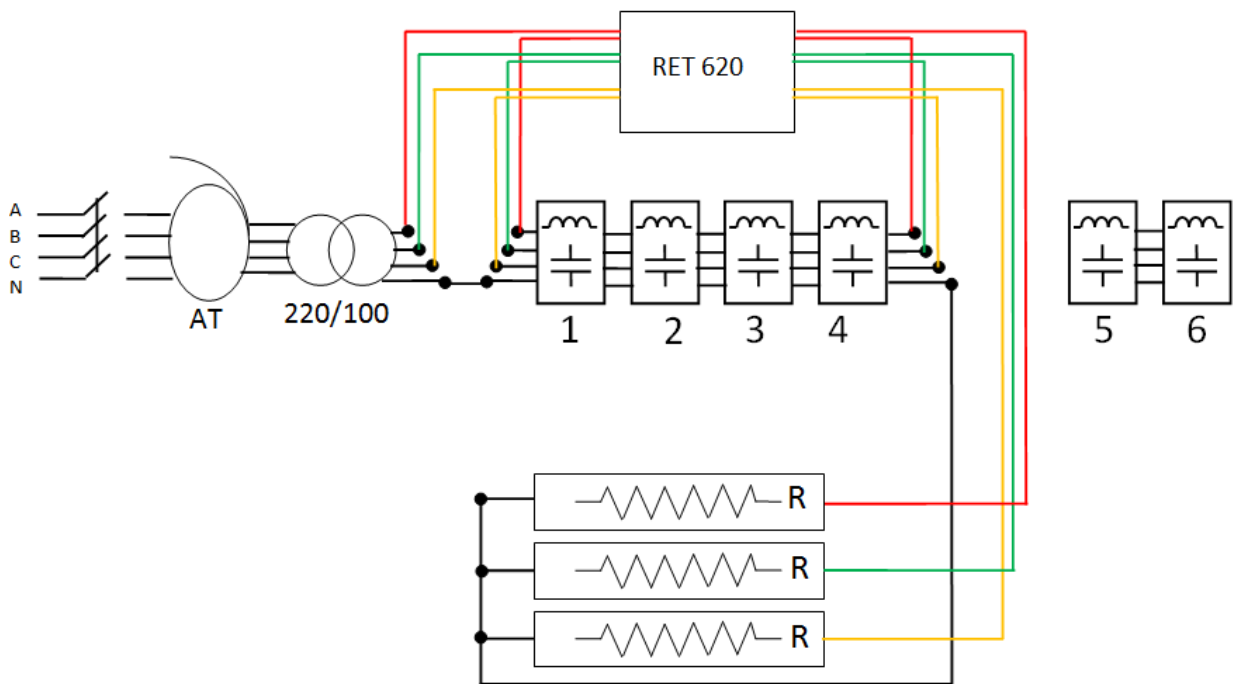
Kvar K6  
Trenutak nastanka kvara 40 ms

Fazna diferencijalna		Nulta		Ukupno
Diferencijalna struja	Indikator smer	diferencijalna		
faza	detektovanje kvara* [ms]	faza	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]
A	-	A	-	-
B	-	B	-	-
C	-	C	-	-

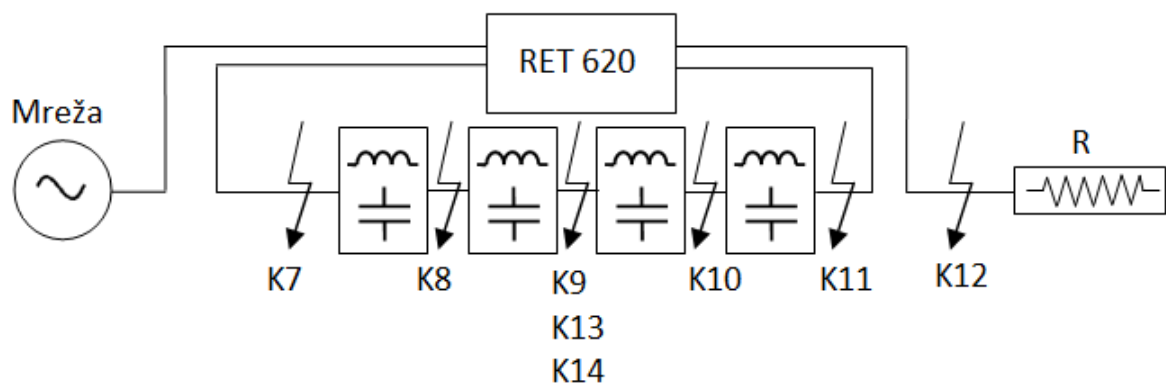
\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

## 7.2. Radijalna mreža

Algoritam je testiran i za radijalnu mrežu. Ponovo je šticeći vod predstavljen sa četiri redno vezane deonice. To znači da preostale dve deonice ne igraju sada nikakvu ulogu. Posle četvrte deonice, slede otpornici od po  $10 \Omega$  za svaku fazu posebno, vezanih u zvezdu. Ova blok šema je prikazana na Slici 7.46. Releji ponovo snima struje ispred prve i iza četvrte deonice. Slika 7.47 prikazuje jednopolnu šemu modela sa naznačenim mestima na kojima su pravljene različiti kvarovi. Kvar *K12* je izvan zone zaštite. U Tabeli 7.4 nalazi se pregled kvarova koji su formirani pomoću kontaktora. Pravljene su kvarovi koji obuhvataju kontakt sa zemljom da bi se testirala nulta diferencijalna zaštita čija primena je upravo osmišljena za kvarove sa zemljom u radijalnim mrežama. Kvarovi *K13* i *K14* izvršeni su da bi se testirao algoritam na kvarove bez kontakta sa zemljom u radijalnim mrežama. Napon napajanja je 12 V, dok su fazne struje bile 0,6 A.



Slika 7.46: Blok šema kada je mreža radijalna



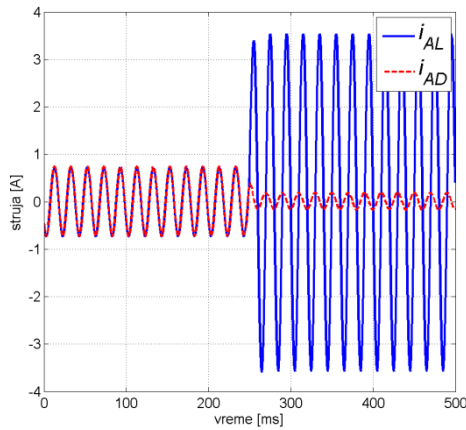
Slika 7.47: Jednopolna šema radijalno napajanog modela voda sa naznačenim mestima na kojima su pravljene kvarovi

Tabela 7.4: Podaci o tipovima kvarova

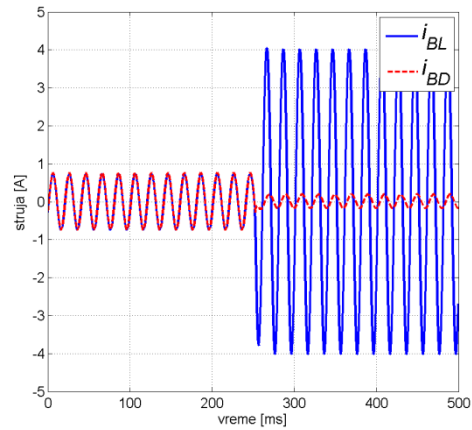
Redni broj kvara	Tip kvara	Pozicija kvara*
Kvar 7	B-N	Ispred 1. deonice
Kvar 8	AB-N	Iza 1. deonice
Kvar 9	B-N	Iza 2. deonice
Kvar 10	A-N	Iza 3. deonice
Kvar 11	AC-N	Iza 4. deonice u zoni
Kvar 12	BC-N	Iza 4. deonice van zone
Kvar 13	BC	Iza 2. deonice
Kvar 14	ABC	Iza 2. deonice

\*Redni broj deonice gledano sa leve strane

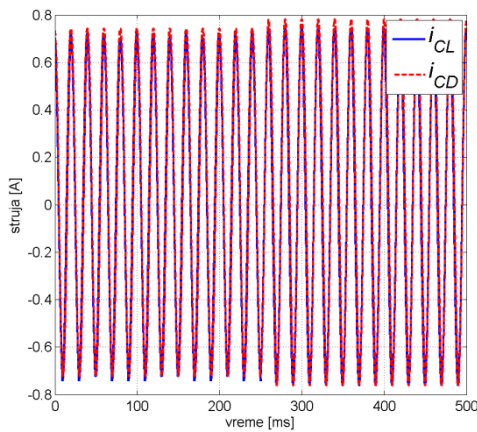
Kao i u prethodnom poglavlju, zarad rasterećenja teksta, neće biti prikazani svi rezultati. Slike 7.48-7.50 prikazuju talasne oblike faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara K8. Trenutak nastanka kvara je  $t=250$  ms.



Slika 7.48: Struje u fazi A pri kvaru K8

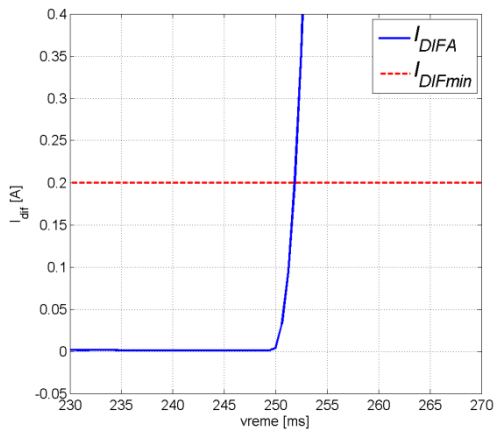


Slika 7.49: Struje u fazi B pri kvaru K8

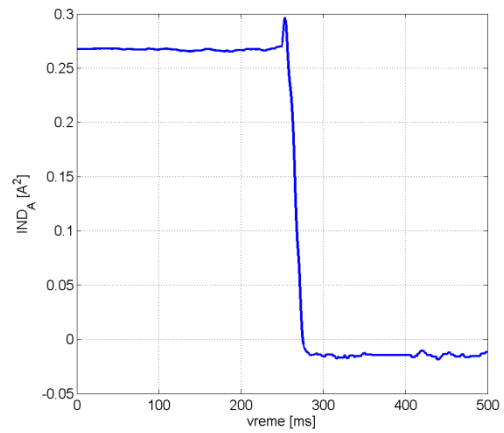


Slika 7.50: Struje u fazi C pri kvaru K8

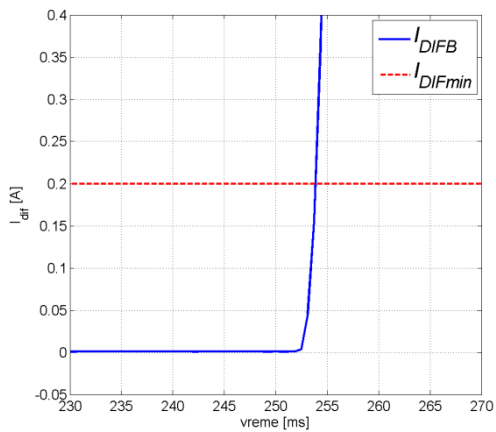
Uočljivo je značajno povećanje struja u fazama pogođenih kvarom. Primetno je i da se u fazi C neznatno povećala struja. Diferencijalne struje i indikatori smera prikazani su na Slikama 7.51-7.56.



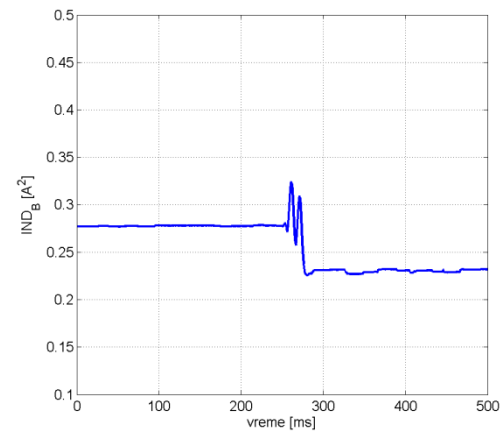
Slika 7.51: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K8 - zumirano



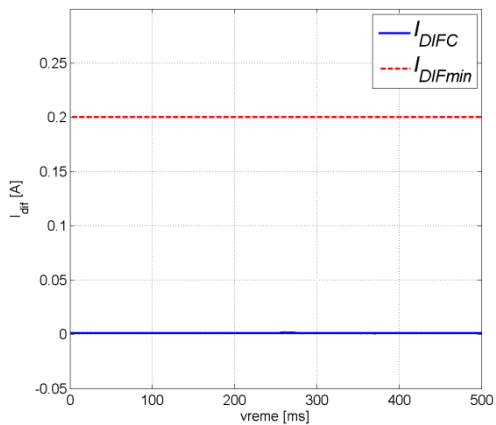
Slika 7.52: Indikator smeru za fazu A pri kvaru K8



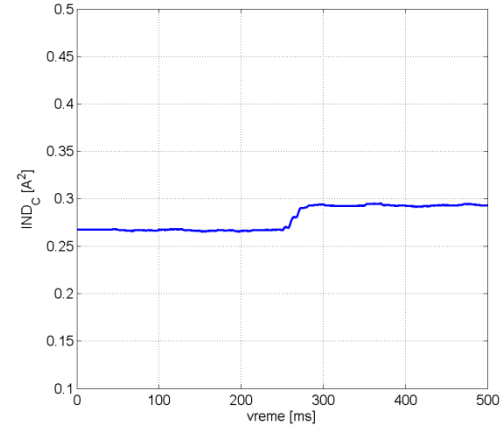
Slika 7.53: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K8 - zumirano



Slika 7.54: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K8



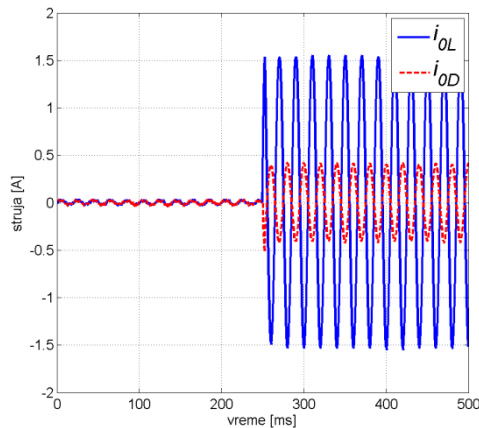
Slika 7.55: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K8



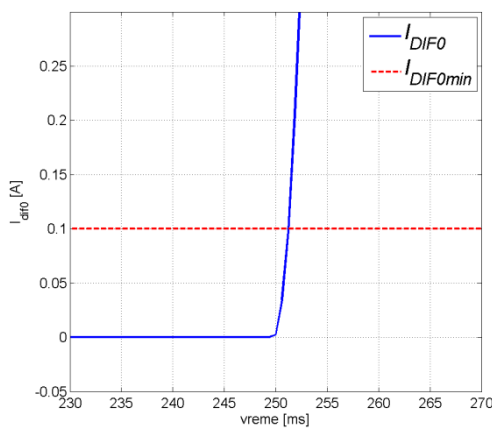
Slika 7.56: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K8

U fazama A i B diferencijalne struje prelaze minimalne vrednosti za reagovanje (252 ms i 254 ms respektivno). Međutim samo u fazi A postoji uslov za reagovanje fazne diferencijalne zaštite jer indikator smeru dobija negativnu vrednost u trenutku  $t=275$  ms. Indikator smeru u fazi B

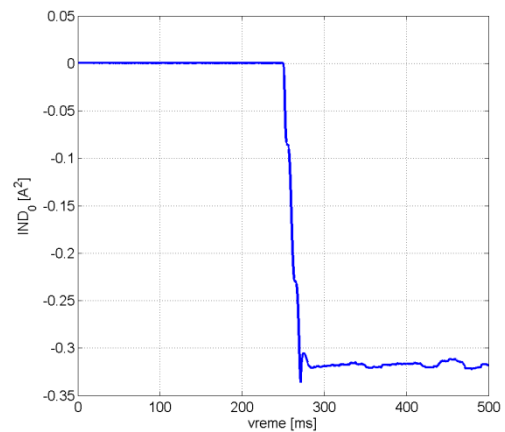
sve vreme ostaje pozitivan. Na Slici 7.57 mogu se videti nulte struje na oba kraja voda pri istom kvaru, a na Slikama 7.58 i 7.59 nulta diferencijalna struja i indikator smera nulte struje.



Slika 7.57: Nulte struje pri kvaru K8



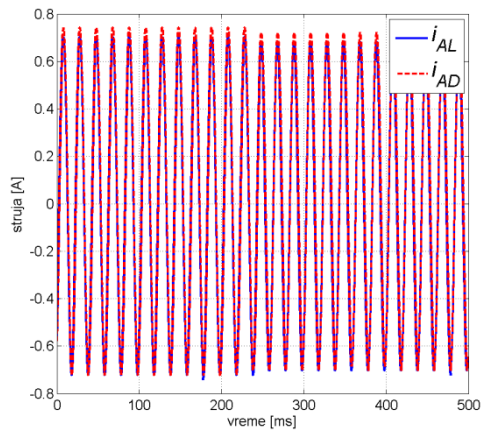
Slika 7.58: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K8 - zumirano



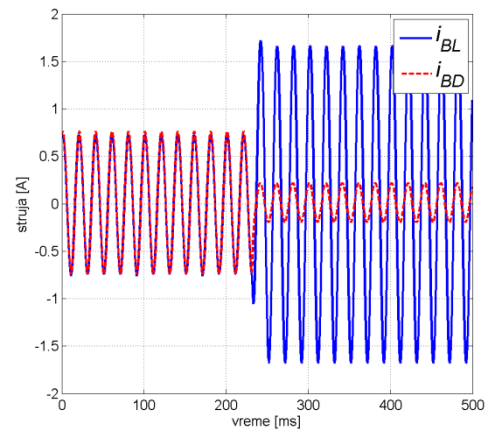
Slika 7.59: Indikator smera nulte struje pri kvaru K8

Nulta diferencijalna zaštita brzo detektuje ovakav kvar, jer je indikator smera i pre kvara jednak nuli. Nulta diferencijalna struja prelazi prag reagovanja u trenutku  $t=252$  ms, samo 2 ms nakon nastanka samog kvara. Zaključak je da bi prekidaču fazi A dobio signal za isključenje u trenutku  $t=252$  ms dok bi prekidači u fazi B dobili signal za isključenje u trenutku  $t=254$  ms, jer tada fazne diferencijalne struje prelaze prag reagovanja.

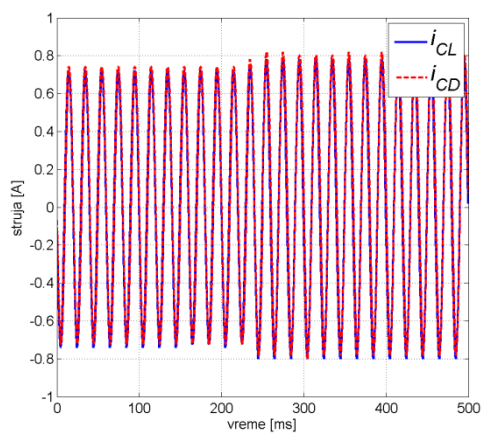
Na Slikama 7.60-7.62 vide se talasni oblici faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara K9.



Slika 7.60: Struje u fazi A pri kvaru K9

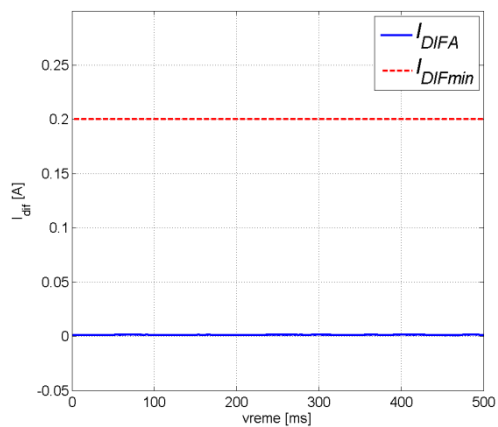


Slika 7.61: Struje u fazi B pri kvaru K9

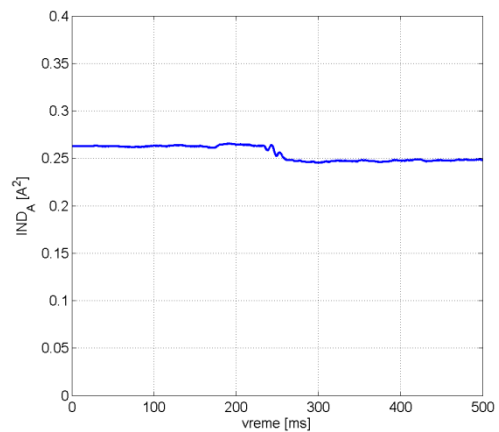


Slika 7.62: Struje u fazi C pri kvaru K9

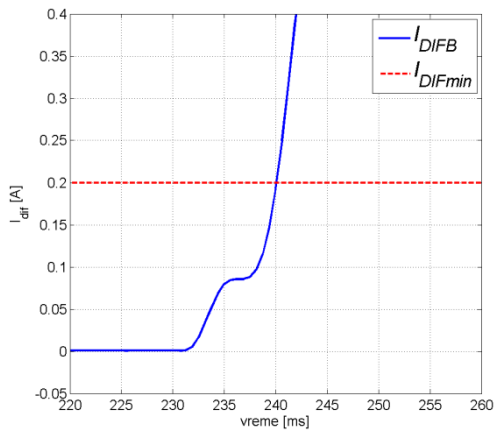
Relevantne veličine za faznu diferencijalnu zaštitu za svaku fazu posebno, prikazani su na Slikama 7.63-7.68.



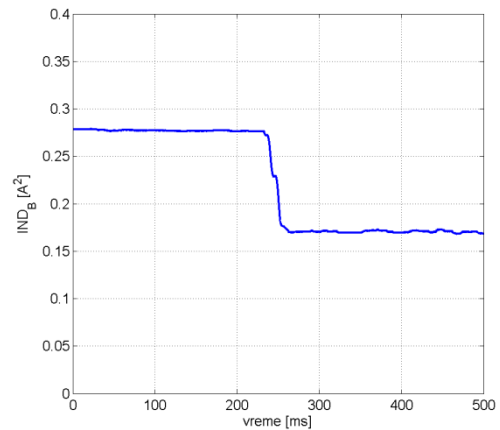
Slika 7.63: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K9



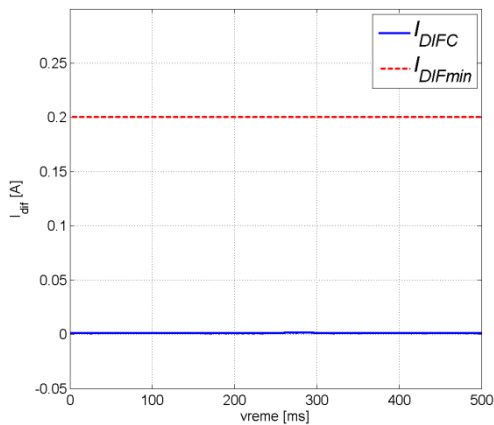
Slika 7.64: Indikator smera za fazu A pri kvaru K9



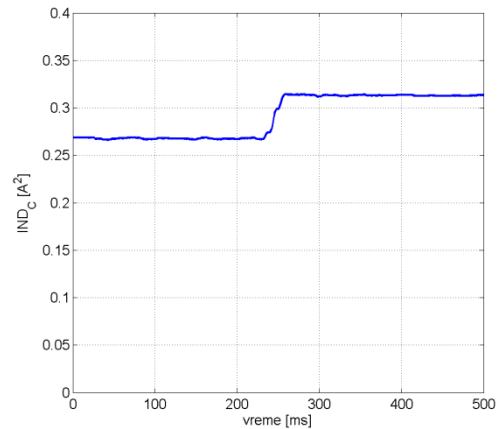
Slika 7.65: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K9 - zumirano



Slika 7.66: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K9



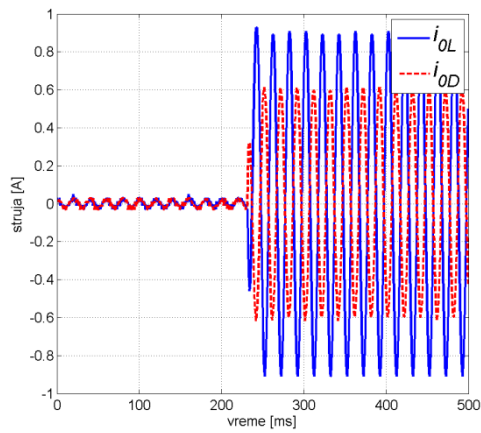
Slika 7.67: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K9



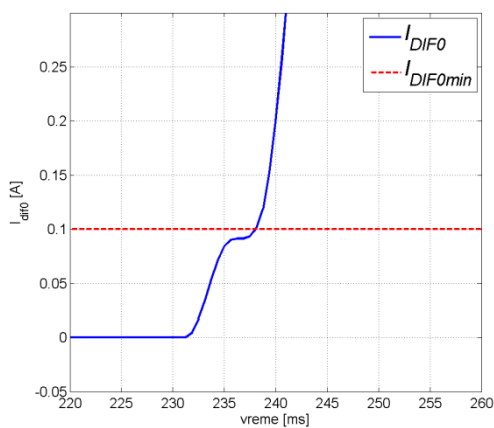
Slika 7.68: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K9

Može se uočiti da fazna diferencijalna zaštita postaje veća od praga reagovanja samo u fazi B, koja je pogođena kvarom i to u trenutku  $t=240$  ms. To je 8 ms nakon nastanka kvara. Indikator smeru ni u jednoj fazi ne postaje negativan što praktično znači da ovaj kvar ne bi bio detektovan od strane fazne diferencijalne zaštite. Trostruke nulte struje i veličine od interesa za nultu diferencijalnu zaštitu, vide se na Slikama 7.69-7.71. Kao što se može i primetiti ova zaštita bi detektovala kvar za 6 ms, jer trostruka nulta diferencijalna struja tada prelazi prag reagovanja koji je niži u odnosu na faznu diferencijalnu zaštitu. Kvar u fazi B bi bio detektovan za 8 ms nakon nastanka.

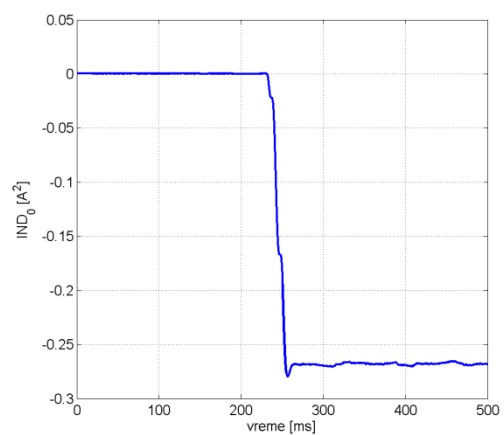




Slika 7.69: Nulte struje pri kvaru K9

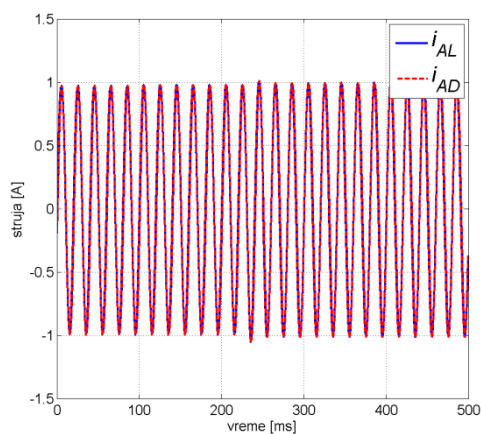


Slika 7.70: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K9 - zumirano

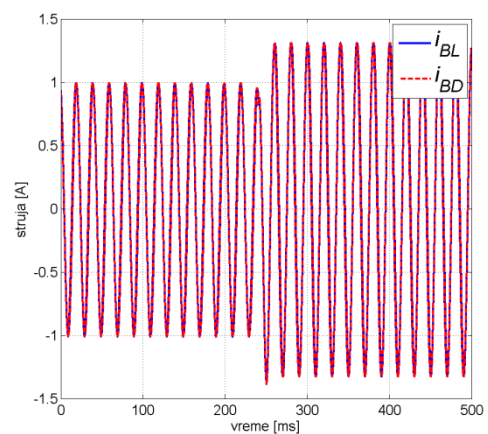


Slika 7.71: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K9

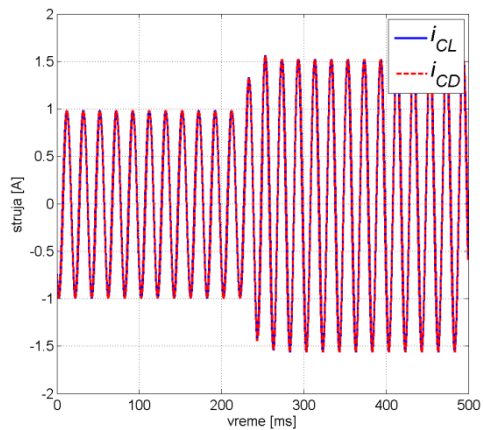
Biće prikazani samo još talasni oblici struje i proračunatih veličina za kvar van zone zaštite (kvar K12). Slike 7.72-7.74 prikazuju struje u svim fazama sa obe strane štice deonice.



Slika 7.72: Struje u fazi A pri kvaru K12

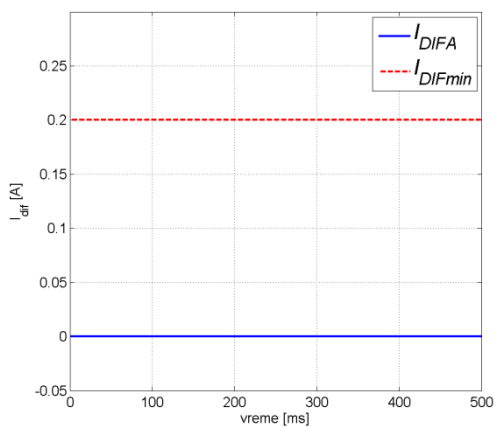


Slika 7.73: Struje u fazi B pri kvaru K12

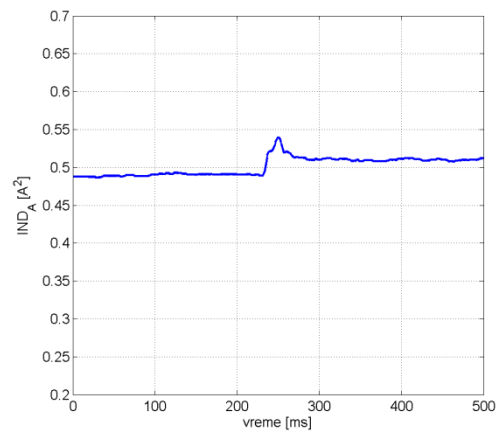


Slika 7.74: Struje u fazi C pri kvaru K12

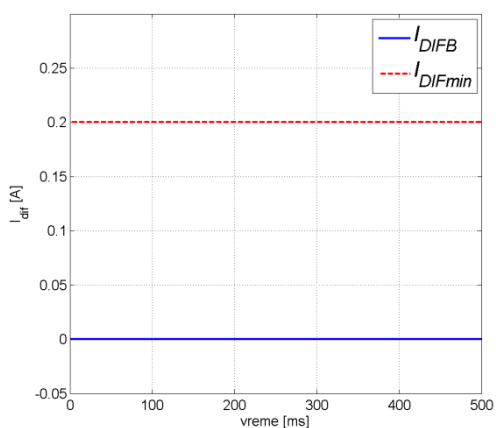
Struje u fazama B i C su porasle, dok se struja u fazi A nije previše promenila. Veličine od interesa za faznu diferencijalnu zaštitu prikazane su na Slikama 7.75-7.80.



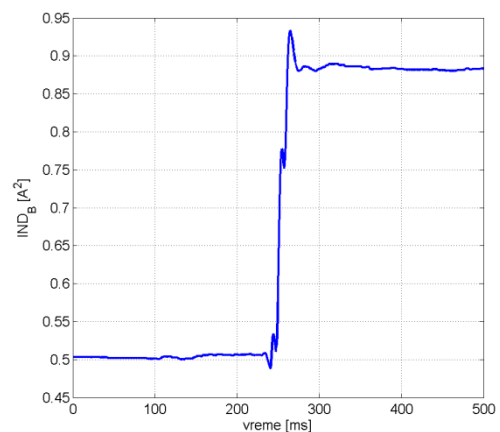
Slika 7.75: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K12



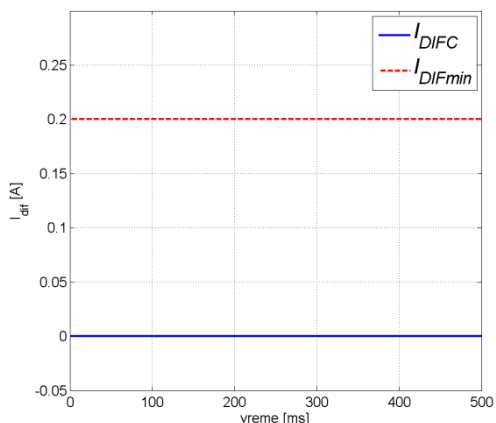
Slika 7.76: Indikator smeru za fazu A pri kvaru K12



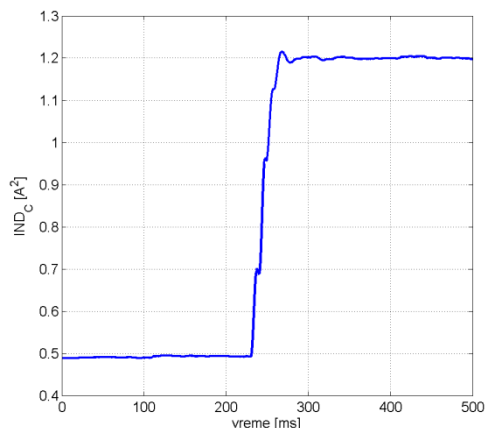
Slika 7.77: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K12



Slika 7.78: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K12



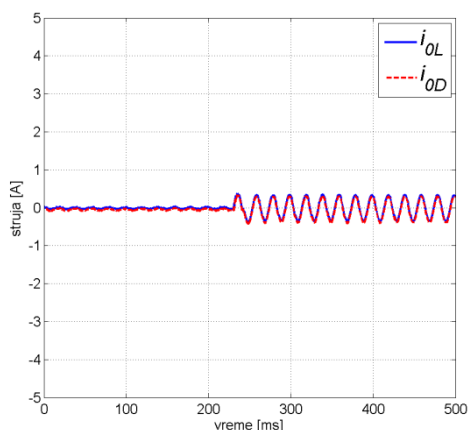
Slika 7.79: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K12



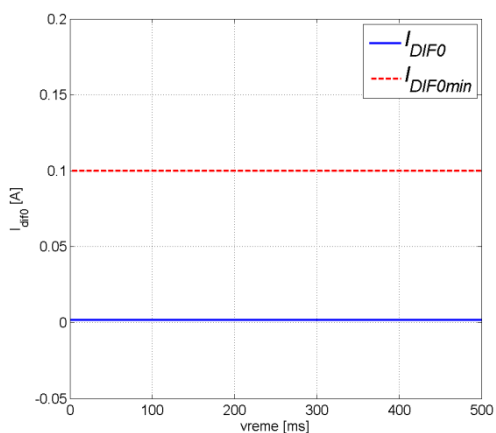
Slika 7.80: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K12

Fazna diferencijalna zaštita ni za jednu fazu nema uslov za reagovanje.

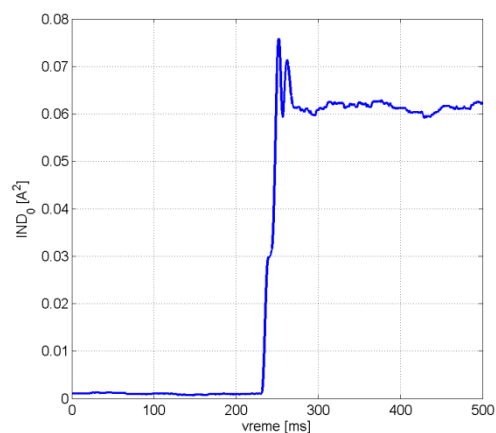
Nulta diferencijalna takođe ne bi imala uslov za reagovanje. Rezultati se mogu videti na Slikama 7.81-7.83. Nulte struje na oba kraja voda su se povećale nakon nastanka kvara, što je i očekivano jer je kvar dvofazni sa zemljom. Međutim nulte struje merene na suprotnim krajevima voda su istih smerova.



Slika 7.81: Nulte struje pri kvaru K12



Slika 7.82: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K12



Slika 7.83: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K12

U Tabeli 7.5 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve testirane kvarove kada je mreža radijalna.

Tabela 7.5: Trenuci detektovanja kvarova nakon njihovog nastanka

Kvar K7					
Trenutak nastanka kvara 248 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-		-
B	2	B	-	2	2
C	-	C	-		-
Kvar K8					
Trenutak nastanka kvara 250 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	2	A	25		4
B	4	B	-	2	2
C	-	C	-		-
Kvar K9					
Trenutak nastanka kvara 232 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-		-
B	8	B	-	6	8
C	-	C	-		-
Kvar K10					
Trenutak nastanka kvara 237 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	5	A	-		5
B	-	B	-	3	-
C	-	C	-		-

Kvar K11  
Trenutak nastanka kvara 236 ms

Fazna diferencijalna		Nulta		Ukupno
Diferencijalna struja	Indikator smera	diferencijalna		
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	4	A	-	4
B	-	B	-	-
C	5	C	-	5

Kvar K12  
Trenutak nastanka kvara 40 ms

Fazna diferencijalna		Nulta		Ukupno
Diferencijalna struja	Indikator smera	diferencijalna		
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-	-
B	-	B	-	-
C	-	C	-	-

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

### 7.3. Dodatna testiranja za radijalnu mrežu

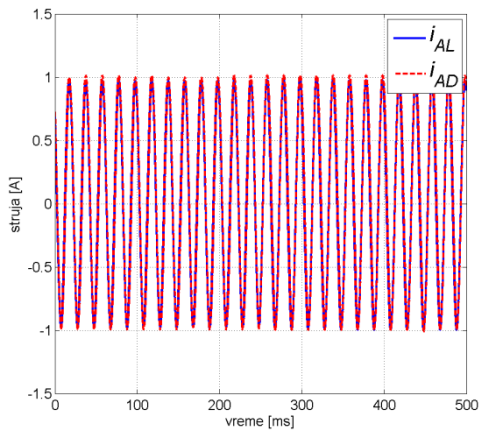
Izvršena su i dodatna testiranja kada je mreža radijalna. Biće diskutovano šta se dešava ako se desi kvar pri kome ne postoje nulte struje, odnosno kada nema kontakta sa zemljom. To su dvofazni kvarovi bez zemlje i trofazni kvar. Izvršen je i jedan test primer kada je zvezdište potrošnje razemljeno, a kada je izazavan zemljospoj. Ovaj slučaj bi trebalo da testira nultu diferencijalnu zaštitu kada ne postoji nulta struja sa jedne strane voda pri kvaru sa zemljom. Svi nabrojani kvarovi su simulirani na sredini voda, odnosno između druge i treće deonice. U Tabeli 7.6 navedeni kvarovi su pregledno prikazani.

Tabela 7.6: Podaci o tipovima kvarova

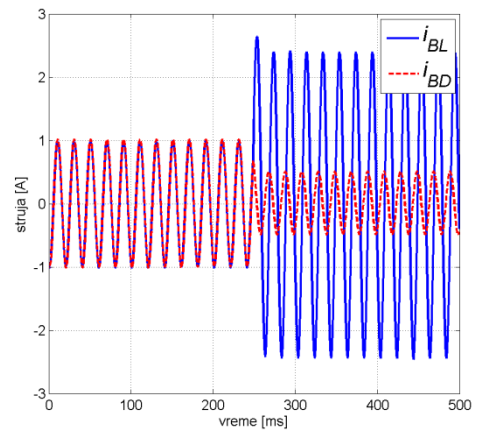
Redni broj kvara	Tip kvara	Pozicija kvara*	Zvezdište potrošnje
Kvar 13	BC	Iza 2. deonice	uzemljeno
Kvar 14	ABC	Iza 2. deonice	uzemljeno
Kvar 15	BN	Iza 2. deonice	izolovano

\*Redni broj deonice gledano sa leve strane

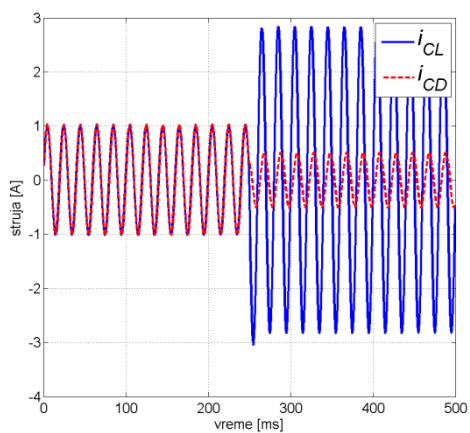
Na slikama 7.84-7.86 prikazuju talasne oblike faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara K13. Trenutak nastanka kvara je  $t=249$  ms.



Slika 7.84: Struje u fazi A pri kvaru K13

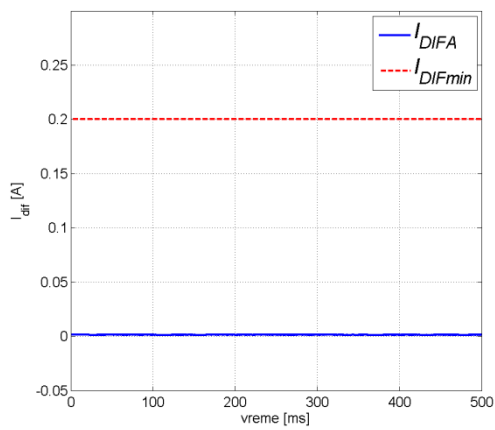


Slika 7.85: Struje u fazi B pri kvaru K13

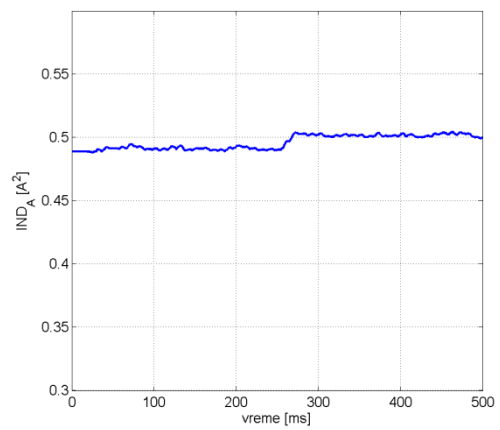


Slika 7.86: Struje u fazi C pri kvaru K13

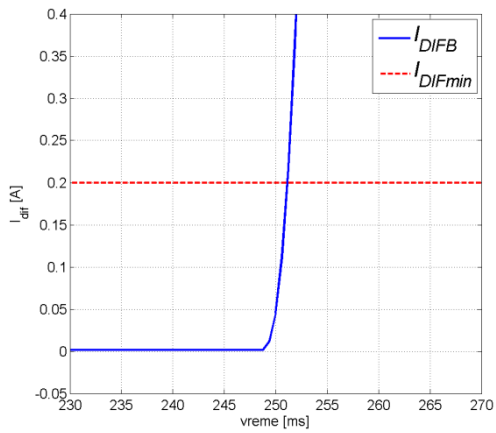
Diferencijalne struje i indikatori smera prikazani su na Slikama 7.87-7.92.



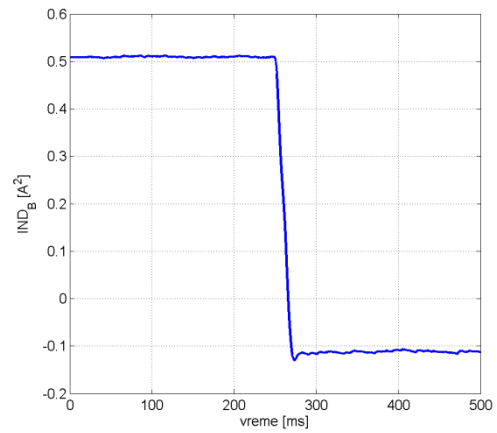
Slika 7.87: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K13



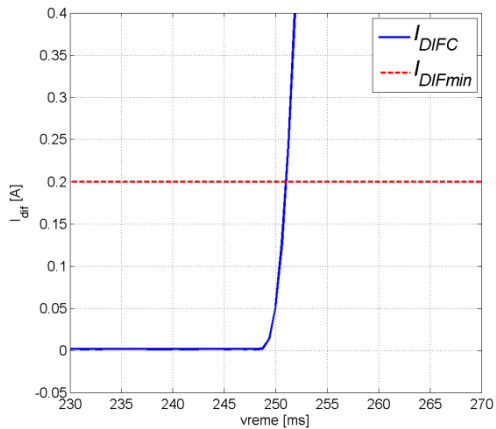
Slika 7.88: Indikator smera za fazu A pri kvaru K13



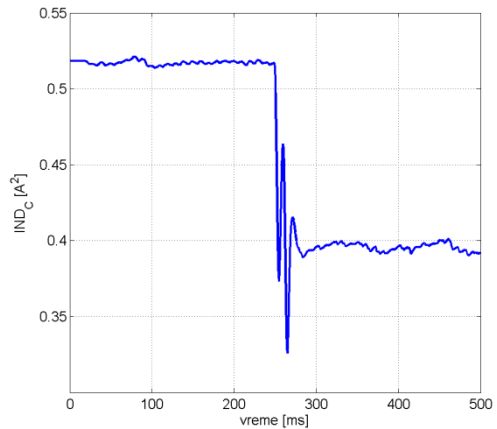
Slika 7.89: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K13 - zumirano



Slika 7.90: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K13

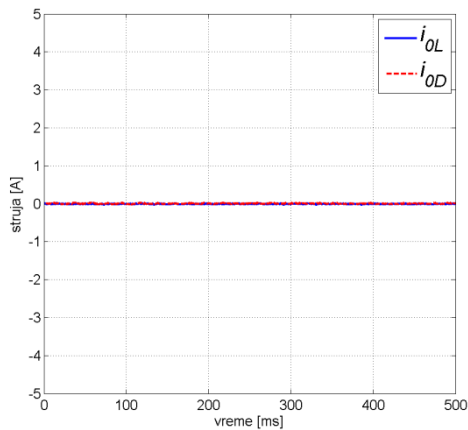


Slika 7.91: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K13- zumirano

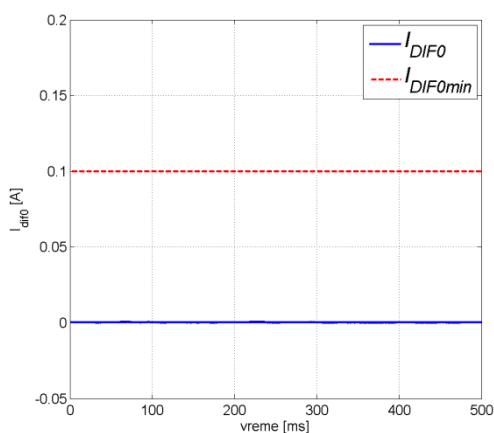


Slika 7.92: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K13

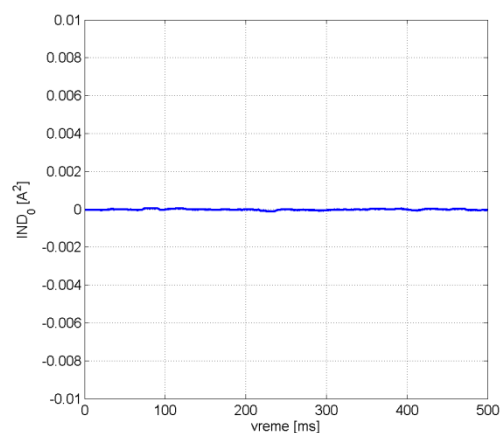
U fazama B i C diferencijalne struje prelaze minimalne vrednosti za reagovanje u trenutku  $t=252$  ms. Međutim, samo u fazi B postoji uslov za reagovanje fazne diferencijalne zaštite jer indikator smeru dobija negativnu vrednost u trenutku  $t=267$  ms. Indikator smeru u fazi C sve vreme ostaje pozitivan. Na Slici 7.93 mogu se videti nulte struje na oba kraja voda pri istom kvaru, a na Slikama 7.94 i 7.95 nulta diferencijalna struja i indikator smeru nulte struje.



Slika 7.93: Nulte struje pri kvaru K13



Slika 7.94: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K13

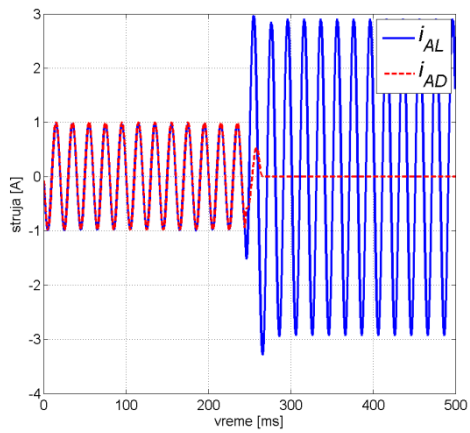


Slika 7.95: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K13

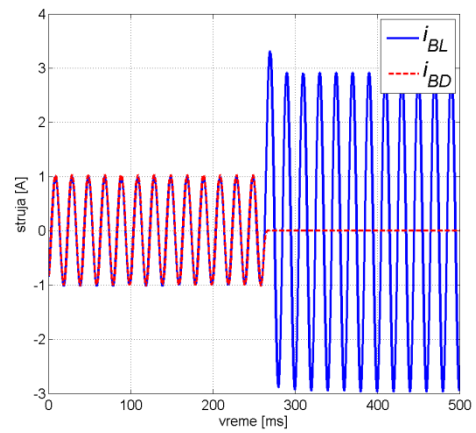
Nulta diferencijalna zaštita nema uslov za reagovanje što je i očekivano jer pri kvaru nema kontakta sa zemljom. Zaključak je se kvar može isključiti samo u fazi B i to 19 ms nakon nastanka istog. Ako bismo smatrali da se ovim testovima razmatraju srednjenaponske mreže, gde je pogon prekidača isti za sve tri faze, onda bi ovakva zaštita isključila kvar i u fazama A i C u istom trenutku kada i prekidači u fazi B dobiju signal za isključenje.

Na Slikama 7.96-7.98 vide se talasni oblici faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara *K14*. Trenutak nastanka kvara je  $t=244$  ms.

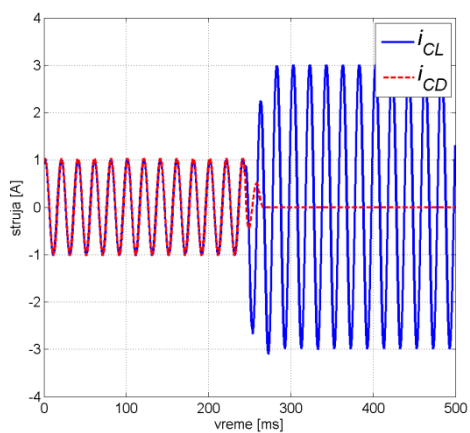




Slika 7.96: Struje u fazi A pri kvaru K14

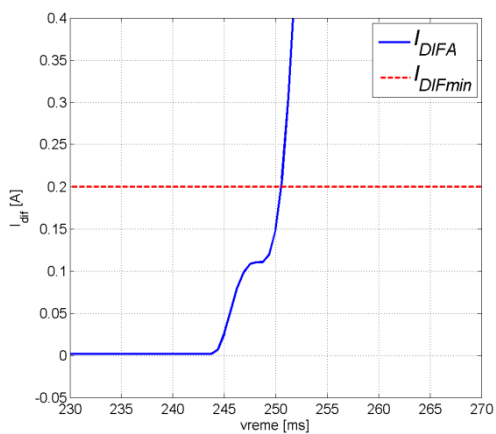


Slika 7.97: Struje u fazi B pri kvaru K14

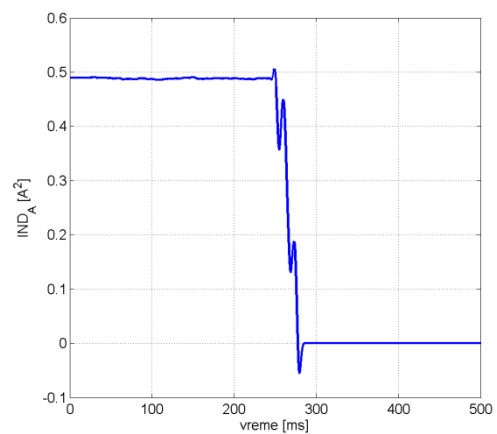


Slika 7.98: Struje u fazi C pri kvaru K14

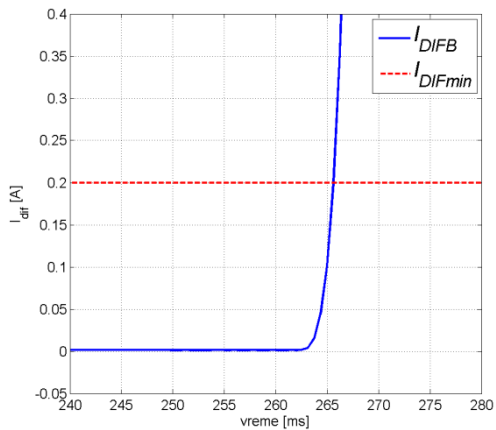
Relevantne veličine za faznu diferencijalnu zaštitu za svaku fazu posebno, prikazani su na Slikama 7.99-7.104.



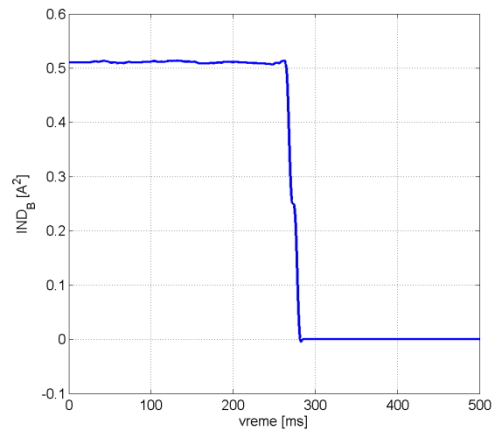
Slika 7.99: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K14 - zumirano



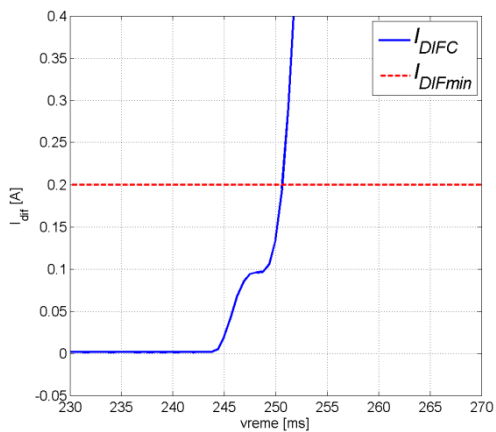
Slika 7.100: Indikator smera za fazu A pri kvaru K14



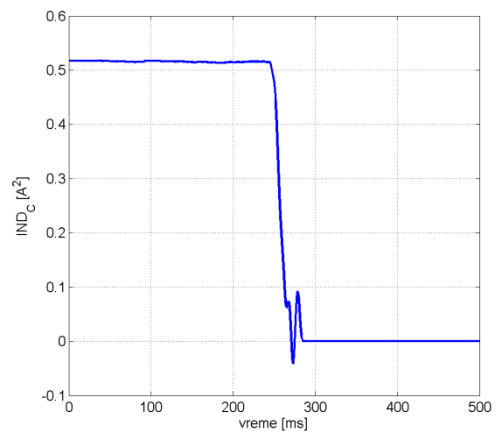
Slika 7.101: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K14-zumirano



Slika 7.102: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K14

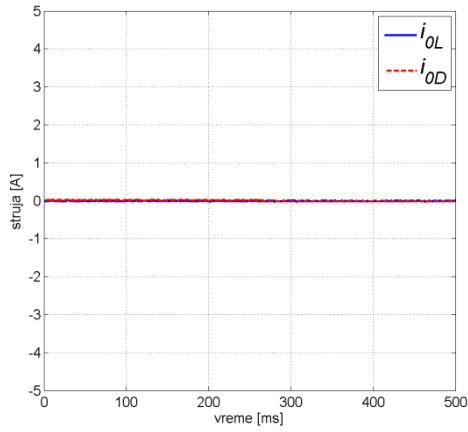


Slika 7.103: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K14 - zumirano

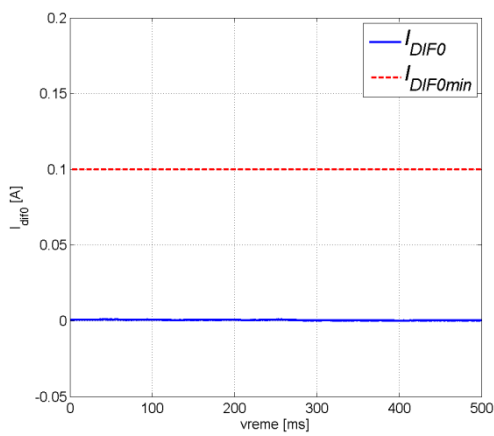


Slika 7.104: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K14

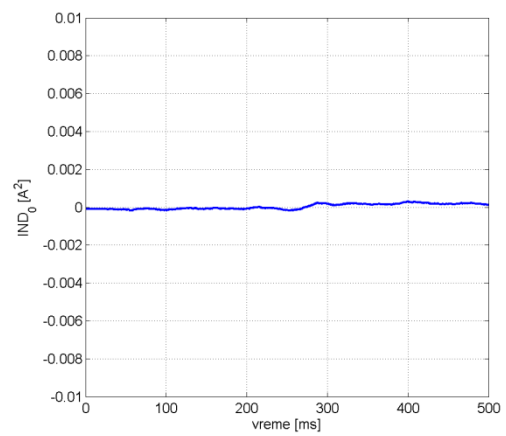
Fazne diferencijalne struje u svim fazama nadmašuju minimalnu struju reagovanja od 0,2 A (faza A-251 ms, faza B-266 ms i faza C-251 ms). Indikatori smeru takođe postaju manji od nule (faza A 276 ms, faza B-281 ms i faza C-271 ms). To su istovremeno i trenuci detektovanja kvara u svakoj fazi. Ovi indikatori na kraju prelaznog procesa postaju jednaki nuli, jer sa strane potrošnje nema struje ni u jednoj fazi. Trostruke nulte struje i veličine od interesa za nultu diferencijalnu zaštitu, vide se na Slikama 7.105-7.107. Nulta diferencijalna zaštita ne prepoznaje ovaj kvar što je i očekivano.



Slika 7.105: Nulte struje pri kvaru K14

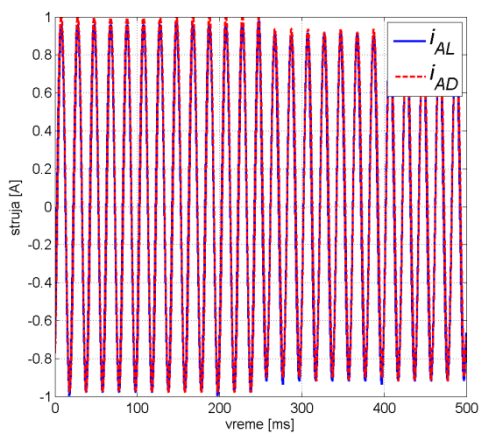


Slika 7.106: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K14

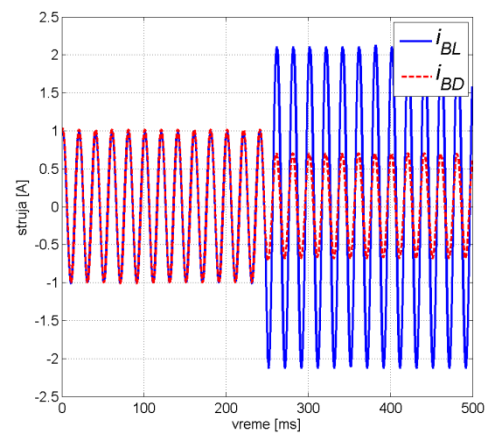


Slika 7.107: Indikator smera nulte struje pri kvaru K14

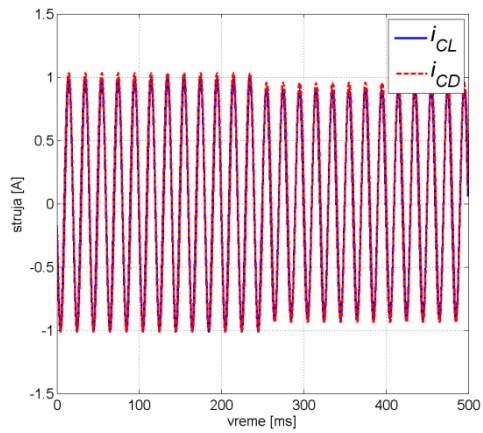
Slike 7.108-7.110 prikazuju struje u svim fazama sa obe strane štice deonice pri kvaru K15. Trenutak nastanka kvara je  $t=247$  ms.



Slika 7.108: Struje u fazi A pri kvaru K15

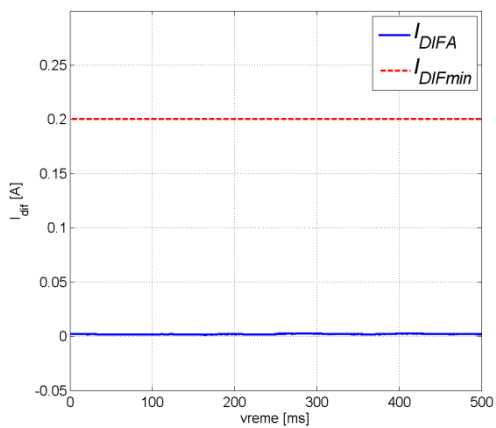


Slika 7.109: Struje u fazi B pri kvaru K15

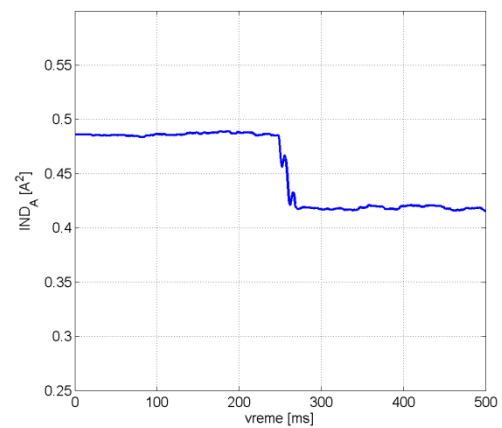


Slika 7.110: Struje u fazi C pri kvaru K15

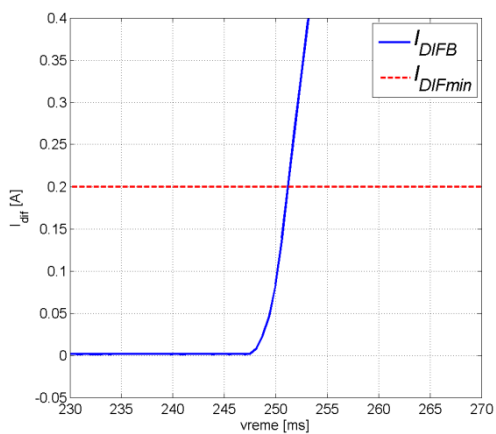
Veličine od interesa za faznu diferencijalnu zaštitu prikazane su na Slikama 7.111-7.116.



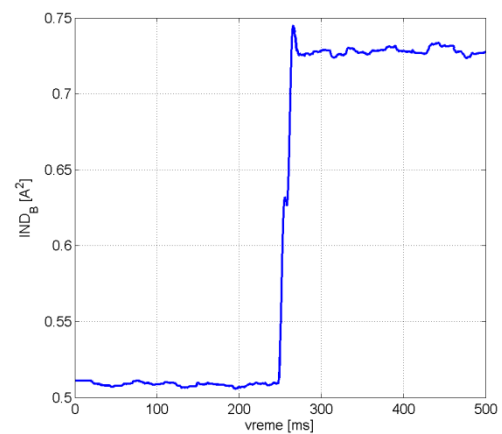
Slika 7.111: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K15



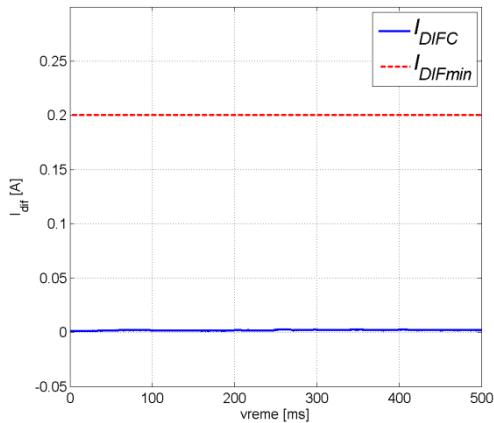
Slika 7.112: Indikator smeru za fazu A pri kvaru K15



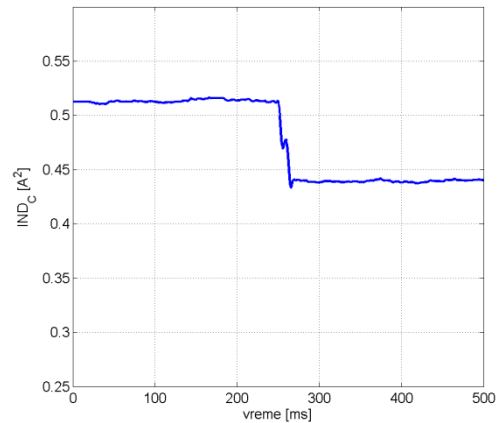
Slika 7.113: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K15



Slika 7.114: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K15



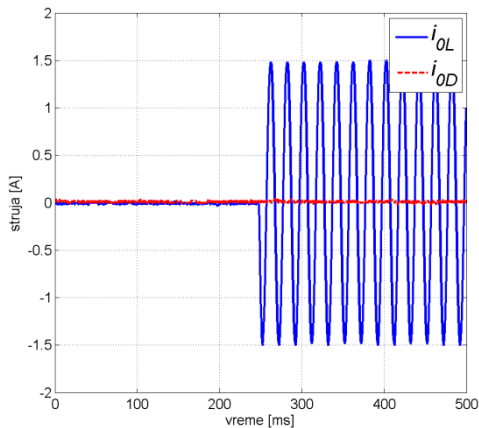
Slika 7.115: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K15



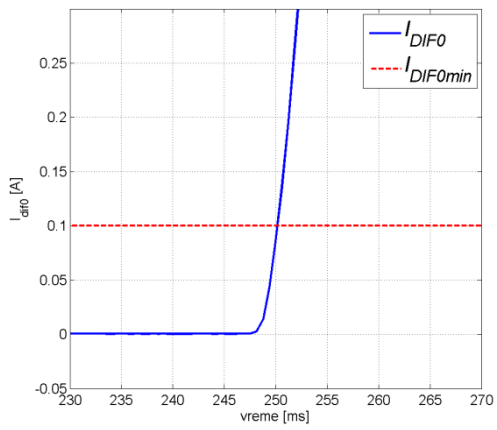
Slika 7.116: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K15

Fazna diferencijalna struja u fazi B 6 ms nakon nastanka kvara. Indikator smeru ne upućuje na to da se kvar dogodio jer ima pozitivnu vrednost sve vreme.

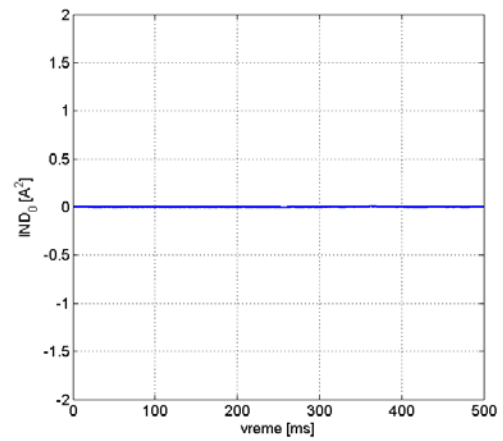
Trostruke nulte struje i veličine od interesa za nultu diferencijalnu zaštitu, vide se na Slikama 117-119. Trostruka nulta diferencijalna struja indicira na kvar sa zemljom 5 ms po njegovom nastanku. U ovom slučaju, nulta struja sa strane potrošnje je jednaka nuli jer je zvezdište ne uzemljeno. Otuda je i indikator smeru jednak nuli pre i posle kvara. Iz uslova za nultu diferencijalnu zaštitu sledi da je ovo dovoljno da bi se detektovao kvar jer indikator smeru trostruke nulte struje može biti i jednak nuli. Ovaj primer pokazuje svrhu uvođenja ovakvog uslova. Zaključak je da bi nulta diferencijalna zaštita detektovala zemljospoj 5 ms nakon njegovog nastanka.



Slika 7.117: Nulte struje pri kvaru K15



Slika 7.118: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K15



Slika 7.119: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K15

U Tabeli 7.7 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve testirane kvarove kada je mreža radijalna.

Tabela 7.7: Trenuci detektovanja kvarova nakon njihovog nastanka

Kvar K13					
Trenutak nastanka kvara 249 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara* [ms]	faza	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]
A	-	A	-		-
B	3	B	18	-	18
C	3	C	-		-

Kvar K14					
Trenutak nastanka kvara 244 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara* [ms]	faza	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]
A	7	A	32		32
B	22	B	37	-	37
C	7	C	27		27

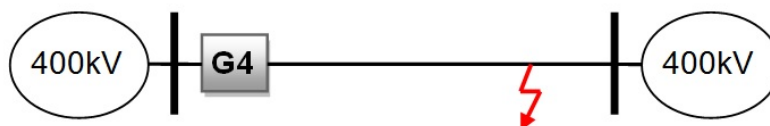
  

Kvar K15					
Trenutak nastanka kvara 247 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smera		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja				diferencijalna	
faza	detektovanje kvara* [ms]	faza	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]	detektovanje kvara* [ms]
A	-	A	-		-
B	6	B	-	5	6
C	-	C	-		-

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

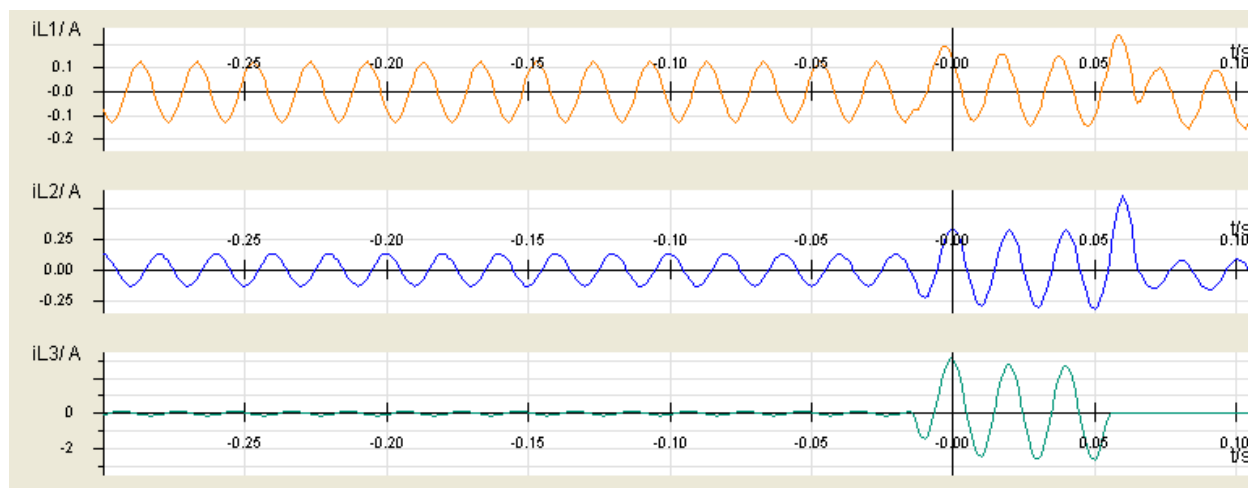
## 8. SNIMAK KVARA

U ovom poglavlju biće prikazani snimci releja koji su instalirani na realnim vodima. Snimci su načinjeni prilikom monofaznog kvara na vodu DV 461, Vranje 4-Štip. Vod je dužine 96 km. Ovi snimci će biti iskorišćeni za proveru predloženog algoritma. Kvar je zabeležen distantnim relejima firme SIEMENS. Na Slici 8.1 prikazana je principijelna šema mesta kvara i položaj releja, odnosno trafostanice TS Vranje 4 (G4). Sa druge strane voda nalazi se TS Štip.



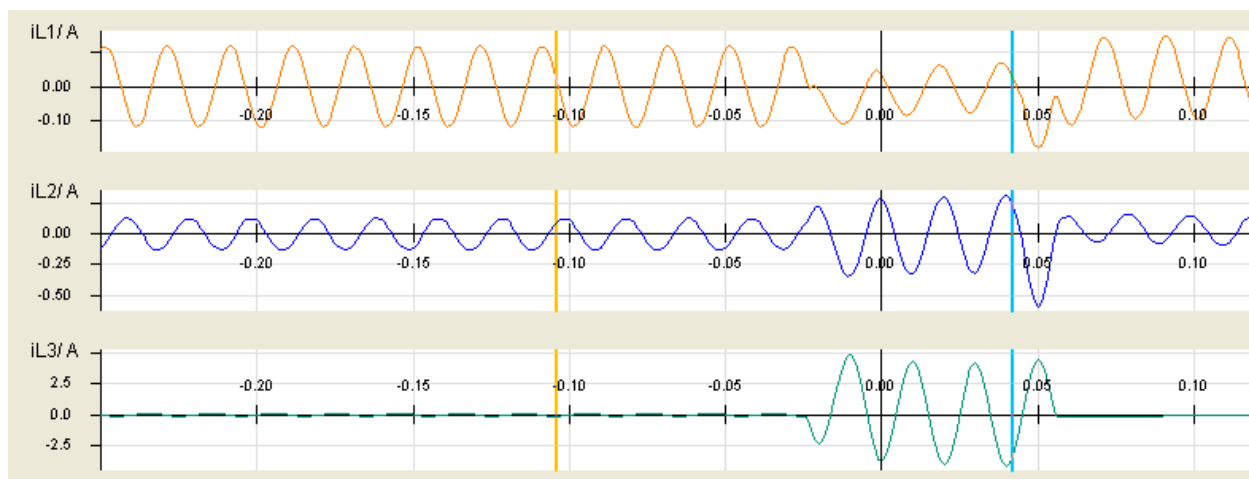
Slika 8.1: Grafički prikaz mesta kvara

Na Slikama 8.2 i 8.3, mogu se videti talasni oblici struja u sve tri faze prilikom navedenog kvara, zabeležene od strane oba releja. Za svaki relej postoji po tri fazne struje. Snimci su prikazani pomoću softvera *SIGRA 4*. Ose su automatski podešene da bi se najbolje uočile vrednosti struja. Struje kvara su svedene na sekundarnu stranu strujnih transformatora. Prenosni odnos strujnih transformatora je 2000/1 A/A. Sa slike se vidi da je primenjen sistem automatskog ponovnog uključanja jer je nakon detektovanja kvara isključena samo jedna faza. Nažalost, ne postoje snimci koji prikazuju ceo ciklus automatskog ponovnog uključanja prekidača, pa će se algoritam primeniti samo na dostupne signale.



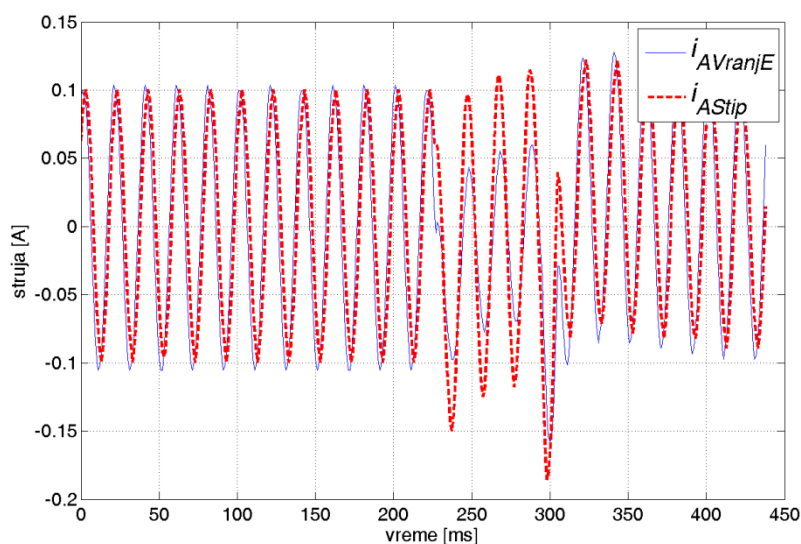
Slika 8.2: Talasni oblici struja u sve tri faze koje se dovode releju firme SIEMENS sa strane TS Vranje 4



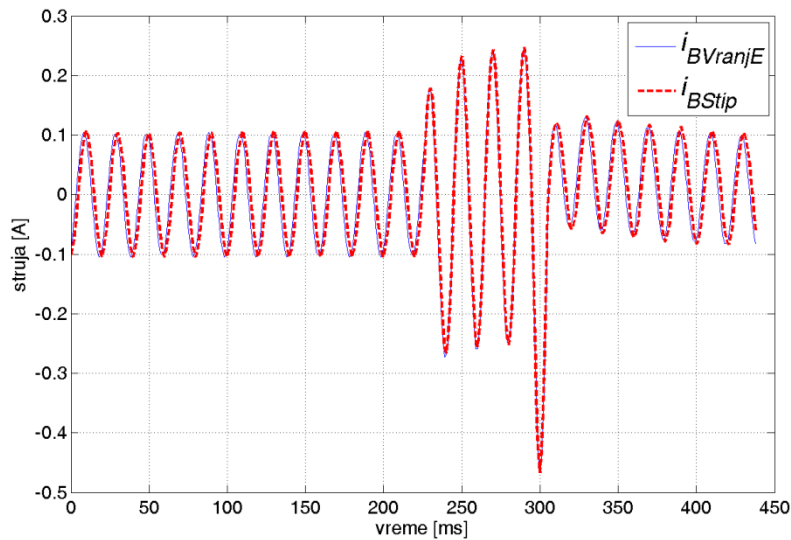


Slika 8.3: Talasni oblici struja u sve tri faze koje se dovode releju firme SIEMENS sa strane TS Štip

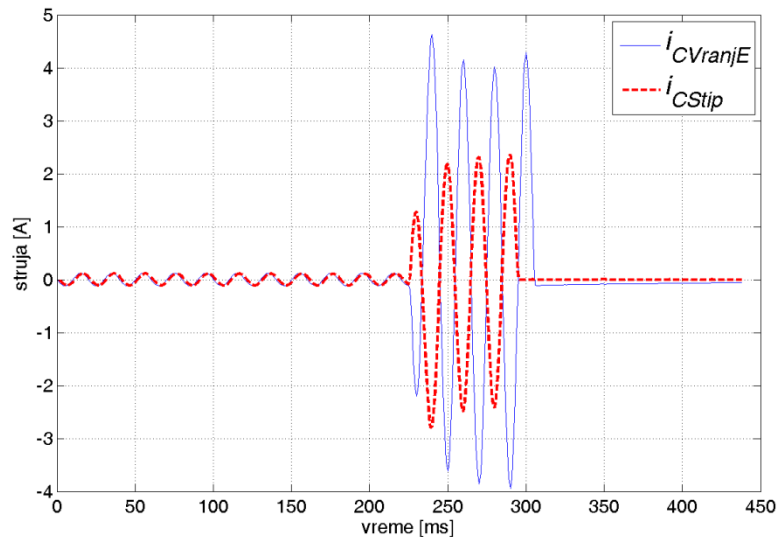
Prikazani snimci izvezeni su u *comtrade* formatu i nad njima je izvršen predloženi algoritam pomoću softverskog paketa *MATLAB*. Radi jednostavnijeg prikaza, na Slikama 8.4-8.6 mogu se videti talasni oblici struja u svakoj fazi posebno. Može se uočiti da su struje sa leve i desne strane u protivfazi. To implicira da su krajevi strujnih transformatora vezani različito na suprotnim krajevima voda. Kvar se dešava u trenutku  $t=225$  ms.



Slika 8.4: Talasni oblici struja u fazi A sa strane TS Vranje i TS Štip

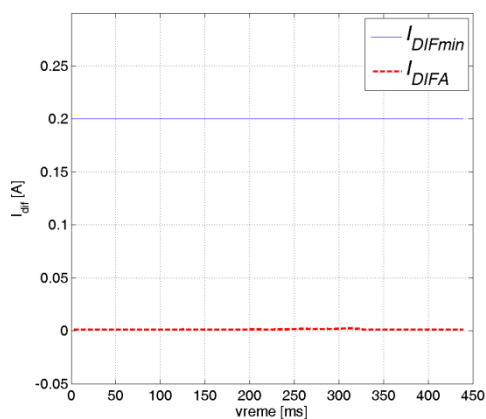


Slika 8.5: Talasni oblici struja u fazi B sa strane TS Vranje i TS Štip

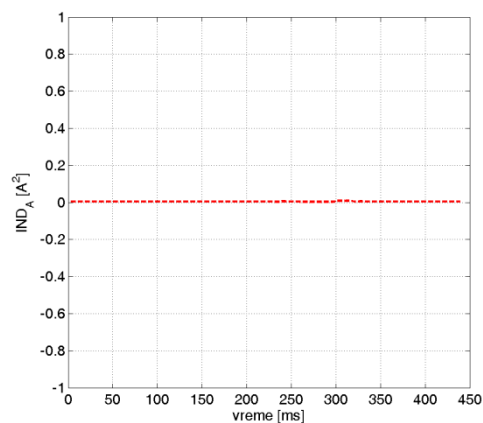


Slika 8.6: Talasni oblici struja u fazi C sa strane TS Vranje i TS Štip

Diferencijalna struja i indikator smera *IND* računati su za svaku fazu posebno. Na Slikama 8.7-8.9 prikazani su rezultati. Prvo treba proračunati vrednost za minimalnu struju reagovanja. Za vod dugačak 96 km,  $I_c$  iznosi 37,2 mA na sekundarnoj strani. Granica od 200 mA je sasvim dovoljna. Ovo je 20% od naznačene sekundarne struje strujnih transformatora (1 A).

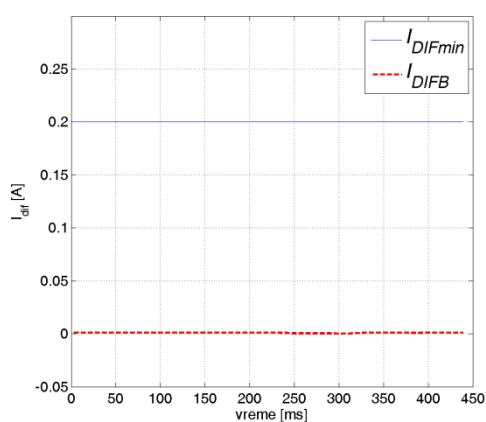


a)

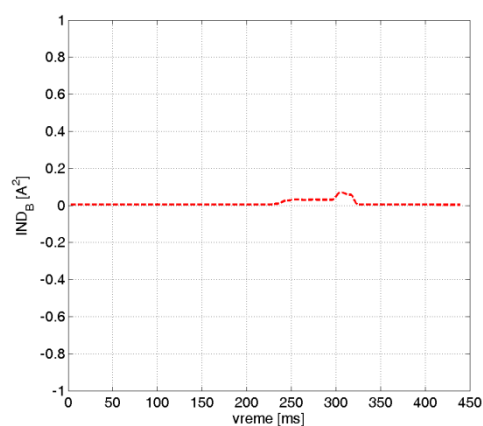


b)

Slika 8.7: Računate veličine za fazu A:  
a) Diferencijalna struja i prag reagovanja b) Indikator smeru



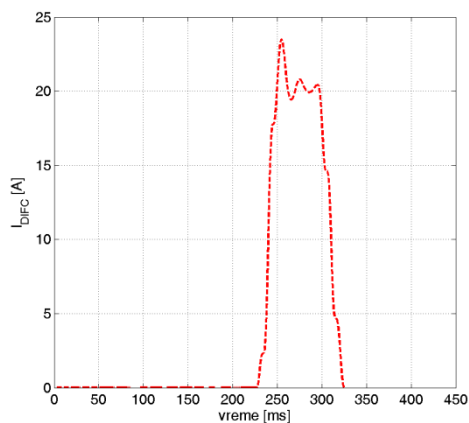
a)



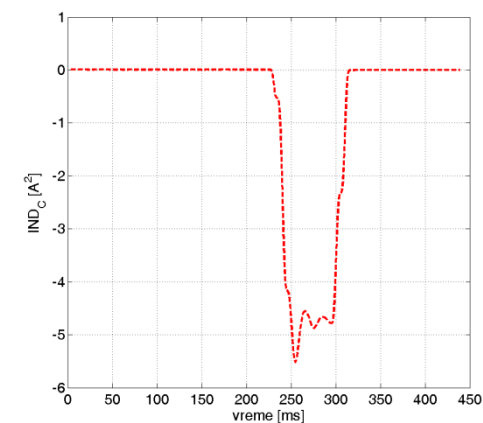
b)

Slika 8.8: Računate veličine za fazu B:  
a) Diferencijalna struja i prag reagovanja b) Indikator smeru

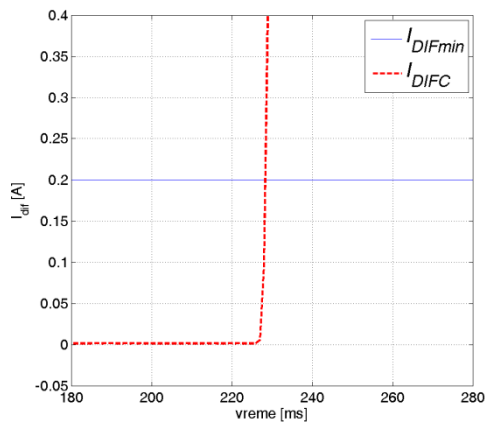
Na osnovu Slike 8.7 i 8.8 može se videti da je diferencijalna struja u obe faze koje nisu pogđene kvarom manja od praga reagovanja ( $I_{difmin}$ ). Takođe, oba indikatora smeru, sve vreme imaju pozitivnu vrednost. Zaključak je da relej neće poslati signal za otvaranje prekidača u ove dve faze, što je ispravna odluka. Na Slici 8.9 prikazane su iste veličine sa i bez skraćivanja vremenskih osa. Vremenske ose su skraćene na Slikama 8.9 c) i 8.9 d) da bi se jasnije video prelazni proces.



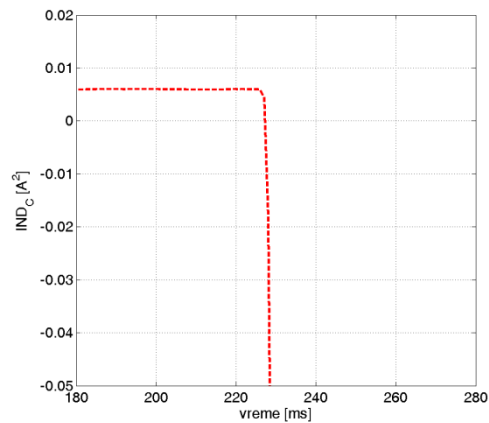
a)



b)



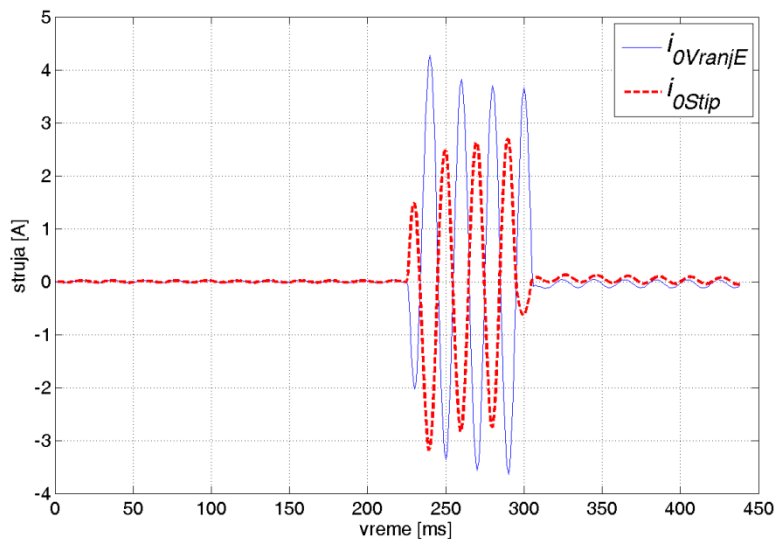
c)



d)

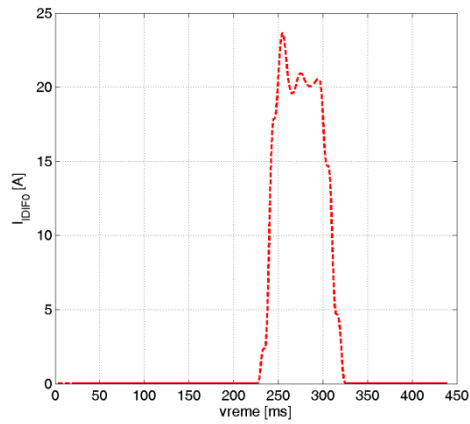
Slika 8.9: Računate veličine za fazu C:  
 a) Diferencijalna struja b) Indikator smera  
 c) Diferencijalna struja i prag reagovanja – zumirano  
 d) Indikator smera – zumirano

Na Slici 8.9 c) jasno se vidi da diferencijalna struja u fazi C prelazi pomenuti prag reagovanja u trenutku  $t_I=229$  ms. Indikator smera je 1 ms ranije postao negativan. To dalje navodi na zaključak da bi relej trebalo da odreaguje samo 4 ms nakon nastanka kvara. Pomenuti algoritam ima dodatak u vidu provere nultih struja. Na Slici 8.10 mogu se videti trenutne vrednosti nultih struja sa obe strane voda.

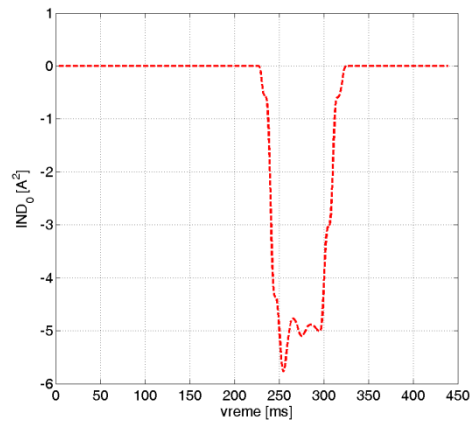


Slika 8.10: Talasni oblici nultih struja sa strane TS Vranje i TS Štip

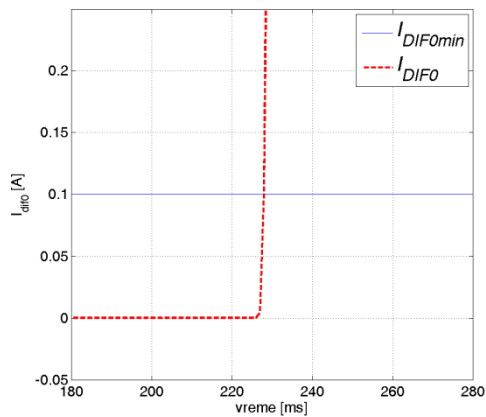
Na Slici 8.11 prikazane su iste veličine sa i bez skraćanja vremenskih osa. Za prag reagovanja uzeta je vrednost od 0,1 A (10% od naznačene sekundarne struje strujnih transformatora).



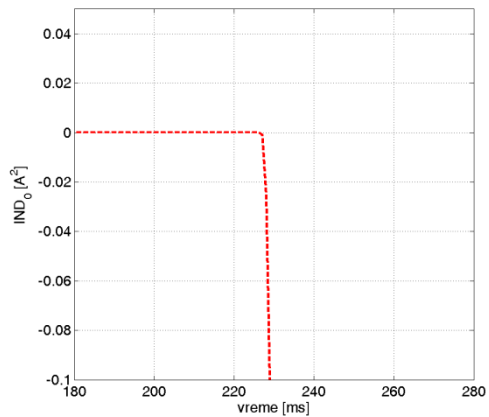
a)



b)



c)

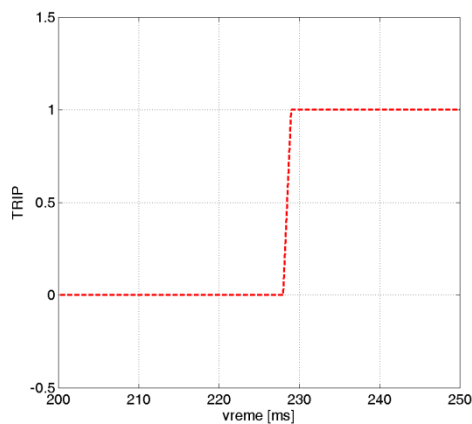


d)

Slika 8.11: Računate veličine za nulte struje:

- a) Diferencijalna nulta struja
- b) Indikator smera nultih struja
- c) Diferencijalna nulta struja i prag reagovanja – zumirano
- d) Indikator smera nultih struja– zumirano

Diferencijalna nulta struja prelazi pomenuti prag reagovanja u trenutku  $t_1=230$  ms, za 1 ms kasnije nego fazna diferencijalna struja za fazu C. Indikator smera je postao negativan samo 1 ms nakon nastanka kvara. Zaključuje se da je fazna diferencijalna u ovom slučaju brža i da će relej reagovati 4 ms nakon kvara (u trenutku  $t_1=229$  ms), što se vidi i na Slici 8.12.



Slika 8.12: Trenutak reagovanja releja.

U Tabeli 8.1 pregledno su prikazana vremena za koje odgovarajući moduli novog algoritma prepoznaju kvar nakon nastanka kvara.

Tabela 8.1: Trenuci prepoznavanja kvarova\*

Trenutak nastanka kvara 225 ms

faza	Nov algoritam – fazna diferencijalna		Nov algoritam – nulta diferencijalna		Ukupno
	Dif. struja	Indikator smera	Dif. struja	Indikator smera	
A	-	-			-
B	-	-	5	1	-
C	4	3			4

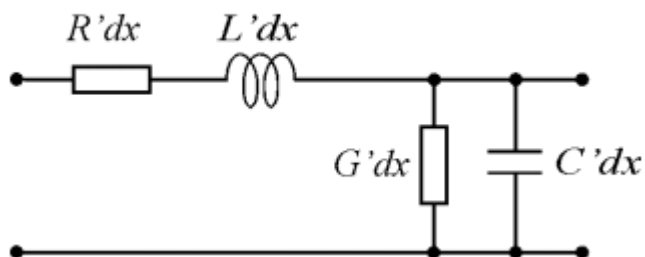
\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara

## 9. PRIKAZ REZULTATA SIMULACIJA IZVRŠENIH POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA EMTP/ATP

Za verifikaciju algoritma koristiće se i drugi softverski paket koji je specijalizovan za proračun brzih elektromagnetskih procesa, EMTP/ATP. Cilj je da se u modelu uvažavaju parametri voda koji su zavisni od frekvencije.

### 9.1. Frekvencijski zavisni parametri

Najčešće se kao zamenska šema voda koristi tzv. "obrnuta  $\Gamma$ " šema. Ona se sastoji od podužne impedanse i poprečne admitanse. Podužnu impedansu čine rezistivnost i induktivnost, dok se odvodnost i kapacitivnost tretiraju kao poprečni parametri. Pomenuti parametri zavise od mnogih faktora. Materijal provodnika, konstrukcija, međusobni položaj faznih provodnika i zaštitne užadi svakako imaju veliki uticaj na parametre. Dužina provodnika i vremenske prilike takođe imaju doprinos. Ukoliko se smatra da se ceo vod može zameniti sa četiri parametra, onda se govori o vodu sa skoncentrisanim parametrima. Ukoliko se pak, vod predstavi kao niz redno vezanih grupacija ova četiri elementa, onda se to odnosi na zamensku šemu voda sa raspodeljenim parametrima. Skoncentrisani parametri se koriste za približne proračune kada su od interesa samo stanja na krajevima voda. Ako se žele posmatrati promene duž voda, npr. kratki spojevi na vodu, onda je nezaobilazan model voda sa raspodeljenim parametrima. Pravilo je da se parametri definišu po jedinici dužine, najčešće po kilometru. Vodovi, u opštem slučaju, nemaju istu dužinu, tako da se parametri vodova definišu po jedinici dužine. Jedan deo voda po jedinici dužine  $dx$  prikazan je na Slici 9.1. Ovo je najčešća zamenska šema koja se implementira u matematičke proračune i simulacije [43, 44].



Slika 9.1: Parametri nadzemnog voda elementarne dužine  $dx$

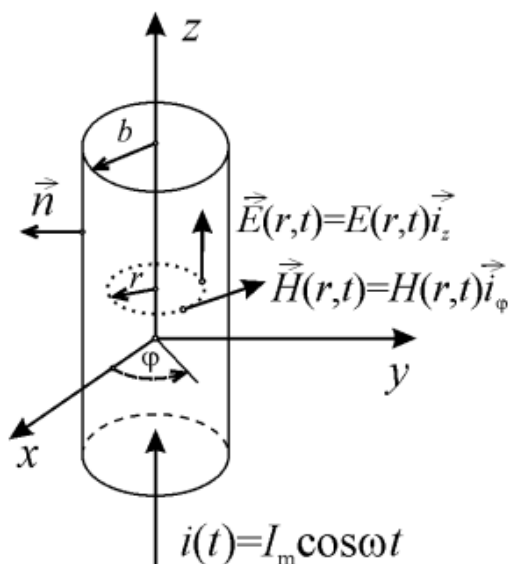
Važan uticaj na vrednosti podužnih parametara voda ima frekvencija. Frekvencija najviše ima uticaja na otpornost i induktivnost nadzemnog voda, odnosno na podužnu impedansu. Ukoliko se pomene termin "frekvencijski zavisna impedansa", misli se na frekvencijski odziv otpornosti i induktivnosti prenosnog elektrenergetskog sistema, odnosno na promenu parametara usled promene frekvencije. Proračuni u elektroenergetici obično se oslanjaju na uzak opseg frekvencija, najčešće na industrijsku frekvenciju od 50 Hz, odnosno 60 Hz u nekim zemljama. Ove frekvencije se mogu smatrati niskim u poređenju sa frekvencijama koje se koriste u radio tehnici i telekomunikacijama. U ovim oblastima elektrotehnike, najčešće se radi sa signalima u kHz i MHz području. Međutim, struje i naponi u elektroenergetici ne sadrže samo osnovni harmonik industrijske frekvencije. U normalnom radnom stanju, a pogotovo prilikom prelaznih procesa, viši harmonici su sastavni delovi strujnih i naponskih talasa. Visoki harmonici pojačavaju uticaj površinskog efekta i efekta blizine. Ovo ima direktan uticaj na parametre voda. Ako se želi dobiti što tačniji rezultat, ne može da se

zanemari uticaj viših harmonika. Program *EMTP/ATP* ima mogućnost uvažavanja promene parametara voda sa promenom frekvencije.

Prema Omovom zakonu, odnos konstantnog napona na krajevima provodnika i jednosmerne struje koja kroz njega protiče je definicija otpornosti. Na otpornost provodnika pri proticanju najveći uticaj ima temperatura. Temperatura direktno utiče na promenu specifične otpornosti materijala od koga je provodnik načinjen. Materijali koji se svrstavaju u provodnike, imaju pozitivan temperaturni koeficijent. To znači da im se povećava otpornost sa povećanjem temperature. Pri proticanju naizmenične struje, frekvencija iste utiče na otpornost provodnika. Povećanje frekvencije pojačava površinski efekat i smanjuje poprečni presek provodnika kroz koji struja protiče. Drugim rečima, struja se "potiskuje" uz zid provodnika. Sa povećanjem frekvencije, smanjuje se površina poprečnog preseka dela provodnika kroz koji dominantno protiče struja, pa otpornost raste.

Što se tiče induktivnosti, definišu se sopstvena induktivnost i međusobna induktivnost dva provodnika. Obe direktno zavise od veličine magnetskog polja u okolini provodnika. Promene reaktansi su linearno srazmerne sa promenim frekvencije. Sam induktivni parametar zavisi od povratnog puta kroz zemlju, ili kako se to često apostrofira, zavisi od "petlje koji obrazuju provodnik i zemlja". Povratni put struje kroz zemlju uvek prati trasu voda. Za veće frekvencije, pojačan je skin efekat i manja je dubina prodiranja. To znači da se struja vraća putem koji je bliži površini tla. Time se pomenuta petlja "vod-zemlja" smanjuje, odnosno smanjuje se površina koju obrazuju provodnik i povratni put struje kroz zemlju. Evidentno se time induktivnost smanjuje. Za niske frekvencije, tlo se smatra kao polubeskonačan nesavršen provodnik.

Matematička analiza će biti sprovedena na jednostavnom provodniku cilindričnog oblika, prikazanog na Slici 9.2. Provodnik se smatra homogenim. Kroz provodnik protiče naizmenična struja. Poluprečnik provodnika obeležen je sa  $b$ . Materijal od koga je provodnik sačinjen ima specifičnu provodnost  $\sigma$  i permeabilnosti  $\mu$ . Zbog osne simetrije, problem će biti analiziran pomoću cilindričnog koordinatnog sistema, pri čemu se  $z$ -osa poklapa sa osom provodnika [43, 44].



Slika 9.2: Cilindrični provodnik kružnog poprečnog preseka

Izrazi za podužnu otpornost i unutrašnju samoinduktivnost mogu se dobiti korišćenjem zakona elektromagnetike. Tu se pre svega misli na Maksvelove jednačine. Rešavanjem ovih jednačina za vektor jačine električnog i magnetskog polja, te uvažavajući fluks Pointingovog vektora, dolazi se do sledećih izraza [43, 44]:



$$R = \frac{1}{|I|^2} \operatorname{Re} \left\{ \oint_s (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} \right\} \quad (9.1)$$

$$X = \frac{1}{|I|^2} \operatorname{Im} \left\{ \oint_s (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} \right\} \quad (9.2)$$

gde su:

$I$ - struja kroz fazni provodnik

$\vec{E}$  i  $\vec{H}$  - vektori električnog i magnetskog polja

Dalje se mogu odrediti željene veličine [44]:

$$R' = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \sigma} \cdot \operatorname{Re} \{ f(mb) \} \quad (9.3)$$

$$L' = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \operatorname{Im} \{ f(mb) \} \quad (9.4)$$

pri čemu je:

$$f(mb) = j \frac{\operatorname{ber}(mb) + j \operatorname{bei}(mb)}{\operatorname{ber}'(mb) + j \operatorname{bei}'(mb)} \quad (9.5)$$

$$m = \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (9.6)$$

Oznake u formulama *ber* i *bei* su Kelvinove funkcije koje pripadaju familiji Besselovih funkcija. Njihovi prvi izvodi se označavaju sa *ber'* i *bei'* [43, 44].

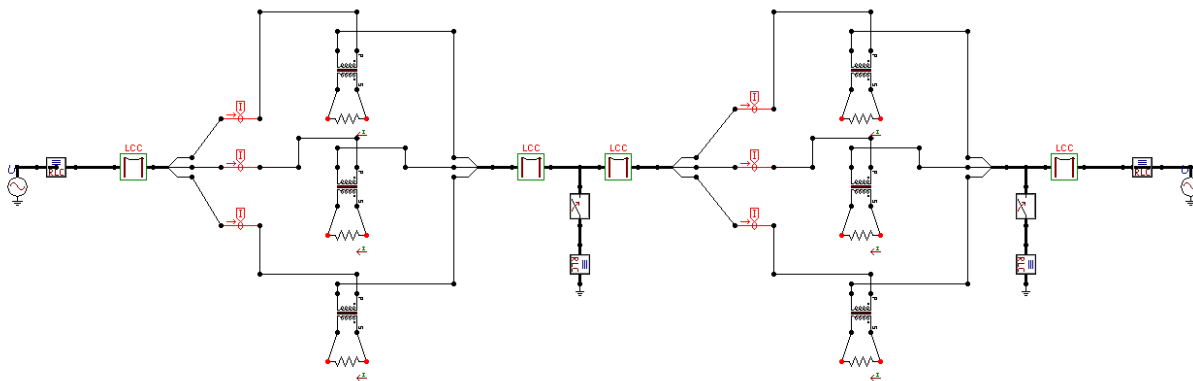
Ukupan fluks koji je posledica struje, utiče na unutrašnju i spoljašnju induktivnost provodnika. Karson se najviše bavio fenomenom povratnog puta kroz zemlju. Uticaj zemlje se uvažava pomoći njegovih korekcionih faktora [43, 44].

Unutar programskog paketa *EMTP/ATP*, koji je specijalizovan za brze elektromagnetske procese, postoje moduli kojima se uvažava promena parametara voda u zavisnosti od frekvencije. Numerički proračun je realizovan prema radovima J. Martija, Semjuela i Beržerona. Numerička metoda je izuzetno brza i predstavlja veliki pomak u primani softverskih alata koji uvažavaju frekvencijski zavisne parametre voda. Nekada se za numeričko rešavanje koristio konvolucionni integral. To znači da se u svakom sledećem koraku, prvo morao integraliti signal do tog koraka. Ovakav način je svakim sledećim korakom usporavao proračun i zahtevao bolje računarske performanse. Uvođenjem pomenutih proračuna, u svakom koraku numeričke procedure, nova vrednost se dobija samo na osnovu rezultata u prethodnom koraku. Time je značajno ubrzan proračun i nije se izgubilo na tačnosti proračuna [43]. Rezultati su prikazani u sledećem poglavlju.

## 9.2. Rezultati simulacija

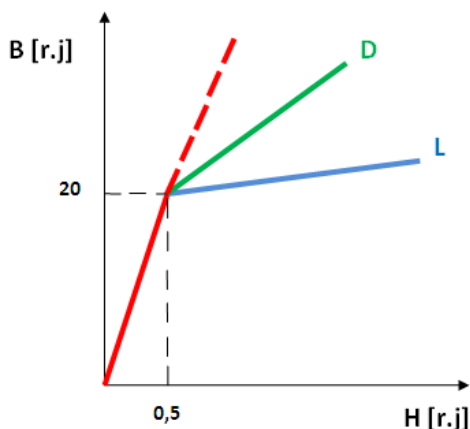
Model 110 kV mreže za testiranje algoritma formiran je pomoću programskog paketa *EMTP/ATP* i prikazan je na Slici 9.3. Podaci o parametrima 220 kV voda preuzeti su od realnog postojećeg, voda. U pitanju je vod broj 209/2 koji spaja trafostanice Sremska Mitrovica 2 i Srbobran. Za proračun frekvencijski zavisnih parametara, zadaju se poprečni presek provodnika i visina vešanja istog. Praktično se zadaje raspodela provodnika u glavi vodnog stuba. Sve podužne parametre program sam računa na osnovu zadatih podataka. Snaga trolejnog kratkog spoja mreže je 10000 MVA, a odnos reaktanse i rezistanse je  $X/R=10$ . Za dužinu voda uzeta je vrednost  $L=80$  km, dok se sa leve i desne strane posmatranog voda nalaze i deonice od po 5 km sa istim parametrima. Moduli napona mreža sa leve i desne strane šticeog voda su podešeni na vrednosti 225 kV i

218 kV, respektivno. Korak proračuna je podešen na  $\Delta t_1=1 \mu s$ . Pošto relej nema takvu rezoluciju odabiranja, strujni talasi su izveženi u *EXCEL*. Nakon toga su učitani u *MATLAB* i obrađeni sa periodom odabiranja  $\Delta t_2=1 ms$ .



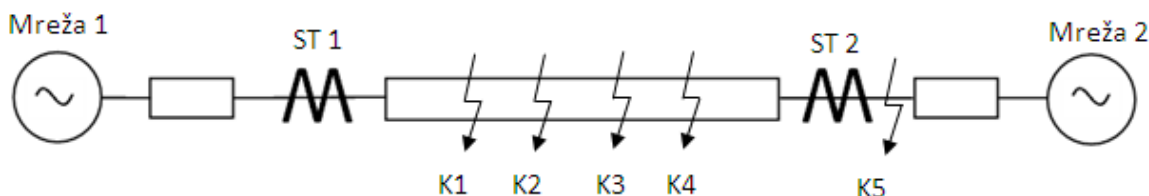
Slika 9.3: Model mreže za testiranje podužne diferencijalne zaštite dalekovoda

Na obe strane štice vod formirani su modeli strujnih transformatora sa sledećim karakteristikama: prenosni odnos 400/1 A/A, snaga 10 VA, strujna (složena) greška 5 i granični faktor tačnosti 20 (5P20). Na Slici 9.4 prikazane su karakteristike magnećenja strujnih transformatora sa leve i desne strane voda.



Slika 9.4: Karakteristike magnećenja strujnih transformatora sa leve (L) i desne strane voda (D)

Za ovaj slučaj (ovu vrstu nadzemnog voda, dužinu, parametre, itd) kapacitivna struja odvođenja ( $I_c$ ) iznosi 35,17 A (0,088 A na sekundarnoj strani). Granica reagovanja od 0,2 A za faznu diferencijalnu zaštitu je sasvim dovoljna (Poglavlje 4.1). Pomenuta granica iznosi 20% od naznačene struje strujnog transformatora (1 A). Pomoću formiranog modela simulirani su različiti kvarovi. Jednopolna šema, sa naznačenim mestima pravljenih kvarova, prikazana je na Slici 9.5.



Slika 9.5: Jednopolna šema mreže sa naznačenim mestima kvarova

Razmatrani su posebni problemi koji mogu uticati na brzinu i pouzdanost zaštite kao što je otpornost na mestu kvara, dugačak vod ili slaba mreža sa jedne strane voda. Biće prikazani rezultati

za faznu i za nultu diferencijalnu zaštitu predložene novim algoritmom. U Tabeli 9.1 navedeni su kvarovi i podaci o parametrima simulacija. Kvarovi *K1-K4* su unutar zone zaštite, dok je kvar *K5* van zone zaštite.

Tabela 9.1: Podaci o kvarovima i o strujnim transformatorima

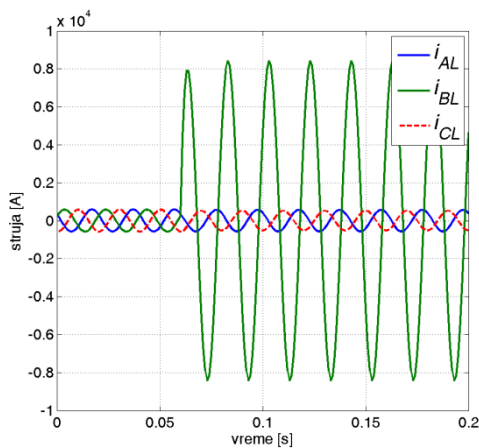
Redni broj kvara	Trenutak nastanka kvara [s]	Pozicija kvara [%]*	Tip kvara	Prelazna otpornost luka [ $\Omega$ ]	Dužina voda [km]	Snaga trofaznog kratkog spoja mreže sa leve strane voda [MVA]	Snaga trofaznog kratkog spoja mreže sa desne strane voda [MVA]
Kvar 1	60	20	B-N	0	80	10000	10000
Kvar 2	62	40	AC	50	80	10000	10000
Kvar 3	64	60	ABC	0	150	10000	10000
Kvar 4	66	80	BC-N	0	80	10000	500
Kvar 5	68	Iza ST2	ABC	0	80	10000	10000

\*Procentat od cele dužine voda gledano sa leve strane

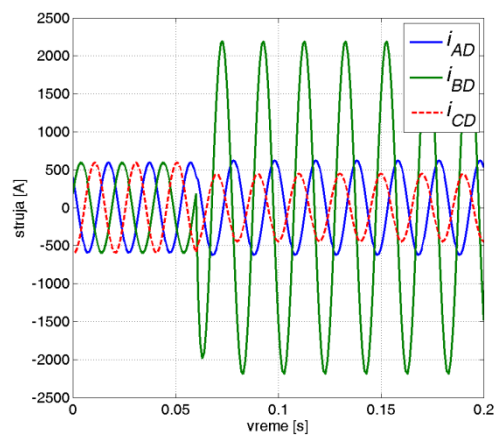
Biće prikazani talasni oblici struja i relevantnih veličina samo samo za kvar *K1*. Ostali rezultati biće tabelarno prikazani na kraju poglavlja.

Slike 9.6 i 9.7 prikazuju talasne oblike faznih struja za sve tri faze, sa obe strane voda, prilikom kvara *K1*.

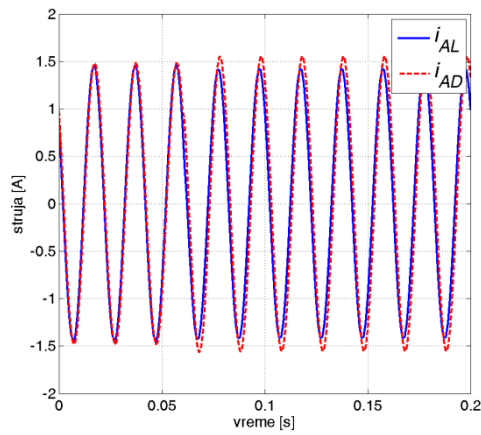
Na Slikama 9.8-9.10 prikazane su struje po fazama koje se dovode releju pri kvaru *K1*. Primetno je da dolazi do zasićenja strujnih transformatora u fazi B koja je pogođena kvarom.



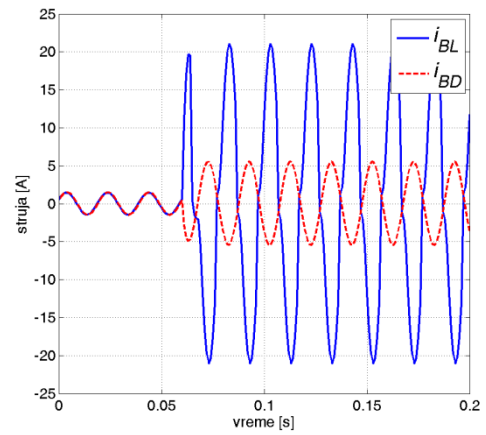
Slika 9.6: Struje u sve tri faze sa leve strane voda pri kvaru K1-primarno



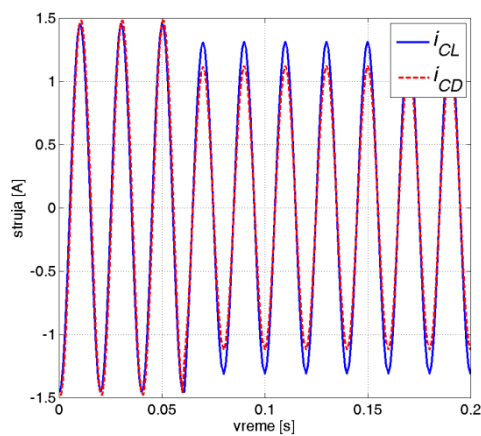
Slika 9.7: Struje u sve tri faze sa desne strane voda pri kvaru K1-primarno



Slika 9.8: Struje u fazi A pri kvaru K1-sekundarno

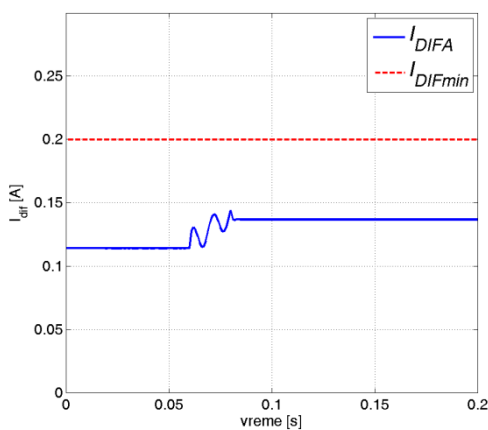


Slika 9.9: Struje u fazi B pri kvaru K1-sekundarno

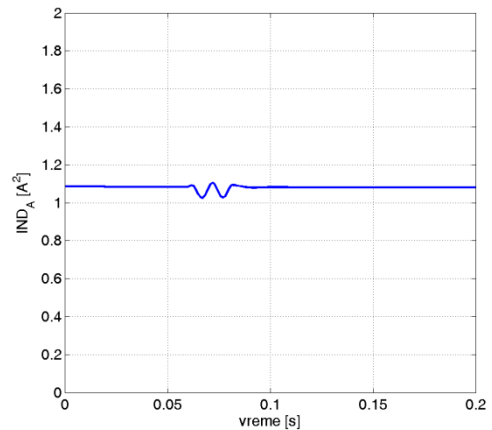


Slika 9.10: Struje u fazi C pri kvaru K1-sekundarno

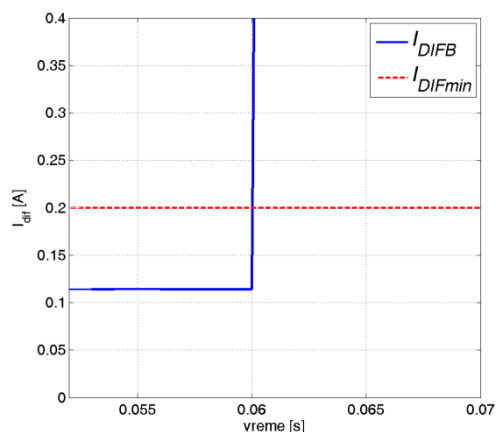
Diferencijalne struje i indikatori smera za svaku fazu posebno, prikazani su na Slikama 9.11-9.16.



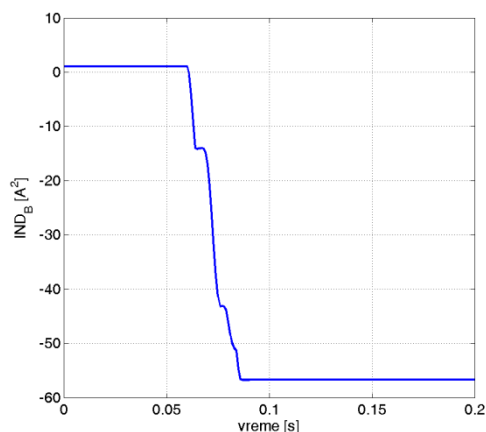
Slika 9.11: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu A pri kvaru K1



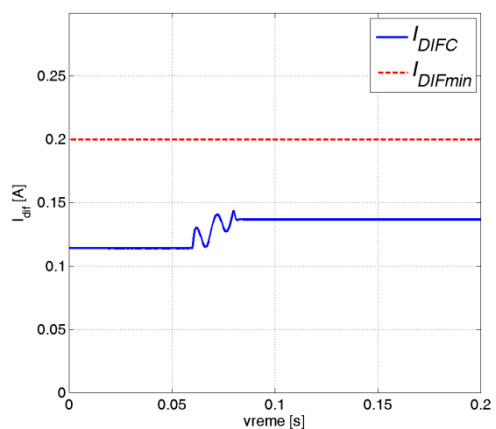
Slika 9.12: Indikator smera za fazu A pri kvaru K1



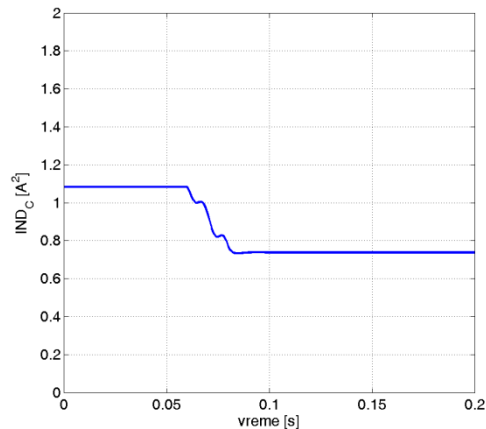
Slika 9.13: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu B pri kvaru K1 - zumirano



Slika 9.14: Indikator smeru za fazu B pri kvaru K1

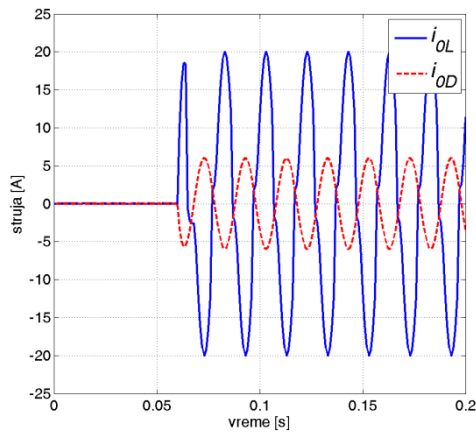


Slika 9.15: Diferencijalna struja i minimalna struja prorade za fazu C pri kvaru K1

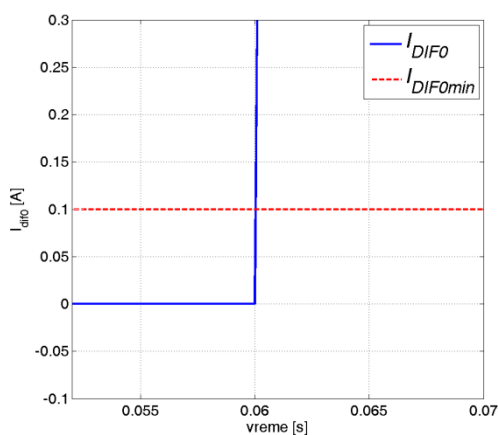


Slika 9.16: Indikator smeru za fazu C pri kvaru K1

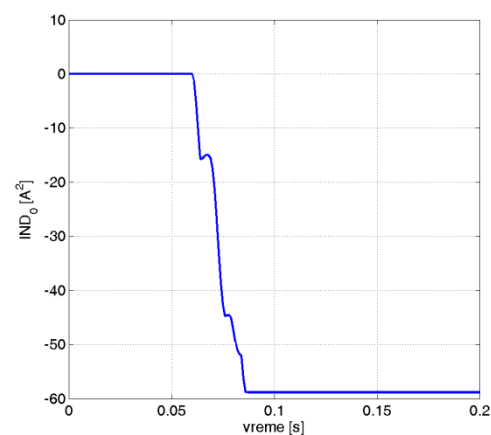
U fazama A i C ne postoji uslov za reagovanje, dok u fazi B postoji. Diferencijalna struja prelazi prag reagovanja u trenutku  $t=61$  ms. Da bi relej odreagovao, potrebno je da indikator smeru u fazi C postane negativan. To se dešava praktično u istom trenutku. Zaključak je da fazna diferencijalna zaštita stiže uslov za reagovanje samo 1 ms nakon nastanka kvara. Na Slici 9.17 mogu se videti nulte struje na oba kraja voda pri istom kvaru, a na Slikama 9.18 i 9.19 nulta diferencijalna struja i indikator smeru nulte struje.



Slika 9.17: Nulte struje pri kvaru K1



Slika 9.18: Nulta diferencijalna struja i minimalna struja prorade pri kvaru K1 - zumirano



Slika 9.19: Indikator smeru nulte struje pri kvaru K1

Nulta diferencijalna zaštita i u ovom slučaju pokazuje zavidnu brzinu. Samo 1 ms nakon nastanka kvara imaju se uslovi za reagovanje. Naravno, ne može se isključenje prekidača vršiti samo na osnovu nulte diferencijalne zaštite na interkonektivnim vodima. Nulta diferencijalna zaštita je tada neselektivna po pitanju faza pogođenih kvarom. Da bi se poslao signal za isključenje prekidača u fazi B, mora se sačekati porast fazne diferencijalne struje. U ovom slučaju to ne predstavlja razliku.

U Tabeli 9.2 prikazana su vremena reagovanja algoritma za sve testirane kvarove. Prag podešenja fazne diferencijalne zaštite, jedino se menja pri velikim dužinama voda. Pri kvaru  $K3$ , struja reagovanja fazne diferencijalne zaštite je prepodešena na 0,4 A.

Tabela 9.2: Trenuci prepoznavanja kvarova

Kvar K1					
Trenutak nastanka kvara 60 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-		-
B	1	B	1	1	1
C	3	C	-		-

Kvar K2					
Trenutak nastanka kvara 62 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	1	A	2		2
B	-	B	-	-	-
C	2	C	2		2

Kvar K3					
Trenutak nastanka kvara 64 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	1	A	1		1
B	1	B	1	-	1
C	2	C	1		2

Kvar K4					
Trenutak nastanka kvara 66 ms					
Fazna diferencijalna		Indikator smer		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Diferencijalna struja		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-		-
B	1	B	2	1	2
C	1	C	2		2

Kvar K5  
Trenutak nastanka kvara 68 ms

Fazna diferencijalna		Fazna diferencijalna		Nulta	Ukupno
Diferencijalna struja		Indikator smera		diferencijalna	
faza	detektovanje kvara * [ms]	faza	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]	detektovanje kvara * [ms]
A	-	A	-		-
B	-	B	-	-	-
C	-	C	-		-

\*Vremena su data u ms u odnosu na trenutak nastanka kvara



# 10. ZAKLJUČAK

U ovoj tezi, prikazan je novi pristup u realizaciji podužne diferencijalne zaštite nadzemnih vodova. Prvo je objašnjena svrha i značaj relejne zaštite u elektroenergetskom sistemu. Dat je kratak pregled različitih vrsta zaštita koje se primenjuju na vodovima i sve njihove mane. Detaljno je objašnjen osnovni princip rada podužne diferencijalne zaštite. Najveći problem pravilnom radu podužne diferencijalne zaštite, može izazvati zasićenje strujnih transformatora. Prilikom kvara van štice deonice, što za posledicu ima povećanje diferencijalne struje, može se javiti nepotrebno reagovanje zaštite. Neželjeno reagovanje može biti rezultat još nekoliko faktora. Dugački vodovi za posledicu imaju velike kapacitivne struje odvođenja duž voda i unose osetnu razliku između struja sa jedne i druge strane voda. Posledica toga je povećanje diferencijalne struje. Kvarovi sa prelaznim otpornostima smanjuju samu struju kvara i utiču na osetljivost diferencijalnog releja. Izolovano zvezdište i uzemljenje preko aktivne otpornosti za ograničenje struje jednofaznog kratkog spoja imaju isti efekat. Srednjenaponske mreže obično imaju tako realizovano uzemljenje neutralne tačke, što se odražava na rad diferencijalne zaštite.

Algoritam se sastoji od dva dela. Jedan deo posmatra trenutne vrednosti faznih struja, a drugi deo je usmeren ka trenutnim vrednostima nultih komponenti struja. Drugi deo suštinski radi na istom principu kao i prvi. Razlika je jedino u tome, što se proračuni vrše sa trenutnim vrednostima nultih komponenti struja. Upotrebom nultog komponentnog sistema struja povećava se osetljivost i brzina reagovanja releja u mrežama sa malim ili ograničenim strujama jednofaznog kratkog spoja.

Predloženi algoritam za realizaciju fazne diferencijalne zaštite voda, najpre je testiran pomoću specijalnog modula programskog paketa MATLAB. Formiran je model elektroenergetskog sistema. Pri testiranju, variran je položaj kvara i vrsta kvara. Upoređena su rešenja koja koriste proizvođači relejne zaštite sa priloženom novom idejom. Rezultati simulacija pokazuju, da je opisani algoritam potpuno neosetljiv na zasićenje strujnih transformatora. Pored toga, prednost predstavljenog algoritma, u odnosu na rešenja koja se navode u novijim istraživanjima, jeste što se dobija brži odziv uz minimum računskih operacija. Algoritam je jednostavan i ne zahteva komplikovane obrade signala.

Nulta diferencijalna zaštita povećava osetljivost pri kvarovima sa zemljom u radijalnim distributivnim mrežama. Takođe, upoređena su rešenja koja koriste renomirani proizvođači relejne zaštite sa novim pristupom. Rezultati simulacija pokazuju da predloženi algoritam ispravno detektuje kvar u svim testiranim situacijama. Prednost predstavljenog algoritma u odnosu na rešenja koja se navode u novijim istraživanjima, jeste dobijanje brzog odziva uz minimum računskih operacija, bez korišćenja naponskih signala.

U ovoj doktorskoj disertaciji dominira istraživanje empirijske prirode i primenjenog cilja. Osnovne istraživačke korišćene metode su: induktivna metoda, metoda analize, komparativna metoda, metoda dokazivanja, matematička metoda i metoda modelovanja.

Pored programskog paketa MATLAB, proračun prelaznih procesa, izvršen je i pomoću softverskog paketa EMTP/ATP. Tu je akcenat stavljen na frekvencijski zavisne parametre voda.

Verifikacija novog algoritma, ostvarena je na fizičkom modelu jednostrukog voda u laboratorijskim uslovima. Algoritam je testiran na osnovu strujnih signala zapisanih pomoću releja, koji se nalaze u pogonu, tj. iskorišćeni su postojeći strujni signali pri kvarovima u realnoj mreži.

Naučni doprinosi predložene doktorske disertacije su:

- Novi pristup u realizaciji digitalne podužne diferencijalne zaštite voda koji se zasniva na principu poređenja smeru faznih i nultih struja sa dve strane voda;
- Jednostavnost novog algoritma u poređenju sa rešenjima koja se navode u radovima novijeg datuma iz ove oblasti;
- Eliminisanje upotrebe Furijeovog filtra u obradi signala;
- Dobijanje bržeg odziva releja za kvarove unutar zone zaštite u odnosu na algoritme koje koriste renomirani proizvođači relejne zaštite;
- Neosetljivost algoritma u situacijama koje mogu izazvati neselektivno reagovanje diferencijalne zaštite;
- Upotrebljivost algoritma i na vodovima na kojima je primenjena tehnika automatskog ponovnog uključanja prekidača.

## LITERATURA

- [1] M. Đurić, Z. Stojanović, Relejna zaštita, Beograd, 2014.
- [2] M. Đurić, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, i dr, Algoritmi za digitalne relejne zaštite, Beograd, 2012.
- [3] G. Ziegler, Numerical Differential Protection: Principles and Applications, Wiley, 2012, 2<sup>nd</sup> ed, pp. 66-69 and 202-233
- [4] M. Đurić, Elementi elektroenergetskih sistema, Beograd, 2009.
- [5] N. Rajaković, Analiza elektroenergetskih sistema 1, Beograd, 2002.
- [6] M. Đurić, Visokonaponska postrojenja, Beograd, 2009.
- [7] J. Nahman, V. Mijailović, Razvodna postrojenja, Beograd, 2015.
- [8] T. Rajić, Z. Stojanović, Podužna diferencijalna zaštota vodova sa primenom automatskog ponovnog uključjenja, INFOTEH, Jahorina, 2015, pp.180-185 (ISBN 978-99955-763-6-3).
- [9] T. Rajić, Z. Stojanović, Uticaj stabilizacione struje na podužnu diferencijalnu zaštitu voda, INFOTEH, Jahorina, 2016, pp.78-83 (ISBN 978-99955-763-9-4).
- [10] T. Rajić, Z. Stojanović, Simulacija podužne diferencijalne zaštite vodova sa primenom dodatne stabilizacije i sistema APU, TEHNIKA – ELEKTROTEHNIKA, vol. 71, br. 6, str. 861-867, 2016, (ISSN 0040-2176, DOI: [10.5937/tehnika1606861R](https://doi.org/10.5937/tehnika1606861R) ).
- [11] T. Rajić, Simulacija podužne diferencijalne zaštite vodova, Master rad, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, 2014.
- [12] A. Hosny, V. K. Sood, Transformer differential protection with phase angle difference based inrush restraint, Electric Power Systems Research, 115 (2014) pp. 57–64.
- [13] S. Dambhare, S. A. Soman, M. C. Chandorkar, Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection, IEEE Transactions on Power Delivery, 24 (2009) pp. 1756-1762.
- [14] X. Deng, R. Yuan, T. Li, i drugi, Digital differential protection technique of transmission line using instantaneous active current: theory, simulation and experiment, IET Generation Transmission & Distribution, 9 (2015) pp. 996–1005.
- [15] M. Wen, D. Chen, X. Yin, An energy differential relay for long transmission lines, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 55 (2014) pp. 497–502.

- [16] T. Kawady, A. Talaab, E. Ahmed, Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32 (2010) pp. 390–397.
- [17] M. M. A. Aziz, A. F. Zobaa, D. K. Ibrahim, i drugi, 'Transmission lines differential protection based on the energy conservation law', *Electric Power Systems Research*, 78 (2008) pp. 1865–1872.
- [18] W. Minghao, C. Deshu, Y. Xianggen, An energy differential relay for long transmission lines, *Electrical Power and Energy Systems* 55 (2014) pp. 497–502.
- [19] K. Krishnanand, P. Dash, M. Naeem, Detection, classification, and location of faults in power transmission lines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67 (2015) pp. 76–86.
- [20] R. Adly, R. A. El Sehiemy, A. Y. Abdelaziz, A negative sequence superimposed pilot protection technique during single pole tripping, *Electric Power Systems Research*, 137 (2016) pp. 175-189.
- [21] R. Adly, R. A. El Sehiemy, A. Y. Abdelaziz, A directional protection scheme during single pole tripping, *Electric Power Systems Research*, 144 (2017) pp. 197-207.
- [22] D. Akmaz, M. S. Mamiş, M. Arkan, M. E. Tağluk, Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine, *Electric Power Systems Research*, 155 (2018) pp. 1-7.
- [23] A. Lei, X. Dong, S. Shi, B. Wang, V. Terzija, Equivalent traveling waves based current differential protection of EHV/UHV transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 97 (2018), pp. 282–289.
- [24] M. L. Almeida, K. Silva, Transmission lines differential protection based on an alternative incremental complex power alpha plane, *IET Generation Transmission & Distribution*, 11 (2017) pp. 10-17.
- [25] O.O. Kalu, T. C. Madueme, Application of artificial neural network (ANN) to enhance, power systems protection: a case of the Nigerian 330 kV transmission line. *Electrical Engineering*, 100 (2018). pp. 1467-1479.
- [26] H. Gao, J. Li, B. Xu, Principle and Implementation of Current Differential Protection in Distribution Networks with High Penetration of DGs, *IEEE Transactions on Power Delivery* 32 (2017) pp. 565-574.
- [27] A. Farughian, L. Kumpulainen, K. Kauhaniemi K, Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unerthed MV distribution networks, *Electric Power Systems Research*, 154 (2018) pp. 373–380.

- [28] I. Voloh, Z. Xu, L. Torelli, Application of the line differential protection scheme for radial transmission lines, 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, IEEE, Texas, USA, April 2016.
- [29] Y. Aslan, Y.E. Yağan, Artificial neural-network-based fault location for power distribution lines using the frequency spectra of fault data, *Electrical Engineering*, 99 (2017) pp.301–311.
- [30] ABB, Application manual-Line differential protection RED670 2.1 IEC, August, 2016, (Product version 2.1), pp. 142–148.
- [31] ABB, Technical manual-Line differential protection RED670 2.0 IEC, July, 2016, (Product version 2.0), pp. 150–158.
- [32] SIEMENS, Manual- SIPROTEC- Differential Protection 7UT6x, June, 2012, (Version 4.6), pp. 105-108.
- [33] SIEMENS, Manual- SIPROTEC- Line Differential Protection with Distance Protection 7SD52/53, April, 2020, (Version 4.6), pp. 102-104.
- [34] Z. Stojanovic, M. Djuric, An algorithm for directional earth-fault relay with novoltage inputs, *Electric Power System Research*, 96 (2013) pp. 144–149.
- [35] Z. Stojanovic, M. Djuric, The algorithm for directional element without deadtripping zone based on digital phase comparator, *Electric Power System Research*, 81 (2011) pp. 377–383.
- [36] M. Forcan, Z. Stojanović, An algorithm for sensitive directional transverse differential protection with no voltage inputs, *Electric Power Systems Research*, 137 (2016) pp. 86-95.
- [37] T. Rajić, Z. Stojanović, An algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 94 (2018) pp. 276–286.
- [38] T. Rajić, Z. Stojanović, Zero-sequence longitudinal differential protection of transmission lines, *Electrical Engineering* 102 (2020), pp. 747-762, (DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00908-4> ISSN 1432-0487).
- [39] Z. Stojković, J. Mikulović, Z. Stojanović, *Praktikum iz softverskih alata u elektroenergetici*, Beograd, 2006.
- [40] C37.243-2015—IEEE Guide for Application of Digital Line Current Differential Relays Using Digital Communication, August, 2015, DOI: 10.1109/ IEEESTD.2015.7181615.
- [41] G. Houlei, H. Jiali, J. Shifang, GPS synchronized digital current differential protection for transmission lines, *Electrical Power and Energy Systems* 62 (2002) pp. 32–42.
- [42] T. Rajić, Longitudinal Differential Protection of Power Systems Transmission Line Using Optical Wavwguide, book chapter (Book Title: *Emerging Wavwguide Technology*, Book Edithor: Kok Yeow You), IntechOpen, London, 2018.

- [43] K. Kasaš-Lažetić, Modelovanje impedanse zemlje kao povratnog provodnika, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu-Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2015.
- [44] M. Savić, Prilog proračunima komutacionih prenapona u elektroenergetskim mrežama, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1977.

## **BIOGRAFIJA AUTORA**

Tomislav Rajić, rođen je 22.04.1989. godine u Beogradu. Završio je osnovnu školu i gimnaziju u Lazarevcu. Upisao je Elektrotehnički fakultetu u Beogradu 2008. godine. U toku osnovnih studija na Odseku za energetiku, smer Elektroenergetski sistemi, ostvario je prosečnu ocenu 9,27. Diplomirao je u septembru 2012. godine. Master studije je upisao 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu, smer za Elektroenergetske mreže i sisteme. Diplomom master inženjera elektrotehnike i računarstva stekao je septembra 2014. godine. Master studije je završio sa prosečnom ocenom 9,80. Završni master rad pod nazivom „Simulacija podužne diferencijalne zaštite voda“, odbranio je sa ocenom 10. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, upisao je 2014. godine.

Učestvovao je na Elektrijadi u Mađarskoj 2013. godine i osvojio drugo mesto na takmičenju iz predmeta Analiza elektroenergetskih sistema.

Od jula meseca 2013. godine, pa sve do januara 2014. godine, radio je u Elektrotehničkom Institutu Nikola Tesla u Centru za elektromerenja.

Od januara 2014. godine, zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, najpre kao saradnik u nastavi, a potom i kao asistent. Na Osnovnim i Master studijama je angažovan u izvođenju nastave na nekoliko predmeta.

Učesnik je na izradi nekoliko elaborata, studija i projekata. Autor je više radova publikovanih u časopisima sa SCI liste, domaćim časopisima, zbornicima međunarodnih, regionalnih i domaćih konferencija.

Oblasti njegovog interesovanja su: relejna zaštita, razvodna postrojenja, analiza elektroenergetskih sistema i elektromagnetna kompatibilnost.

Od 2015. do 2018. godine, obavljao je funkciju sekretara Odseka za energetiku. Izabran je za člana Etičke komisije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Takođe, član je udruženja CIGRE Srbija u komitetima A3 i D1, gde obavlja i funkciju sekretara.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Томислав Рашић

Број индекса 5008/2014

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне  
ЗАШТИТЕ НАДЗЕМНИХ ВОДОВА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

### Потпис аутора

У Београду, 20.07.2020.

Т Рашић



## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Томислав Рајић

Број индекса 5008/2014

Студијски програм ЕТФ-УБ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКЕ МРЕЖЕ И СИСТЕМИ

Наслов рада Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова

Ментор др Зоран Стојановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива 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 аутора**

У Београду, 20.07.2020.

Т Рајић

## Изјава о коришћењу

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

НОВИ ПРИСТУП У РЕАЛИЗАЦИЈИ ПОДУЖНЕ ДИФЕРЕНЦИЈАЛНЕ  
ЗАШТИТЕ НАДЗЕМНИХ ВОДОВА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, 20.07.2020.

М. Ружић

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.