



UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Miodrag Ž. Forcan

POPREČNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA DVOSTRUKIH NADZEMNIH VODOVA

-doktorska disertacija-

Beograd, 2019.



UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Miodrag Ž. Forcan

**TRANSVERSE DIFFERENTIAL
PROTECTION OF DOUBLE CIRCUIT
OVERHEAD LINES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019.

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

Dr Zoran Stojanović, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Članovi komisije:

Dr Zoran Stojanović, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Tomislav Šekara, redovni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Žarko Janda, viši naučni saradnik
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”)

Dr Željko Đurišić, vanredni profesor
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Dr Jelisaveta Krstivojević, docent
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Datum usmene odbrane: _____

Posvećeno mom dragom stricu Neđu Đeriću

Zahvalnica

Najveću zahvalnost dugujem svom mentoru, profesoru Zoranu Stojanoviću, za dugogodišnju uspješnu saradnju, posvećeno vrijeme, razumijevanje, strpljenje i uvijek nesebičnu podršku i pomoć u toku studija.

Veliku zahvalnost za pomoć pri realizaciji eksperimentalnog dijela doktorske disertacije dugujem Tomislavu Rajiću, Branislavu Bukoroviću i Duletu iz EMS-a.

Posebnu zahvalnost dugujem profesoru Tomislavu Šekari, koji je uvijek pratio, motivisao i pomagao moj rad. Takođe, najljepše se zahvaljujem profesorima Željku Đurišiću, Jovanu Mikuloviću, Dragutinu Salamonu, Vidanu Govedarici i Zoranu Ljuboju za mnogobrojne korisne savjete i pomoć u toku studija.

Neizmjereno hvala mojoj voljenoj supruzi Jovani, koja je sve vrijeme nesebično pomagala, čvrsto vjerovala i konstantno bila uz mene tokom studija.

Iz sveg srca se zahvaljujem ocu Željku, majci Vujadinki i sestri Žaklini. Hvala za dugogodišnju podršku, pomoć, razumijevanje i prije svega ljubav. Bez vas ne bih ostvario ni najmanji uspjeh u životu.

Veliko hvala kumu Slobodanu i najboljim drugovima Lazaru i Dejanu na svim našim druženjima i pruženoj motivaciji u toku studija. Hvala puno dragim prijateljima i kolegama Mirjani i Marku, koji su uvijek iskreno podržavali i cijenili moj rad.

POPREČNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA DVOSTRUKIH NADZEMNIH VODOVA

Rezime

Dvostruki nadzemni vodovi (DNV) se često projektuju i grade u elektroenergetskim sistemima (EES) sa osnovnim ciljem povećanja kapaciteta i pouzdanosti prenosa električne energije. Najčešće povezuju dva aktivna visokonaponska dijela EES-a, ali se mogu pronaći i u radijalno napajanim mrežama industrijskih nivoa napona, za šta je karakterističan primjer napajanje udaljenih industrijskih zona i rudnika u razvijenim državama. Zbog postojanja dva paralelna sistema vodova na zajedničkim stubovima duž iste trase, aktivne su elektromagnetske sprege šest provodnika, što značajno komplikuje realizaciju osjetljive i selektivne relejne zaštite u odnosu na standardne slučajeve relejne zaštite jednostrukih nadzemnih vodova. Od relejne zaštite DNV-a očekuje se selektivnost u pogledu razlikovanja kvarova unutar i izvan štíčene dionice, lociranja na kom od dva paralelna voda se nalazi kvar i određivanja faza koje su obuhvaćene petljom kvara.

U okviru ove doktorske disertacije analizirani su postojeći i razvijeni novi algoritmi u cilju poboljšanja osjetljivosti i obezbjeđivanja selektivnosti usmjerene poprečne diferencijalne zaštite DNV-a. Kao preduslov za kvalitetan istraživački proces, na početku je definisan precizan matematički model DNV-a, praćen odgovarajućom softverskom implementacijom i detaljnom metodologijom proračuna podužnih električnih parametara. Potom je data i komparativna analiza uticaja različitih transpozicija provodnika DNV-a na signale struja u asimetričnim režimima rada. Nakon formiranja i implementacije modela DNV-a, razvijen je interaktivni simulator rada relejne zaštite primjenom softverskog paketa MATLAB, u svrhu detaljnog simulacionog ispitivanja postojećih i novorazvijenih algoritama.

U prvom koraku istraživačkog procesa analizirani su i detaljno ispitivani tradicionalni koncepti relejne zaštite DNV-a. Putem odgovarajuće komparativne analize utvrđene su prednosti i mane koncepta poprečne diferencijalne zaštite u odnosu na koncept distantne zaštite. Drugi korak istraživačkog procesa je posvećen analizi i ispitivanju posebne klase algoritama poprečne diferencijalne zaštite koji u svom radu ne koriste naponske signale. Za slučaj dvostrano napajanog DNV-a, vršeno je ispitivanje i data je komparativna analiza rezultata rada dva najpoznatija algoritma poprečne

diferencijalne zaštite, zasnovana na priraštajima strujnih signala. U trećem koraku istraživanja predložen je novi algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu radijalnog DNV-a. Osnovni cilj razvoja novog algoritma je zasnovan na pretpostavci da je moguće poboljšati osjetljivost usmjerene poprečne diferencijalne zaštite za slučaj radijalnog DNV-a, u odnosu na postojeće algoritme koji u svom radu koriste samo signale struja. Zatim je za slučaj radijalnog DNV-a vršeno novo ispitivanje i data je komparativna analiza rezultata rada postojećeg poznatog algoritma zasnovanog na priraštajima strujnih signala i predloženog novog algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala.

Četvrti korak istraživanja je posvećen rješavanju problema neosjetljivosti algoritama, koji u svom radu koriste samo signale struja, u slučaju kvarova na slabo opterećenom (mala potrošnja) ili neopterećenom (prazan hod) DNV-u. Kao rješenje prethodnog problema, predložen je koncept zaključavanja memorijskih registara signala struja u sklopu nadogradnje ranije predloženog algoritma. U svrhu potvrde osjetljivosti i selektivnosti nadograđenog algoritma vršena su odgovarajuća simulaciona ispitivanja i detaljno su obrazloženi dobijeni rezultati. U narednom ili petom po redu koraku istraživanja, analiza je proširena na usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu sa primjenom tehnike jednofaznog automatskog ponovnog uključanja (APU). Osnovni cilj ove analize je razvoj novog algoritma, baziranog samo na signalima struja, koji bi omogućio očuvanje osjetljivosti i selektivnosti zaštite pri upotrebi jednofaznog APU-a. Kao rješenje, predložena je nova referentna veličina za određivanje smjera struje kvara, pomoću koje su u daljoj analizi definisani pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a. Prethodni pokazatelji, u kombinaciji sa algoritmima zasnovanim na priraštajima i promjenama faznih uglova signala struja, čine novi složeniji algoritam za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu sa sistemom jednofaznog APU-a, primjenjivu u slučajevima i dvostrano napajanog i radijalnog DNV-a. Detaljna simulaciona ispitivanja su vršena u cilju potvrde pravilnog rada novog algoritma. Poseban dio istraživanja je posvećen rješavanju problema neselektivnog rada poprečne diferencijalne zaštite u slučaju trajnog isključenja jednog od paralelnih vodova. Novi algoritam, zasnovan na kombinaciji neusmjerenog elementa prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja i pokazatelja promjene faznih uglova struja, predložen je kao rješenje za

ovaj slučaj. Provjera osjetljivosti i selektivnosti novog algoritma je vršena putem detaljnih simulacionih ispitivanja.

U završnom koraku istraživanja, u okviru ove doktorske disertacije, razvijena je eksperimentalna šema prilagođena za laboratorijsko ispitivanje rada ranije predloženog algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu radijalnog DNV-a, zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala. Ključni dio eksperimentalne šeme predstavlja fizički model DNV-a, koji je primjenjiv za analizu asimetričnih režima rada. Različiti tipovi kratkih spojeva su pravljani na fizičkom modelu DNV-a, upotrebom kontaktora, dok su kvarovi detektovani od strane realnih mikroprocesorskih releja kompanije ABB. Snimci prelaznih procesa signala struja fizičkog modela DNV-a, u vremenskom opsegu koji odgovara okolini trenutka kvara, su sa realnih releja prenošeni na lokalni računar na kome je vršena obrada rezultata ispitivanja. Na osnovu snimaka realnih kvarova iz eksperimentalne šeme, koji su rekonstruisani primjenom softverskog paketa MATLAB, ispitivana je osjetljivost i selektivnost predloženog algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala. Osnovni cilj ove analize je potvrda ispravnog rada predloženog algoritma primjenom snimaka realnih kratkih spojeva. Sporedni cilj je sadržan u razvoju modularne eksperimentalne šeme, koja se jednostavno može prilagoditi potrebama ispitivanja različitih algoritama relejne zaštite nadzemnih vodova, što je od velikog značaja za buduće edukativne i naučno-istraživačke svrhe.

Svi algoritmi, razvijeni u okviru ove doktorske disertacije, mogu biti softverski implementirani u realne mikroprocesorske uređaje i uz dalja unapređenja biti korišćeni u sistemima relejne zaštite realnog DNV-a.

Ključne riječi: dvostruki nadzemni vod, poprečna diferencijalna zaštita, algoritmi za digitalne relejne zaštite, jednofazno automatsko ponovno uključenje

Naučna oblast: Tehničke nauke – Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi

UDK: 621.3

TRANSVERSE DIFFERENTIAL PROTECTION OF DOUBLE CIRCUIT OVERHEAD LINES

Abstract

Double circuit lines (DCL) are often designed and used in the power systems with the main goal of improving the capacity and reliability of the power transmission. They usually connect two high-voltage active networks, but also can be found in industry-level voltage radial networks in developed countries with typical application of supplying power to remote industrial areas and mines. Due to the existence of two parallel lines on the same transmission towers, along the same route, electromagnetic couplings of six conductors significantly complicate realization of the sensitive and selective relay protection systems when compared to relay protection systems for typical transmission lines consisting of three conductors. Relay protection of DCL is expected to be selective in the distinction of the faults inside and outside of the protection zone, as well as in the distinction of the faulted and healthy line, and it is additionally required for protection to detect which phases are faulted.

Within this thesis, the existing and new algorithms are developed in order to improve sensitivity and ensure selectivity of the transverse differential protection of DCL. A precise mathematical model of DCL is initially defined as a precondition for quality research process, which is followed by the corresponding software implementation and detailed methodology of longitudinal electrical parameters calculation. Then the comparative analysis of the impact of different transpositions of DCL conductors on current signals in unbalanced operation mode is presented. After defining and implementing DCL model, an interactive simulator of relay protection is developed using a software package MATLAB with the main goal of enabling detailed simulation analysis of the existing and newly created algorithms.

Traditional concepts of DCL relay protection operation are analysed and tested in the first step of the research process. The advantages and drawbacks of transverse differential protection concept are determined and compared with those corresponding to distance protection concept. The second step of the research process includes the analysis and testing of the special algorithms for transverse differential protection that do not require the voltage signals for operation. For the case of doubly-fed DCL, two selected algorithms based on increments of current signals are tested and the

comparative analysis of the obtained results is given. In the third step of the research process a new algorithm, based on the changes of phase angles of current signals, is proposed for protection of radial DCL. The main goal behind the development of the new algorithm is based on the assumption that is possible to additionally improve sensitivity of directional transverse differential protection in the case of radial DCL, when compared to existing algorithms using only current signals for operation. Then the new testing is performed in the case of radial DCL in order to compare the existing well-known algorithm based on increments of current signals with newly proposed algorithm based on the changes of phase angles of current signals.

The fourth step of the research process includes solving of the unsensitivity problem of the algorithms based only on current signals, in the cases of faults on low-loaded (small consumption) and unloaded (no consumption) DCL. As the solution of previous problem, the new concept using locking of memory registers containing samples of currents signals is proposed as an upgrade of earlier proposed algorithm. Special simulation testing is performed in order to verify sensitivity and selectivity of the upgraded algorithm and the obtained results are discussed. In the next or fifth step of the research process, the analysis is expanded to directional transverse differential protection with consideration of the single-pole reclosing (SPR). The main goal of the following analysis is a development of the new algorithm using only current signals to enable sensitivity and selectivity of the relay protection operating with SPR. As a solution, the new reference quantity for determination of the fault current direction is used for defining SPR success indicators. Previous indicators in combination with algorithms using increments and changes of phase angles of current signals make the new and more complex algorithm for directional transverse differential protection with SPR which is applicable in both cases, doubly-fed and radial DCL. Detailed simulation testing is performed to verify the correct operation of the proposed algorithm. A special part of the research is dedicated to solving the problem of unselective operation of transverse differential protection in the case of permanent tripping of the one of parallel lines. The new algorithm combining unidirectional element of overcurrent protection with definite time characteristic and phase angle change indicators is proposed as a solution in this case. Sensitivity and selectivity of the new algorithm are tested via various simulations.

In the final step of the research process in this thesis an experimental setup is developed and adapted for laboratory testing of previously proposed algorithm for directional transverse differential protection based on the changes of phase angles of current signals. The key part of the experimental setup is a physical model of DCL applicable for analysis of unbalanced operating conditions. Different types of short circuits are initiated using contactor device, while transients are detected by the real microprocessor relays from ABB company. DCL current signals are recorded during fault transient and transferred to local computer for processing purposes. Using obtained recordings from faults initiated in experimental setup, signals of DCL currents are reconstructed by application of software package MATLAB and later used for testing of sensitivity and selectivity of the proposed algorithm based on the changes of phase angles of current signals. The main goal of this experimental analysis is to verify the correct operation of the proposed algorithm in the case of real short circuit recordings. Additional goal includes development of a modular experimental setup which can be easily adapted for testing of different algorithms for relay protection of overhead lines and therefore has great importance for future educational and scientific research.

All algorithms developed in this thesis can be implemented in real microprocessor devices and with further upgrades and adaptations can be used in relay protection systems of real DCL.

Keywords: double circuit lines, transverse differential protection, digital relay protection algorithms, single-pole reclosing

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power systems

UDK: 621.3

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MODELOVANJE DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA I INTERAKTIVNI SIMULATOR RADA RELEJNE ZAŠTITE	5
2.1. PRIMJERI I PREDNOSTI PRIMJENE DVOSTRUKIH NADZEMNIH VODOVA U EES-U	5
2.2. MODELOVANJE DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA.....	7
2.2.1 <i>Proračun podužnih električnih parametara DNV-a.....</i>	<i>8</i>
2.2.2 <i>Matrice podužnih električnih parametara DNV-a</i>	<i>13</i>
2.2.3 <i>Uticaj transpozicije provodnika na matrice podužnih električnih parametara DNV-a.....</i>	<i>17</i>
2.2.4 <i>Model DNV-a sa raspodijeljenim parametrima</i>	<i>19</i>
2.3. UTICAJ TRANSPOZICIJE PROVODNIKA NA ASIMETRIČNE REŽIME RADA DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA	20
2.4. INTERAKTIVNI SIMULATOR RADA RELEJNE ZAŠTITE	23
2.4.1 <i>Elementi interaktivnog simulatora rada relejne zaštite</i>	<i>24</i>
2.4.2 <i>Modelovanje digitalne obrade signala i zaštitne funkcije releja.....</i>	<i>25</i>
2.4.3 <i>Osnovna podešavanja i programi interaktivnog simulatora rada relejne zaštite</i>	<i>26</i>
2.4.4 <i>Digitalno filtriranje opadajuće jednosmjerne komponente.....</i>	<i>27</i>
3. TRADICIONALNE RELEJNE ZAŠTITE DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA.....	30
3.1. DISTANTNA ZAŠTITA DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA	30
3.1.1 <i>Kratak pregled postojećeg istraživanja u oblasti distantne zaštite DNV-a ...</i>	<i>32</i>
3.1.2 <i>Problemi u radu distantne zaštite DNV-a</i>	<i>33</i>
3.1.3 <i>Ispitivanje distantne zaštite DNV-a</i>	<i>36</i>
3.2. POPREČNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA	45
3.2.1 <i>Kratak pregled postojećeg istraživanja u oblasti poprečne diferencijalne zaštite DNV-a</i>	<i>45</i>
3.2.2 <i>Princip rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite DNV-a</i>	<i>47</i>
3.2.3 <i>Model EES-a sa DNV-om za testiranje algoritama poprečne diferencijalne zaštite</i>	<i>51</i>
3.2.4 <i>Određivanje pragova reagovanja poprečne diferencijalne zaštite DNV-a ...</i>	<i>53</i>
3.2.5 <i>Ispitivanje usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u slučaju dvostrano napajanog DNV-a</i>	<i>56</i>
3.2.6 <i>Ispitivanje usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u slučaju jednostrano napajanog DNV-a</i>	<i>62</i>
3.2.7 <i>Problem mrtve zone i kaskadnog rada prekidača</i>	<i>67</i>
4. ALGORITMI ZA POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU ZASNOVANI NA SIGNALIMA STRUJA	71
4.1. PRINCIPI RADA ALGORITAMA ZASNOVANI NA PRIRAŠTAJIMA SIGNALA STRUJA	71
4.1.1 <i>Algoritam na bazi priraštaja apsolutnih vrijednosti struja</i>	<i>72</i>
4.1.2 <i>Algoritam na bazi priraštaja trenutnih vrijednosti struja</i>	<i>73</i>

4.2	ISPITIVANJE POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE ZASNOVANE NA STRUJNIM SIGNALIMA U SLUČAJU DVOSTRANO NAPAJANOG DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA ...	74
4.2.1	<i>Određivanje pragova reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na strujnim signalima u slučaju dvostrano napajano DNV-a</i>	74
4.2.2	<i>Ispitivanje algoritama zaštite za slučajeve različitih lokacija, vrsta i trenutaka nastanka kvara</i>	76
4.2.3	<i>Ispitivanje osjetljivosti algoritama zaštite za slučaj promjenljive snage mreže na kraju DNV-a</i>	78
4.2.4	<i>Ispitivanje osjetljivosti algoritama zaštite za slučaj prolaznih kvarova sa velikom otpornošću</i>	80
4.2.5	<i>Ispitivanje brzine reagovanja algoritama zaštite</i>	82
4.2.6	<i>Ispitivanje mrtve zone algoritama zaštite</i>	84
4.2.7	<i>Diskusija</i>	88
4.3	ALGORITAM ZASNOVAN NA PROMJENI FAZNIH UGLOVA STRUJNIH SIGNALA ZA USMJERENU POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU RADIJALNOG DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA	90
4.3.1	<i>Teorijske osnove algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala</i>	91
4.3.2	<i>Princip rada i implementacija algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala</i>	93
4.3.3	<i>Primjer rada algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala</i>	98
4.4	ISPITIVANJE POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE ZASNOVANE NA STRUJNIM SIGNALIMA U SLUČAJU RADIJALNOG DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA	102
4.4.1	<i>Određivanje pragova reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na strujnim signalima u slučaju radijalno napajano DNV-a</i>	102
4.4.2	<i>Ispitivanje algoritama zaštite za slučajeve različitih lokacija, vrsta i trenutaka nastanka kvara</i>	104
4.4.3	<i>Ispitivanje osjetljivosti algoritama zaštite za slučaj prolaznih kvarova sa velikom otpornošću</i>	106
4.4.4	<i>Ispitivanje selektivnosti algoritama zaštite za slučaj uzastopnih kvarova na oba voda u sistemu DNV-a</i>	108
4.4.5	<i>Ispitivanje brzine reagovanja algoritama zaštite</i>	109
4.4.6	<i>Ispitivanje mrtve zone algoritama zaštite</i>	111
4.4.7	<i>Uticaj promjene potrošnje na osjetljivost algoritama zaštite</i>	115
4.4.8	<i>Diskusija</i>	119
4.5	ZAKLJUČAVANJE REGISTARA SIGNALA STRUJA KAO RJEŠENJE PROBLEMA NEOSJETLJIVOSTI ALGORITAMA POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE RADIJALNOG DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA	121
4.5.1	<i>Koncept zaključavanja memorijskih registara signala struja</i>	121
4.5.2	<i>Ispitivanje koncepta zaključavanja memorijskih registara signala struja</i> ..	125
5.	POPREČNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA SA JEDNOFAZNIM AUTOMATSKIM PONOVNIM UKLJUČENJEM.....	133
5.1	PROBLEM U RADU POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE ZASNOVANE NA SIGNALIMA STRUJA PRI PRIMJENI JEDNOFAZNOG APU-A.....	134
5.1.1	<i>Teorijska analiza problema</i>	134

5.2 ALGORITAM ZA POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU SA JEDNOFAZNIM APU	135
5.2.1 Teorijska analiza predloženog rješenja	135
5.2.2 Pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a	137
5.2.3 Predložena šema poprečne diferencijalne zaštite	138
5.3 ISPITIVANJE POPREČNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE SA JEDNOFAZNIM APU	140
5.3.1 Određivanje pragova reagovanja zaštite za pokazatelje uspješnosti jednofaznog APU-a	141
5.3.2 Ispitivanje algoritma zaštite u slučaju dvostrano napajanog DNV-a	143
5.3.3 Ispitivanje algoritma zaštite u slučaju radijalno napajanog DNV-a	153
5.3.4 Diskusija	161
5.4 KONCEPT ZAŠTITE DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA SA SAMO JEDNIM VODOM U POGONU	162
5.4.1 Algoritam za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovan na promjenama faznih uglova strujnih signala	163
5.4.2 Ispitivanje algoritma za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala	165
6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE PREDLOŽENOG ALGORITMA ZA USMJERENU POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU	174
6.1 FIZIČKI MODEL DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA ZA SIMETRIČNE I ASIMETRIČNE REŽIME RADA	174
6.1.1 Proračun parametara fizičkog modela DNV-a	177
6.1.2 Realizacija fizičkog modela DNV-a	178
6.2 EKSPERIMENTALNA ŠEMA ZA ISPITIVANJE PREDLOŽENOG ALGORITMA ZAŠTITE ..	180
6.2.1 Obrada rezultata mjerenja	182
6.3 ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA	183
7. ZAKLJUČAK.....	188
LITERATURA	192
PRILOZI	199
PRILOG 1 - PODUŽNI ELEKTRIČNI PARAMETRI DNV-A SA SL.2.2.1	200
PRILOG 2 - PROGRAMSKI KOD ALGORITMA ZASNOVANOG NA PROMJENI FAZNIH UGLOVA SIGNALA STRUJA ZA DIFERENCIJALNI RELEJ R1	201

LISTA SLIKA

Sl.2.2.1 Geometrijski raspored i konstrukcione karakteristike provodnika modelovanog 400 kV DNV-a [37]	8
Sl.2.2.2 „Potpuna” transpozicija DNV-a: vod 1 transponovan na tri dionice, vod 2 transponovan na devet dionica - po tri za svaku dionicu voda 1 [37].....	18
Sl.2.2.3 Nadzemni vod ekvivalentiran električnim kolom sa raspodijeljenim parametrima [22], [45].....	20
Sl.2.4.1 Uopšteni blok dijagram interaktivnog simulatora rada relejne zaštite primijenjenog na DNV u simulacionom modulu Simulink.....	24
Sl.2.4.2 Blok šema modela relejne zaštite u simulacionom modulu Simulink	25
Sl.2.4.3 Karakteristike korištenog modela digitalnog eliptičkog filtera 6. reda i normalizovane granične frekvencije 0.001 (rad sa frekvencijom odabiranja 100 kHz) i projektovanog digitalnog eliptičkog filtera 6. reda i normalizovane granične frekvencije 0.02 (rad sa frekvencijom odabiranja 4 kHz): (a) amplitudske karakteristike, (b) grupna kašnjenja	29
Sl.3.1.1 Uopštena ideja za princip rada distantne zaštite JNV-a – primjer trostepene zaštite: (a) zone zaštite distantnog releja na početku dionice JNV-a; (b) stepenaste karakteristike vrijeme-impedansa distantnih releja [66].....	30
Sl.3.1.2 Distantna zaštita DNV-a sa istaknutim problemom postojanja velike vrijednosti međusobne impedanse nultog redoslijeda [66]	32
Sl.3.1.3 Problem selektivnosti distantne zaštite DNV-a u slučaju kvarova sa zemljospojem [5].....	33
Sl.3.1.4 Tipično kolo simetričnih komponenti u slučaju zemljospoja faze A JNV-a [66]	35
Sl.3.1.5 Pojednostavljena električna šema modela EES-a sa dvostrano napajanim DNV-om za ispitivanje distantne zaštite [65].....	37
Sl.3.1.6 Promjene modula mjerenih impedansi i odgovarajući hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 za slučaj kvarova na lokaciji K1: (a) jednofazni kratak spoj A0; (b) dvofazni kratak spoj bez zemljospoja AB; (c) dvofazni kratak spoj sa zemljospojem AB0 [65]	38
Sl.3.1.7 Rezultati simulacije trofaznog kratkog spoja ABC na lokaciji K1: (a) promjene modula mjerenih impedansi; (b) hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 [65]	39
Sl.3.1.8 Promjene modula mjerenih impedansi i odgovarajući hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 za slučaj kvarova na lokaciji K2: (a) jednofazni kratak spoj A0; (b) dvofazni kratak spoj bez zemljospoja AB; (c) dvofazni kratak spoj sa zemljospojem AB0 [65]	40

Sl.3.1.9 Rezultati simulacije trofaznog kratkog spoja ABC na lokaciji K2: (a) promjene modula mjerenih impedansi; (b) hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 [65]	40
Sl.3.1.10 Promjene modula mjerene impedanse, hodograf distantne jedinice R14 i promjene faznih struja i za analizirani slučaj S1: (a) bez uvažavanja koeficijenta kompenzacije m ; (b) sa uvažavanjem koeficijenta kompenzacije m [65]	41
Sl.3.1.11 Promjene modula mjerene impedanse, hodograf distantne jedinice R14 i promjene faznih struja i za analizirani slučaj S2: (a) netransponovan DNV; (b) potpuno transponovan DNV [65].....	42
Sl.3.1.12 Promjene modula mjerene impedanse, hodograf distantne jedinice R14 i promjene faznih struja i za analizirani slučaj S3: (a) sa uvažavanjem međusobne kapacitivnosti nultog redoslijeda C_{m0} ; (b) bez uvažavanja međusobne kapacitivnosti nultog redoslijeda C_{m0} [65]	43
Sl.3.2.1 Uopštena ideja za princip rada poprečne diferencijalne zaštite: (a) kvar izvan dionice DNV-a; (b) kvar unutar dionice DNV-a [23]	45
Sl.3.2.2 Pojednostavljena šema principa rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) kvar na vodu 1; (b) kvar na vodu 2 [23].....	47
Sl.3.2.3 Fazorski dijagrami sa karakterističnim veličinama usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) jednopolni kratak spoj Az na sredini dionice voda 1 (100 km od početnih sabirnica BB); (b) jednopolni kratak spoj Az na sredini dionice voda 2 (100 km od početnih sabirnica BB)	50
Sl.3.2.4 Pojednostavljena šema modela EES-a sa DNV-om za testiranje algoritama poprečne diferencijalne zaštite	52
Sl.3.2.5 Maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja usmjerene poprečne diferencijalne zaštite i usvojena vrijednost praga reagovanja: trolezni kratak spoj na početnim sabirnicama BB – (a) diferencijalni relej R1; (b) diferencijalni relej R2; trolezni kratak spoj na završnim sabirnicama EB – (c) diferencijalni relej R1; (d) diferencijalni relej R2	56
Sl.3.2.6 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) dvopolni kratak spoj AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2	58

Sl.3.2.7 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) dvopolni kratak spoj ACz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) trolpolni kratak spoj ABC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2	60
Sl.3.2.8 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) jednopolni kratak spoj Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) trolpolni kratak spoj ABC na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2	63
Sl.3.2.9 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) dvopolni kratak spoj BC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2	65
Sl.3.2.10 Mrtva zona neusmjerene poprečne diferencijalne zaštite [23]	67
Sl.3.2.11 Kaskadni rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite za slučaj kvara na vodu 1 u mrtvoj zoni releja R2: (a) šema prije reagovanja dif. releja R1 – prekidač P zatvoren; (b) šema posle reagovanja dif. releja R1 – prekidač P otvoren [23]	70
Sl.4.2.1 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja i usvojena vrijednost praga reagovanja: trolpolni kratak spoj na početnim sabirnicama BB – (a) diferencijalni relej R1; (b) diferencijalni relej R2; trolpolni kratak spoj na završnim sabirnicama EB – (c) diferencijalni relej R1; (d) diferencijalni relej R2	75
Sl.4.2.2 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i usvojena vrijednost praga reagovanja: trolpolni kratak spoj na početnim sabirnicama BB – (a) diferencijalni relej R1; (b) diferencijalni relej R2; trolpolni kratak spoj na završnim sabirnicama EB – (c) diferencijalni relej R1; (d) diferencijalni relej R2	76

Sl.4.2.3 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja (GM) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0.211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R277

Sl.4.2.4 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj ABCz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0.211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R277

Sl.4.2.5 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj snazi trolpolnog kratkog spoja mreže na kraju DNV-a: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R279

Sl.4.2.6 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj snazi trolpolnog kratkog spoja mreže na kraju DNV-a: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R279

Sl.4.2.7 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R281

Sl.4.2.8 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Bz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R281

Sl.4.2.9 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trolpolnog kratkog spoja ABCz na vodu 1, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica BB: 1. algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C85

Sl.4.2.10 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj troleznog kratkog spoja ABCz na vodu 2, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica EB: 1. Algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. Algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C	86
Sl.4.3.1 Pojednostavljena jednopolna šema radijalno napajanog DNV-a sa prikazanim kvarom u šticejnoj zoni poprečne diferencijalne zaštite [72]	91
Sl.4.3.2 Fazorski dijagram koji prikazuje struje DNV-a za slučaj kvara sa Sl.4.3.1 u odnosu na referentne fazore napona odgovarajućih sabirnica [72]	92
Sl.4.3.3 Princip formiranja pokazatelja promjene faznog ugla signala struje D_i u računarskim registrima [71]	95
Sl.4.3.4 Promjene u vremenu struja DNV-a prije i poslije jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1 (trenutak 0.2 s): (a) struje na početku voda 1 – lokacija 11; (b) struje na kraju voda 1 – lokacija 12; (c) struje na početku voda 2 – lokacija 21; (d) struje na kraju voda 2 – lokacija 22	98
Sl.4.3.5 Fazori struja DNV-a prije i poslije jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1 (trenutak 0.2 s): (a) struje na početku voda 1 – lokacija 11; (b) struje na kraju voda 1 – lokacija 12; (c) struje na početku voda 2 – lokacija 21; (d) struje na kraju voda 2 – lokacija 22	99
Sl.4.3.6 Promjene u vremenu pokazatelja promjene faznih uglova struja u svakoj fazi na početku DNV-a (relej R1) i odgovarajućih pokazatelja kvara predloženog algoritma u slučaju jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB, trenutak 0.2 s	100
Sl.4.3.7 Promjene u vremenu pokazatelja promjene faznih uglova struja u svakoj fazi na kraju DNV-a (relej R2) i odgovarajućih pokazatelja kvara predloženog algoritma u slučaju jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB, trenutak 0,2 s	101
Sl.4.4.1 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj troleznog kratkog spoja na završnim sabirnicama EB: algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a) dif. relej R1; (b) dif. relej R2; algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja – (c) dif. relej R1; (d) dif. relej R2	103

Sl.4.4.2 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0,211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R2..... 105

Sl.4.4.3 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja (FS) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0,211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R2 105

Sl.4.4.4 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2..... 107

Sl.4.4.5 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Bz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2 107

Sl.4.4.6 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj istovremenog kvara sa zemljospojem na vodovima 1 i 2, u fazama Az i Bz, i trenucima 0,2 s i 0,22 s, redom, 100 km od sabirnica BB: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2 108

Sl.4.4.7 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trolpolnog kratkog spoja ABCz na vodu 2, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica EB: 1. algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C 112

Sl.4.4.8 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trolpolnog kratkog spoja ABCz na vodu 2, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica EB: 1. algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C 113

Sl.4.4.9 Kvar na DNV-u u praznom hodu	115
Sl.4.4.10 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja na vodu 1, u fazi A, u trenutku 0,2 s, 50 km od sabirnica BB, pri promjenljivoj otpornosti potrošnje priključene na završne sabirnice EB: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2	117
Sl.4.4.11 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja na vodu 2, u fazi B, u trenutku 0,205 s, 150 km od sabirnica BB, pri promjenljivoj otpornosti potrošnje priključene na završne sabirnice EB: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2	118
Sl.4.5.1 Postupak zaključavanja memorijskih registara signala struja pri nastanku režima praznog hoda DNV-a	121
Sl.4.5.2 Promjene struja DNV-a u vremenu za slučaj nastanka praznog hoda u trenutku 0,1 s, praćenog jednopolnim kratkim spojem Az, na vodu 1, u trenutku 0,3 s, 50 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22	126
Sl.4.5.3 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az, na vodu 1, u trenutku 0,3 s, 50 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2	127
Sl.4.5.4 Promjene struja DNV-a u vremenu pri nastanku praznog hoda u trenutku 0,1 s, ponovnog uspostavljanja početne snage potrošnje u trenutku 0,2 s i dvopolnog kratkog spoja BC, na vodu 1, u trenutku 0,305 s, 100 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22	128
Sl.4.5.5 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj dvopolnog kratkog spoja BC, na vodu 1, u trenutku 0,305 s, 100 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2	128
Sl.4.5.6 Promjene struja DNV-a u vremenu pri smanjenju snage potrošnje u trenutku 0,1 s, povećanja snage potrošnje u trenutku 0,2 s, nastanku praznog hoda u trenutku 0,3 s i dvopolnog kratkog spoja ACz, na vodu 2, u trenutku 0,41 s, 100 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22	129
Sl.4.5.7 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj dvopolnog kratkog spoja ACz, na vodu 2, u trenutku 0,41 s, 100 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2	130

Sl.4.5.8 Promjene struja DNV-a u vremenu pri smanjenju snage potrošnje u trenutku 0,1 s, nastanku praznog hoda u trenutku 0,2 s i trolnog kratkog spoja ABC, na vodu 2, u trenutku 0,315 s, 150 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22.....	131
Sl.4.5.9 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj trolnog kratkog spoja ABCz, na vodu 2, u trenutku 0,315 s, 150 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. Relej R2.....	131
Sl.5.1.1 Pojednostavljena jednopolna šema DNV-a nakon isključenja voda u kvaru i prije primjene tehnike APU-a [84].....	134
Sl.5.2.1 Fazorski dijagrami koji odgovaraju slučaju dvostrano napajanog DNV-a nakon APU-a voda 1: (a) dif. relej R1 – lociran kod sabirnica BB; (b) dif. relej R2 – lociran kod sabirnica EB [84]	136
Sl.5.2.2 Fazorski dijagrami koji odgovaraju slučaju radijalnog DNV-a nakon APU-a voda 1: (a) dif. relej R1 – lociran kod sabirnica BB; (b) dif. relej R2 – lociran kod sabirnica EB [84].....	136
Sl.5.2.3 Algoritam toka predložene usmjerene poprečne diferencijalne zaštite sa jednofaznim APU [84].....	139
Sl.5.3.1 Vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a za slučajeve jednofaznih prolaznih kvarova na vodu 1 u sistemu dvostrano napajanog DNV-a: (a) dif. relej R1; (b) dif. relej R2 [84].....	141
Sl.5.3.2 Vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a za slučajeve jednofaznih prolaznih kvarova na vodu 1 u sistemu radijalno napajanog DNV-a: (a) dif. relej R1; (b) dif. relej R2 [84].....	142
Sl.5.3.3 Dvostrano napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	143
Sl.5.3.4 Dvostrano napajan DNV – rezultati za trajan kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	144

Sl.5.3.5 Dvostrano napajanje DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi B voda 2, sa otpornošću na mjestu kvara od 1Ω , na udaljenosti 150 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	146
Sl.5.3.6 Dvostrano napajanje DNV – rezultati za trajan kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	146
Sl.5.3.7 Dvostrano napajanje DNV - promijenjen tok snage – rezultati za prolazan kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	148
Sl.5.3.8 Dvostrano napajanje DNV – promijenjen tok snage - rezultati za trajan kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	148
Sl.5.3.9 Dvostrano napajanje DNV – rezultati za uzastopne prolazne kvarove u fazama B i C vodova 2 i 1, redom, sa otpornostima na mjestu kvara od 2Ω i 1Ω , redom, na udaljenosti 150 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	150
Sl.5.3.10 Dvostrano napajanje DNV – rezultati za uzastopne trajne kvarove u fazama B i C vodova 2 i 1, redom, sa zanemarljivim otpornostima na mjestu kvara, na udaljenosti 150 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	151

Sl.5.3.11 Radijalno napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	155
Sl.5.3.12 Radijalno napajan DNV – rezultati za trajan kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	155
Sl.5.3.13 Radijalno napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi B voda 2, sa otpornošću na mjestu kvara od 1Ω , na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	156
Sl.5.3.14 Radijalno napajan DNV – rezultati za trajan kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	157
Sl.5.3.15 Radijalno napajan DNV – rezultati za uzastopne prolazne kvarove u fazama A i B vodova 1 i 2, redom, sa otpornostima na mjestu kvara od 1Ω i 2Ω , redom, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	159
Sl.5.3.16 Dvostrano napajan DNV – rezultati za uzastopne trajne kvarove u fazama A i B vodova 1 i 2, redom, sa zanemarljivim otpornostima na mjestu kvara, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2	159
Sl.5.4.1 Pojednostavljena jednopolna šema DNV-a sa trajno isključenim i uzemljenim vodom 2	165

Sl.5.4.2 Amplitude struja i_{l1} i i_{l2} , mjerenih na početku i kraju voda 1, redom, i usvojene vrijednosti pragova reagovanja: (a.1) relej R1 – trolni kratak spoj na sabirnicama EB (K1); (a.2) relej R2 – trolni kratak spoj na sabirnicama BB (K3).. 166

Sl.5.4.3 Vrijednosti pokazatelja usmjerenog elementa u slučaju jednopolnog kratkog spoja u fazi A: (a) kvar na lokaciji K1: (a.1) - relej R1, (a.2) - relej R2; (b) kvar na lokaciji K2: (b.1) - relej R1, (b.2) - relej R2; (c) kvar na lokaciji K3: (c.1) - relej R1, (c.2) - relej R2..... 167

Sl.5.4.4 Rezultati ispitivanja osjetljivosti i selektivnosti algoritma za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala: (a) kvar ABC - 25 km od sabirnica BB: (a.1) amplitude struja releja R1 – test T.1; (a.2) amplitude struja releja R2 – test T.1; (a.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.1; (a.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.1; (b) kvar Az - 50 km od sabirnica BB: (b.1) amplitude struja releja R1 – test T.2; (b.2) amplitude struja releja R2 – test T.2; (b.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.2; (b.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.2; (c) kvar BC – 100 km od sabirnica BB: (c.1) amplitude struja releja R1 – test T.3; (c.2) amplitude struja releja R2 – test T.3; (c.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.3; (c.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.3; (d) kvar ACz – 150 km od sabirnica BB: (d.1) amplitude struja releja R1 – test T.4; (d.2) amplitude struja releja R2 – test T.4; (d.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.4; (d.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.4; (e) kvar Cz – 175 km od sabirnica BB: (e.1) amplitude struja releja R1 – test T.5; (e.2) amplitude struja releja R2 – test T.5; (e.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.5; (e.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.5..... 169

Sl.5.4.5 Rezultati ispitivanja selektivnosti algoritma za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala u slučaju kvarova izvan zone zaštite: (a) kvar AB - 5 km od sabirnica BB – izvan zone zaštite releja R1: (a.1) amplitude struja releja R1 – test T.6; (a.2) amplitude struja releja R2 – test T.6; (a.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.6; (a.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.6; (b) kvar ABC - 5 km od sabirnica EB – izvan zone zaštite releja R2: (b.1) amplitude struja releja R1 – test T.7; (b.2) amplitude struja releja R2 – test T.7; (b.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.7; (b.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.7 172

Sl.6.1.1 Šema nultog redoslijeda sa indirektnim uvažavanjem uticaja međusobnih induktivnosti preko induktivnosti u povratnom provodniku 176

Sl.6.1.2 Električna šema fizičkog modela 400 kV DNV-a sa tri dionice ukupne dužine 150 km 179

Sl.6.1.3 Izgled fizičkog modela 400 kV DNV-a i ilustracija električne šeme postojećeg fizičkog modela 110 kV JNV-a..... 179

Sl.6.2.1 Pojednostavljeni blok dijagram eksperimentalne šeme za ispitivanje predloženog algoritma zaštite 180

Sl.6.2.2 Izgled eksperimentalne šeme za ispitivanje predloženog algoritma zaštite u laboratorijskom okruženju	180
Sl.6.3.1 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj trolnog kratkog spoja ABC na sabirnicama (spojevima) iza fizičkog modela DNV-a: (a.1) struje na početku fizičkog modela DNV-a prije i posle kvara; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R1 algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja	183
Sl.6.3.2 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.1) – kvar Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica: (a.1) struje na početku fizičkog modela DNV-a; (a.2) struje na kraju fizičkog modela DNV-a; (b.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (b.2) pokazatelji kvara dif. releja R2.....	184
Sl.6.3.3 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.2): (a) kvar ABz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar BC na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2	185
Sl.6.3.4 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.3): (a) kvar Az na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2	186
Sl.6.3.5 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.4): (a) kvar Bz na vodu 2, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar ACz na vodu 2, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2	187
Sl.6.3.6 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.5): (a) kvar Cz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar ABC na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2	187

LISTA TABELA

Tab.2.3.1 Relativna odstupanja struje kvara nultog redoslijeda modela DNV-a (M2) i (M3) u odnosu na model (M1) [51]	22
Tab.3.1.1 Ulazne veličine konvencionalnih trofaznih distantnih releja [23].....	34
Tab.3.2.1 Određivanje referentne veličine usmjerenog elementa – sprega sa pomjerajem „90°” [23].....	49
Tab.3.2.2 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj jednofaznog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB	58
Tab.3.2.3 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvofaznog kratkog spoja AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB	58
Tab.3.2.4 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljospojem ACz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB	60
Tab.3.2.5 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj trofaznog kratkog spoja ABC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB	61
Tab.3.2.6 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj jednofaznog kratkog spoja Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB	63
Tab.3.2.7 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj trofaznog kratkog spoja ABC na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB	64
Tab.3.2.8 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljospojem ABz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB	65
Tab.3.2.9 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljospojem BC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB	66
Tab.4.2.1 Uporedna analiza brzine reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja	83
Tab.4.4.1 Uporedna analiza brzine reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i promjenama faznih uglova struja.....	110
Tab.5.3.1 Vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara i uspješnosti jednofaznog APU-a pri promjenljivim lokacijama, fazama, trenucima nastanka i vrstama kvara za dvostrano napajanje DNV [84].....	152
Tab.5.3.2 Vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara i uspješnosti jednofaznog APU-a pri promjenljivim lokacijama, fazama, trenucima nastanka i vrstama kvara za radialno napajanje DNV [84]	160

1. UVOD

Dvostruki nadzemni vodovi (DNV) se sastoje od dva fizički paralelno vođena trofazna sistema provodnika. Često se u literaturi pod pojmom DNV ili paralelni vodovi podrazumijevaju dva trofazna sistema provodnika vođena na istim stubovima duž kompletne ili dijela trase [1]. Paralelni vodovi su najčešće istog nazivnog napona, ali u specifičnim slučajevima moguća je i njihova realizacija za različite naponske nivoe. Postojanje DNV-ova u elektroenergetskom sistemu (EES) obezbjeđuje povećanje kapaciteta prenosa električne energije (EE) i pozitivno utiče na očuvanje njegove stabilnosti. Projektovanjem i izgradnjom novih DNV-ova moguće je ostvariti značajne ekonomske uštede u oblasti planiranja EES-a. Zbog svih svojih prednosti, DNV-ovi nerijetko dominiraju u prenosnim mrežama država širom svijeta. Karakteristični primjeri su 400 i 275 kV mreža Velike Britanije [2], 275 i 132 kV mreža Kuvajta [3], 500 i 220 kV mreža Egipta [4], itd.

DNV, kao element EES-a, predstavlja prilično kompleksan slučaj u pogledu realizacije osjetljive, selektivne i brze relejne zaštite. Postojanje paralelne električne veze dva trofazna voda, sa ukupno šest faznih provodnika na međusobno bliskim rastojanjima, ima za posljedicu neophodnost primjene komplikovanijih koncepata relejne zaštite u odnosu na odgovarajuće koncepte relejne zaštite jednostrukog nadzemnog voda (JNV). Velike vrijednosti međusobnih induktivnosti nultog redoslijeda nepovoljno utiču na osjetljivost, a u nekim slučajevima mogu da ugroze i selektivnost relejne zaštite [5]. Koncepti distantne i poprečne diferencijalne zaštite DNV-a se najčešće koriste u praksi. Distantna zaštita DNV-a zahtijeva određena prilagođenja u odnosu na svoju klasičnu verziju [6]-[9], dok je koncept poprečne diferencijalne zaštite izvorno i namijenjen za DNV [10]. Prve mikroprocesorske poprečne diferencijalne zaštite DNV-a su se pojavile devedesetih godina prošlog vijeka [11]-[13], što je praćeno razvojem raznih algoritama, čija osnovna podjela je na one za neusmjerenu i usmjerenu zaštitu. Tipični primjeri algoritama za neusmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu se mogu pronaći u naučnim publikacijama [14]-[16]. Algoritmi za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu tipično koriste signale napona kao referentne veličine za određivanje smjera struje kvara [17], [18]. U naučnom članku [19] je pokazano da se kao referentne veličine mogu koristiti i signali struja, što eliminiše potrebu za primjenom naponskih mjernih transformatora. U naučnoj literaturi se mogu pronaći i

interesantne ideje za algoritme koji u svom radu objedinjuju po dva različita koncepta relejne zaštite [20], [21].

Osnovni predmet istraživanja ove doktorske disertacije je usmjerena poprečna diferencijalna zaštita DNV-a koja koristi samo signale struja.

U okviru prethodnog istraživanja [22], ispitivan je rad algoritama [14], [19], zasnovanih na priraštajima strujnih signala. Rezultati ispitivanja su pokazali da algoritam [14] nije osjetljiv u slučaju kvarova na radijalnom DNV-u. Dodatnim ispitivanjem, za isti slučaj, pokazano je da osjetljivost algoritma [19] značajno opada kada je DNV opterećen malom potrošnjom i da zaštita postaje potpuno neosjetljiva u slučaju kvarova na neopterećenom DNV-u (slučaj praznog hoda). Na osnovu uočenih nedostataka, zaključeno je da postoji prostor za razvoj novog algoritma, koji bi u određenoj mjeri poboljšao osjetljivost zaštite u slučaju radijalnog DNV-a, što predstavlja prvi osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije. Novi algoritam bi pripadao konceptu usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, ali bi u svom radu koristio strujne signale kao referentne veličine za određivanje smjera struje kvara, čime bi bila očuvana prednost mogućnosti primjene zaštite bez naponskih mjernih transformatora.

Relejne zaštite visokonaponskih mreža se često koriste u kombinaciji sa sistemom jednofaznog automatskog ponovnog uključanja (APU), čime se postiže brza eliminacija prolaznih kvarova [23], [24]. Veoma je česta pojava da selektivnost algoritama relejne zaštite biva ugrožena kada se oni primijene u kombinaciji sa jednofaznim APU [25], [26]. Da bi neki algoritam relejne zaštite bio primjenjiv u praksi, veoma često je neophodno njegovo prilagođenje sistemima APU-a. U naučnim publikacijama [27], [28], predložene su interesantne tehnike APU-a za DNV, ali nije testirana njihova kompatibilnost sa algoritmima usmjerene poprečne diferencijalne zaštite. Zanimljiv algoritam za poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a, nedavno objavljen u naučnom članku [29], u svom radu se oslanja na primjenu jednofaznog APU-a, ali takođe koristi i naponske signale pri definiciji usmjerenih elemenata. Razvoj algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a, koji bi u svom radu koristio tehniku jednofaznog APU-a, a pri tome koristio signale struja kao referentne veličine za određivanje smjera struje kvara, predstavlja veoma težak zadatak i drugi osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije. Ovakav algoritam bi omogućio privremeno isključenje samo jednog od šest faznih provodnika DNV-a, u slučaju prolaznog kvara,

čime bi bio ostvaren pozitivan uticaj na stabilnost EES-a. U široj naučnoj literaturi ne postoji puno podataka o radu poprečne diferencijalne zaštite DNV-a kada je u pogonu samo jedan od dva paralelna voda. Sam koncept poprečne diferencijalne zaštite se u svom radu oslanja na struje oba paralelna voda [23]. Isključenjem jednog od vodova, diferencijalne struje, koje su u osnovi ovog koncepta, imale bi velike vrijednosti, što bi dovelo do neselektivnog isključenja i drugog voda. Iz prethodnog razloga, poprečnu diferencijalnu zaštitu je potrebno blokirati kada je samo jedan vod u pogonu i taj vod zaštititi nekom rezervnom zaštitom. Korisno bi bilo ispitati mogućnosti prilagođenja pokazatelja kvara algoritama zasnovanih na strujnim signalima u cilju ostvarenja selektivnosti zaštite za slučaj jednog voda u pogonu, što predstavlja treći osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije.

Osnovni ciljevi istraživanja ove doktorske disertacije su:

- Razvoj algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu bez naponskih signala sa većom osjetljivošću u slučaju slabo opterećenog i neopterećenog radikalnog DNV-a.
- Razvoj algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a bez naponskih signala u svrhu postizanja selektivnosti u slučaju primjene jednofaznog APU-a.
- Razvoj algoritma za usmjerenu zaštitu DNV-a bez naponskih signala u svrhu postizanja selektivnosti kada je samo jedan od paralelnih vodova u pogonu.

U okviru istraživanja ove doktorske disertacije, pored osnovnih ciljeva, definisani su i najvažniji sporedni ciljevi: prikaz detaljne metodologije proračuna parametara i modelovanja DNV-a, formiranje interaktivnog simulatora rada relejne zaštite primjenom softverskog paketa MATLAB [30] i realizacija eksperimentalne šeme sa fizičkim modelom DNV-a za ispitivanje algoritama relejne zaštite na primjerima realnih slučajeva kratkih spojeva. Sva laboratorijska ispitivanja su sprovedena u Laboratoriji za relejnu zaštitu Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Doktorska disertacija je organizovana u sedam poglavlja.

U prvom poglavlju su data uvodna razmatranja i kratak pregled najzastupljenijih koncepata relejne zaštite DNV-a. Istaknuti su osnovni i najvažniji sporedni ciljevi istraživanja doktorske disertacije.

Drugo poglavlje daje prikaz metodologije modelovanja DNV-a i proračuna električnih parametara, analizu uticaja različitih tipova transpozicija provodnika na signale struja DNV-a u asimetričnim režimima rada, razvoj i softversku implementaciju interaktivnog simulatora rada relejne zaštite.

U trećem poglavlju data je teorijska analiza osnovnih koncepata tradicionalnih relejnih zaštita DNV-a i simuliran je rad distantne i usmjerene poprečne diferencijalne zaštite. Predložena je i jednostavna metoda za određivanje podešenih vrijednosti pragova reagovanja poprečne diferencijalne zaštite, zasnovana na fizikalnim razlikama dva paralelna voda.

Četvrto poglavlje obuhvata analizu algoritama za poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a, koji u svom radu koriste samo signale struja. Prvo su ispitivane osnovne osobine postojećih algoritama zaštite, zasnovanih na priraštajima strujnih signala, u slučaju dvostrano napajanog DNV-a. Zatim je za slučaj radijalnog DNV-a predložen novi algoritam, zasnovan na detekciji promjeni faznih uglova struja. Potom su kroz komparativnu analizu ispitivani novi algoritam i postojeći algoritam, zasnovan na priraštajima strujnih signala, u slučaju radijalnog DNV-a. U završnom dijelu poglavlja predložen je koncept zaključavanja memorijskih registara signala struja kao rješenje problema osjetljivosti algoritama u slučaju kvarova na neopterećenom DNV-u.

U petom poglavlju predložen je i ispitivan poboljšani algoritam za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu sa jednofaznim APU, koji koristi postojeće algoritme za početnu detekciju kvara, a vrijednosti novodefinisanih pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a kao kriterijum za razlikovanje prolaznih i trajnih kvarova. Prethodni algoritam je primjenjiv u slučajevima i dvostrano napajanog i radijalnog DNV-a.

Šesto poglavlje obuhvata razvoj eksperimentalne šeme sa fizičkim modelom DNV-a, namijenjene za laboratorijsko ispitivanje rada predloženog algoritma za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, zasnovanog na promjenama faznih uglova signala struja. Vršena su odgovarajuća laboratorijska ispitivanja, čiji rezultati su obrazloženi i diskutovani u završnom dijelu poglavlja.

U sedmom poglavlju su istaknuti najvažniji zaključci u pogledu ostvarenih doprinosa ove doktorske disertacije.

2. MODELOVANJE DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA I INTERAKTIVNI SIMULATOR RADA RELEJNE ZAŠTITE

2.1. Primjeri i prednosti primjene dvostrukih nadzemnih vodova u EES-u

DNV-ovi se veoma često grade kao sastavni dio visokonaponskih prenosnih mreža u cilju smanjenja rizika od nestabilnosti elektroenergetskog sistema (EES) pri poremećajima. Kada je jedan od paralelnih vodova isključen, snagu je moguće prenositi drugim paralelnim vodom duž iste trase (ista grana mreže), što povoljno utiče na očuvanje stabilnosti EES-a. U fazi planiranja EES-a, projektanti se često odlučuju za plan izgradnje DNV-ova, umjesto jednostrukih nadzemnih vodova (JNV), iako u bližoj budućnosti nije predviđeno značajno povećanje potrošnje električne energije (EE). Na ovaj način se ostvaruje rezervna mogućnost napajanja za potencijalni porast potrošnje u daljoj budućnosti bez potrebe za izgradnjom trasa za nove vodove.

DNV, vođeni na čelično-rešetkastim stubovima, su dominantni u 400 i 275 kV prenosnim mrežama Velike Britanije. Budući razvoj pomenutog prenosnog sistema će takođe biti zasnovan na izgradnji DNV-ova, o čemu svjedoče mnogi projekti, kao što je priključenje nuklearne elektrane „Moorside”, u blizini grada „Sellafield”, na postojeću 400 kV mrežu, gdje je početak izgradnje dva nova DNV-a bio predviđen za 2017. godinu [2]. Prenosna mreža savezne države „Queensland” (sjeveroistočna savezna država Australije) se takođe većinski sastoji od dugih DNV-ova velikog prenosnog kapaciteta, koji služe za prenos snage od termoelektrana, u blizini velikih nalazišta uglja, do udaljenih centara potrošnje. Karakteristični primjeri DNV-ova u prenosnoj mreži savezne države „Queensland” su: „D3S0A” - 330 kV - 208 km, „D2S0K” - 275 kV - 336 km i „D1S0A” - 132 kV - 100 km [31]. Zbog prirodnih ograničenja površine raspoloživog zemljišta, prenosna mreža države Japan je uglavnom sačinjena od DNV-ova [32]. DNV-ovi čine značajan dio 275 i 132 kV prenosnih mreža u Kuvajtu [3]. Egipat predstavlja još jedan karakterističan primjer države sa dominantnom primjenom DNV-ova u 500 i 220 kV prenosnim mrežama. Dva energetska bazena u Egiptu (sjeverni i južni) su međusobno povezani 500 kV DNV-ovima dužine 800 km [4].

U državama sa velikom površinom nije neuobičajen slučaj da se veoma udaljena potrošačka područja napajaju radijalnim DNV-ovima (prenos snage samo u jednom smjeru). Karakterističan primjer predstavljaju radijalni DNV-ovi u 132 kV subprenosnoj mreži države Australije, koji služe za napajanje udaljenih industrijskih

zona i rudnika [33]. DNV se može smatrati radijalnim i ukoliko prenosnu mrežu povezuje sa generatorom male snage. Projektom iz 2016. godine [34], planirano je priključenje vjetroelektrana na postojeću prenosnu mrežu u južnom dijelu savezne države Alberta u Kanadi putem 240 kV DNV-a dužine 80 km.

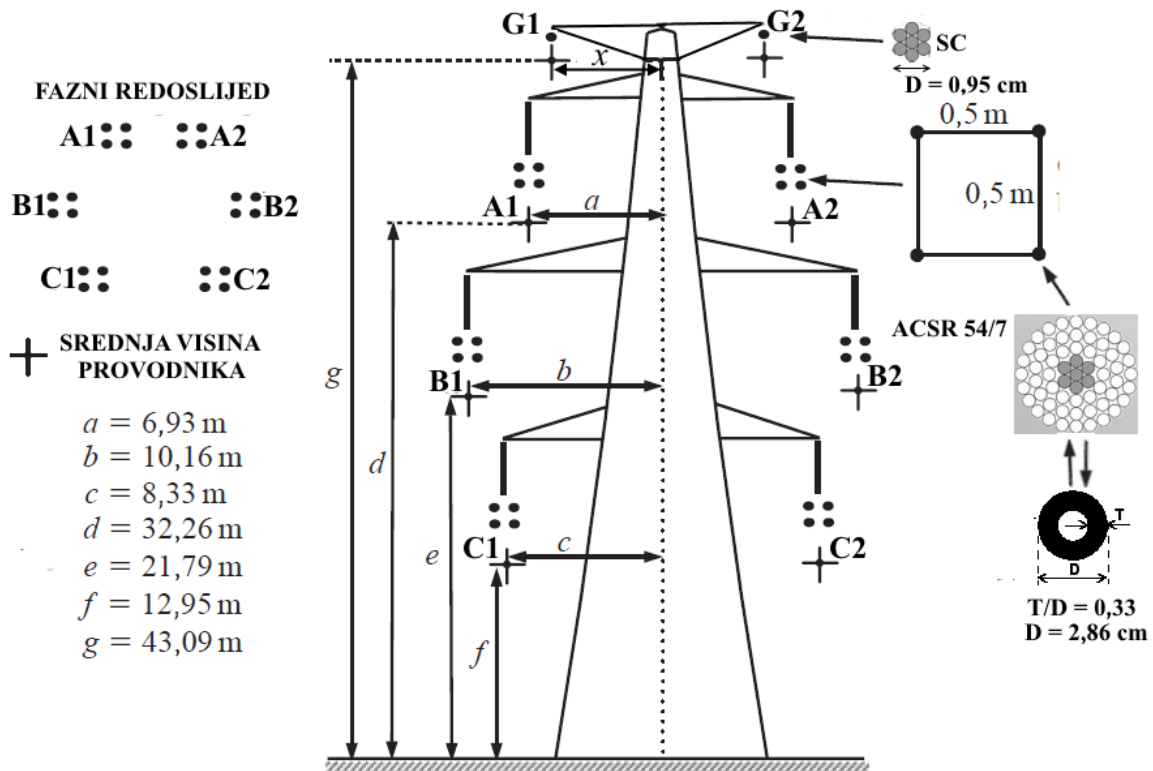
Primjena DNV-ova u elektroenergetskim mrežama obezbjeđuje povećanje kapaciteta i pouzdanosti prenosa električne energije (EE) [5]. Ukoliko su provodnici DNV-a vođeni na istim stubovima, postiže se smanjenje potrebne površine zemljišta duž iste trase u odnosu na sistem dva paralelno vođena jednostruka nadzemna voda (JNV) na posebnim stubovima. Za trasu iste udaljenosti i površine zemljišta, preko DNV-a, moguće je prenositi dvostruko veću snagu u odnosu na JNV sa identičnim provodnicima (povećanje kapaciteta prenosa EE). Ukoliko se prenosi ista snaga preko DNV i odgovarajuće dimenzionisanog JNV-a, u slučaju većine trajnih kvarova, DNV može da obezbijedi nastavak napajanja potrošnje (jedan paralelni vod se trajno isključuje, dok drugi preuzima dio ili kompletno opterećenje), dok u slučaju JNV-a dolazi do potpunog prekida napajanja (povećanje pouzdanosti prenosa EE). U slučaju mehaničkih kvarova uzrokovanih prirodnim nepogodama (npr. rušenje stubova usljed oluja i zemljotresa ili pojave požara), dva paralelna JNV-a, vođena na posebnim stubovima, najčešće predstavljaju pouzdanije rješenje za prenos EE u odnosu na DNV (manja je vjerovatnoća da mehanički kvar zadesi oba stuba ili da požar zahvati provodnike na oba stuba). Prethodni slučajevi su veoma rijetki.

DNV se često koriste za prenos EE zbog značajnih ekonomskih i ekoloških prednosti u odnosu na JNV [35]. Za istu snagu prenosa, cijena investicije DNV-a je najčešće manja od cijene investicije dva paralelna JNV-a zbog manjeg broja stubova (manje utrošenog konstrukcionog materijala) i manje potrebne površine zemljišta duž trase. U specifičnim slučajevima cijena investicije dva paralelno vođena JNV-a može biti i manja od cijene investicije DNV-a, zbog manje potrošnje konstrukcionog materijala, kada se za JNV-ove koriste dva „usidrena” čelično-rešetkasta vertikalna stuba sa prebačenim užetom na koje su „ovješani” izolatori (cross-rope towers) [36]. Osnovne ekološke prednosti DNV se ogledaju kroz manju potrebnu površinu zemljišta duž trase i mogućnost smanjenja jačine elektromagnetskih polja izborom povoljnog rasporeda faznih provodnika na stubovima.

2.2. Modelovanje dvostrukog nadzemnog voda

Osnovne teškoće u procesu modelovanja dvostrukih nadzemnih vodova na istim stubovima su uzrokovane postojanjem međusobnih elektromagnetnih sprega između dva različita trofazna kola [37]. Za potrebe analize algoritama digitalne relejne zaštite u ovoj disertaciji modelovan je 400 kV DNV (dva paralelna JNV-a na zajedničkim stubovima, koja počinju i završavaju na zajedničkim sabirnicama), sa geometrijskim rasporedom i konstrukcionim karakteristikama provodnika prikazanim na Sl. 2.2.1. Fazni provodnici su realizovani kao snopovi od po četiri Al-Če (aluminijum-čelik) ili ACSR (Aluminium Conductor Steel-Reinforced) provodnika, koji se sastoje od 54 aluminijumskih i 7 čeličnih upredenih užadi (54/7). Spoljašnji prečnik jednog Al-Če provodnika je $D_{ACSR} = 2,86$ cm, dok je snop od četiri provodnika realizovan u obliku kvadrata stranice dužine 0,5 m. Al-Če provodnici se mogu ekvivalentirati šupljim aluminijumskim provodnicima debljine $T = 0,944$ cm uz minimalnu grešku aproksimacije. Za Al-Če provodnik pretpostavljena je vrijednost relativne permeabilnosti $\mu_r = 1$. Pretpostavljeno je da se na DNV-u nalaze dva zaštitna provodnika od čelika SC (Steel Conductor) prečnika dužine $D_{SC} = 0,95$ cm, sastavljena od po 7 čeličnih upredenih užadi.

Kao što se može vidjeti sa Sl. 2.2.1, Al-Če provodnici su postavljeni u identičnom faznom redosljedju sa obje strane stuba. Geometrijski raspored Al-Če provodnika je određen horizontalnim rastojanjima a , b i c u odnosu na vertikalnu osu stuba i visinama d , e i f u odnosu na ravan zemlje. Zaštitni provodnici su postavljeni na visinu g , dok je njihovo horizontalno rastojanje u odnosu na vertikalnu osu stuba $x = 6$ m. Sve prikazane visine provodnika, u odnosu na ravan zemlje, predstavljaju srednje visine raspona provodnika između susjednih stubova, koje su date izrazom (2.2.1) [37].



Sl.2.2.1 Geometrijski raspored i konstrukcione karakteristike provodnika modelovanog 400 kV DNV-a [37]

$$H_{av} = \frac{\sqrt{(2H_t - S_{av})S_{av}}}{\ln\left(\frac{H_t + \sqrt{(2H_t - S_{av})S_{av}}}{H_t - S_{av}}\right)}. \quad (2.2.1)$$

Veličine S_{av} i H_t predstavljaju ugib provodnika na sredini raspona i visinu vješanja provodnika, redom.

2.2.1 Proračun podužnih električnih parametara DNV-a

Određivanje vrijednosti podužnih električnih parametara predstavlja važan korak u modelovanju nadzemnih vodova. Slučaj DNV-a je komplikovaniji u pogledu proračuna podužnih električnih parametara u odnosu na slučaj JNV-a, zbog većeg broja provodnika, a samim tim i složenijeg geometrijskog rasporeda provodnika na stubovima. U ovoj disertaciji, električni parametri su računati primjenom programa power_lineparam [38], koji je sastavni dio softverskog paketa MATLAB R2014a [30].

Podužna otpornost Al-Če provodnika pri jednosmjernoj struji, kada se on ekvivalentira aluminijumskim šupljim provodnikom, je data sljedećim izrazom [37]:

$$R_{DC} = \frac{1000 \cdot \rho_C}{\pi(r_o^2 - r_i^2)}, \quad (2.2.2)$$

gdje su: r_o i r_i spoljašnji i unutrašnji poluprečnik šupljeg provodnika, redom, dok ρ_C predstavlja specifičnu otpornost materijala. Za analizirani Al-Če provodnik (ACSR 54/7) vrijednosti spoljašnjeg i unutrašnjeg poluprečnika su $r_o = D/2 = 1,43$ cm i $r_i = 0,476$ cm, dok je vrijednost specifične otpornosti čvrstog aluminijuma $\rho_C = 2,78 \times 10^{-8}$ Ωm na temperaturi 20°C . Na osnovu prethodnih podataka, moguće je izračunati podužnu otpornost Al-Če provodnika pri jednosmjernoj struji i ona iznosi $R_{DC} = 0,0487$ Ω/km . U svrhu preciznijeg modelovanja, preporučuje se proračun podužne otpornosti za temperaturu 50°C [37]. Podužna otpornost provodnika pri jednosmjernoj struji za proizvoljnu temperaturu, može se odrediti prema sljedećem izrazu [23]:

$$R_{DC}(T) = R_{DC}(20^\circ\text{C}) \cdot (1 + \alpha(T - 20)), \quad (2.2.3)$$

gdje je koeficijent temperaturne promjene specifične otpornosti provodnika $\alpha = 1/(20 - T_0)$. T_0 predstavlja temperaturu superprovodnosti materijala. Za tvrdi aluminijum imaju se vrijednosti $T_0 = -228^\circ\text{C}$ i $\alpha = 0,004$. Na osnovu prethodnih podataka, moguće je izračunati podužnu otpornost Al-Če provodnika pri jednosmjernoj struji za temperaturu 50°C i ona iznosi $R_{DC}(50^\circ\text{C}) = 0,0546$ Ω/km . Prethodnu vrijednost otpornosti je neophodno zadati kao ulazni podatak u programu `power_lineparam`. Kao dodatne ulazne podatke, neophodno je zadati odnos debljine i spoljašnjeg prečnika provodnika $T/D = 0,33$ i relativnu permeabilnost provodnika $\mu_r = 1$.

Podužna unutrašnja reaktansa šupljeg metalnog provodnika je data sljedećim izrazom [37]:

$$X_{i\text{sup}} = X_i \left[1 - \frac{2r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{4r_i^4}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \right], \quad (2.2.4)$$

gdje je X_i podužna unutrašnja reaktansa punog metalnog provodnika data izrazom (2.2.5).

$$X_i = \pi f \cdot 10^{-4} \mu_r. \quad (2.2.5)$$

U prethodnom izrazu veličina f predstavlja frekvenciju električnih signala.

Unutrašnja reaktansa Al-Če provodnika se može aproksimativno izračunavati upotrebom izraza (2.2.4) za unutrašnju reaktansu šupljeg metalnog provodnika ukoliko ne dolazi do zasićenja čeličnog dijela užeta ili jezgra provodnika.

Prethodno dati izrazi, za podužnu otpornost i podužnu unutrašnju reaktansu, zajedno definišu izraz za unutrašnju impedansu analiziranog Al-Če provodnika bez uvažavanja površinskog efekta. Program `power_lineparam` pruža mogućnost uvažavanja uticaja površinskog efekta na unutrašnju impedansu Al-Če provodnika prema sljedećem izrazu [37]:

$$Z_{i(\text{pov})} = \frac{1000\rho_c}{2\pi(r_0^2 - r_i^2)} \left(1 - \frac{r_i^2}{r_0^2}\right) (\sqrt{2}\delta^{-1}r_0) j \frac{D_1}{D_2}, \quad (2.2.6)$$

gdje su D_1 i D_2 koeficijenti dati sljedećim relacijama [37]:

$$D_1 = I_0 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_0) e^{j\pi/4} \right] \cdot K_1 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_i) e^{j\pi/4} \right] + I_1 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_i) e^{j\pi/4} \right] \cdot K_0 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_0) e^{j\pi/4} \right], \quad (2.2.7)$$

$$D_2 = I_1 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_0) e^{j\pi/4} \right] \cdot K_1 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_i) e^{j\pi/4} \right] + I_1 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_i) e^{j\pi/4} \right] \cdot K_1 \left[(\sqrt{2}\delta^{-1}r_0) e^{j\pi/4} \right]. \quad (2.2.8)$$

Oznake I_i i K_i u prethodnim izrazima predstavljaju modifikovane Beselove funkcije reda i prve i druge vrste, redom. Oznaka δ predstavlja dubinu površinskog efekta i može se izračunati na osnovu sljedećeg izraza [37]:

$$\delta = 503,292 \times \sqrt{\frac{\rho_c}{f\mu_r}}. \quad (2.2.9)$$

Na osnovu rezultata proračuna prema izrazu (2.2.6) u programu se jednostavno dobija vrijednost unutrašnje reaktanse jednog Al-Če provodnika kao $X_{Li} = \text{Im}(Z_{i(\text{pov})})$. Unutrašnja otpornost i reaktansa snopa od četiri Al-Če provodnika se jednostavno određuju kao $R_{i(\text{snop})} = \text{Re}(Z_{i(\text{pov})})/4$ i $X_{Li(\text{snop})} = \text{Im}(Z_{i(\text{pov})})/4$.

Podužna spoljašnja reaktansa provodnika nastaje usljed induktivnosti petlje provodnik-zemlja i može se odrediti prema sljedećem izrazu [37]:

$$X_{s(g)} = 2\pi f \cdot L_{s(g)} = 4\pi f \cdot 10^{-4} \ln \frac{2y_i}{r_o}, \quad (2.2.10)$$

gdje je $y_i = H_{av}$ srednja visina raspona provodnika (srednja udaljenost provodnika do zemlje).

U analiziranom slučaju snopa od četiri simetrično raspoređena Al-Če provodnika, kao što je prikazano na Sl.2.2.1, podužna spoljašnja induktivnost grupe ili snopa provodnika se može jednostavno odrediti primjenom metode srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU) prema sljedećem izrazu [37]:

$$X_{snop(g)} = 4\pi f \cdot 10^{-4} \ln \frac{2y_i}{\sqrt[N]{N \times r_0 \times A^{N-1}}}, \quad (2.2.11)$$

gdje je $N = 4$ broj provodnika u snopu. Veličina A predstavlja poluprečnik opisane kružnice snopa provodnika. Na osnovu podataka sa Sl.2.2.1 moguće je jednostavno odrediti vrijednost $A = 0,354$ m (polovina dužine dijagonale kvadrata u čijim tjemenu su raspoređeni Al-Če provodnici).

Analognom procedurom, kao u slučaju Al-Če provodnika, izračunata je podužna otpornost zaštitnog provodnika od čelika, poluprečnika $r_i = 0,476$ cm, pri jednosmjernoj struji, primjenom izraza (2.2.2) uz malu modifikaciju kvadratnog člana u imeniocu (umjesto razlike kvadrata poluprečnika uvršten je samo kvadrat poluprečnika r_i), zbog činjenice da se zaštitni provodnik ekvivalentira punim metalnim provodnikom, a ne šupljim metalnim provodnikom. Vrijednost specifične otpornosti čelika je $\rho_{Cz} = 1,43 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ na temperaturi 20°C , na osnovu čega se dobija vrijednost podužne otpornosti zaštitnog provodnika pri jednosmjernoj struji $R_{DCz} = 2,01 \Omega/\text{km}$. Vrijednosti podužne unutrašnje i spoljašnje reaktanse zaštitnog provodnika se mogu izračunati prema izrazima (2.2.5) i (2.2.10), redom.

Pored sopstvenih, unutrašnje i spoljašnje reaktanse provodnika, kod nadzemnih vodova, prisutne su i međusobne reaktanse. Kod proračuna međusobnih reaktansi, snopovi provodnika se posmatraju kao jedan provodnik, jer su udaljenosti između različitih snopova provodnika mnogo veće od udaljenosti između pojedinačnih provodnika u samim snopovima. Međusobna reaktansa provodnika i i j je data sljedećim izrazom [37]:

$$X_{ij(g)} = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, \quad (2.2.12)$$

gdje je D_{ij} udaljenost između provodnika i i lika u ogledalu provodnika j , dok d_{ij} predstavlja udaljenost između provodnika i i j .

Izrazi za otpornosti i sopstvene i međusobne reaktanse provodnika nadzemnih vodova, prikazani u prethodnoj analizi, zasnovani su na aproksimaciji da se petlja provodnik-zemlja može aproksimirati petljom provodnik-slika lika provodnika, prema teoriji ogledala. Međutim, u realnosti povratni put zemlje na specifičniji način utiče na sopstvene i međusobne impedanse provodnika. Uvođenjem aproksimacije da je relativna permeabilnost zemlje jednaka $\mu_{rz} = 1$, uticaj povratnog puta zemlje se može uvažiti kroz ekvivalentni provodnik na dubini D_e , koja se određuje sljedećim izrazom [37], [39]:

$$D_e = 1,309125 \times \delta = 658,87 \times \sqrt{\frac{\rho_e}{f}}, \quad (2.2.13)$$

gdje je ρ_e specifična otpornost zemlje. Vrijednost specifične otpornosti zemlje $\rho_e = 20 \Omega\text{m}$ je unesena u program, jer je pretpostavljeno da se radi o baštenskom, močvarnom ili glinastom zemljištu duž trase DNV-a.

Program `power_lineparam` koristi aproksimaciju zamjene povratnog puta zemlje ekvivalentnim provodnikom na dubini D_e i implementira sljedeće korekcijske faktore za sopstvene i međusobne impedanse provodnika [37], [38]:

$$R_{i(e)} = \pi^2 f \cdot 10^{-4} - \frac{f}{911,812 \times \frac{D_e}{2y_i}} + \dots, \quad (2.2.14)$$

$$X_{i(e)} = 4\pi f \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{2y_i} + \frac{f}{911,812 \times \frac{D_e}{2y_i}} + \dots, \quad (2.2.15)$$

$$R_{ij(e)} = \pi^2 f \cdot 10^{-4} - \frac{f}{911,812 \times \frac{D_e}{y_i + y_j}} + \dots, \quad (2.2.16)$$

$$X_{ij(e)} = 4\pi f \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_e}{D_{ij}} + \frac{f}{911,812 \times \frac{D_e}{y_i + y_j}} + \dots, \quad (2.2.17)$$

gdje su y_i i y_j srednje visine raspona provodnika i i j . U prethodnim izrazima su navedena samo po prva dva člana beskonačnih matematičkih nizova.

Otočne kapacitivnosti i susceptanse nadzemnog voda se računaju na osnovu potencijalnih koeficijenata koji zavise od geometrijskog rasporeda provodnika na stubovima. Program pri proračunu koristi metodu provodnika u ogledalu, koja uvodi aproksimaciju da je zemlja ravan sa uniformnim nulnim potencijalom i da su poluprečnici provodnika mnogo manji u odnosu na međusobna rastojanja provodnika (metoda je validna za analize signala do maksimalne frekvencije 1 MHz). U sistemu od N provodnika izraz za potencijal provodnika i usljed sopstvenog naelektrisanja i naelektrisanja svih ostalih provodnika u sistemu je:

$$V_i = \sum_{j=1}^N P_{ij} Q_j, \quad (2.2.18)$$

gdje je P_{ij} Maksvelov potencijalni koeficijent, dok Q_j predstavlja naelektrisanje provodnika j . Sopstveni i međusobni potencijalni koeficijent provodnika i su dati sljedećim izrazima [37]:

$$P_{ii} = 17,975109 \times \ln \left(\frac{2y_i}{r_i} \right), \quad (2.2.19)$$

$$P_{ij} = 17,975109 \times \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right), \quad (2.2.20)$$

gdje je r_i poluprečnik provodnika i .

Program `power_lineparam` na osnovu geometrijskog rasporeda provodnika DNV-a sa Sl.2.2.1 vrši proračun sopstvenih i međusobnih potencijalnih koeficijenata.

2.2.2 Matrice podužnih električnih parametara DNV-a

Nakon proračuna podužnih električnih parametara, moguće je formirati sistem jednačina matematičkog modela DNV-a. Sistem jednačina je određen matricama rednih impedansi i otočnih admitansi DNV-a. Matrica rednih impedansi DNV-a sa dva zaštitna provodnika, koji je prikazan na Sl.2.2.1, je dimenzije 8×8 (8 provodnika). Sistem jednačina koji opisuje funkcionalnu zavisnost između padova napona na provodnicima i odgovarajućih struja kroz provodnike, može se prikazati u formi datoj izrazom (2.2.21) [37].

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_1 \\ \Delta \mathbf{V}_2 \\ \Delta \mathbf{V}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} & \mathbf{Z}_{1G} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} & \mathbf{Z}_{2G} \\ \mathbf{Z}_{G1} & \mathbf{Z}_{G2} & \mathbf{Z}_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_G \end{bmatrix}, \quad (2.2.21)$$

gdje su odgovarajuće submatrice date sa:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} I_{A2} \\ I_{B2} \\ I_{C2} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_G = \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \end{bmatrix}; \Delta \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} \Delta V_{A1} \\ \Delta V_{B1} \\ \Delta V_{C1} \end{bmatrix}; \Delta \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} \Delta V_{A2} \\ \Delta V_{B2} \\ \Delta V_{C2} \end{bmatrix}; \Delta \mathbf{V}_G = \begin{bmatrix} \Delta V_{G1} \\ \Delta V_{G2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{Z}_{11} &= \begin{bmatrix} Z_{A1A1} & Z_{A1B1} & Z_{A1C1} \\ Z_{B1A1} & Z_{B1B1} & Z_{B1C1} \\ Z_{C1A1} & Z_{C1B1} & Z_{C1C1} \end{bmatrix}; \mathbf{Z}_{12} = \begin{bmatrix} Z_{A1A2} & Z_{A1B2} & Z_{A1C2} \\ Z_{B1A2} & Z_{B1B2} & Z_{B1C2} \\ Z_{C1A2} & Z_{C1B2} & Z_{C1C2} \end{bmatrix}; \mathbf{Z}_{22} = \begin{bmatrix} Z_{A2A2} & Z_{A2B2} & Z_{A2C2} \\ Z_{B2A2} & Z_{B2B2} & Z_{B2C2} \\ Z_{C2A2} & Z_{C2B2} & Z_{C2C2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{Z}_{21} = \mathbf{Z}_{12}^T &= \begin{bmatrix} Z_{A2A1} & Z_{A2B1} & Z_{A2C1} \\ Z_{B2A1} & Z_{B2B1} & Z_{B2C1} \\ Z_{C2A1} & Z_{C2B1} & Z_{C2C1} \end{bmatrix}; \mathbf{Z}_{1G} = \mathbf{Z}_{G1}^T = \begin{bmatrix} Z_{A1G1} & Z_{A1G2} \\ Z_{B1G1} & Z_{B1G2} \\ Z_{C1G1} & Z_{C1G2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{Z}_{2G} = \mathbf{Z}_{G2}^T &= \begin{bmatrix} Z_{A2G1} & Z_{A2G2} \\ Z_{B2G1} & Z_{B2G2} \\ Z_{C2G1} & Z_{C2G2} \end{bmatrix}; \mathbf{Z}_{GG} = \begin{bmatrix} Z_{G1G1} & Z_{G1G2} \\ Z_{G2G1} & Z_{G2G2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Indeksi elemenata prethodnih submatrica označavaju odgovarajuće provodnike sa Sl.2.2.1. Elementi submatrica tipa Z_{ii} i Z_{ij} predstavljaju sopstvene i međusobne impedanse provodnika DNV-a, redom, i dati su sljedećim izrazima:

$$Z_{ii} = \frac{\text{Re}(Z_{i(pov)})}{4} + R_{i(e)} + j\left(\frac{\text{Im}(Z_{i(pov)})}{4} + X_{snop(g)} + X_{i(e)}\right), \quad (2.2.22)$$

$$Z_{ij} = R_{ij(e)} + j(X_{ij(g)} + X_{ij(e)}). \quad (2.2.23)$$

U slučaju sopstvenih i međusobnih impedansi zaštitnih provodnika, prethodni izrazi su nešto jednostavniji, jer su zaštitni provodnici ekvivalentirani punim metalnim provodnicima i nisu realizovani u snopovima.

Ukoliko se pretpostavi da su zaštitni provodnici uzemljeni na svakom stubu duž dionice DNV-a, onda vrijedi uslov $\Delta \mathbf{V}_G = 0$ i sistem jednačina (2.2.21) se svodi na jednostavniju formu datu izrazom (2.2.24), gdje su odgovarajuće submatrice definisane izrazima (2.2.25).

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_1 \\ \Delta \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{11} & \mathbf{Z}'_{12} \\ \mathbf{Z}'_{21} & \mathbf{Z}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z}' \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.2.24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}'_{11} &= \mathbf{Z}_{11} - \mathbf{Z}_{1G} \mathbf{Z}_{GG}^{-1} \mathbf{Z}_{1G}^T, \\ \mathbf{Z}'_{12} &= \mathbf{Z}_{12} - \mathbf{Z}_{1G} \mathbf{Z}_{GG}^{-1} \mathbf{Z}_{2G}^T, \\ \mathbf{Z}'_{21} &= \mathbf{Z}_{21} - \mathbf{Z}_{2G} \mathbf{Z}_{GG}^{-1} \mathbf{Z}_{1G}^T, \\ \mathbf{Z}'_{22} &= \mathbf{Z}_{22} - \mathbf{Z}_{2G} \mathbf{Z}_{GG}^{-1} \mathbf{Z}_{2G}^T. \end{aligned} \quad (2.2.25)$$

Na osnovu prethodnih izraza, moguće je zaključiti da prisustvo zaštitnih provodnika umanjuje vrijednosti sopstvenih i međusobnih impedansi provodnika DNV-a. Primjenom programa power_lineparam, proračunate su vrijednosti elemenata matrice \mathbf{Z}' za analizirani DNV i date u prilogu 1.

Matrica otočnih admitansi DNV-a, sa dva zaštitna provodnika, takođe je dimenzije 8 x 8. Sistem jednačina, koji opisuje funkcionalnu zavisnost između napona i naelektrisanja provodnika, može se prikazati u sljedećoj formi [37]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} & \mathbf{P}_{1G} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} & \mathbf{P}_{2G} \\ \mathbf{P}_{G1} & \mathbf{P}_{G2} & \mathbf{P}_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \\ \mathbf{Q}_G \end{bmatrix}, \quad (2.2.26)$$

gdje su odgovarajuće submatrice date sa:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_1 &= \begin{bmatrix} Q_{A1} \\ Q_{B1} \\ Q_{C1} \end{bmatrix}; \mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} Q_{A2} \\ Q_{B2} \\ Q_{C2} \end{bmatrix}; \mathbf{Q}_G = \begin{bmatrix} Q_{G1} \\ Q_{G2} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_G = \begin{bmatrix} V_{G1} \\ V_{G2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{P}_{11} &= \begin{bmatrix} P_{A1A1} & P_{A1B1} & P_{A1C1} \\ P_{B1A1} & P_{B1B1} & P_{B1C1} \\ P_{C1A1} & P_{C1B1} & P_{C1C1} \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{12} = \begin{bmatrix} P_{A1A2} & P_{A1B2} & P_{A1C2} \\ P_{B1A2} & P_{B1B2} & P_{B1C2} \\ P_{C1A2} & P_{C1B2} & P_{C1C2} \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{22} = \begin{bmatrix} P_{A2A2} & P_{A2B2} & P_{A2C2} \\ P_{B2A2} & P_{B2B2} & P_{B2C2} \\ P_{C2A2} & P_{C2B2} & P_{C2C2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{P}_{21} = \mathbf{P}_{12}^T &= \begin{bmatrix} P_{A2A1} & P_{A2B1} & P_{A2C1} \\ P_{B2A1} & P_{B2B1} & P_{B2C1} \\ P_{C2A1} & P_{C2B1} & P_{C2C1} \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{1G} = \mathbf{P}_{G1}^T = \begin{bmatrix} P_{A1G1} & P_{A1G2} \\ P_{B1G1} & P_{B1G2} \\ P_{C1G1} & P_{C1G2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{P}_{2G} = \mathbf{P}_{G2}^T &= \begin{bmatrix} P_{A2G1} & P_{A2G2} \\ P_{B2G1} & P_{B2G2} \\ P_{C2G1} & P_{C2G2} \end{bmatrix}; \mathbf{P}_{GG} = \begin{bmatrix} P_{G1G1} & P_{G1G2} \\ P_{G2G1} & P_{G2G2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Elementi submatrica, tipa P_{ii} i P_{ij} , predstavljaju sopstvene i međusobne potencijalne koeficijente provodnika DNV-a, redom, i dati su izrazima (2.2.19) i (2.2.20).

Kao i u slučaju sistema jednačina (2.2.21), ukoliko se uvede pretpostavka da su zaštitni provodnici uzemljeni na svakom stubu duž dionice DNV-a, onda vrijedi uslov $V_G = 0$ i sistem jednačina (2.2.26) se svodi na sljedeću jednostavniju formu:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}'_{11} & \mathbf{P}'_{12} \\ \mathbf{P}'_{21} & \mathbf{P}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{P}' \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.2.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'_{11} &= \mathbf{P}_{11} - \mathbf{P}_{1G} \mathbf{P}_{GG}^{-1} \mathbf{P}_{1G}^T; \\ \mathbf{P}'_{12} &= \mathbf{P}_{12} - \mathbf{P}_{1G} \mathbf{P}_{GG}^{-1} \mathbf{P}_{2G}^T; \\ \mathbf{P}'_{21} &= \mathbf{P}_{21} - \mathbf{P}_{2G} \mathbf{P}_{GG}^{-1} \mathbf{P}_{1G}^T; \\ \mathbf{P}'_{22} &= \mathbf{P}_{22} - \mathbf{P}_{2G} \mathbf{P}_{GG}^{-1} \mathbf{P}_{2G}^T. \end{aligned} \quad (2.2.28)$$

Na osnovu prethodnih izraza, moguće je zaključiti da prisustvo zaštitnih provodnika umanjuje vrijednosti sopstvenih i međusobnih potencijalnih koeficijenata provodnika DNV-a. Primjenom programa `power_lineparam`, proračunate su vrijednosti elemenata matrice otočnih kapacitivnosti provodnika DNV-a, koja je data sljedećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{C}' \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{C}' = \mathbf{P}'^{-1}. \quad (2.2.29)$$

Na osnovu prethodnog izraza, moguće je zaključiti da je matrica otočnih kapacitivnosti provodnika DNV-a jednaka inverznoj matrici potencijalnih koeficijenata provodnika DNV-a. Elementi proračunske matrice \mathbf{C}' za analizirani DNV su dati u prilogu 1. Pomoću matrice \mathbf{C}' moguće je formirati proračunsku matricu otočnih susceptansi DNV-a na osnovu koje se dobija funkcionalna zavisnost između otočnih struja i napona provodnika:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1o} \\ \mathbf{I}_{2o} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}'_{11} & \mathbf{C}'_{12} \\ \mathbf{C}'_{21} & \mathbf{C}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{11} & \mathbf{B}'_{12} \\ \mathbf{B}'_{21} & \mathbf{B}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = j\mathbf{B}' \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.2.30)$$

2.2.3 Uticaj transpozicije provodnika na matrice podužnih električnih parametara DNV-a

Transformacijom matrica podužnih rednih impedansi i otočnih admitansi u domen simetričnih komponenti, dobijaju se podužni električni parametri direktnog, inverznog i nultog redoslijeda. Ukoliko je ispunjen uslov da su matrice rednih impedansi i otočnih admitansi DNV-a u domenu simetričnih komponenti dijagonalne (svi elementi van glavne dijagonale su jednaki nuli), onda se DNV može analizirati pomoću tri nezavisne jednopolne šeme (šeme direktnog, inverznog i nultog redoslijeda). Transformacije sistema jednačina matematičkog modela DNV-a (2.2.24) i (2.2.30) u domen simetričnih komponenti su date sljedećim izrazima [37]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_1^{\text{di}0} \\ \Delta \mathbf{V}_2^{\text{di}0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{11} & \mathbf{Z}'_{12} \\ \mathbf{Z}'_{21} & \mathbf{Z}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H} & 0 \\ 0 & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{\text{di}0} \\ \mathbf{I}_2^{\text{di}0} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}^{\text{di}0} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{\text{di}0} \\ \mathbf{I}_2^{\text{di}0} \end{bmatrix}, \quad (2.2.31)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1o}^{\text{di}0} \\ \mathbf{I}_{2o}^{\text{di}0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{H}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j\mathbf{B}'_{11} & j\mathbf{B}'_{12} \\ j\mathbf{B}'_{21} & j\mathbf{B}'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H} & 0 \\ 0 & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{\text{di}0} \\ \mathbf{V}_2^{\text{di}0} \end{bmatrix} = j\mathbf{B}^{\text{di}0} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{\text{di}0} \\ \mathbf{V}_2^{\text{di}0} \end{bmatrix}, \quad (2.2.32)$$

gdje su $\Delta \mathbf{V}^{\text{di}0}$, $\mathbf{V}^{\text{di}0}$, $\mathbf{I}^{\text{di}0}$ i $\mathbf{I}_o^{\text{di}0}$ vektori padova napona na provodnicima, faznih napona provodnika, struja kroz provodnike i otočnih struja, redom, u domenu simetričnih komponenti. Elementi prethodnih vektora su dobijeni primjenom dobro poznate metode simetričnih komponenti, koja je izvorno predložena u [40]. Submatrica \mathbf{H} data je sljedećim izrazom:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ h^2 & h & 1 \\ h & h^2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.2.33)$$

gdje $h = e^{j2\pi/3}$ predstavlja operator transformacije.

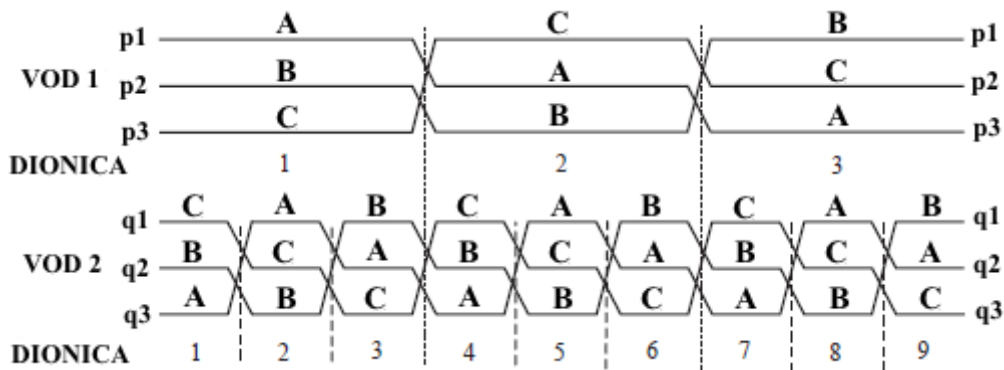
Primjenom metode simetričnih komponenti matrice \mathbf{Z}' i \mathbf{B}' se transformišu u sljedeće forme [37]:

$$\mathbf{Z}^{\text{di}0} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Z}'_{11}\mathbf{H} & \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Z}'_{12}\mathbf{H} \\ \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Z}'_{21}\mathbf{H} & \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Z}'_{22}\mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad (2.2.34)$$

$$j\mathbf{B}^{\text{di}0} = j \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{-1}\mathbf{B}'_{11}\mathbf{H} & \mathbf{H}^{-1}\mathbf{B}'_{12}\mathbf{H} \\ \mathbf{H}^{-1}\mathbf{B}'_{21}\mathbf{H} & \mathbf{H}^{-1}\mathbf{B}'_{22}\mathbf{H} \end{bmatrix}. \quad (2.2.35)$$

U opštem kao i u analiziranom slučaju DNV-a sa Sl.2.2.1, dobijene matrice $\mathbf{Z}^{\text{di}0}$ i $\mathbf{B}^{\text{di}0}$ nisu dijagonalne, što znači da se trofazni sistem ne može predstaviti kao superpozicija tri nezavisna jednofazna sistema (šeme direktnog, inverznog i nultog redosljeda).

Transponovanje provodnika nadzemnih vodova se vrši u cilju smanjenja naponske i strujne nesimetrije, koje je uzrokovano nesimetrijom geometrijskih pozicija provodnika na prenosnim stubovima. Maksimalne dozvoljene vrijednosti inverznih komponenti napona na krajevima nadzemnog voda i struje kroz nadzemni vod su 0,5-0,7% i 3%, redom [41]. Strujna nesimetrija je posebno izražena u slučaju dugih DNV-ova vođenih na istim stubovima [42]. Najbliži slučaj idealnoj transpoziciji provodnika DNV-a (potpuna eliminacija nesimetrije) predstavlja „potpuna” transpozicija provodnika koja je prikazana na Sl.2.2.2.



Sl.2.2.2 „Potpuna” transpozicija DNV-a: vod 1 transponovan na tri dionice, vod 2 transponovan na devet dionica - po tri za svaku dionicu voda 1 [37]

Transpozicijom DNV-a sa Sl.2.2.2 postiže se da provodnici voda 2 zauzimaju sve moguće relativne pozicije u odnosu na provodnike voda 1, što daje sljedeće forme matrica $\mathbf{Z}^{\text{di}0}$ i $\mathbf{B}^{\text{di}0}$ [37]:

$$\mathbf{Z}^{\text{di}0} = \begin{bmatrix} Z_1^{\text{d}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1^{\text{i}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1^0 & 0 & 0 & Z_{12}^0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_2^{\text{d}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_2^{\text{i}} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{12}^0 & 0 & 0 & Z_2^0 \end{bmatrix}, \quad j\mathbf{B}^{\text{di}0} = j \begin{bmatrix} B_1^{\text{d}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_1^{\text{i}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_1^0 & 0 & 0 & B_{12}^0 \\ 0 & 0 & 0 & B_2^{\text{d}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_2^{\text{i}} & 0 \\ 0 & 0 & B_{12}^0 & 0 & 0 & B_2^0 \end{bmatrix}. \quad (2.2.36)$$

Na osnovu prethodnih izraza, može se zaključiti da matrice $\mathbf{Z}^{\text{di}0}$ i $\mathbf{B}^{\text{di}0}$ nisu dijagonalne ni pri „potpunoj” transpoziciji DNV-a, ali da međusobne impedanse i admitanse postoje samo u nultom komponentnom sistemu (Z_{12}^0 i B_{12}^0). Međusobne impedanse u nultom komponentnom sistemu mogu dostići i do 70% vrijednosti sopstvenih impedansi. Njihovo zanemarenje pri modelovanju DNV-a može dovesti i do nepreciznih rezultata pri analizi rada relejnih zaštita [5]. Program `power_lineparam` pruža mogućnost proračuna podužnih električnih parametara DNV-a u domenu simetričnih komponenti pod pretpostavkom „potpune” transpozicije provodnika. Odgovarajuće vrijednosti za analizirani DNV su date u prilogu 1.

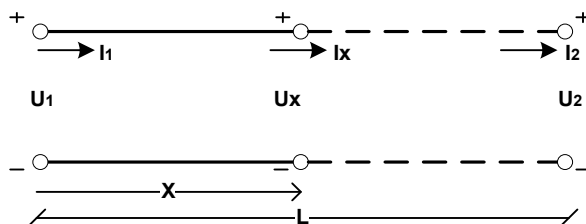
2.2.4 Model DNV-a sa raspodijeljenim parametrima

Za modelovanje nadzemnih vodova najčešće se koriste šeme sa skoncentrisanim i raspodijeljenim parametrima. Modeli zasnovani na skoncentrisanim parametrima su proračunski manje zahtjevni, ali zato i manje tačni u odnosu na modele zasnovane na raspodijeljenim parametrima [43], [44]. Električne veličine realnih nadzemnih vodova nisu samo funkcije vremena nego i lokacije na kojoj se posmatraju, odnosno koordinate x ukoliko se električno kolo dominantno proteže duž jedne ose (x). U većini analiza nadzemnih vodova, može se smatrati da su električni parametri ravnomjerno raspodijeljeni duž prostorne koordinate x , odnosno da je u pitanju slučaj električnog kola sa homogeno raspodijeljenim parametrima [22], [45]. Model odsječka vremenski nepromjenljivog linearnog voda, beskonačno male dužine, je opisan dobro poznatim jednačinama telegrafičara [45]:

$$\begin{aligned} -\frac{du(x,t)}{dx} &= R'i(x,t) + L' \frac{di(x,t)}{dt}, \\ -\frac{di(x,t)}{dx} &= G'u(x,t) + C' \frac{du(x,t)}{dt}, \end{aligned} \quad (2.2.37)$$

gdje su R' , G' , L' i C' podužna otpornost, provodnost, induktivnost i kapacitivnost, redom.

Funkcionalnu zavisnost napona i struje u proizvoljnoj tački voda jednostavno je prikazati na primjeru ograničenog voda sa ustaljenim prostoperiodičnim odzivom. Na Sl.2.2.3 prikazan je princip određivanja funkcionalne zavisnosti napona i struje u proizvoljnoj tački voda od napona i struje na početku voda.



Sl.2.2.3 Nadzemni vod ekvivalentiran električnim kolom sa raspodijeljenim parametrima [22], [45]

Napon i struja u proizvoljnoj tački voda na udaljenosti x od početka voda, dati su sljedećim izrazima [22], [45]:

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_1 \text{ch}(\underline{\gamma}x) - \underline{Z}_C \underline{I}_1 \text{sh}(\underline{\gamma}x), \\ \underline{I}(x) &= -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_C} \text{sh}(\underline{\gamma}x) + \underline{I}_1 \text{ch}(\underline{\gamma}x), \end{aligned} \quad (2.2.38)$$

gdje su \underline{U}_1 i \underline{I}_1 fazori napona i struje na početku voda, redom. Veličine \underline{Z}_C i $\underline{\gamma}$ predstavljaju karakterističnu impedansu i koeficijent prostiranja, redom.

U simulacionom modulu Simulink softverskog paketa MATLAB R2014a dostupan je model N -faznog voda sa raspodijeljenim parametrima, koji je i upotrijebljen u ovoj disertaciji za modelovanje DNV-a sa Sl.2.2.1. Numerički proračun električnih signala na modelu voda u vremenskom domenu je vršen primjenom Beržeronove metode putujućih talasa [46].

2.3. Uticaj transpozicije provodnika na asimetrične režime rada dvostrukog nadzemnog voda

U mnogim publikacijama, koje analiziraju algoritme relejne zaštite DNV-a, pri samom modelovanju, uvedena je pretpostavka da je DNV „putpuno” transponovan (Sl.2.2.2). U realnosti je veoma moguće da analizirani DNV-ovi nisu „potpuno” transponovani. Veoma je češći slučaj „djelimične” transpozicije provodnika DNV-a, jer

se na taj način postiže određeno smanjenje naponske i strujne nesimetrije pri povoljnijim ekonomskim uslovima. Transpozicije provodnika mogu da se vrše u razvodnim postrojenjima ili na specijalnim stubovima duž dionica vodova [41]. Čak i ako se uvede pretpostavka o „potpunoj” transpoziciji DNV-a, neophodno je voditi računa o međusobnoj impedansi nultog redoslijeda, koja ima uticaj pri asimetričnim režimima rada koji uključuju zemljospojeve. Prema standardu IEC 60909-2 [47] preporučena je primjena aproksimacije za analizu asimetričnih režima rada DNV-a, koja je zasnovana na implicitnom uvažavanju međusobne impedanse u izraz sopstvene impedanse nultog redoslijeda. U članku [48], autori su pokazali da uvođenje prethodne aproksimacije može da uzrokuje greške i do 20% pri proračunu struje jednopolnog kratkog spoja u odnosu na upotrebu odgovarajućeg preciznijeg modela DNV-a [49], [50].

Sa ciljem utvrđivanja greške aproksimativnog modelovanja DNV-a pri proračunu struje kvara u asimetričnim režimima, u nastavku je data uporedna analiza tri granična slučaja [51]:

(M1) model netransponovanog DNV-a (referentna tačna vrijednost),

(M2) model „potpuno” transponovanog DNV-a sa uvaženom međusobnom impedansom nultog redoslijeda,

(M3) model „potpuno” transponovanog DNV-a sa zanemarenom međusobnom impedansom nultog redoslijeda.

Prethodni modeli su realizovani u simulacionom modulu Simulink softverskog paketa MATLAB R2014a primjenom šeme sa raspodijeljenim parametrima. Modelovan je 400 kV DNV sa Sl.2.2.1, čije vrijednosti električnih parametara su date u prilogu 1. Pretpostavljeno je da je DNV sa jedne strane napajan idealnom trofaznom mrežom napona 400 kV, dok je na njegov drugi kraj priključen čisto aktivni trofazni potrošač sa spregom direktno uzemljena zvijezda (otpornost po fazi 110Ω). Usvojena dužina DNV-a je 600 km. Uporedna analiza modela DNV-a je vršena na tri karakteristična slučaja kvara sa zemljospojem [51]:

(K1) prolazan kvar Az na vodu 1, 50 km od početka dionice (otpornost kvara 1Ω),

(K2) trajan kvar ABz na vodu 1, 300 km od početka dionice,

(K3) uzastopni prolazni kvarovi, Az na vodu 1 i Bz na vodu 2, 550 km od početka dionice.

Struje su mjerene na četiri lokacije: 11 – početak voda 1, 12 – kraj voda 1, 21 – početak voda 2 i 22 – kraj voda 2. Relativna odstupanja struja kvara nultog redoslijeda na prethodnim lokacijama, dobijena primjenom modela (M2) i (M3), u odnosu na model (M1), prikazana su u Tab.2.3.1.

Tab.2.3.1 Relativna odstupanja struje kvara nultog redoslijeda modela DNV-a (M2) i (M3) u odnosu na model (M1) [51]

Lokacije mjerenih struja	Kvar (K1)			Kvar (K2)			Kvar (K3)		
	(M1) [kA]	(M2) [%]	(M3) [%]	(M1) [kA]	(M2) [%]	(M3) [%]	(M1) [kA]	(M2) [%]	(M3) [%]
I_{11-0}	4,36	2,15	2,91	0,46	3,49	9,27	0,14	2,65	58,8
I_{12-0}	0,46	-5,71	-5,74	0,49	-9,98	-11,2	1,42	4,45	-0,05
I_{21-0}	0,11	-12,9	-14,0	0,11	-25,5	-9,45	0,29	-15,3	11,85
I_{22-0}	0,01	48,7	298	0,03	-16,3	112	1,16	-8,85	-24,3

Na osnovu dobijenih rezultata iz prethodne tabele, može se zaključiti sljedeće:

- razlike između maksimalnih vrijednosti struja nultog redoslijeda modela (M2) i (M3) na lokaciji 22 su veće od 100% za slučajeve kvara (K1) i (K2), što nije od prevelikog značaja s obzirom na veoma malu vrijednost odgovarajuće struje modela (M1),
- razlike između maksimalnih vrijednosti struja nultog redoslijeda modela (M2) i (M3) na lokacijama 11, 12 i 21 su maksimalno oko 15% za slučajeve kvara (K1) i (K2),
- kvar (K3) predstavlja najkritičniji slučaj u pogledu razlika između maksimalnih vrijednosti struja nultog redoslijeda modela (M2) i (M3).

Prethodnom analizom je pokazano da zanemarivanje međusobne impedanse nultog redoslijeda DNV-a može da uzrokuje odstupanja veća od 20% pri procjeni struje kvara nultog redoslijeda, što može da ugrozi osjetljivost i selektivnost relejnih zaštita. Takođe, na osobine relejnih zaštita značajno može da utiče upotreba modela DNV-a (M2) i (M3) umjesto modela (M1), gdje su dobijena odstupanja često veća i od 10%.

U slučaju kvarova, bez zemljospoja, ne postoje razlike između modela (M2) i (M3), dok odstupanja struja kvara direktnog i inverznog redoslijeda prethodnih modela u odnosu na model (M1), mogu da dostignu i do 20% [51]. U asimetričnim režimima

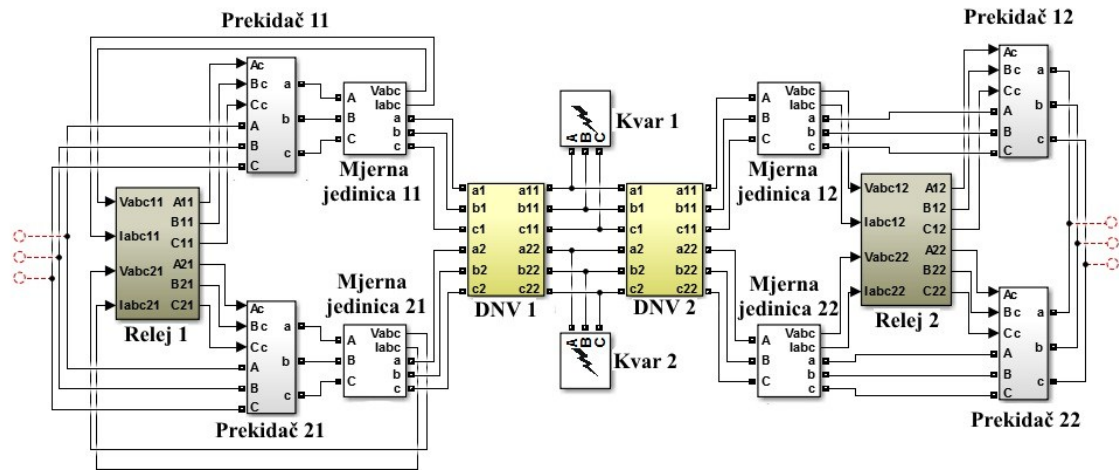
rada, ukoliko se realan netransponovan DNV modeluje pomoću modela „potpuno” transponovanog DNV-a, pri pravilnom podešavanju relejnih zaštita, moraju se u obzir uzeti odgovarajuća odstupanja. Pri analizi kvarova sa zemljospojem, potrebno je uvažiti i uticaj međusobne impedanse nultog redoslijeda na struju kvara.

U slučaju simetričnih režima rada, opravdano je koristiti model „potpuno” transponovanog DNV-a za osnovne analize EES-a, poput proračuna tokova snaga, dok je za preciznije analize, koje uključuju proračun strujnih i naponskih nesimetrija, neophodno koristiti model što približniji realnom DNV-u [51].

2.4. Interaktivni simulator rada relejne zaštite

U cilju ispitivanja rada algoritama relejne zaštite, u okviru ove disertacije, razvijen je interaktivni simulator upotrebom simulacionog modula Simulink softverskog paketa MATLAB R2014a. Simulator omogućava vizuelni prikaz modela sistema i interakciju sa korisničkim naredbama u toku vremena aktivne simulacije. Metodološki smisao ovakvih sistema je detaljno opisan u [52]. Osnovni cilj razvijenog simulatora je da što preciznije modeluje sisteme relejne zaštite, uvažavajući specifičnosti njihovog rada u realnom vremenu. Simulacije procesa u razvijenom simulatoru se ne izvršavaju u realnom vremenu (vremenski interval proračuna simulacije nije jednak vremenskom intervalu u realnosti), ali dužine simuliranih vremenskih intervala odgovaraju dužinama realnih vremenskih intervala koji se mogu očekivati u praksi, npr. ako relejna zaštita u simulatoru reaguje nakon 20 ms simuliranog vremena, može se približno očekivati da će realna relejna zaštita u praksi za isti proces reagovati nakon 20 ms realnog vremena. Osobina interaktivnosti simulatora omogućava primjenu akcija i promjenu simuliranih „događaja” za vrijeme trajanja simulacije, npr. moguće je isključiti struju kvara modelima prekidača u toku simuliranog vremena i pratiti odziv relejne zaštite. Primjena akcija u toku simulacije procesa može biti zadata unaprijed (prepodešena programskim kodom) ili zadata od strane korisnika interaktivno tokom simuliranog vremena.

Uopšteni blok dijagram predloženog simulatora rada relejne zaštite za primjer poprečne diferencijalne zaštite DNV-a, u simulacionom modulu Simulink, dat je na Sl.2.4.1.



Sl.2.4.1 Uopšteni blok dijagram interaktivnog simulatora rada relejne zaštite primijenjenog na DNV u simulacionom modulu Simulink

2.4.1 Elementi interaktivnog simulatora rada relejne zaštite

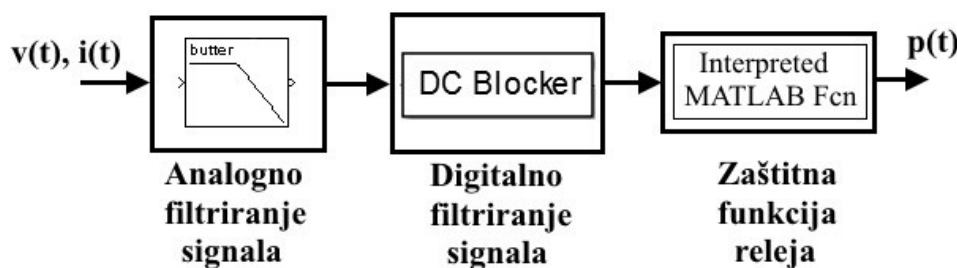
Sa Sl.2.4.1 moguće je uočiti osnovne elemente predloženog interaktivnog simulatora rada relejne zaštite: modeli relejne zaštite (Relej 1 i 2), model netransponovanog DNV-a sa raspodijeljenim parametrima (DNV 1 i 2), modeli kvarova u trofaznom sistemu (Kvar 1 i 2), modeli trofaznih prekidača (Prekidač 11, 12, 21 i 22) i modeli mjernih jedinica (Mjerna jedinica 11, 12, 21 i 22).

Modeli relejne zaštite su detaljno objašnjeni u nastavku. Model netransponovanog DNV-a sa raspodijeljenim parametrima je realizovan kao kaskadna veza četiri dionice prilagodljive dužine (u blokovima DNV 1 i 2 se nalaze po dvije dionice modelovanog DNV-a). Svaka od četiri dionice je predstavljena modelom sa raspodijeljenim parametrima DNV-a sa Sl.2.2.1. U model DNV-a se učitavaju matrice rednih impedansi i otočnih admitansi sa podužnim električnim parametrima, koje su date u prilogu 1. Kvarovi u trofaznom sistemu su modelovani postojećim blokovima u Simulink-u, gdje je moguće podešavati tip, trenutak i otpornost na mjestu kvara. Trofazni prekidači su takođe modelovani postojećim blokovima. Zbog pojednostavljenja analize korišćeni su modeli idealnih prekidača (impedansa prekidača je zanemarljiva pri zatvorenim kontaktima, dok je njena vrijednost približno beskonačna pri otvorenim kontaktima). Upravljanje prekidačima je podešeno kao vanjsko, gdje se signali isklopa i uklopa dobijaju iz modela relejne zaštite. Uključenje i isključenje signala struja se dešava u trenutku prolaska signala kroz nulu uz aktivne signale uklopa i isklopa. Vrijeme uklopa

i isklopa prekidača je podešeno na 40 ms. Modeli prekidača omogućavaju razdvojeno upravljanje polovima, pa je moguća i primjena jednofaznog APU-a. Mjerne jedinice, koje modeluju trofazne naponske i strujne transformatore, su stacionirane na četiri lokacije, kao što je prikazano na Sl.2.4.1. Zbog pojednostavljenja analize, strujni i naponski transformatori su modelovani kao idealni sa prenosnim odnosom $m = 1$. Sekundari mjernih transformatora su povezani na ulaze modela relejne zaštite.

2.4.2 Modelovanje digitalne obrade signala i zaštitne funkcije releja

Unutar blokova Relej 1 i 2 sa Sl.2.4.1 implementirani su modeli relejne zaštite, čija uopštena blok šema je prikazana na Sl.2.4.2.



Sl.2.4.2 Blok šema modela relejne zaštite u simulacionom modulu Simulink

Na ulaze svakog od dva modela diferencijalnih releja dovodi se ukupno 12 mjernih signala, po 6 signala struja i napona. Svi signali se u prvom koraku analogno filtriraju primjenom Batervort (Butterworth) filtera propusnika niskih učestanosti trećeg reda [53], [54] sa ciljem eliminacije šuma i viših harmonika. Granična frekvencija Batervort filtera je podešena na vrijednost $f_b = 150$ Hz, čime je postignuto zanemarljivo slabljenje amplitude signala osnovnog harmonika $f_1 = 50$ Hz. Vremensko zaostajanje filtriranih signala u odnosu na originalne signale je manje od 2 ms. U drugom koraku obrade signala se vrši procjena i uklanjanje jednosmjerne komponente signala primjenom eliptičkog filtera propusnika niskih učestanosti šestog reda, sa beskonačnim odzivom na impulsnu pobudu [55], [56]. Normalizovana vrijednost propusnog opsega eliptičkog filtera je podešena na 0,001. Nakon procesa filtriranja, signali se dovode na ulaz zaštitne funkcije releja u kojoj je implementiran kod algoritma zaštite u vidu programiranog MATLAB m-fajla. Zaštitna funkcija je modelovana postojećim MATLAB funkcijskim blokom sa mogućnošću proizvoljne vrijednosti frekvencije odabiranja. Programirani MATLAB m-fajl, implementiran unutar MATLAB funkcijskog bloka, sadrži

programski kod algoritma odabrane digitalne relejne zaštite. Primjer programskog koda algoritma poprečne diferencijalne zaštite, zasnovanog samo na strujnim signalima, dat je u prilogu 2. Nakon izvršavanja programskog koda algoritma relejne zaštite, na izlaz se šalju signali reagovanja za komandovanje sklopnim operacijama modela prekidača. Kompletna digitalna obrada signala se obavlja za vrijeme trajanja simulacije u okviru predloženog simulatora.

2.4.3 Osnovna podešavanja i programi interaktivnog simulatora rada relejne zaštite

Trenutne vrijednosti električnih signala u simulacionom modulu Simulink, u okviru predloženog simulatora rada relejne zaštite, se dobijaju numeričkim rješavanjem običnih diferencijalnih jednačina upotrebom metode Bogački-Šampin (Bogacki–Shampine) [57]. Vremenski korak proračuna sistema jednačina (vremenski korak simulacije) je podešen na vrijednost $T_s = 0,01$ ms. Frekvencija odabiranja modela zaštitne funkcije je podešena na vrijednost $f_{od} = 4$ kHz (perioda odabiranja iznosi $T_{od} = 0,25$ ms). Kao sastavni dio predloženog simulatora, za procjenu fazora signala napona i struja korišćena je rekurzivna Furijeova metoda. U toku simulacija rezultati od interesa se interaktivno upisuju i čuvaju u radnoj memoriji softverskog paketa MATLAB R2014a.

U okviru predloženog simulatora, realizovani su sljedeći programi upotrebom softverskog paketa MATLAB R2014a:

- program algoritma relejne zaštite (izvršava se interaktivno u toku vremena simulacije),
- program za prilagođenje, obradu i grafički prikaz rezultata simulacije (izvršava se nakon završetka simulacije),
- program za podešenje osnovnih parametara simulatora (izvršava se prije početka simulacije),
- program za automatsko izvršavanje proizvoljnog broja uzastopnih simulacija (nakon završetka svake pojedinačne simulacije odgovarajući rezultati se memorišu).

Pored prethodnih programa u simulacionom modulu Simulink, realizovan je i sistem za praćenje signala od interesa u toku vremena simulacije. Sistem omogućava praćenje promjena signala u vremenskom i fazorskom domenu, kao i interaktivno izračunavanje simetričnih komponenti signala.

2.4.4 Digitalno filtriranje opadajuće jednosmjerne komponente

Za postizanje iste frekventne karakteristike, filteri sa beskonačnim impulsnim odzivom predstavljaju bolje rješenje u odnosu na filtere sa konačnim impulsnim odzivom. Filteri sa konačnim impulsnim odzivom unose značajno veće vremensko kašnjenje signala i zahtijevaju veće računarske resurse prilikom proračuna [58], [59]. U primjenama koje zahtijevaju mala vremenska kašnjenja, poput sistema koji rade u realnom vremenu, neophodno je birati filtere sa minimalnim grupnim kašnjenjem [60].

Najpoznatiji analogni filteri su Batervortov, Čebišev (Chebyshev), Beselov (Bessel) i eliptički (Elliptic). Eliptički filteri se odlikuju najstrmijom frekventnom karakteristikom u intervalu između propusnog i nepropusnog opsega u odnosu na ostale filtere istog reda [61]. Prenosna funkcija eliptičkog filtera u s -domenu je data sljedećim izrazom [62]:

$$H_a(s) = H_0 \left[\frac{1}{1 + A_{01}s} \right]^r \prod_{i=1}^L \left[\frac{1 + B_{i1}s + B_{i2}s^2}{1 + A_{i1}s + A_{i2}s^2} \right], \quad (2.4.1)$$

gdje su koeficijenti u brojiocu i imeniocu dati sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} [1, B_{i1}, B_{i2}] &= \left[1, -2 \operatorname{Re}\left(\frac{1}{z_{ai}}\right), \frac{1}{|z_{ai}|^2} \right], \\ [1, A_{i1}, A_{i2}] &= \left[1, -2 \operatorname{Re}\left(\frac{1}{p_{ai}}\right), \frac{1}{|p_{ai}|^2} \right], \\ [1, A_{01}] &= \left[1, -\frac{1}{p_{a0}} \right], \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

gdje su z_{ai} i p_{ai} nule i polovi polinoma prenosne funkcije filtera. Parametar r može imati vrijednosti 0 i 1. L predstavlja broj analognih sekcija koji se može izračunati na osnovu reda filtera: $N = 2L + r$. Frekventni odziv filtera se dobija zamjenom $s = j\Omega$.

Projektovanje digitalnog filtera se najčešće odvija u sljedećim koracima [63]:

1. Odabrano podešenje digitalnog filtera se transformiše u odgovarajuće podešenje analognog prototipa filtera propusnika niskih učestanosti.
2. Analogni prototip filtera se projektuje odabirom nekog od poznatih tipova filtera: Batervortov, Čebišev, Beselov i eliptički.

3. Prenosna funkcija odabranog analognog prototipa filtera $H_a(s)$ se transformiše u željenu prenosnu funkciju digitalnog filtera $H(z)$ primjenom odgovarajuće bilinearne transformacije, tj. mapiranjem između s -ravni i z -ravni u formi $s = f(z)$. Forma funkcije $f(z)$ određuje mapiranje za koje je moguće dobiti različite filtere: propusnik niskih učestanosti, propusnik visokih učestanosti, propusnik opsega učestanosti i nepropusnik opsega učestanosti.

Pri modelovanju rada relejne zaštite, u simulacionom modulu Simulink, za digitalno filtiranje opadajuće jednosmjerne komponente korišćen je blok “DC blocker” koji omogućava širok izbor tipova i podešenja digitalnih filtera. Odabran je eliptički filter 6. reda i normalizovane granične frekvencije 0.001. Ovaj filter je i preporučen kao prvi izbor u okviru Simulink okruženja, zbog naslijeđenih povoljnih karakteristika koje odlikuju analogne eliptičke filtere. Prema ranije opisanoj proceduri, prenosna funkcija analognog prototipa eliptičkog filtera se primjenom bilinearne transformacije prenosi u diskretni domen. Mapiranje je odabrano tako da se dobije digitalni eliptički filter propusnik visokih učestanosti uz primjenu sljedećih transformacija [63]:

$$s = \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (2.4.3)$$

$$\Omega = -\operatorname{ctg}\left(\frac{\omega}{2}\right),$$

gdje su $s = j\Omega$ i $z = e^{j\omega}$. Digitalna frekvencija je data sa $\omega = 2\pi f/f_s$, gdje f_s predstavlja frekvenciju odabiranja filtera.

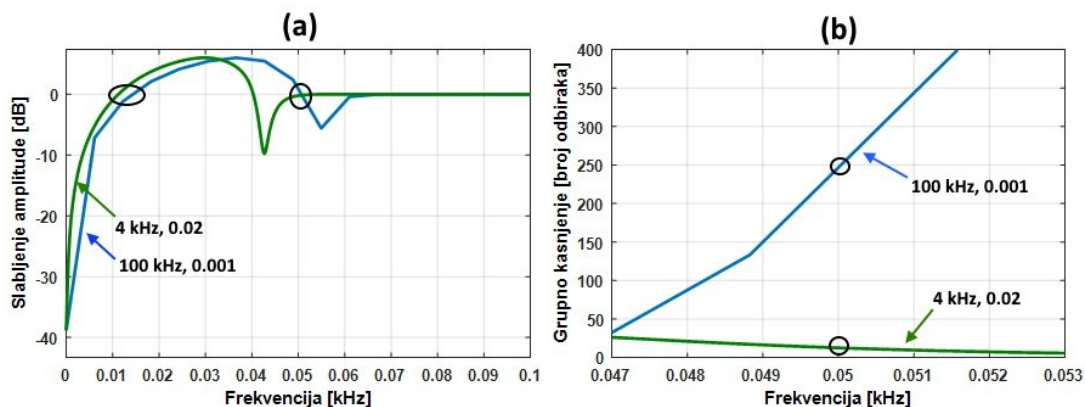
Prilikom korišćenja ugrađenog “DC blocker” bloka u Simulink-u nije omogućeno proizvoljno podešavanje frekvencije odabiranja digitalnog filtera, a njena vrijednost je automatski prepodešena tako da odgovara definisanom koraku simulacije. Iz ovog razloga model digitalnog filtera za eliminaciju opadajuće jednosmjerne komponente prepodešeno radi sa velikom frekvencijom odabiranja $f_s = 100$ kHz, koja se razlikuje od frekvencije odabiranja sa kojom radi model zaštitne funkcije digitalnog releja $f_{od} = 4$ kHz. U realnim uređajima digitalne relejne zaštite frekvencija odabiranja digitalnog filtera je jednaka frekvenciji odabiranja sa kojom radi zaštitna funkcija. Sa aspekta rada zaštitne funkcije releja, koja je osnovni predmet istraživanja u okviru disertacije, najvažnije je obezbjediti što efikasniju eliminaciju opadajuće jednosmjerne komponente, dok sam tip metode za eliminaciju ima sekundarni značaj. Svi analizirani algoritmi digitalne relejne zaštite u disertaciji mogu biti korišteni u kombinaciji i sa

drugim filterskim rješenjima, ukoliko ona efikasno eliminišu opadajuću jednosmjernu komponentu. Jedno od mogućih rješenja za primjenu u relejnim zaštitama predstavlja karakteristični harmonijski digitalni filter (Characteristic Harmonic Digital Filter), koji je predložen u [64]. Ovaj filter je zasnovan na proračunu razlika uzastopnih odbiraka signala:

$$s_f(t) = s(t) - s(t - T_s), \quad (2.4.4)$$

Prethodno naučno-istraživačko iskustvo u radu sa ovim filterom, u vezi primjene na algoritme za poprečnu diferencijalnu zaštitu, pokazalo je veliku brzinu filtera (kašnjenje od samo jednog odbirka), ali i veliku osjetljivost na komponente signala frekvencija većih od 50 Hz. Efikasan rad ovog filtera puno zavisi od analognog filtriranja signala, jer se postavlja uslov da granična frekvencija analognog filtera bude veoma blizu frekvencije od 50 Hz (dolazi do povećanja kašnjenja analognog filtera). Takođe, pri svom radu ovaj filter značajno mijenja amplitudu i fazu ulaznog signala, pa je za određene primjene neophodno uvesti odgovarajuće korekcije.

Moguće je projektovati digitalni eliptički filter koji bi radio sa frekvencijom odabiranja od 4 kHz, a da pri tome posjeduje karakteristike približno jednake karakteristikama korišćenog modela eliptičkog filtra. Takav filter bi bio istog reda kao i korišteni model (6. red), ali bi njegova normalizovana granična frekvencija bila jednaka 0.02. Na Sl.2.1 su prikazani amplitudska karakteristika i grupno kašnjenje korišćenog modela filtera i odgovarajućeg projektovanog modela filtera za rad sa frekvencijom odabiranja od 4 kHz (odgovara modelu zaštitne funkcije).

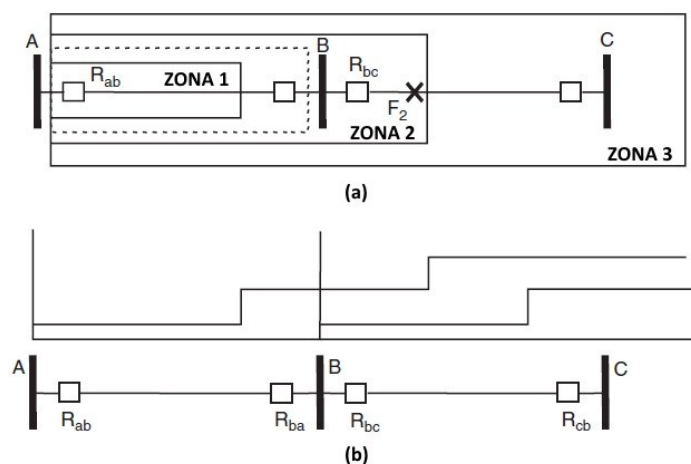


Sl.2.4.3 Karakteristike korišćenog modela digitalnog eliptičkog filtera 6. reda i normalizovane granične frekvencije 0.001 (rad sa frekvencijom odabiranja 100 kHz) i projektovanog digitalnog eliptičkog filtera 6. reda i normalizovane granične frekvencije 0.02 (rad sa frekvencijom odabiranja 4 kHz): (a) amplitudske karakteristike, (b) grupna kašnjenja

3. TRADICIONALNE RELEJNE ZAŠTITE DVOSTRUKOG NADZEMNOG VODA

3.1. Distantna zaštita dvostrukog nadzemnog voda

Selektivna zaštita nadzemnih vodova u petljastim mrežama realizuje se distantnim relejima, koji kao dodatni kriterijum koriste udaljenost kvara od releja. Distantna zaštita je u opštem slučaju selektivna ako su distantni releji usmjereni, montirani na oba kraja nadzemnog voda i reaguju brže ako mjere manju impedansu [23]. Uobičajena distantna zaštita se sastoji od šest individualnih distantnih releja čime je omogućeno detektovanje svakog tipa kvara u trofaznim sistemima [65]. Uopštena ideja za princip rada distantne zaštite jednostrukog nadzemnog voda (JNV) prikazana je na Sl.3.1.1 za primjer trostepene zaštite [66].

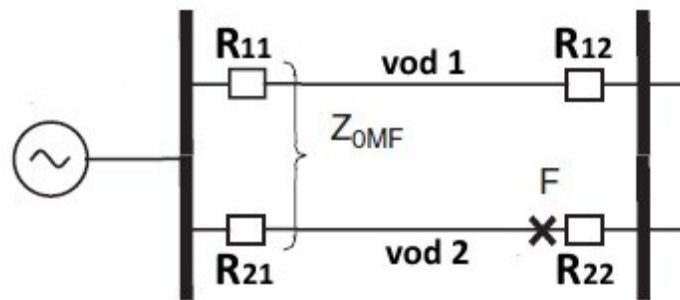


Sl.3.1.1 Uopštena ideja za princip rada distantne zaštite JNV-a – primjer trostepene zaštite: (a) zone zaštite distantnog releja na početku dionice JNV-a; (b) stepenaste karakteristike vrijeme-impedansa distantnih releja [66]

Na Sl.3.1.1.(a) isprekidanom linijom je prikazana željena dužina zone zaštite distantnog releja R_{ab} . U „idealnom” slučaju relej R_{ab} bi trebao da reaguje bez vremenskog kašnjenja za sve kvarove unutar željene zone zaštite. Krajnja tačka zone zaštite distantnog releja ne može biti precizno određena u realnim uslovima i shodno tome je neophodno prihvatiti određenu nesigurnost pri njenom određivanju, koja tipično iznosi oko 5% u odnosu na podešeni prag reagovanja releja [66]. Iz prethodnog razloga prag reagovanja distantnog releja se obično podešava na 85-90% dužine štice vodova, jer se na ovaj način postiže sigurnost da relej neće reagovati bez vremenskog kašnjenja pri kvarovima iza sabirnica B. Zbog ovakvog podešenja distantni relej ne štiti

kompletan vod, već samo njegov dio obuhvaćen zonom 1. Ostatak voda se štiti zonom 2 u kojoj distantni relej reaguje sa vremenskim kašnjenjem. Prag reagovanja distantnog releja u zoni 2 se obično podešava na 120-150% dužine štice vod (vod AB) [66]. Kao posljedica prethodnog dolazi do preklapanja zone 2 distantnog releja R_{ab} i zone 1 distantnog releja R_{bc} . Da bi se osigurala selektivnost distantne zaštite, mora biti uspostavljena koordinacija između podešenih vremena reagovanja releja R_{ab} u zoni 2 i R_{bc} u zoni 1. Iz prethodnog razloga se vrijeme reagovanja u zoni 2 releja R_{ab} podešava na tipične vrijednosti 0,25-0,35 s, čime se postiže sigurnost da kvarovi na vodu BC budu isključeni kao posljedica reagovanja releja R_{bc} u zoni 1 bez vremenskog kašnjenja. Zona 2 releja R_{ab} također služi kao rezerva u slučaju izostanka reagovanja releja R_{bc} u zoni 1. Analogno poput releja R_{ab} i relej R_{bc} posjeduje sopstvenu zonu zaštite 2, čime se postiže zaštita kompletnog voda BC. Da bi se osigurala rezerva u slučaju izostanka reagovanja releja R_{bc} u zoni 2, relej R_{ab} posjeduje i zonu zaštite 3, koja se prostire do 120-180% dužine voda BC. I u slučaju zone zaštite 3 releja R_{ab} , neophodno je uspostaviti koordinaciju podešenog vremena reagovanja u odnosu na podešeno vrijeme reagovanja releja R_{bc} u zoni 2, čime se osigurava selektivnost zaštite (vrijeme reagovanja distantnog releja u zoni zaštite 3 se obično podešava na 1 s). Preklapanje stepenastih karakteristika vrijeme-impedansa releja R_{ab} i R_{bc} je prikazano na Sl.3.1.1.(b). Distantni releji se prema istom principu postavljaju i na druge krajeve vodova AB i BC (releji R_{ba} i R_{cb}), pri čemu se uspostavlja analogno preklapanje odgovarajućih stepenastih karakteristika kao i u slučaju releja R_{ab} i R_{bc} . Distantni releji moraju biti postavljeni na oba kraja štice vod da bi se osiguralo potpuno izolovanje mjesta kvara u slučaju dvostrano napajanih sistema.

U slučaju DNV-a dolazi do određenih komplikacija prilikom primjene koncepta distantne zaštite. Suština problema je sadržana u činjenici da postoji velika vrijednost međusobne impedanse nultog redoslijeda (međusobne induktivnosti uzrokovane blizinom paralelnih vodova) [5], [66], što je ilustrovano na Sl.3.1.2. Kod DNV-a upotrebljavaju se četiri trofazna distantna releja, što je analogno slučaju distantne zaštite dva potpuno nezavisna JNV-a.



Sl.3.1.2 Distantna zaštita DNV-a sa istaknutim problemom postojanja velike vrijednosti međusobne impedanse nultog redoslijeda [66]

3.1.1 Kratak pregled postojećeg istraživanja u oblasti distantne zaštite DNV-a

Jedna od prvih naučnih publikacija, koja široj svjetskoj javnosti predstavlja koncept distantne zaštite za nadzemne vodove, je članak [67], koji datira iz davne 1931. godine. U ovom članku se već ističe mogućnost primjene koncepta distantne zaštite na DNV i pominje se da distantni releji mogu biti adekvatna zamjena diferencijalnim relejima, ukoliko se realizuju sa dovoljnom preciznošću i brzinom reagovanja. Isti autori predstavljaju široj naučnoj javnosti i koncept trofazne distantne zaštite u članku [68].

Na DNV-u mogu da nastanu i netipični kvarovi poput uzastopnih jednofaznih kvarova sa zemljospojem u različitim fazama dva paralelna voda. Konvencionalni distantni releji bi ovakav kvar detektovali kao dvofazni na oba paralelna voda, što bi rezultovalo njihovim trofaznim isključenjem i onemogućavanjem primjene tehnike jednofaznog APU-a. Kao rješenje prethodnog problema, predložen je koncept integrisane distantne zaštite [69].

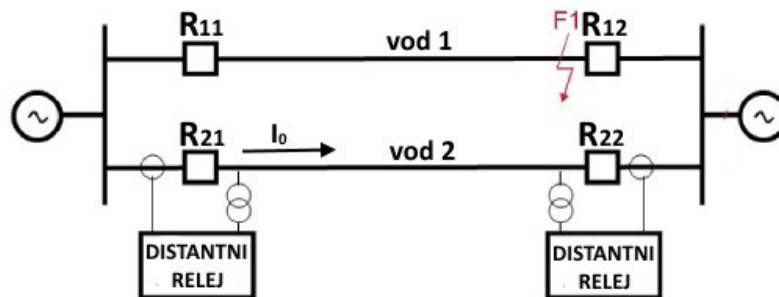
Osnovna komplikacija prilikom primjene konvencionalne distantne zaštite na slučaj DNV-a je neophodnost kompenzacije greške usljed postojanja velike vrijednosti međusobne impedanse nultog redoslijeda, koja najčešće iznosi 50-70% vrijednosti sopstvene impedanse nultog redoslijeda [5]. Da bi se kompenzovala prethodna greška, distantni relej postavljen na jedan vod mora mjeriti sopstvenu struju nultog redoslijeda, ali i struju nultog redoslijeda paralelnog voda. Primjena mikroprocesorskih releja je omogućila jednostavniju realizaciju distantne zaštite DNV-a sa mogućnošću prilagođenja pragova reagovanja u zavisnosti od radnog režima EES-a [6]. Uvažavanje uticaja promjenljivosti radnog režima EES-a na rad distantnih releja je omogućeno konceptom prilagodljive ili adaptivne zaštite [7]. Sličan koncept adaptivne distantne

zaštite DNV-a, koji omogućava kompenzaciju greške usljed međusobne impedanse nultog redoslijeda i u slučaju kada direktno mjerenje struje nultog redoslijeda paralelnog voda nije moguće, predložen je u članku [8]. Primjena koncepta adaptivne distantne zaštite je proširena i na serijski kompenzovane DNV-ove [9].

Na osnovu prethodnog razmatranja, može se zaključiti da je najveći broj naučnih članaka, u kojima su predstavljeni rezultati istraživanja distantne zaštite DNV-a, posvećen minimizaciji grešaka u radu distantnih releja usljed postojanja međusobne impedanse nultog redoslijeda. Koncept adaptivne distantne zaštite se u dosadašnjem istraživanju pokazao kao najzapaženiji u pogledu rješavanja prethodnog problema.

3.1.2 Problemi u radu distantne zaštite DNV-a

Usljed postojanja velike vrijednosti međusobne impedanse nultog redoslijeda, distantna zaštita DNV-a može da reaguje neselektivno. Prethodni problem je predstavljen na Sl.3.1.3.



Sl.3.1.3 Problem selektivnosti distantne zaštite DNV-a u slučaju kvara sa zemljospojem [5]

Kada se dogodi kvar sa zemljospojem na jednom od paralelnih vodova, kao npr. kvar F1 prikazan na Sl.3.1.3, struje nultog redoslijeda se uspostavljaju i na drugomvodu (vod bez kvara). Te struje indukuju padove napona nultog redoslijeda na vod sa kvarom što utiče na rad distantnih releja. Kao što je prikazano na Sl.3.1.3, struja I_0 će indukovati pad napona nultog redoslijeda na vod 1 koji će uticati na povećanje napona koji mjeri relej R11 (struje mjerene od strane releja R11 i R21 su istog smjera), a samim tim i na povećanje odgovarajuće mjerene impedanse. Kao posljedica prethodnog, može se dogoditi da relej R11 detektuje kvar nastao u zoni zaštite 1, kao kvar iz zone zaštite 2. Istovremeno, struja I_0 će uticati na smanjenje napona koji mjeri relej R12 (struje mjerene od strane releja R12 i R22 su suprotnog smjera), a samim tim i na smanjenje

odgovarajuće mjerene impedanse. Prethodna činjenica može uticati na rad distantnih releja „iza” DNV-a, koji su u koordinaciji sa prikazanim distantnim relejima DNV-a, na način da oni detektuju kvar u zoni zaštite 1, što bi dovelo do neselektivnog isključenja voda nastavljenog na DNV sa Sl.3.1.3.

Konvencionalna trofazna distantna zaštita JNV-a se sastoji od šest individualnih distantnih jedinica, čime se postiže osjetljivost za svaku vrstu kvara. Ulazne veličine konvencionalnih trofaznih distantnih releja su prikazane u Tab.3.1.1 [23]. Na osnovu podataka za ulazne struje, prikazanih u Tab.3.1.1, moguće je zapaziti da je pri mjerenju impedanse, kod distantne zaštite JNV-a, potrebno uvažiti uticaj struje nultog redoslijeda u slučaju jednofaznih kratkih spojeva (uvažavanje sopstvene impedanse nultog redoslijeda JNV-a).

Tab.3.1.1 Ulazne veličine konvencionalnih trofaznih distantnih releja [23]

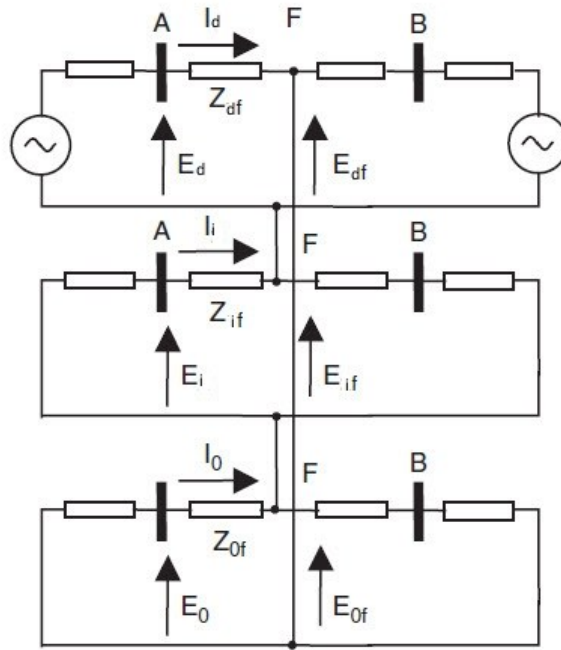
Oznaka distantne jedinice	Ulazni napon \underline{U}_r	Ulazna struja \underline{I}_r	Vrsta kvara
R1	\underline{U}_{AB}	$\underline{I}_A - \underline{I}_B$	$AB, ABC, AB0$
R2	\underline{U}_{BC}	$\underline{I}_B - \underline{I}_C$	$BC, ABC, BC0$
R3	\underline{U}_{CA}	$\underline{I}_C - \underline{I}_A$	$AC, ABC, AC0$
R4	\underline{U}_A	$\underline{I}_A + k\underline{I}_0$	$A0, AB0, AC0, ABC$
R5	\underline{U}_B	$\underline{I}_B + k\underline{I}_0$	$B0, AB0, BC0, ABC$
R6	\underline{U}_C	$\underline{I}_C + k\underline{I}_0$	$C0, AC0, BC0, ABC$

Iako se struje nultog redoslijeda pojavljuju i u slučaju dvofaznih kvarova sa zemljospojem, korišćenjem linijskih napona i razlika faznih struja kao ulaznih veličina distantnih jedinica (distantne jedinice R1, R2 i R3 iz Tab.3.1.1), njihov uticaj je već kompenzovan i nije potrebno uvoditi posebne korekcije. Korekcija mjerene impedanse za JNV (k u Tab.3.1.1), naophodna u slučaju jednofaznih kratkih spojeva, data je sljedećim izrazom:

$$k = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_d}{\underline{Z}_d}, \quad (3.1.1)$$

gdje su \underline{Z}_d i \underline{Z}_0 impedanse direktnog i nultog redoslijeda JNV-a.

Prethodno data korekcija je neophodna za tačno mjerenje impedanse od lokacije releja do lokacije jednofaznog kvara. Na Sl.3.1.4 prikazano je tipično kolo simetričnih komponenti za slučaj zemljospoja faze A JNV-a.



Sl.3.1.4 Tipično kolo simetričnih komponenti u slučaju zemljospoja faze A JNV-a [66]

Na osnovu kola simetričnih komponenti sa Sl.3.1.4, uz pretpostavku da je napon na mjestu kvara jednak nuli (metalni kratak spoj), vrijedi sljedeći izraz za napon na mjestu kvara [66]:

$$\begin{aligned} \underline{E}_{af} &= \underline{E}_{df} + \underline{E}_{if} + \underline{E}_{of} = (\underline{E}_d + \underline{E}_i + \underline{E}_0) - \underline{Z}_{df}(\underline{I}_d + \underline{I}_i) - \underline{Z}_{of}\underline{I}_0 = \\ &= \underline{E}_a - \underline{Z}_{df}\underline{I}_a - (\underline{Z}_{of} - \underline{Z}_{df})\underline{I}_0 = 0. \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

Gdje su: \underline{E}_{df} , \underline{E}_{if} i \underline{E}_{of} naponi na mjestu kvara direktnog, inverznog i nultog redoslijeda, redom; \underline{E}_d , \underline{E}_i i \underline{E}_0 naponi čvora A direktnog, inverznog i nultog redoslijeda, redom; \underline{I}_d , \underline{I}_i i \underline{I}_0 struje direktnog, inverznog i nultog redoslijeda, redom; \underline{Z}_{df} i \underline{Z}_{of} impedanse od čvora A do lokacije kvara F direktnog i nultog redoslijeda, redom.

Na osnovu izraza (3.1.2) dobija se izraz za mjerenu impedansu distantne jedinice [66]:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_{df} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{I}_a + \frac{\underline{Z}_{of} - \underline{Z}_{df}}{\underline{Z}_{df}} \underline{I}_0}. \quad (3.1.3)$$

Za isti slučaj kvara, u svrhu obezbjeđivanja selektivnosti distantne zaštite DNV-a, pored uticaja sopstvene impedanse nultog redoslijeda, neophodno je uvažiti i uticaj međusobne impedanse nultog redoslijeda. Mjerena impedansa jedinice distantnog releja

za isti jednofazni kvar sa zemljospojem, ali u slučaju DNV-a, data je sljedećim izrazom [66]:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_{df} = \frac{\underline{E}_a}{\underline{I}_a + \frac{\underline{Z}_{0f} - \underline{Z}_{df}}{\underline{Z}_{df}} \underline{I}_{01} + \frac{\underline{Z}_{0mf}}{\underline{Z}_{df}} \underline{I}_{02}}, \quad (3.1.4)$$

gdje su: \underline{I}_{01} i \underline{I}_{02} struje nultog redoslijeda voda sa kvarom i njemu paralelnog voda bez kvara, redom; \underline{Z}_{0mf} je međusobna impedansa nultog redoslijeda.

Da bi se obezbijedilo tačno mjerenje impedanse distantne jedinice releja za jednofazni kvar sa zemljospojem (distantne jedinice R4, R5 i R6 iz Tab.3.1.1), u slučaju DNV-a, kao ulaznu veličinu, potrebno je dovesti sljedeću struju [66]:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_a + k\underline{I}_{01} + m\underline{I}_{02}, \quad (3.1.5)$$

gdje je m koeficijent kompenzacije uticaja struje nultog redoslijeda voda u paraleli.

Poređenjem izraza (3.1.4) i (3.1.5), može se zaključiti da izraz za koeficijent m glasi:

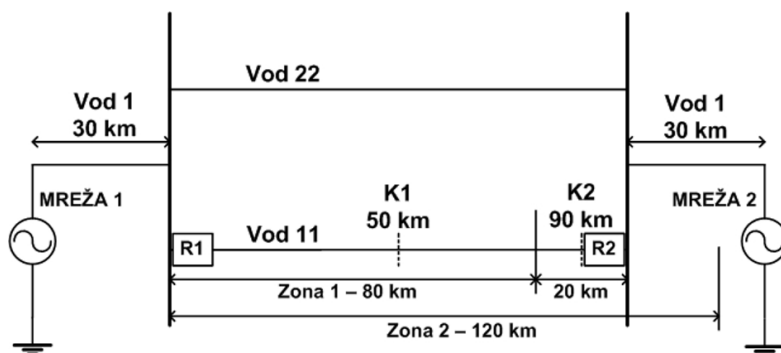
$$m = \frac{\underline{Z}_{0mf}}{\underline{Z}_{df}}. \quad (3.1.6)$$

Realizacija distantne zaštite DNV-a je komplikovanija u odnosu na konvencionalnu distantnu zaštitu JNV-a zbog postojanja međusobne impedanse nultog redoslijeda. Da bi se postigla selektivnost distantnim jedinicama za jednofazne kvarove, neophodno je kao ulaznu veličinu dovesti struju datu izrazom (3.1.5).

3.1.3 Ispitivanje distantne zaštite DNV-a

Distantna zaštita je ispitivana upotrebom interaktivnog simulatora rada relejne zaštite, koji je predstavljen u poglavlju 2, na modelu EES-a sa dvostrano napajanim DNV-a, čija je pojednostavljena električna šema prikazana na Sl.3.1.5.

Konstruktivne karakteristike i geometrijski raspored provodnika na stubovima DNV-a sa Sl.3.1.5 (paralelni vodovi sa oznakama: vod 11 i vod 22) su detaljno opisani u prethodnom poglavlju. U analiziranom modelu EES-a upotrijebljen je netransponovan model DNV-a, čime je omogućeno ispitivanje distantne zaštite za kritičniji slučaj. Dužina voda je $l = 100$ km. Nazivni napon sistema je 400 kV.



Sl.3.1.5 Pojednostavljena električna šema modela EES-a sa dvostrano napajanim DNV-om za ispitivanje distantne zaštite [65]

Mreže sa Sl.3.1.5 su modelovane kao realni izvori napajanja sa sljedećim parametrima: M1 - 400 kV, 1200 MVA, $X/R = 10$; M2: 385 kV, 1000 MVA, $X/R = 8$. Više podataka o modelima JNV-ova, sa oznakom Vod 1 na slici, dužine 30 km, koji povezuju modele mreža sa modelom DNV-a, moguće je pronaći u [37]. Prethodni podaci nisu od velikog značaja za analizu koja slijedi.

Analiziran je rad distantnih releja postavljenih na vodu 11 (releji R1 i R2 sa Sl.3.1.5). Pri realizaciji distantnih releja, odabrana je ugaono admitansna karakteristika reagovanja (mho karakteristika), definisana sljedećim izrazom:

$$\left(\operatorname{real}(\underline{Z}_m) - zR_C\right)^2 + \left(\operatorname{imag}(\underline{Z}_m) - zX_C\right)^2 \leq \left(z \frac{|\underline{Z}_v|}{2}\right)^2, \quad (3.1.7)$$

gdje su: \underline{Z}_m - mjerena impedansa distantnog releja, \underline{Z}_v - impedansa voda direktnog redoslijeda, z - koeficijent za podešavanje zone reagovanja, R_C , X_C - koordinate centra mho karakteristike, definisane izrazima (3.1.8) i (3.1.9).

$$R_C = \frac{|\underline{Z}_v|}{2} \cos(\arg(\underline{Z}_v)), \quad (3.1.8)$$

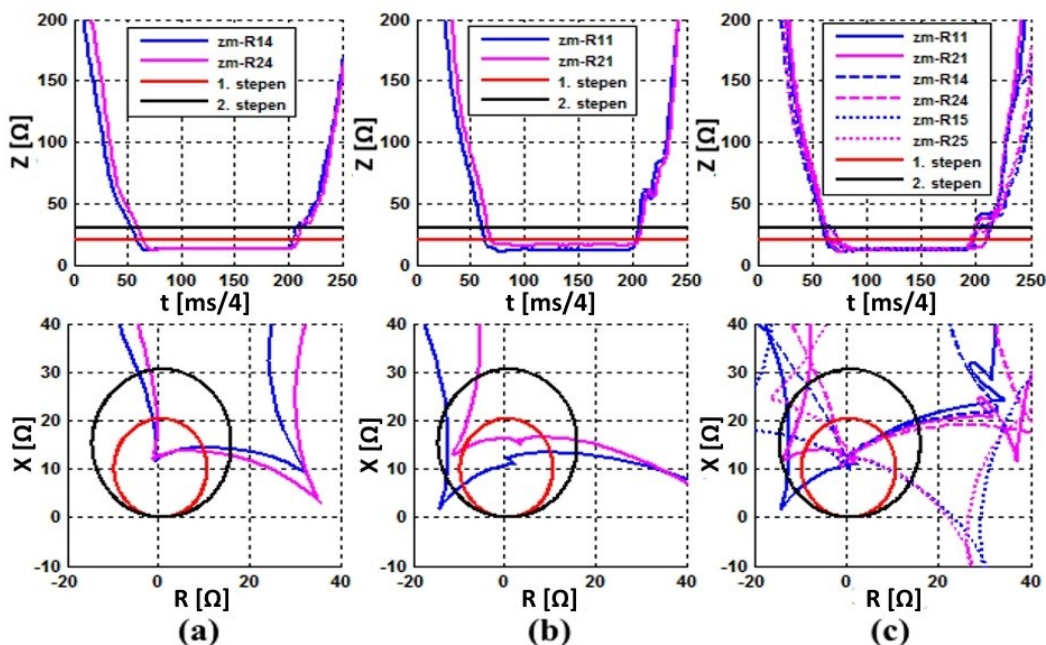
$$X_C = \frac{|\underline{Z}_v|}{2} \sin(\arg(\underline{Z}_v)). \quad (3.1.9)$$

Vrijednosti mjerene impedanse \underline{Z}_m su određene ulaznim veličinama releja iz Tab.3.1.1, uz neophodne korekcije struje za DNV. Vrijednost impedanse voda 11 direktnog redoslijeda je $\underline{Z}_v = 1,43 + j25,43 \Omega$. Koeficijent za podešavanje zone zaštite 1 (prvi stepen) ima vrijednost $z_1 = 0,8$ (80% dužine voda), dok je njegova vrijednost u zoni zaštite 2 (drugi stepen) $z_2 = 1,2$ (120% dužine voda). Uslovi reagovanja distantnih releja u zonama zaštite 1 i 2 su određeni ispunjenošću uslova (3.1.7).

U svrhu testiranja selektivnosti distantne zaštite DNV-a sa uvaženim koeficijentima kompenzacije struja nultog redoslijeda prema izrazu (3.1.5), simulirani su različiti tipovi kvara na dvije lokacije prikazane na Sl.3.1.5:

- K1 na udaljenosti 50 km od početka voda 11 (zona zaštite 1),
- K2 na udaljenosti 90 km od početka voda 11 (zona zaštite 2).

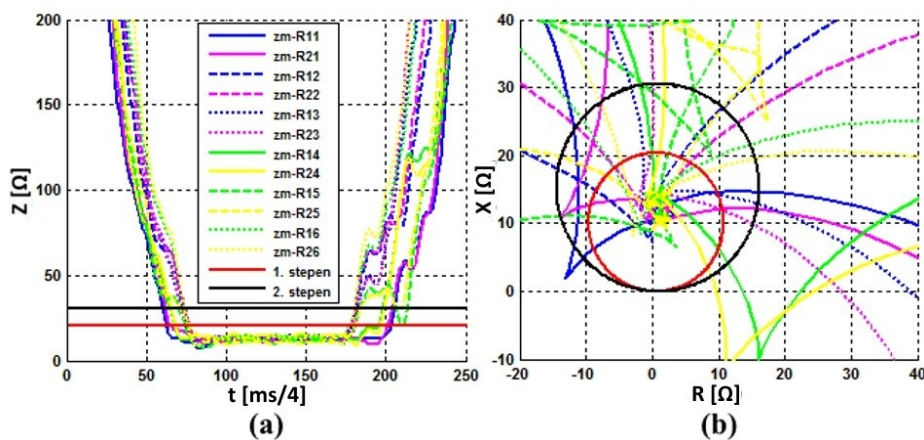
Na Sl.3.1.6 su prikazani rezultati testiranja za slučaj kvarova A0, AB i AB0, na lokaciji K1, dok su na Sl.3.1.7 prikazani odgovarajući rezultati testiranja za slučaj kvara ABC na istoj lokaciji. Posmatrane su promjene modula mjerenih impedansi i hodografi distantnih jedinica datih u Tab.3.1.1 sa uvaženim koeficijentom kompenzacije za DNV prema izrazu (3.1.6). Granice zona zaštite 1 i 2 su prikazane crvenom i crnom bojom, redom.



Sl.3.1.6 Promjene modula mjerenih impedansi i odgovarajući hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 za slučaj kvarova na lokaciji K1: (a) jednofazni kratak spoj A0; (b) dvofazni kratak spoj bez zemljospoja AB; (c) dvofazni kratak spoj sa zemljospojem AB0 [65]

Sa grafika (a) na Sl.3.1.6 može se uočiti da su u prvom stepenu (zona zaštite 1) reagovala distantne jedinice R14 i R24 (jedinica R4 iz Tab.3.1.1), na početku i kraju voda 11 za slučaj kvara A0, čime je ostvarena selektivnost distantne zaštite. Identičan zaključak važi za distantne jedinice R11 i R21 u slučaju kvara AB, što je prikazano na grafiku (b). Pri kvaru AB0, za koji su rezultati prikazani na grafiku (c), reaguju po tri

distantne jedinice u prvom stepenu, na početku i kraju voda 11: R11, R21, R14, R24, R15 i R25, što znači da je zaštita selektivna i u ovom slučaju kvara.



Sl.3.1.7 Rezultati simulacije trofaznog kratkog spoja ABC na lokaciji K1: (a) promjene modula mjerenih impedansi; (b) hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 [65]

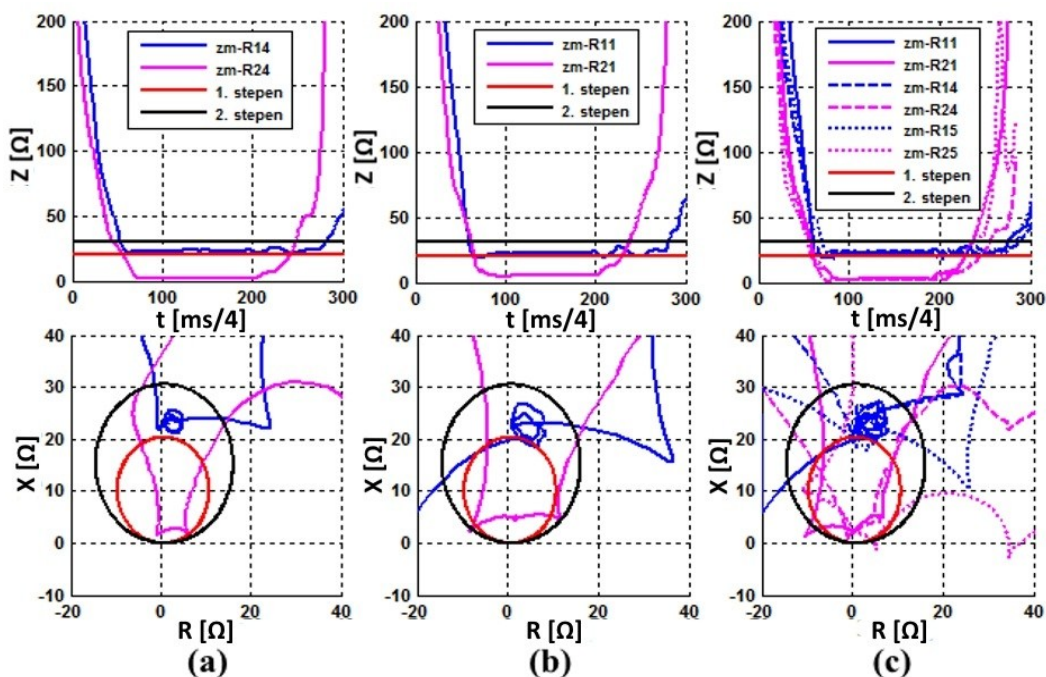
Na osnovu rezultata za slučaj trofaznog kvara ABC na lokaciji K1, koji su prikazani na graficima (a) i (b) sa Sl.3.1.7, može se zaključiti da je zaštita reagovala selektivno, jer je u prvom stepenu reagovalo svih šest distantnih jedinica i na početku i na kraju dionice voda 11 (releji R1 i R2).

Na Sl.3.1.8 su prikazani rezultati testiranja za slučaj kvarova A0, AB i AB0, na lokaciji K2, dok su na Sl.3.1.9 prikazani odgovarajući rezultati testiranja za slučaj kvara ABC na istoj lokaciji.

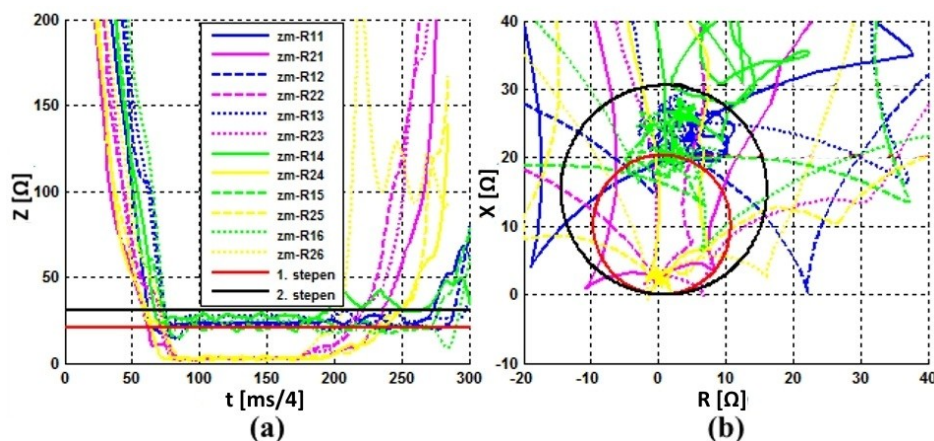
Sa grafika (a) na Sl.3.1.8 može se uočiti da je u prvom stepenu (zona zaštite 1) reagovala distantna jedinica R24, dok je jedinica R14 (relej R1 na početku voda 11), reagovala u drugom stepenu (zona zaštite 2) za slučaj kvara A0, čime je ostvarena selektivnost distantne zaštite. Identičan zaključak važi za distantne jedinice R11 i R21 u slučaju kvara AB, što je prikazano na grafiku (b). Pri kvaru AB0, za koji su rezultati prikazani na grafiku (c), distantne jedinice R21, R24 i R25 na kraju voda 11 reaguju u prvom stepenu, dok distantne jedinice R11, R14 i R15 na početku voda 11 reaguju u drugom stepenu, čime je potvrđena selektivnost zaštite i u ovom slučaju kvara. Moguće je zapaziti da su vrijednosti mjerenih impedansi distantnih jedinica releja R1 blizu granice između zona zaštite 1 i 2.

Na osnovu rezultata za slučaj trofaznog kvara ABC na lokaciji K2, koji su prikazani na graficima (a) i (b) sa Sl.3.1.9, može se zaključiti da je zaštita ponovo

reagovala selektivno, jer su u prvom stepenu reagovala distantne jedinice releja R2, dok su u drugom stepenu reagovala distantne jedinice releja R1.



Sl.3.1.8 Promjene modula mjerenih impedansi i odgovarajući hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 za slučaj kvarova na lokaciji K2: (a) jednofazni kratak spoj A0; (b) dvofazni kratak spoj bez zemljospoja AB; (c) dvofazni kratak spoj sa zemljospojem AB0 [65]



Sl.3.1.9 Rezultati simulacije trofaznog kratkog spoja ABC na lokaciji K2: (a) promjene modula mjerenih impedansi; (b) hodografi distantnih jedinica releja R1 i R2 [65]

U svim prethodnim testovima distantna zaštita DNV-a, sa uvaženim koeficijentima kompenzacije struja nultog redosljeda prema izrazu (3.1.5), se pokazala kao selektivna. U nastavku je rad distantne zaštite DNV-a dodatno testiran za tri karakteristična slučaja:

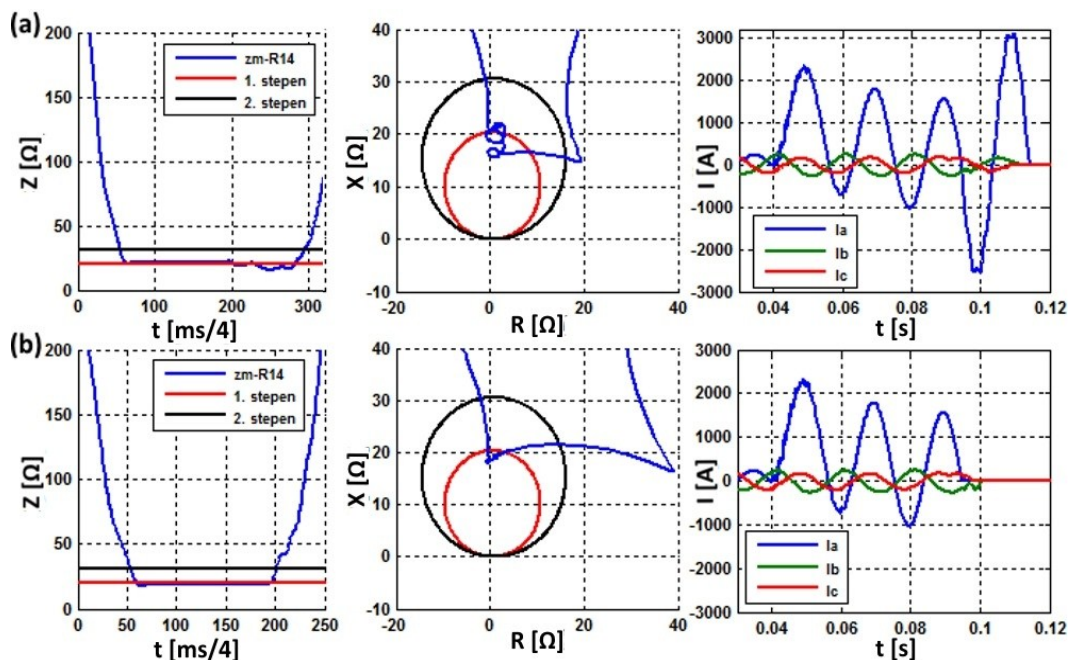
(S1) Poređenje rada distantne zaštite DNV-a bez i sa uvažavanjem koeficijenta kompenzacije uticaja struje nultog redoslijeda voda u paraleli m , datog izrazom (3.1.6).

(S2) Uticaj modela transpozicije DNV-a (netransponovan i potpuno transponovan DNV) na rad distantne zaštite (koeficijent kompenzacije m uvažen).

(S3) Uticaj zanemarenja međusobne kapacitivnosti nultog redoslijeda DNV-a ($C_{m0} \approx 0$) na rad distantne zaštite (koeficijent kompenzacije m i model potpuno transponovanog DNV-a uvaženi).

U svim prethodnim slučajevima testiran je rad distantnog releja R1 na primjeru jednofaznog kvara A0 na vodu 11 sa Sl.3.1.5. Kod ovog testiranja, pored promjena mjerene impedanse i hodografa odgovarajuće distantne jedinice, posmatrane su i promjene faznih struja. Zbog kraćeg vremena izvršavanja simulacija, drugi stepen distantne zaštite je podešen da reaguje sa vremenskim kašnjenjem od 40 ms (prvi stepen zaštite reaguje bez vremenskog kašnjenja, tj. odmah nakon procjene vrijednosti mjerene impedanse).

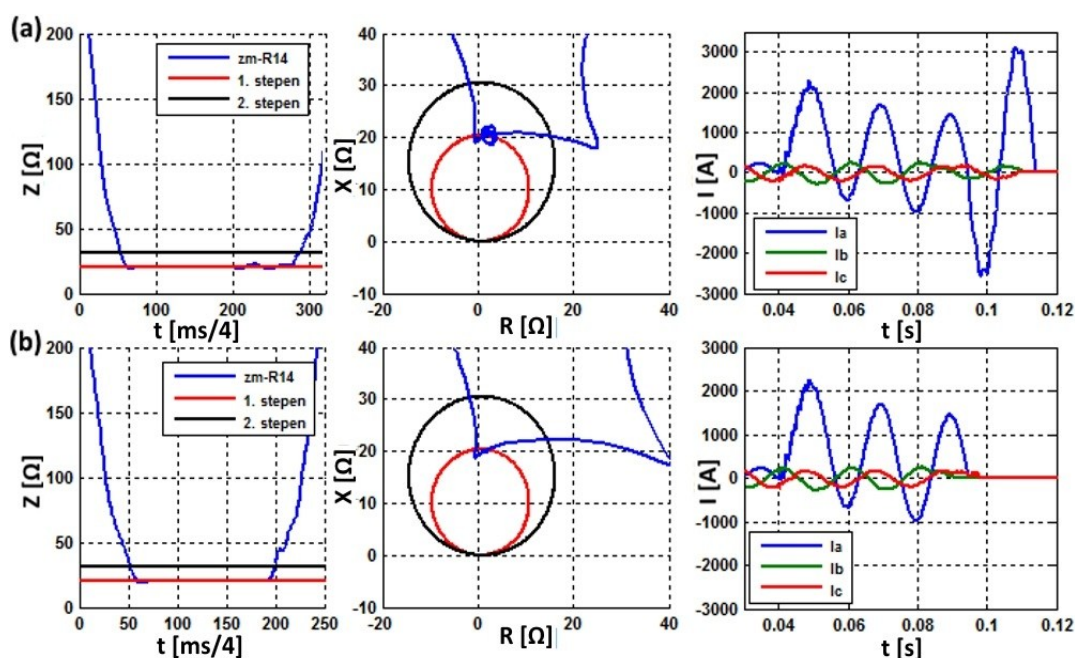
U okviru slučaja (S1), kvar je simuliran u prvom stepenu zaštite na udaljenosti 75 km od početka voda 11, a odgovarajući rezultati su prikazani na Sl.3.1.10.



Sl.3.1.10 Promjene modula mjerene impedanse, hodograf distantne jedinice R14 i promjene faznih struja i za analizirani slučaj S1: (a) bez uvažavanja koeficijenta kompenzacije m ; (b) sa uvažavanjem koeficijenta kompenzacije m [65]

Na osnovu grafika (a) sa Sl.3.1.10, može se zaključiti da distantna jedinica R14 nije reagovala u prvom stepenu za analizirani slučaj kvara, jer je vrijednost mjerene impedanse veća od granice reagovanja za zonu zaštite 1 iako je kvar nastao u pomenutoj zoni. Zaštita je nepravilno reagovala u drugom stepenu i kvar je isključen tek nakon podešenog vremenskog kašnjenja. Vrijednost mjerene impedanse je veća od stvarne vrijednosti impedanse direktnog redoslijeda do mjesta kvara, jer nije uvažen koeficijent kompenzacije usljed uticaja nulte struje paralelnog voda (vod 22 sa Sl.3.1.5). Uvažavanjem koeficijenta kompenzacije m , definisanog izrazom (3.1.6), dobijaju se rezultati prikazani na grafiku (b). Može se zapaziti da distantni relej R1 u ovom slučaju pravilno reaguje u prvom stepenu i da je struja kvara isključena bez podešenog vremenskog kašnjenja.

U okviru slučaja (S2), kvar je simuliran u prvom stepenu zaštite na udaljenosti 79 km od početka voda 11 (blizu granice zone zaštite 1), a odgovarajući rezultati su prikazani na Sl.3.1.11.

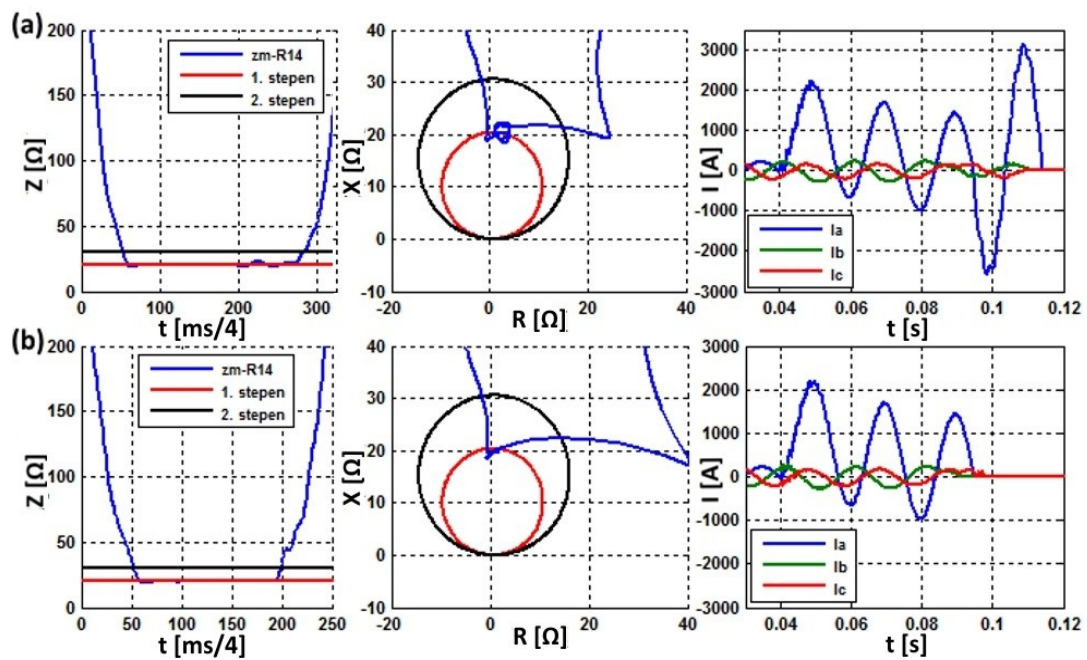


Sl.3.1.11 Promjene modula mjerene impedanse, hodograf distantne jedinice R14 i promjene faznih struja i za analizirani slučaj S2: (a) netransponovan DNV; (b) potpuno transponovan DNV [65]

Analizom grafika (a) sa Sl.3.1.11, može se uočiti da distantna jedinica releja R14 reaguje u drugom stepenu, iako je kvar nastao u zoni zaštite 1. Uzrok prethodnog nepravilnog reagovanja zaštite je upotreba modela netransponovanog DNV-a, koji

uvažava međusobne impedanse direktnog i inverznog redoslijeda. Distantna zaštita je zasnovana samo na mjerenju impedanse direktnog redoslijeda, na osnovu čega su i podešeni pragovi reagovanja. Kod modela netransponovanog voda, mjerena impedansa distantne jedinice R14 je veća od pretpostavljene (Z_d), što uzrokuje manju osjetljivost zaštite u prvom stepenu. Za potpuno isti slučaj kvara, upotrebom modela potpuno transponovanog DNV-a, distantna zaštita reaguje ispravno u prvom stepenu, što se može zaključiti na osnovu grafika (b). Analizirani slučaj je razmatran uz uvažavanje koeficijenta kompenzacije m . Ukoliko se pragovi reagovanja distantne zaštite podese u odnosu na model potpuno transponovanog DNV-a, a u pogonskim uslovima se radi o netransponovanom DNV-u, dolazi do greške u mjerenju impedanse i kvarovi bliski kraju zone zaštite 1 mogu biti pogrešno detektovani kao kvarovi u zoni zaštite 2.

U okviru slučaja (S3), kvar je simuliran u prvom stepenu zaštite na udaljenosti 79.5 km od početka voda 11 (veoma blizu granice zone zaštite 1), a odgovarajući rezultati su prikazani na Sl.3.1.12.



Sl.3.1.12 Promjene modula mjerene impedanse, hodograf distantne jedinice R14 i promjene faznih struja i za analizirani slučaj S3: (a) sa uvažavanjem međusobne kapacitivnosti nultog redoslijeda C_{m0} ; (b) bez uvažavanja međusobne kapacitivnosti nultog redoslijeda C_{m0} [65]

Na osnovu grafika (a) sa Sl.3.1.12, može se uočiti da distantna jedinica R14 nije reagovala u prvom stepenu, iako su uvaženi koeficijent kompenzacije m i model

potpuno transponovanog DNV-a. Greška mjerene impedanse je prisutna zbog postojanja međusobne kapacitivnosti nultog redoslijeda C_{m0} . Zbog konačne vrijednosti kapacitivnosti C_{m0} , mali dio nulte struje se uspostavlja od voda bez kvara (vod 22) do mjesta kvara na vodu 11, što uzrokuje mjerenje manje struje na lokaciji releja R1. Kao posljedica prethodnog, mjerena impedansa je veća od stvarne impedanse direktnog redoslijeda od lokacije releja R1 do mjesta kvara. Zanemarenjem C_{m0} u modelu DNV-a, distantna jedinica R14 reaguje u prvom stepenu, što se može vidjeti sa grafika (b) na Sl.3.1.12.

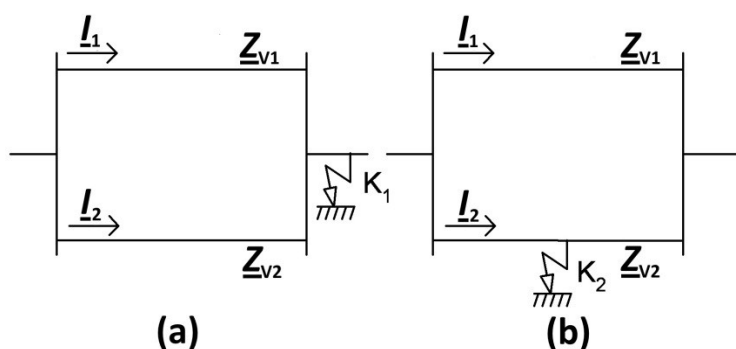
Ukoliko se pragovi reagovanja distantne zaštite podese u odnosu na model DNV-a bez uvažavanja kapacitivnosti C_{m0} , koja je prisutna u pogonskim uslovima, dolazi do greške u mjerenju impedanse i kvarovi bliski kraju zone zaštite 1 mogu biti pogrešno detektovani kao kvarovi u zoni zaštite 2.

Kroz analizu rezultata testiranja distantne zaštite DNV-a, za slučajeve (S1), (S2) i (S3), uočava se značaj preciznosti modelovanja DNV-a. Upotreba tačnijeg modela DNV-a, pri podešavanju pragova reagovanja distantnih releja, može poboljšati osjetljivost zaštite.

Konvencionalna distantna zaštita JNV-a je dosta komplikovanija i skuplja u odnosu na prostije zaštite [23]. U slučaju DNV-a distantna zaštita postaje još komplikovanija zbog neophodnosti kompenzacije uticaja struja nultog redoslijeda u slučaju kvarova sa zemljospojem. Veća komplikovanost zaštite dovodi do smanjenja pouzdanosti njenog rada. Takođe, postojanje mrtve zone u prvom stepenu reagovanja (doseg zone zaštite 1 je manji od dužine voda) uzrokuje kaskadno isključenje kvarova koji nastaju u blizini krajeva voda. Distantni releji su osjetljivi i na oscilovanje snage u mreži, koje može da dovede do neselektivnog reagovanja [23]. Iz prethodnih razloga za zaštitu DNV-a se često koristi poprečna diferencijalna zaštita, koja se odlikuje jednostavnošću, nižom cijenom, većom pouzdanošću i brzinom reagovanja i neosjetljivošću na oscilovanje snage kroz vod [23].

3.2. Poprečna diferencijalna zaštita dvostrukog nadzemnog voda

Paralelni vodovi, koji polaze i završavaju se na zajedničkim sabirnicama, najčešće se štite poprečnom diferencijalnom zaštitom [22], [23]. Preduslov za primjenu poprečne diferencijalne zaštite je da su oba paralelna voda u pogonu. Kada je u pogonu samo jedan od paralelnih vodova, poprečna diferencijalna zaštita nije selektivna i zbog toga mora biti blokirana. Iz prethodnog razloga, ova zaštita ne može biti jedina zaštita DNV-a, pa se onda često koristi u kombinaciji sa distantnom ili prekostrujnom zaštitom. Uopštena ideja za princip rada poprečne diferencijalne zaštite je prikazana na Sl.3.2.1.



Sl.3.2.1 Uopštena ideja za princip rada poprečne diferencijalne zaštite: (a) kvar izvan dionice DNV-a; (b) kvar unutar dionice DNV-a [23]

Kao što se može vidjeti na prethodnoj slici, ako su impedanse paralelnih vodova približno jednake ($Z_{v1} \approx Z_{v2}$) u normalnim radnim režimima ili pri kvaru K_1 izvan dionice DNV-a, struje paralelnih vodova će takođe biti približno jednake (slučaj (a) sa Sl.3.2.1). Pri kvaru na jednom od paralelnih vodova (unutar dionice DNV-a), npr. pri kvaru K_2 (slučaj (b) sa Sl.3.2.1), struje paralelnih vodova će biti različite, što se može iskoristiti kao kriterijum za djelovanje zaštite [22], [23].

3.2.1 Kratak pregled postojećeg istraživanja u oblasti poprečne diferencijalne zaštite DNV-a

Prva naučna publikacija, koja široj svjetskoj javnosti predstavlja ideju poprečne diferencijalne zaštite za paralelne vodove, je članak [10] koji datira iz davne 1915. godine. U pomenutom članku predložena je primjena tkz. stabilizovanih elektromagnetskih strujnih diferencijalnih releja, koji realizuju uopštenu ideju principa rada poprečne diferencijalne zaštite, predstavljenu na Sl.3.2.1. Slična realizacija pomenutih elektromagnetskih releja je prisutna i u modernijoj statičkoj generaciji

zaštita, npr. statički diferencijalni stabilizovani relej se primjenjivao i za zaštitu energetskog transformatora [23].

U toku devedesetih godina prošlog vijeka došlo je do ubrzane primjene poprečne diferencijalne zaštite zasnovane na mikroprocesorskim relejima [11], [12], [13]. Sa razvojem digitalne generacije relejnih zaštita, pojavili su se razni algoritmi za poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a, koji su takođe naslijedili princip rada sa Sl.3.2.1. Osnovna podjela pomenutih algoritama je na one za neusmjerenu i usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu.

Algoritmi za neusmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu u svom radu ne koriste informacije o faznim uglovima električnih signala. Ovi algoritmi su zasnovani na poređenju amplituda struja paralelnih vodova gdje veća amplituda struje ukazuje na vod sa kvarom [70]. Tipičan primjer ovakvog algoritma, koji koristi priraštaje apsolutnih vrijednosti struja paralelnih vodova, je dat u naučnim člancima [14], [15]. Sličan algoritam, zasnovan na priraštajima suma apsolutnih vrijednosti struja paralelnih vodova na intervalu dužine jedne periode osnovne frekvencije, predložen je u [16].

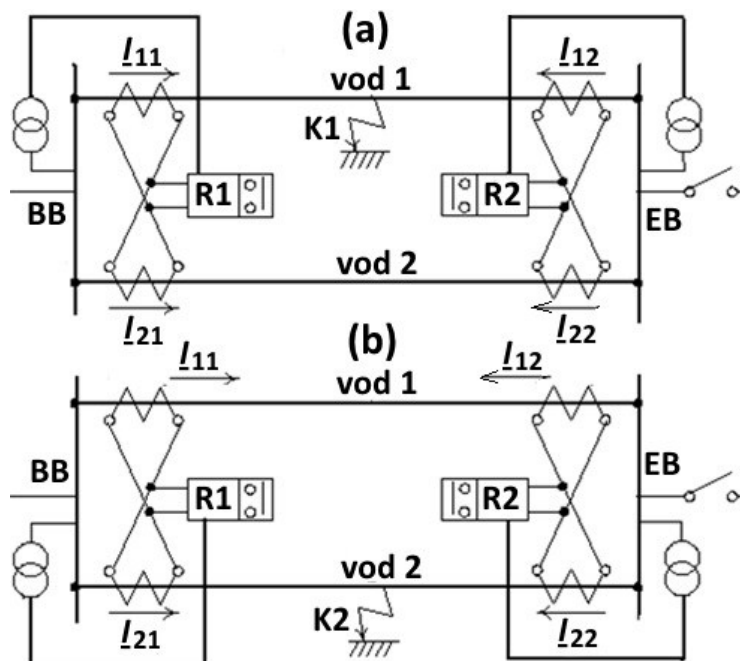
Algoritmi za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu u svom radu koriste informacije o faznim uglovima električnih signala. Ovi algoritmi su zasnovani na procjeni faznih pomjeraja struja kvara u odnosu na odgovarajuće referentne veličine. Najčešće korišćene referentne veličine za određivanje smjera struja kvara DNV-a su linijski naponi zajedničkih sabirnica [17], [70]. Kod ovih algoritama fazni uglovi struja kvara ukazuju na vod u kvaru. Najpoznatiji algoritam ovog tipa, koji se često primjenjuje u praksi, objedinjuje faznu i nultu strujnu diferencijalnu zaštitu i oslanja se na mjerenja šest struja (fazne struje oba voda u paraleli) i tri napona (fazni naponi zajedničkih sabirnica) sa strane svakog diferencijalnog releja [18]. Koriste se dva nezavisna diferencijalna releja, po jedan sa svake strane DNV-a. Princip rada ovog algoritma, koji predstavlja „klasičnu” usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, biće detaljno opisan u nastavku ovog poglavlja. Kao posebnu grupu algoritama, u okviru koncepta usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, moguće je izdvojiti one koji ne koriste naponske signale kao referentne veličine za određivanje smjera struja kvara DNV-a [19], [71] i [72]. Pomenuti algoritmi koriste struju koja prethodi režimu kvara kao referentnu veličinu za određivanje smjera struje kvara i na taj način eliminišu

potrebu za primjenom naponskih mjernih transformatora. Posebno poglavlje u ovoj disertaciji je posvećeno analizi algoritama poprečne diferencijalne zaštite zasnovanih samo na signalima struja.

Pored algoritama iz prethodne podjele u naučnoj literaturi se mogu pronaći i algoritmi koje nije jednostavno kategorizovati. U ovu grupu se mogu svrstati algoritmi zasnovani na: sinhronizovanim jedinicama za mjerenje fazora [73], objedinjenom konceptu rada poprečne i podužne diferencijalne zaštite [20], detekciji putujućih talasa u intervalu dužine jedne poluperiode [74], objedinjenom konceptu rada distantne i poprečne diferencijalne zaštite [21], usmjerenom elementu koji koristi višekriterijumski fuzzy sistem odlučivanja [75] i primjeni wavelet transformacija [76].

3.2.2 Princip rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite DNV-a

Osnovni princip rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite je zasnovan na poređenju faznih uglova diferencijalnih struja, pored poređenja njihovih amplituda ili efektivnih vrijednosti. Pojednostavljena šema pomenutog koncepta rada je prikazana na Sl.3.2.2. Referentna veličina za određivanje smjera diferencijalnih struja je napon sabirnica [77].



Sl.3.2.2 Pojednostavljena šema principa rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) kvar na vodu 1; (b) kvar na vodu 2 [23]

Diferencijalni releji na početku i kraju dionice DNV-a su označeni sa R1 i R2, redom, dok su odgovarajuće sabirnice označene sa BB i EB. Prethodne oznake sa istim značenjem biće korišćene konzistentno u nastavku disertacije. Diferencijalne struje je moguće definisati na sljedeći način [77]:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{D1} &= \underline{I}_{11} - \underline{I}_{21} = I_{11} e^{j\phi_{11}} - I_{21} e^{j\phi_{21}} = I_{D1} e^{j\phi_{D1}}, \\ \underline{I}_{D2} &= \underline{I}_{12} - \underline{I}_{22} = I_{12} e^{j\phi_{12}} - I_{22} e^{j\phi_{22}} = I_{D2} e^{j\phi_{D2}},\end{aligned}\quad (3.2.1)$$

gdje su: I_{11} , I_{21} , I_{12} i I_{22} efektivne vrijednosti struja DNV-a mjerenih na četiri lokacije prema šemi na Sl.3.2.2; ϕ_{11} , ϕ_{21} , ϕ_{12} i ϕ_{22} fazni uglovi odgovarajućih struja DNV-a.

Smjerovi diferencijalnih struja određuju koji od dva voda je u kvaru. Razlikuju se tri slučaja [77]:

(1) Režim bez kvara ili kvar van dionice DNV-a za koji važe sljedeći uslovi:

$$\begin{aligned}I_{11} &\approx I_{21} \wedge \phi_{11} \approx \phi_{21} \Rightarrow I_{D1} = 0, \\ I_{12} &\approx I_{22} \wedge \phi_{12} \approx \phi_{22} \Rightarrow I_{D2} = 0.\end{aligned}\quad (3.2.2)$$

(2) Kvar na vodu 1 za koji važe sljedeći uslovi:

$$\begin{aligned}I_{11} &> I_{21}, \phi_{11} \approx \phi_{21}, \\ I_{12} &\approx I_{22}, \phi_{12} = \phi_2, \phi_{22} = \phi_2 + 180^\circ,\end{aligned}\quad (3.2.3)$$

gdje je ϕ_2 referentni fazni ugao za dif. relej R2.

Diferencijalne struje za ovaj slučaj kvara su jednake:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{D1} &= (I_{11} - I_{21}) e^{j\phi_{11}} = I_{D1} e^{j\phi_{D1}}, \\ \underline{I}_{D2} &= I_{12} (e^{j\phi_2} - e^{j(\phi_2 + 180^\circ)}) = 2I_{12} e^{j\phi_2} = I_{D2} e^{j\phi_{D2}},\end{aligned}\quad (3.2.4)$$

gdje je I_{D1K1} efektivna vrijednost diferencijalne struje releja R1 pri kvaru K1.

(3) Kvar na vodu 2 za koji važe sljedeći uslovi:

$$\begin{aligned}I_{11} &< I_{21}, \phi_{11} \approx \phi_{21}, \\ I_{12} &\approx I_{22}, \phi_{12} = \phi_2 + 180^\circ, \phi_{22} = \phi_2.\end{aligned}\quad (3.2.5)$$

Diferencijalne struje za ovaj slučaj kvara su jednake:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{D1} &= (I_{11} - I_{21}) e^{j\phi_{11}} = -I_{D1} e^{j\phi_{D1}}, \\ \underline{I}_{D2} &= I_{12} (e^{j(\phi_2 + 180^\circ)} - e^{j\phi_2}) = -2I_{12} e^{j\phi_2} = -I_{D2} e^{j\phi_{D2}}.\end{aligned}\quad (3.2.6)$$

Poređenjem izraza (3.2.4) i (3.2.6) može se zaključiti da su diferencijalne struje za slučajeve kvara na istoj lokaciji na vodovima 1 i 2 u protivfazi. Prethodni zaključak važi za oba releja R1 i R2.

Osnovni princip rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite je zasnovan na određivanju efektivnih vrijednosti ili amplituda diferencijalnih struja, čime se ostvaruje selektivnost pri razlikovanju kvarova unutar i izvan štíćene dionice, i faznih uglova diferencijalnih struja, čime se ostvaruje selektivnost pri razlikovanju kvarova na jednom i drugom paralelnom vodu u sistemu DNV-a [70]. Kriterijumi reagovanja usmjerene poprečne diferencijalne zaštite neusmjerelog i usmjerelog elementa su dati sljedećim izrazima, redom [70]:

$$|\underline{I}_1 - \underline{I}_2| > D, \quad (3.2.7)$$

$$\varphi_{D\min} < \arg\left(\frac{|\underline{I}_1 - \underline{I}_2| e^{j\varphi_D}}{|\underline{U}_L|}\right) < \varphi_{D\max}, \quad (3.2.8)$$

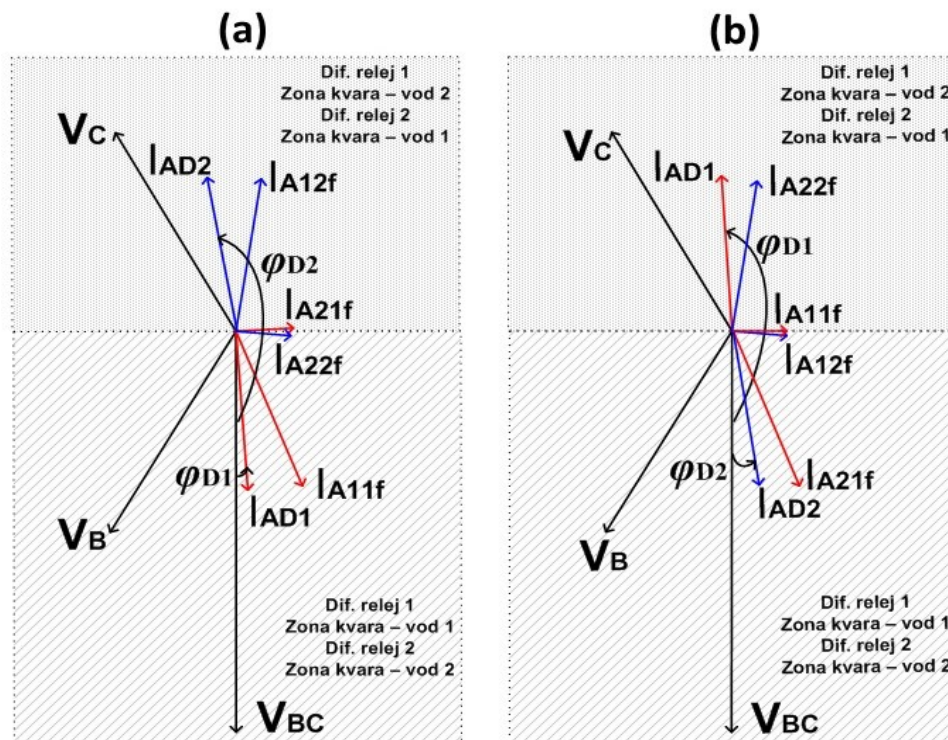
gdje su: \underline{I}_1 – struja voda 1; \underline{I}_2 – struja voda 2; \underline{U}_L – linijski napon (referentna veličina); φ_D – fazni ugao diferencijalne struje u odnosu na referentni napon; D – podešeni prag reagovanja neusmjerelog elementa; $\varphi_{D\min}$ i $\varphi_{D\max}$ – minimalni i maksimalni fazni ugao reagovanja usmjerelog elementa.

Za razliku od neusmjerene poprečne diferencijalne zaštite, usmjerena varijanta kao dodatni kriterijum reagovanja koristi fazni pomjeraj diferencijalne struje u odnosu na odgovarajući linijski napon koji predstavlja referentnu veličinu. Kriterijumi reagovanja (3.2.7) i (3.2.8) se posebno definišu za diferencijalne releje na početku i kraju dionice DNV-a (R1 i R2). Pri određivanju referentne veličine, usmjereni elementi oba diferencijalna releja najčešće koriste spregu sa pomjerajem „90°”, koja je prikazana u sljedećoj tabeli [23]:

Tab.3.2.1 Određivanje referentne veličine usmjerelog elementa – sprega sa pomjerajem „90°” [23]

Relej u fazi	Sprega sa pomjerajem „90°”	
	Referentni napon	Diferencijalna struja
A	U_{BC}	I_{AD}
B	U_{CA}	I_{BD}
C	U_{AB}	I_{CD}

Za selektivan rad usmjerenog elementa potrebno je pravilno odrediti minimalni i maksimalni fazni ugao reagovanja φ_{Dmin} i φ_{Dmax} . Na Sl.3.2.3 su prikazani približni fazorski dijagrami koji odgovaraju slučajevima jednopolnog kratkog spoja u fazi A na sredini dionice paralelnih vodova 1 i 2, koji čine sistem DNV-a, dužine 200 km, čiji parametri su dati u prilogu 1.



Sl.3.2.3 Fazorski dijagrami sa karakterističnim veličinama usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) jednopolni kratak spoj Az na sredini dionice voda 1 (100 km od početnih sabirnica BB); (b) jednopolni kratak spoj Az na sredini dionice voda 2 (100 km od početnih sabirnica BB)

Na fazorskim dijagramima prikazanim na Sl.3.2.3 zanemaren je pad napona na DNV-u. Fazori I_{A11f} , I_{A21f} , I_{A12f} i I_{A22f} predstavljaju struje iz režima kvara, mjerene na četiri karakteristične lokacije DNV-a (mjerne jedinice sa Sl.2.4.1). Napon V_{BC} predstavlja referentnu veličinu za određivanje faznog ugla diferencijalnih struja, jer se koristi sprega sa pomjerajem „90°”. U slučaju jednopolnog kratkog spoja na vodu 1, koji je prikazan dijagramu (a), fazori napona V_{BC} i diferencijalne struje I_{AD1} (dif. relej 1 – R1) su približno u fazi ($\varphi_{D1} \approx 0^\circ$), dok je fazor diferencijalne struje I_{AD2} u približnoj protivfazi u odnosu na fazor napona V_{BC} ($\varphi_{D2} \approx 180^\circ$). U slučaju jednopolnog kratkog spoja na vodu 2, koji je prikazan na dijagramu (b), fazori napona V_{BC} i diferencijalne struje I_{AD1} (dif. relej 1 – R1) su približno u protivfazi ($\varphi_{D1} \approx 180^\circ$), dok je fazor

diferencijalne struje I_{AD2} približno u fazi sa naponom V_{BC} ($\varphi_{D2} \approx 0^\circ$). Prethodne konstatacije ukazuju na mogućnost definisanja odgovarajućih zona reagovanja usmjerenih elemenata diferencijalnih releja 1 i 2 (R1 i R2). Za granične uglove $\varphi_{Dmin} = -90^\circ$ i $\varphi_{Dmax} = 90^\circ$ dobija se pravolinijska karakteristika usmjerenog releja koja dijeli ravan fazorskog dijagrama na dva dijela, kao što je prikazano na Sl.3.2.3. Donja i gornja ravan sa dijagrama (a) i (b) na Sl.3.2.3, predstavljaju zone reagovanja usmjerenog elementa dif. releja 1 (R1) za kvarove na vodovima 1 i 2, redom. U slučaju usmjerenog elementa dif. releja 2 (R2), pomenute donja i gornja ravan predstavljaju zone reagovanja za kvarove na vodovima 2 i 1, redom.

Na osnovu prethodne analize moguće je definisati sljedeće kriterijume reagovanja usmjerenog elementa dif. releja 1 i 2 (R1 i R2):

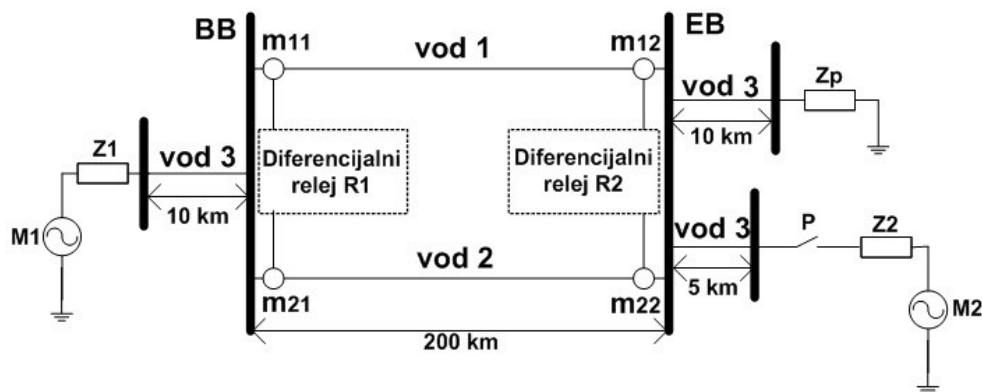
$$relej_R1 \rightarrow -90^\circ < \arg\left(\frac{|I_{11} - I_{21}| e^{j\varphi_{D1}}}{|U_{L1}|}\right) < 90^\circ, \quad (3.2.9)$$

$$relej_R2 \rightarrow 90^\circ < \arg\left(\frac{|I_{12} - I_{22}| e^{j\varphi_{D2}}}{|U_{L2}|}\right) < 270^\circ(-90^\circ). \quad (3.2.10)$$

Ukoliko su prethodni kriterijumi ispunjeni, usmjereni elementi diferencijalnih releja detektuju kvar na vodu 1, u suprotnom kvar je detektovan na vodu 2. Ovako definisana usmjerena poprečna diferencijalna zaštita spada u grupu faznih zaštita, jer se njeni neusmjereni i usmjereni elementi računaju nezavisno u svakoj fazi.

3.2.3 Model EES-a sa DNV-om za testiranje algoritama poprečne diferencijalne zaštite

Usmjerena poprečna diferencijalna zaštita je ispitivana upotrebom interaktivnog simulatora rada relejne zaštite, čija uopštena blok šema je prikazana na Sl.2.4.1, na modelu EES-a sa DNV-om, koji je prikazan na Sl.3.2.4. Pomenuti model EES-a je upotrijebljen i pri testiranju svih ostalih algoritama poprečne diferencijalne zaštite koji su analizirani u nastavku disertacije. Jednostavnim prilagođenjem modela moguće je dobiti dva karakteristična slučaja: dvostrano napajan DNV i jednostrano ili radijalno napajan DNV. Testiranje rada odabranih algoritama poprečne diferencijalne zaštite za prethodne slučajeve je od velikog značaja za naučne doprinose predstavljene u ovoj disertaciji.



Sl.3.2.4 Pojednostavljena šema modela EES-a sa DNV-om za testiranje algoritama poprečne diferencijalne zaštite

Konstruktivne karakteristike i geometrijski raspored provodnika na stubovima DNV-a sa Sl.3.2.4 (paralelni vodovi sa oznakama na slici: vod 1 i vod 2) su detaljno opisani u poglavlju 2. Takođe, prikazane su i vrijednosti električnih poduznih parametara u slučajevima „potpuno” transponovanog i netransponovanog DNV-a u prilogu 1. U analiziranom modelu EES-a upotrijebljen je netransponovan model DNV-a, čime je omogućeno ispitivanje algoritama zaštite za kritičniji slučaj. Nazivni napon DNV-a je 400 kV, dok je njegova dužina 200 km. DNV povezuje početne i završne sabirnice, označene sa BB i EB, redom. Vodovi označeni sa vod 3, vod 4 i vod 5, dužina 10, 5 i 10 km, redom, predstavljaju modele kratkih JNV-ova, koji povezuju model DNV-a sa modelima mreža i potrošača. Poduzni električni parametri svih modela JNV-ova, za slučaj potpune transpozicije provodnika, imaju vrijednosti: $R_d = 0,064 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0,237 \Omega/\text{km}$, $L_d = 1,106 \text{ mH}/\text{km}$, $L_0 = 3,174 \text{ mH}/\text{km}$, $C_d = 10,53 \text{ nF}/\text{km}$, $C_0 = 7,55 \text{ nF}/\text{km}$. Pretpostavljeno je da fazni provodnici JNV-ova predstavljaju snopove od po dva provodnika tipa ACSR - 30/7 i da postoji jedan zemljovodni provodnik od čelika. Više podataka o konstrukcionim karakteristikama i geometrijskom rasporedu provodnika na stubovima za modelovane JNV-ove moguće je pronaći u [37]. Mreže sa Sl.3.2.4 su modelovane kao realni izvori napajanja sa sljedećim parametrima: M1 - 400 kV, 1200 MVA, $X/R = 10$; M2: 385 kV, 1000 MVA, $X/R = 8$. Potrošač Z_P je modelovan rednom vezom otpornosti i induktivnosti čije vrijednosti je moguće mijenjati u zavisnosti od potrebne analize. U većini ispitivanja u nastavku, potrošač je modelovan kao otpornik otpornosti $R_P = 150 \Omega$. Prekidač P je modelovan kao idealan i njegov prepodešeni položaj određuje slučajeve dvostranog i jednostranog napajanja DNV-a. Modeli diferencijalnih releja R1 i R2 su detaljno objašnjeni u poglavlju 2. SMT-i i

NMT-i, na mjernim lokacijama m11, m12, m21 i m22, su zbog jednostavnosti modelovani kao idealni sa prenosnim odnosima 1:1. Uticaj nelinearnosti SMT-a na rad poprečne diferencijalne zaštite je aproksimativno uvažen prilikom definisanja procedure za određivanje pragova reagovanja.

3.2.4 Određivanje pragova reagovanja poprečne diferencijalne zaštite DNV-a

Neophodnost definisanja pragova reagovanja poprečne diferencijalne zaštite je posljedica fizikalnih razlika između dva trofazna voda u sistemu DNV-a. U realnim slučajevima uvijek su prisutne male razlike između karakteristika materijala istofaznih provodnika dva trofazna nadzemna voda u sistemu DNV-a, kao i mala odstupanja u geometrijskom rasporedu provodnika na stubovima, čime je uzrokovana razlika između istofaznih struja na primaru koje se porede prema konceptu poprečne diferencijalne zaštite. Takođe, nesavršena uparenost karakteristika magnećenja strujnih mjernih transformatora (SMT-a), postavljenih na istofazne provodnike, kao i same mjerne greške, doprinose dodatnom odstupanju odgovarajućih struja na sekundaru koje se dovode na ulaze diferencijalnih releja.

U ovoj disertaciji predložen je jednostavan način za modelovanje fizikalnih razlika pojedinačnih trofaznih nadzemnih vodova, koji čine sistem DNV-a [77]. Osnovna ideja je sadržana u razmatranju posljedica pomenutih fizikalnih razlika na električni model DNV-a. Bez obzira o kom algoritmu poprečne diferencijalne zaštite je riječ, pragovi reagovanja se mogu odrediti na način da se testiraju odgovarajući pokazatelji kvara, svojstveni individualnom algoritmu, za slučaj bliskih kvarova izvan štice dionice, pri prethodno pretpostavljenim maksimalnim fizikalnim razlikama između dva paralelna nadzemna voda. Pomenute razlike se mogu uzeti u obzir kroz definisanje koeficijenata razlike između realnih i imaginarnih dijelova elemenata matrice podužnih rednih impedansi električnog modela DNV-a, koja je u poglavlju 2 označena sa \mathbf{Z}' , a čije submatrice su definisane izrazom (2.2.25). Vrijednosti svih elemenata matrice \mathbf{Z}' , za korišćeni model netransponovanog DNV-a, su date u prilogu 1. Izraz (3.2.11) prikazuje pozicije definisanih koeficijenata razlike k_R i k_X u matrici \mathbf{Z}' .

$$\mathbf{Z}' = \begin{bmatrix} k_R R_{11} + jk_X X_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} & \cdots \\ \underline{Z}_{21-S} & k_R R_{22} + jk_X X_{22} & \underline{Z}_{23} & \cdots \\ \underline{Z}_{31-S} & \underline{Z}_{32} & k_R R_{33} + jk_X X_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \underline{Z}_{61-S} & \underline{Z}_{62} & \underline{Z}_{63} & \cdots \end{bmatrix} \quad (3.2.11)$$

Elementi \underline{Z}_{ij} u opštem slučaju predstavljaju sopstvene ($i = j$) ili međusobne ($i \neq j$) svedene podužne redne impedanse provodnika DNV-a, gdje su i i j oznake za fazne provodnike ($i, j = 1, 2, \dots, 6$).

Na osnovu izraza (3.2.11) može se zaključiti da su koeficijenti razlike k_R i k_X definisani samo za sopstvene podužne redne impedanse provodnika prvog trofaznog voda u sistemu DNV-a (razlike između međusobnih impedansi nisu razmatrane zbog jednostavnosti). Značenje ovih koeficijenata, pri datim vrijednostima $k_R \neq 1$ i $k_X \neq 1$, se može zapaziti na osnovu sljedećih izraza:

$$\begin{aligned} k_R R_{11} &\neq R_{44}, \\ k_X X_{11} &\neq X_{44}, \end{aligned} \quad (3.2.12)$$

gdje su: 11 i 44 oznake za istofazni provodnik jednog i drugog trofaznog voda u sistemu DNV-a, redom. Prethodni izraz važi i za preostala dva para istofaznih provodnika (22-55 i 33-66).

Za slučaj identičnih fizikalnih karakteristika dva trofazna voda, umjesto znaka nejednakosti u izrazima (3.2.12) bi bio znak jednakosti, pri vrijednostima koeficijenata $k_R = 1$ i $k_X = 1$, što bi značilo da su istofazne struje DNV-a jednake i po amplitudi i po faznom stavu. Upotrebom koeficijenata k_R i k_X unosi se vještačka razlika između sopstvenih impedansi istofaznih provodnika u modelu DNV-a, koja posljedično uzrokuje razliku između istofaznih struja, što može dovesti do neselektivnog rada poprečne diferencijalne zaštite u režimima bez kvara ili kvara van zone zaštite. U režimima bez kvara, stalno bi bile prisutne male razlike između vrijednosti istofaznih struja, pri čemu zaštita ne bi trebala da reaguje. Zbog očuvanja selektivnosti zaštite neophodno je definisanje pragova reagovanja. Bliski kvarovi van štíćene dionice predstavljaju najkritičniji slučaj u pogledu mogućnosti neselektivnog reagovanja zaštite, jer se vrijednosti obje istofazne struje proporcionalno povećavaju, što dalje dovodi i do povećanja njihove razlike.

Pri određivanju pragova reagovanja proizvoljnog algoritma poprečne diferencijalne zaštite predložena je sljedeća jednostavna procedura, sastavljena od tri koraka:

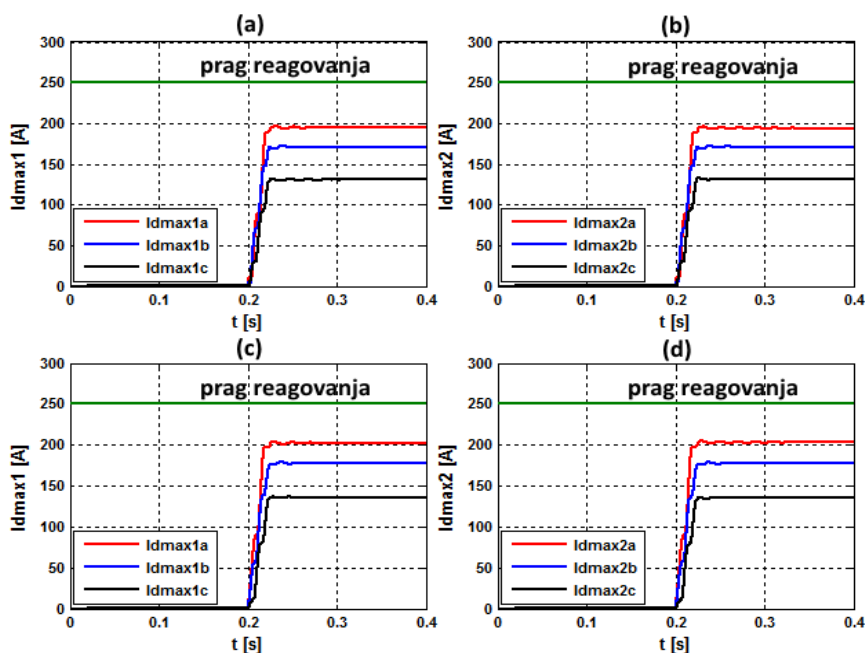
- (1) iskustveno pretpostavljanje vrijednosti koeficijenata k_R i k_X ,
- (2) iniciranje kvara na zajedničkim sabirnicama DNV-a (najbliža lokacija van zone zaštite) i očitavanje maksimalne vrijednosti pokazatelja kvara analiziranog algoritma,
- (3) definisanje konstantne vrijednosti praga reagovanja, koja mora biti veća od maksimalne dobijene vrijednosti pokazatelja kvara zbog očuvanja sigurnosti u slučajevima prisustva mjernih grešaka i razlika između karakteristika magnećenja SMT-a istofaznih provodnika.

Prilikom ispitivanja poprečne diferencijalne zaštite u ovoj disertaciji, na modelu 400 kV DNV-a dužine 200 km (Sl.3.2.4), pretpostavljene su sljedeće vrijednosti koeficijenata razlike $k_R = 1,02$ i $k_X = 1,02$. Prethodne vrijednosti ukazuju na to da su svedene sopstvene podužne impedanse provodnika voda 1 za 2% veće u odnosu na odgovarajuće impedanse provodnika voda 2. Usvajanjem istih vrijednosti koeficijenata $k_R = k_X = 1,02$ postignuto je da se sopstvene impedanse istofaznih provodnika razlikuju samo po efektivnoj vrijednosti (zbog jednostavnosti su zanemarene razlike između faznih stavova). Budući da su vrijednosti sopstvene podužne otpornosti i induktivne reaktanse faznog provodnika DNV-a jednake sljedećim vrijednostima $R_{11}' = 0,077$ Ω/km i $X_{11}' = 0,47$ Ω/km , redom, odgovarajuće uvećane vrijednosti iznose $k_R R_{11}' = 0,079$ Ω/km i $k_X X_{11}' = 0,48$ Ω/km , redom. Na prvi pogled, razlike između podužnih parametara su skoro zanemarljive: $\Delta R_{11}' = k_R R_{11}' - R_{11}' = 0,002$ Ω/km i $\Delta X_{11}' = k_X X_{11}' - X_{11}' = 0,01$ Ω/km , ali za dužinu 200 km one iznose $\Delta R_{11} = 0,4$ Ω i $\Delta X_{11} = 2$ Ω , redom. Posmatrajući sljedeći količnik $\Delta X_{11} / X_{11}' = 4,255$ km, može se zaključiti da se prethodno analizirani slučaj može aproksimativno posmatrati kao slučaj dva fazna provodnika identičnih sopstvenih podužnih reaktansi, pri čemu je jedan za 4,255 km duži od drugog. Prethodni rezultat ukazuje na to da su pretpostavljene vrijednosti koeficijenata razlike nerealno velike, jer je u praksi skoro nemoguće u sistemu DNV-a imati istofazne provodnike čije dužine bi se razlikovale za više od 4 km. Usvajanjem ovih vrijednosti koeficijenata razlike ide se na stranu sigurnosti, za slučaj da su u realnosti prisutne i razlike između međusobnih podužnih rednih impedansi i sopstvenih i međusobnih otočnih admitansi dva trofazna voda, koje nisu posebno analizirane.

Opravdano se može zaključiti da pretpostavljene vrijednosti koeficijenta razlike odgovaraju slučaju kritičnijem od najkritičnijeg mogućeg u realnosti, čime se ide na stranu sigurnosti kod definisanja vrijednosti pragova reagovanja koji obezbjeđuju selektivan rad poprečne diferencijalne zaštite.

3.2.5 Ispitivanje usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u slučaju dvostrano napajanog DNV-a

Na osnovu rezultata početnog testa potrebno je pravilno odrediti i podesiti vrijednosti pragova reagovanja neusmjerenih elemenata zbog ostvarenja selektivnosti pri razlikovanju kvarova unutar i izvan zone zaštite. Prema prvom koraku predložene procedure za određivanje pragova reagovanja, pretpostavljaju se sljedeće vrijednosti koeficijenta razlike: $k_R = 1,02$ i $k_X = 1,02$. Zatim su analizirane vrijednosti neusmjerenih elemenata, definisanih izrazom (3.2.7), za slučaj trolnog kratkog spoja na početnim i završnim sabirnicama DNV-a. Dobijeni rezultati su prikazani na Sl.3.2.5.



Sl.3.2.5 Maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja usmjerene poprečne diferencijalne zaštite i usvojena vrijednost praga reagovanja: trolni kratak spoj na početnim sabirnicama BB – (a) diferencijalni relej R1; (b) diferencijalni relej R2; trolni kratak spoj na završnim sabirnicama EB – (c) diferencijalni relej R1; (d) diferencijalni relej R2

Na osnovu grafika sa Sl.3.2.5 može se uočiti da su posmatrane maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja za oba releja. U slučaju trolnog kratkog spoja na početnim sabirnicama BB, čiji rezultati su prikazani na graficima (a) i (b), za dif. releje

R1 i R2, redom, zabilježena je maksimalna vrijednost diferencijalne struje u fazi A: $I_{dmax1a} \approx I_{dmax2a} \approx 200$ A. Prema rezultatima za slučaj trolnog kratkog spoja na završnim sabirnicama EB, koji su prikazani na graficima (c) i (d), za dif. releje R1 i R2, redom, zabilježena je približno identična maksimalna vrijednost diferencijalne struje, takođe u fazi A. U okviru trećeg koraka predložene procedure za određivanje pragova reagovanja zaštite, neophodno je za pragove reagovanja usvojiti vrijednosti veće od maksimalne zabilježene vrijednosti diferencijalne struje, sa ciljem obezbjeđivanja sigurnosne rezerve u slučaju mjernih grešaka. Usvojena je identična vrijednost za pragove reagovanja neusmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, koja iznosi $D = 250$ A.

Da bi se ispitala selektivnost usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u slučaju dvostrano napajnog DNV-a, simulirana su četiri karakteristična slučaja kvara:

(K.1) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB,

(K.2) dvopolni kratak spoj AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB,

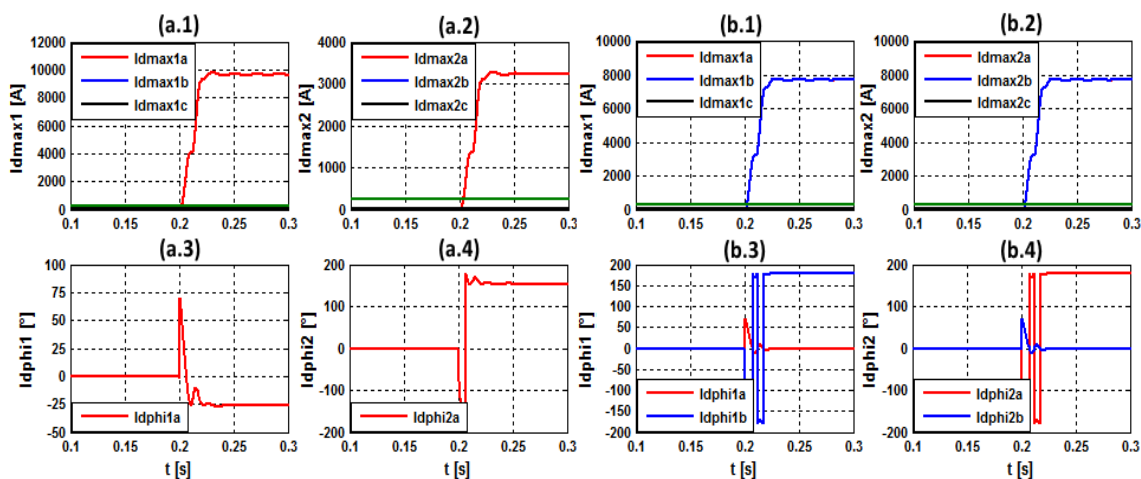
(K.3) dvopolni kratak spoj ACz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB,

(K.4) trolni kratak spoj ABC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB.

U okviru dobijenih rezultata analizirane su maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja (neusmjereni element zaštite) i vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja (usmjereni element zaštite) u odnosu na odgovarajuće referentne napone. Za kvarove na vodu 2, maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja su ilustrativno prikazane sa negativnim predznakom. Amplitude i fazni uglovi diferencijalnih struja su procijenjeni primjenom dobro poznate Furijeove metode [23].

Grafički rezultati za slučajeve kvarova (K.1) i (K.2) su prikazani na Sl.3.2.6, dok su odgovarajući numerički rezultati prikazani u tabelama Tab.3.2.2 i Tab.3.2.3, redom.

Na osnovu grafika (a.1) i (a.2) sa Sl.3.2.6 moguće je zaključiti da je kvar (K.1) selektivno detektovan unutar zone zaštite, jer su amplitude diferencijalnih struja releja R1 i R2 značajno veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Takođe, kvar je selektivno detektovan samo u fazi A. Na graficima (a.3) i (a.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom. Jasno je uočljivo da su diferencijalne struje releja R1 i R2 približno u protivfazi.



Sl.3.2.6 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) dvopolni kratak spoj AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2

Tab.3.2.2 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB

Kvar Az – vod 1 - 50 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{BC}	$\theta_{BC1} = -32,65^\circ$	$\theta_{BC2} = -45,69^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{AD}	$\phi_{AD1} = -26,21^\circ$	$\phi_{AD2} = -206,2^\circ (153,8^\circ)$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{BC} i \underline{I}_{AD}	$\varphi_{AD1} = -6,44^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{AD2} = 160,51^\circ$ Kvar na vodu 1

Tab.3.2.3 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvopolnog kratkog spoja AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB

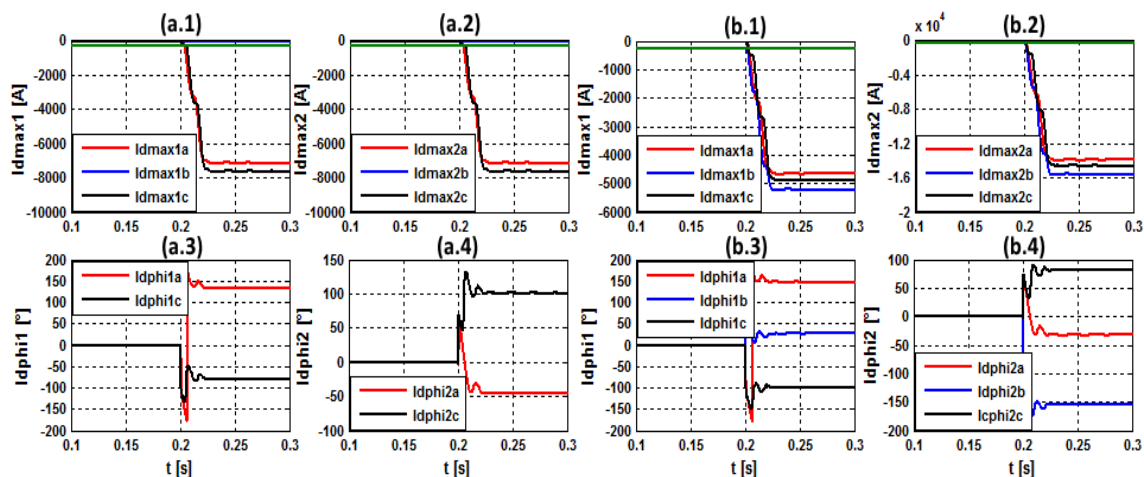
Kvar AB – vod 1 - 100 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{BC}	$\theta_{BC1} = -20,8^\circ$	$\theta_{BC2} = -34,9^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{AD}	$\phi_{AD1} = -2,53^\circ$	$\phi_{AD2} = 177,5^\circ (-182,5^\circ)$
Fazni ugao napona \underline{V}_{CA}	$\theta_{CA1} = -161,8^\circ$	$\theta_{CA2} = -178,3^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{BD}	$\phi_{BD1} = 177,5^\circ (-182,5^\circ)$	$\phi_{BD2} = -2,53^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{BC} i \underline{I}_{AD}	$\varphi_{AD1} = -18,27^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{AD2} = 147,6^\circ$ Kvar na vodu 1
Razlika faznih uglova \underline{V}_{CA} i \underline{I}_{BD}	$\varphi_{BD1} = 20,7^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{BD2} = -175,8^\circ$ Kvar na vodu 1

U Tab.3.2.2 su prikazane procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalne struje i_{AD} i referentnog napona v_{BC} za slučaj kvara (K.1). Na osnovu pomenutih vrijednosti moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalne struje i_{AD} releja R1 i R2 u odnosu na referentni napon v_{BC} , čije vrijednosti iznose $\varphi_{AD1} = -6,44^\circ$ i $\varphi_{AD2} = 160,51^\circ$, redom. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, dati izrazima (3.2.9) i (3.2.10), redom, su zadovoljeni, i zaštita selektivno detektuje kvar na vodu 1.

Amplitude diferencijalnih struja za slučaj kvara (K.2) su prikazane na graficima (b.1) i (b.2) sa Sl.3.2.6, za releje R1 i R2, redom. Kvar je detektovan unutar zone zaštite u fazama A i B, jer su amplitude odgovarajućih diferencijalnih struja veće od podešenih pragova reagovanja za oba dif. releja. Na graficima (b.3) i (b.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom. Kao i u prethodnom slučaju kvara, moguće je zaključiti da su diferencijalne struje releja R1 i R2 približno u protivfazi. Prethodna konstatacija je važeća za obje diferencijalne struje, u fazama A i B. Procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja i_{AD} i i_{BD} i odgovarajućih referentnih napona v_{BC} i v_{CA} za slučaj kvara (K.2) su prikazane u Tab.3.2.3. Na osnovu prethodno procijenjenih vrijednosti faznih uglova moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalnih struja u odnosu na referentne napone. Vrijednosti faznih pomjeraja za dif. relej R1 iznose $\varphi_{AD1} = -18,27^\circ$ i $\varphi_{BD1} = 20,7^\circ$, dok odgovarajuće vrijednosti za dif. relej R2 iznose $\varphi_{AD2} = 147,6^\circ$ i $\varphi_{BD2} = -175,8^\circ$. Kao i u prethodnom slučaju kvara, kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, dati izrazima (3.2.9) i (3.2.10), redom, su zadovoljeni za obje faze A i B, i zaštita selektivno detektuje kvar na vodu 1.

Grafički rezultati za slučajeve kvarova (K.3) i (K.4) su prikazani na Sl.3.2.7, dok su odgovarajući numerički rezultati prikazani u tabelama Tab.3.2.4 i Tab.3.2.5, redom.

Na osnovu grafika (a.1) i (a.2) sa Sl.3.2.7 moguće je zaključiti da je kvar selektivno detektovan unutar zone zaštite u fazama A i C, jer su amplitude diferencijalnih struja releja R1 i R2 značajno veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Amplitude diferencijalnih struja su prikazane sa negativnim predznakom da ilustrativno ukažu na kvarove na vodu 2. Na graficima (a.3) i (a.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom, u fazama obuhvaćenim kvarom. Moguće je uočiti da su diferencijalne struje releja 1 i 2 približno u protivfazi.



Sl.3.2.7 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) dvopolni kratak spoj ACz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) trolpolni kratak spoj ABC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2

Tab.3.2.4 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvopolnog kratkog spoja sa zemljospojem ACz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB

Kvar ACz – vod 2 - 100 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{BC}	$\theta_{BC1} = -40,28^\circ$	$\theta_{BC2} = -55,3^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{AD}	$\phi_{AD1} = 133,7^\circ$	$\phi_{AD2} = -46,3^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{AB}	$\theta_{AB1} = 97,9^\circ$	$\theta_{AB2} = 82,96^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{CD}	$\phi_{CD1} = -79,25^\circ$	$\phi_{CD2} = 100,08^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{BC} i \underline{I}_{AD}	$\varphi_{AD1} = -173,98^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{AD2} = -9^\circ$ Kvar na vodu 2
Razlika faznih uglova \underline{V}_{AB} i \underline{I}_{CD}	$\varphi_{CD1} = 177,15^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{CD2} = -17,12^\circ$ Kvar na vodu 2

Pomoću prethodno procijenjenih vrijednosti faznih uglova, prikazanih u Tab.3.2.4, moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalnih struja u odnosu na referentne napone. Vrijednosti faznih pomjeraja za dif. relej R1 su $\varphi_{AD1} = -173,98^\circ$ i $\varphi_{CD1} = 177,15^\circ$, dok odgovarajuće vrijednosti za dif. relej R2 iznose $\varphi_{AD2} = -9^\circ$ i $\varphi_{CD2} = -17,12^\circ$. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, dati izrazima (3.2.9) i (3.2.10), redom, nisu ispunjeni za obje faze A i C, i zaštita selektivno detektuje kvar na vodu 2.

Tab.3.2.5 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj tropolnog kratkog spoja ABC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB

Kvar ABC – vod 2 - 150 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{BC}	$\theta_{BC1} = -22,92^\circ$	$\theta_{BC2} = -42,84^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{AD}	$\phi_{AD1} = 147,3^\circ$	$\phi_{AD2} = -32,68^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{CA}	$\theta_{CA1} = -143,6^\circ$	$\theta_{CA2} = -165,1^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{BD}	$\phi_{BD1} = 26,31^\circ$	$\phi_{BD2} = -153,7^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{AB}	$\theta_{AB1} = 93,19^\circ$	$\theta_{AB2} = 72,13^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{CD}	$\phi_{CD1} = -98,96^\circ$	$\phi_{CD2} = 81^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{BC} i \underline{I}_{AD}	$\varphi_{AD1} = -170,22^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{AD2} = -10,16^\circ$ Kvar na vodu 2
Razlika faznih uglova \underline{V}_{CA} i \underline{I}_{BD}	$\varphi_{BD1} = -169,91^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{BD2} = -11,4^\circ$ Kvar na vodu 2
Razlika faznih uglova \underline{V}_{AB} i \underline{I}_{CD}	$\varphi_{CD1} = -167,85^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{CD2} = -8,87^\circ$ Kvar na vodu 2

Amplitude diferencijalnih struja za slučaj kvara (K.4) su prikazane na graficima (b.1) i (b.2) sa Sl.3.2.7, za releje R1 i R2, redom. Kvar je detektovan unutar zone zaštite u sve tri faze, jer su amplitude odgovarajućih diferencijalnih struja veće od podešenih pragova reagovanja za oba dif. releja. Na graficima (b.3) i (b.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom. I u ovom slučaju kvara, moguće je zaključiti da su diferencijalne struje releja R1 i R2 približno u protivfazi.

Procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja u svim fazama i odgovarajućih referentnih napona za slučaj kvara (K.4) su prikazane u Tab.3.2.5. Pomoću prethodno procijenjenih vrijednosti faznih uglova moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalnih struja u odnosu na referentne napone. Vrijednosti faznih pomjeraja za dif. relej R1 iznose $\varphi_{AD1} = -170,22^\circ$, $\varphi_{BD1} = -169,91^\circ$ i $\varphi_{CD1} = -167,85^\circ$, dok odgovarajuće vrijednosti za dif. relej R2 iznose $\varphi_{AD2} = -10,16^\circ$, $\varphi_{BD2} = -11,4^\circ$ i $\varphi_{CD2} = -8,87^\circ$. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, dati izrazima (3.2.9) i (3.2.10), redom, nisu ispunjeni za sve tri faze, i kvar na vodu 2 je selektivno detektovan.

Na osnovu rezultata za četiri analizirane vrste kvara, moguće je potvrditi selektivnost usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u slučaju dvostrano napajanog DNV-a.

3.2.6 Ispitivanje usmjerene poprečne diferencijalne zaštite u slučaju jednostrano napajanog DNV-a

Selektivnost usmjerene poprečne diferencijalne zaštite je dodatno ispitivana na modelu jednostrano napajanog DNV-a (radijalna mreža). Kao i u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, na početku je potrebno pravilno odrediti i podesiti vrijednosti pragova reagovanja neusmjerenih elemenata zbog ostvarenja selektivnosti pri razlikovanju kvarova unutar i izvan zone zaštite. U okviru predložene procedure za određivanje pragova reagovanja, pretpostavljene su identične vrijednosti koeficijenta razlike kao i u slučaju dvostrano napajanog DNV-a: $k_R = 1,02$ i $k_X = 1,02$. Potom je simuliran trolpolni kratak spoj na završnim sabirnicama DNV-a (sabirnice EB) u svrhu utvrđivanja vrijednosti neusmjerenih elemenata, definisanih izrazom (3.2.7). Kako je analizirani slučaj kvara ekvivalentan slučaju kvara iz početnog testa kod dvostrano napajanog DNV-a, jer se radi o metalnom kratkom spoju, dobijene su identične maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja kao na graficima (c) i (d) sa Sl.3.2.5. Posljedično je usvojena i identična vrijednost za pragove reagovanja neusmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, koja iznosi $D = 250$ A. Simuliranje trolpolnog kratkog spoja na početnim sabirnicama BB nema smisla u ovoj analizi, jer je DNV napajan samo sa njihove strane (snaga se prenosi radijalno od sabirnica BB do EB).

Da bi se ispitala selektivnost usmjerene poprečne diferencijalne zaštite i u slučaju jednostrano napajanog DNV-a, simulirana su četiri dodatna slučaja kvara:

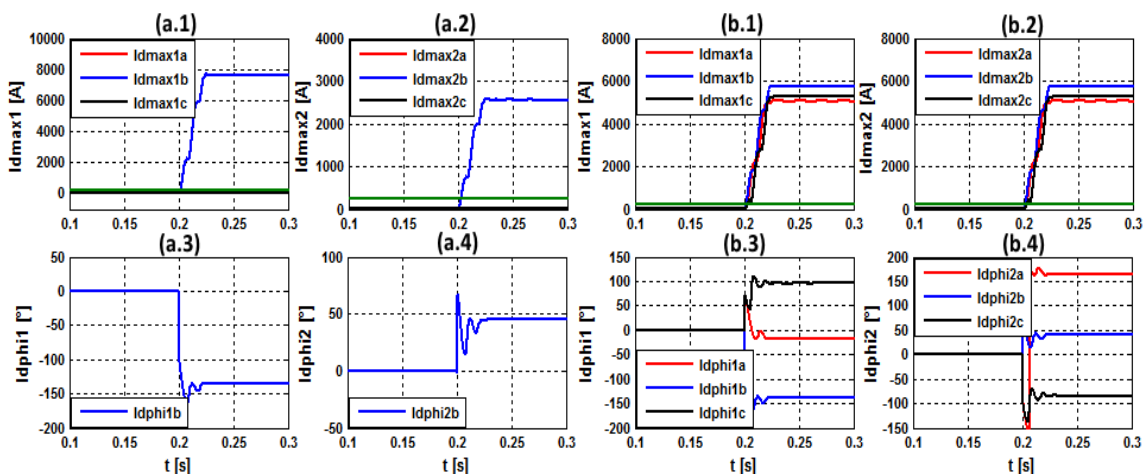
(K.5) jednopolni kratak spoj Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB,

(K.6) trolpolni kratak spoj ABC na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB,

(K.7) dvopolni kratak spoj ABz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB,

(K.8) dvopolni kratak spoj BC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB.

Grafički rezultati za slučajeve kvarova (K.5) i (K.6) su prikazani na Sl.3.2.8, dok su odgovarajući numerički rezultati prikazani u tabelama Tab.3.2.6 i Tab.3.2.7, redom.



Sl.3.2.8 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) jednopolni kratak spoj Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) trolpolni kratak spoj ABC na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2

Tab.3.2.6 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj jednopolnog kratkog spoja Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB

Kvar Bz – vod 1 - 50 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{CA}	$\theta_{CA1} = -149,4^\circ$	$\theta_{CA2} = -161,4^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{BD}	$\phi_{BD1} = -135,2^\circ$	$\phi_{BD2} = 44,81^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{CA} i \underline{I}_{BD}	$\varphi_{BD1} = -14,2^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{BD2} = 153,79^\circ$ Kvar na vodu 1

Na osnovu grafika (a.1) i (a.2) sa Sl.3.2.8 moguće je zaključiti da je kvar (K.5) selektivno detektovan unutar zone zaštite, jer su amplitude diferencijalnih struja releja R1 i R2 u fazi B značajno veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2 su prikazane na graficima (a.3) i (a.4), redom. Uočljivo je da su diferencijalne struje releja R1 i R2 u protivfazi.

U Tab.3.2.6 su prikazane procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalne struje i_{BD} i referentnog napona v_{CA} za slučaj kvara (K.5). Na osnovu ovih vrijednosti moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalne struje i_{BD} releja R1 i R2 u odnosu na referentni napon v_{CA} , čije vrijednosti iznose $\varphi_{BD1} = -14,2^\circ$ i $\varphi_{BD2} = 153,79^\circ$, redom. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, dati izrazima (3.2.9) i (3.2.10),

redom, su zadovoljeni i u slučaju jednostrano napajano DNV-a. Zaštita selektivno detektuje kvar u fazi B voda 1.

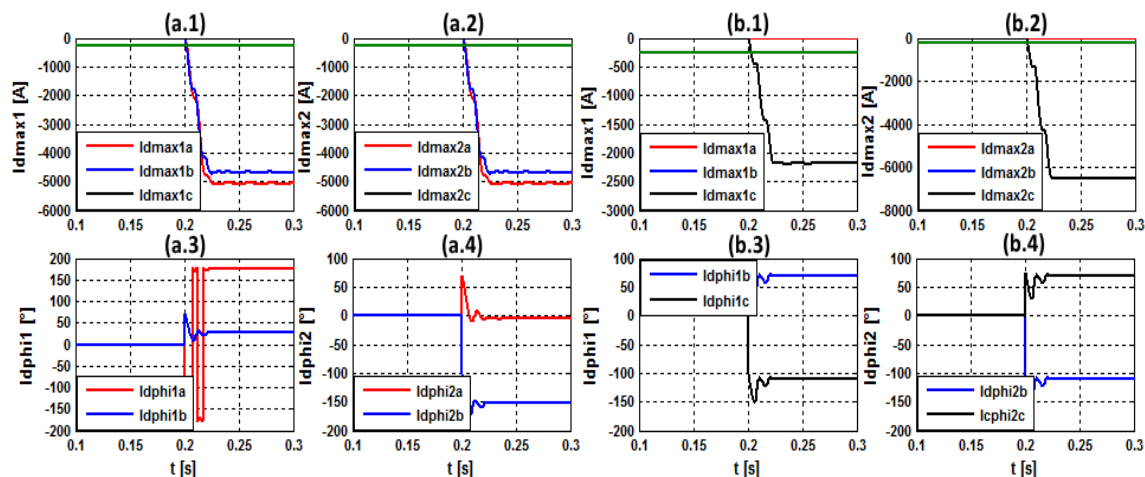
Tab.3.2.7 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj trolnog kratkog spoja ABC na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB

Kvar ABC – vod 1 - 100 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{BC}	$\theta_{BC1} = -19,6^\circ$	$\theta_{BC2} = -29^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{AD}	$\phi_{AD1} = -16,86^\circ$	$\phi_{AD2} = 163,1^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{CA}	$\theta_{CA1} = -140,9^\circ$	$\theta_{CA2} = -149^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{BD}	$\phi_{BD1} = -138,8^\circ$	$\phi_{BD2} = 41,22^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{AB}	$\theta_{AB1} = 95,39^\circ$	$\theta_{AB2} = 92,83^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{CD}	$\phi_{CD1} = 95,59^\circ$	$\phi_{CD2} = -84,4^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{BC} i \underline{I}_{AD}	$\varphi_{AD1} = -2,74^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{AD2} = 167,9^\circ$ Kvar na vodu 1
Razlika faznih uglova \underline{V}_{CA} i \underline{I}_{BD}	$\varphi_{BD1} = -2,1^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{BD2} = 169,8^\circ$ Kvar na vodu 1
Razlika faznih uglova \underline{V}_{AB} i \underline{I}_{CD}	$\varphi_{CD1} = -0,2^\circ$ Kvar na vodu 1	$\varphi_{CD2} = 177,23^\circ$ Kvar na vodu 1

Amplitude diferencijalnih struja za slučaj kvara (K.6) su prikazane na graficima (b.1) i (b.2) sa Sl.3.2.8, za releje R1 i R2, redom. Kvar je detektovan unutar zone zaštite u sve tri faze, jer su amplitude odgovarajućih diferencijalnih struja veće od podešenih pragova reagovanja za oba dif. releja. Na graficima (b.3) i (b.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom. Moguće je zaključiti da su diferencijalne struje releja R1 i R2 približno u protivfazi. Prethodna konstatacija je važeća za sve tri faze.

Procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja u svim fazama i odgovarajućih referentnih napona za slučaj kvara (K.6) su prikazane u Tab.3.2.7. Pomoću prethodno procijenjenih vrijednosti faznih uglova moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalnih struja u odnosu na referentne napone. Vrijednosti faznih pomjeraja za dif. relej R1 iznose $\varphi_{AD1} = -2,74^\circ$, $\varphi_{BD1} = -2,1^\circ$ i $\varphi_{CD1} = -0,2^\circ$, dok odgovarajuće vrijednosti za dif. relej R2 iznose $\varphi_{AD2} = 167,9^\circ$, $\varphi_{BD2} = 169,8^\circ$ i $\varphi_{CD2} = 177,23^\circ$. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2 su ispunjeni za sve tri faze i zaštita selektivno detektuje kvar na vodu 1.

Grafički rezultati za slučajeve kvarova (K.7) i (K.8) su prikazani na Sl.3.2.9, dok su odgovarajući numerički rezultati prikazani u tabelama Tab.3.2.8 i Tab.3.2.9, redom. Amplitude diferencijalnih struja su prikazane sa negativnim predznakom da ilustrativno ukažu na kvarove na vodu 2.



Sl.3.2.9 Vrijednosti pokazatelja kvara usmjerene poprečne diferencijalne zaštite: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB – (a.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (a.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (a.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (a.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2; (b) dvopolni kratak spoj BC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB - (b.1) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R1, (b.2) maksimalne vrijednosti diferencijalnih struja releja R2, (b.3) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R1, (b.4) fazni uglovi diferencijalnih struja releja R2

Tab.3.2.8 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvopolnog kratkog spoja sa zemljospojem ABz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica BB

Kvar ABz – vod 2 - 100 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{BC}	$\theta_{BC1} = -17,95^\circ$	$\theta_{BC2} = -21,14^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{AD}	$\phi_{AD1} = 174,7^\circ$	$\phi_{AD2} = -5,34^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{CA}	$\theta_{CA1} = -160,1^\circ$	$\theta_{CA2} = 170,2^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{BD}	$\phi_{BD1} = 28,57^\circ$	$\phi_{BD2} = -151,4^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{BC} i struje \underline{I}_{AD}	$\varphi_{AD1} = 167,35^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{AD2} = -15,8^\circ$ Kvar na vodu 2
Razlika faznih uglova \underline{V}_{CA} i struje \underline{I}_{BD}	$\varphi_{BD1} = 171,33^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{BD2} = -38,4^\circ$ Kvar na vodu 2

Na osnovu grafika (a.1) i (a.2) sa Sl.3.2.9 moguće je zaključiti da je kvar selektivno detektovan unutar zone zaštite u fazama A i B, jer su amplitude diferencijalnih struja releja R1 i R2 značajno veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Na graficima

(a.3) i (a.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom, u fazama obuhvaćenim kvarom. Moguće je uočiti da su diferencijalne struje releja R1 i R2 približno u protivfazi.

Procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja i_{AD} i i_{BD} i odgovarajućih referentnih napona v_{BC} i v_{CA} za slučaj kvara (K.7) su prikazane u Tab.3.2.8. Pomoću prethodno procijenjenih vrijednosti faznih uglova moguće je izračunati fazne pomjeraje diferencijalnih struja u odnosu na referentne napone. Vrijednosti faznih pomjeraja za dif. relej R1 su $\varphi_{AD1} = 167,35^\circ$ i $\varphi_{BD1} = 171,33^\circ$, dok odgovarajuće vrijednosti za dif. relej R2 iznose $\varphi_{AD2} = -15,8^\circ$ i $\varphi_{BD2} = -38,4^\circ$. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2 nisu ispunjeni za obje faze A i B, i zaštita selektivno detektuje kvar na vodu 2.

Tab.3.2.9 Fazni uglovi struja kvara i referentnih napona za slučaj dvopolnog kratkog spoja sa zemljospojem BC na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB

Kvar BC – vod 2 - 150 km od BB	Diferencijalni relej R1	Diferencijalni relej R2
Fazni ugao napona \underline{V}_{CA}	$\theta_{CA1} = -136,5^\circ$	$\theta_{CA2} = -130,6^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{BD}	$\phi_{BD1} = 69,9^\circ$	$\phi_{BD2} = -110,1^\circ$
Fazni ugao napona \underline{V}_{AB}	$\theta_{AB1} = 80^\circ$	$\theta_{AB2} = 57,21^\circ$
Fazni ugao struje \underline{I}_{CD}	$\phi_{CD1} = -110,1^\circ$	$\phi_{CD2} = 69,93^\circ$
Razlika faznih uglova \underline{V}_{CA} i \underline{I}_{BD}	$\varphi_{BD1} = 153,6^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{BD2} = -20,5^\circ$ Kvar na vodu 2
Razlika faznih uglova \underline{V}_{AB} i \underline{I}_{CD}	$\varphi_{CD1} = -170^\circ$ Kvar na vodu 2	$\varphi_{CD2} = -12,72^\circ$ Kvar na vodu 2

Prema rezultatima sa grafika (a.1) i (a.2) na Sl.3.2.9 moguće je zaključiti da je kvar selektivno detektovan unutar zone zaštite u fazama B i C, jer su amplitude diferencijalnih struja releja R1 i R2 značajno veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Na graficima (a.3) i (a.4) prikazane su procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja releja R1 i R2, redom, u fazama obuhvaćenim kvarom. Kao i u prethodnom slučaju kvara, moguće je uočiti da su diferencijalne struje releja R1 i R2 približno u protivfazi.

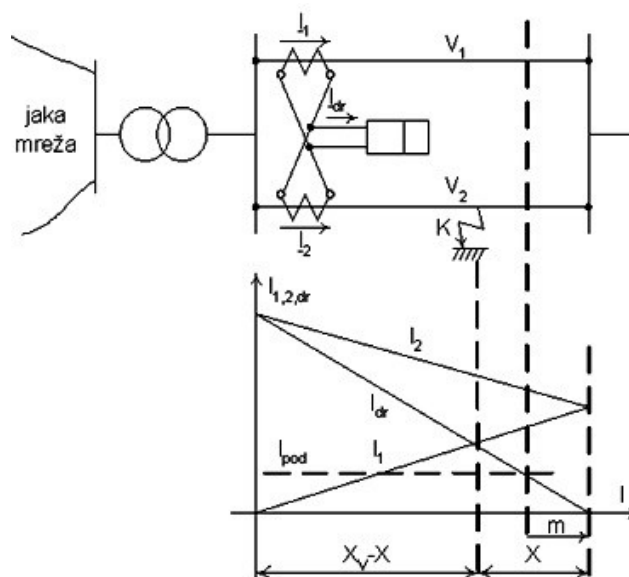
Procijenjene vrijednosti faznih uglova diferencijalnih struja i_{BD} i i_{CD} i odgovarajućih referentnih napona v_{CA} i v_{AB} za slučaj kvara (K.8) su prikazane u Tab.3.2.9. Pomoću prethodno procijenjenih vrijednosti faznih uglova moguće je

izračunati fazne pomjeraje diferencijalnih struja u odnosu na referentne napone. Vrijednosti faznih pomjeraja za dif. relej R1 su $\varphi_{BD1} = 153,6^\circ$ i $\varphi_{CD1} = -170^\circ$, dok odgovarajuće vrijednosti za dif. relej R2 iznose $\varphi_{BD2} = -20,5^\circ$ i $\varphi_{CD2} = -12,72^\circ$. Kriterijumi usmjerenih elemenata dif. releja R1 i R2, dati izrazima (3.2.9) i (3.2.10), redom, nisu ispunjeni za obje faze B i C, i zaštita selektivno detektuje kvar na vodu 2.

Na osnovu rezultata dodatna četiri slučaja kvara, moguće je potvrditi selektivnost tradicionalne usmjerene poprečne diferencijalne zaštite i u slučaju jednostrano napajanog DNV-a. Koncept upotrebe napona kao referentnih veličina za određivanje smjera diferencijalnih struja se pokazao kao selektivan u oba slučaja, dvostrano i jednostrano napajanog DNV-a.

3.2.7 Problem mrtve zone i kaskadnog rada prekidača

Primicanjem kvara kraju jednog od paralelnih vodova, amplituda diferencijalne struje udaljenijeg releja se smanjuje i poprečna diferencijalna zaštita ima mrtvu zonu, čija dužina zavisi od vrste kvara, parametara šticevskih vodova i ostalih elemenata mreže [23]. Matematički izraz za mrtvu zonu poprečne diferencijalne zaštite najjednostavnije je izvesti na primjeru neusmjerene zaštite u jednostrano napajanom sistemu [77]. Uopšteni primjer pomenutog sistema, za slučaj kvara na vodu 2, prikazan je na Sl.3.2.10.



Sl.3.2.10 Mrtva zona neusmjerene poprečne diferencijalne zaštite [23]

Pri izvođenju izraza za mrtvu zonu pretpostavljen je slučaj trofaznog kratkog spoja (simetričan kvar), čime je izbjegnuta složeniji proračun u okviru primjene metode simetričnih komponenti (posmatra se jedino sistem fazora direktnog redoslijeda). Dodatno uvedene aproksimacije su zanemarenje svih aktivnih otpornosti u sistemu i posmatranje slučaja praznog hoda na kraju nadzemnog voda (zanemaren uticaj potrošnje). Kompletan postupak izvođenja izraza za mrtvu zonu je preuzet iz [77]. Ekvivalentna reaktansa sistema od mjesta napajanja do lokacije kvara je data izrazom:

$$X_e = X_T + \frac{(X_V + X) \cdot (X_V - X)}{2X_V}, \quad (3.2.13)$$

gdje su: X_V - reaktansa nadzemnog voda; X_T - reaktansa transformatora; X - dio reaktanse nadzemnog voda od mjesta kvara do završnih sabirnica.

Nakon uvažavanja svih prethodnih pretpostavki može se napisati sljedeći izraz za struju kvara:

$$\underline{I}_K = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \Rightarrow I_K = \frac{U_f}{X_e}, \quad (3.2.14)$$

gdje je U_f fazni napon mreže.

Primjenom pravila strujnog djelitelja može se odrediti zavisnost struje I_2 u funkciji struje kvara I_K , a potom i primjenom izraza (3.2.14) zavisnost struje I_2 u funkciji struje I_1 :

$$I_2 = I_K \frac{X_V + X}{2X_V} = I_1 \frac{X_V + X}{X_V - X}. \quad (3.2.15)$$

Diferencijalna struja neusmjerene poprečne diferencijalne zaštite definiše se uopšteno pomoću sljedećeg izraza:

$$\underline{I}_{dif} = \underline{I}_1 - \underline{I}_2. \quad (3.2.16)$$

Zavisnost diferencijalne struje I_{dif} u funkciji struje I_1 data je sljedećim izrazom:

$$I_{dif} = I_1 \frac{2X}{X_V - X}. \quad (3.2.17)$$

Na granici mrtve zone (Sl.3.2.10), gdje je $X = m$, važi sljedeća jednakost:

$$I_{dif} = I_{pod} = I_1 \frac{2m}{X_V - m}. \quad (3.2.18)$$

Kombinovanjem izraza (3.2.14), (3.2.15) i (3.2.18) dobija se sljedeći izraz:

$$\frac{U_f}{X_e} = \frac{X_V}{m} I_{pod}. \quad (3.2.19)$$

Uvrštavanjem izraza (3.2.13) u izraz (3.2.19) dobija se sljedeća kvadratna jednačina u kojoj promjenljivu predstavlja mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite:

$$m^2 + \frac{U_f}{I_{pod}} m - X_V(2X_T + X_V) = 0. \quad (3.2.20)$$

Rješenja prethodne kvadratne jednačine su:

$$m_{1,2} = \frac{-\frac{U_f}{I_{pod}} \pm \sqrt{\left(\frac{U_f}{I_{pod}}\right)^2 + 4X_V(2X_T + X_V)}}{2}. \quad (3.2.21)$$

Fizikalno prihvatljivo rješenje podrazumijeva pozitivnu vrijednost mrtve zone, pa se usvaja rješenje sa znakom „+” u brojiocu:

$$m = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{U_f}{I_{pod}}\right)^2 + 4X_V(2X_T + X_V)} - \frac{U_f}{I_{pod}} \right). \quad (3.2.22)$$

Na osnovu prethodnog izraza, može se doći do sljedećih zaključaka [77]:

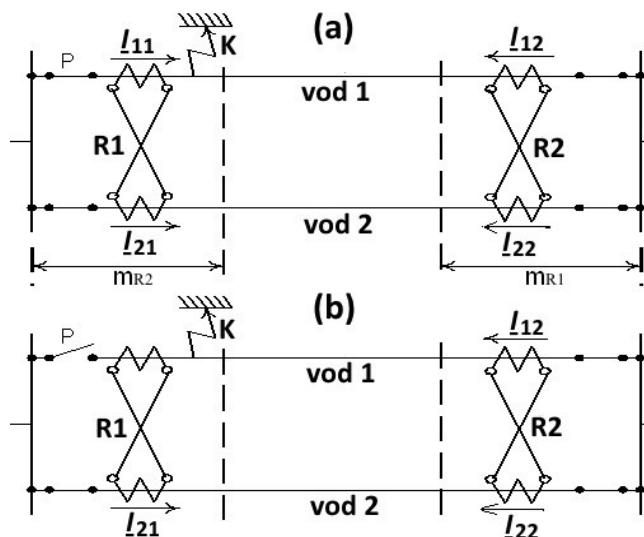
- mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite je duža što su veće reaktanse nadzemnog voda i transformatora (X_V i X_T),
- dodatnim proračunom je moguće pokazati da vrijedi sljedeća nejednakost:

$$\frac{dm(I_{pod})}{d(I_{pod})} > 0, \quad (3.2.23)$$

koja ukazuje na zaključak da je mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite duža što je veća vrijednost podešene struje.

Vrijednosti podešene struje ili praga reagovanja veće od nule uzrokuju postojanje mrtve zone poprečne diferencijalne zaštite. Prag reagovanja je neophodan da bi se obezbijedila selektivnost zaštite pri razlikovanju kvarova unutar i izvan dionice DNV-a, pa u skladu sa prethodnim, postojanje mrtve zone predstavlja neizbježnu posljedicu.

Postojanje mrtve zone uzrokuje kaskadno isključenje kvara od strane prekidača, koje je uzrokovano kaskadnim reagovanjem releja usmjerene poprečne diferencijalne zaštite [77]. Na Sl.3.2.11 je prikazan slučaj kvara u mrtvoj zoni releja R2 na kraju dionice DNV-a.



Sl.3.2.11 Kaskadni rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite za slučaj kvara na vodu 1 u mrtvoj zoni releja R2: (a) šema prije reagovanja dif. releja R1 – prekidač P zatvoren; (b) šema posle reagovanja dif. releja R1 – prekidač P otvoren [23]

Nakon nastanka kvara, relej R1 uspješno detektuje kvar na vodu 1 i daje nalog za isključenje prekidaču P. Nakon isključenja voda 1 na početku dionice, efektivna vrijednost struje I_{12} se povećava čime se povećava i efektivna vrijednost diferencijalne struje releja R2 prema izrazu (3.2.4), jer je $I_{D2} = 2I_{12}$. Kao posljedica prethodnog, relej R2 izlazi iz mrtve zone i sa zakašnjenjem daje nalog prekidaču da isključi vod 1 na kraju dionice, čime bi kvar bio potpuno izolovan. Dakle, releji R1 i R2 reaguju kaskadno jedan za drugim. Kaskadno isključenje struje kvara nije poželjno u elektroenergetskom sistemu, jer je prisutan negativan uticaj na tranzientnu stabilnost zbog dužeg trajanja režima kvara [77].

4. ALGORITMI ZA POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU ZASNOVANI NA SIGNALIMA STRUJA

Devedesetih godina prošlog vijeka, u periodu velike ekspanzije digitalnih relejnih zaštita, pojavila se ideja za realizaciju digitalne poprečne diferencijalne zaštite dvostrukog nadzemnog voda zasnovane samo na strujnim signalima. Značajnu pažnju naučne javnosti izazvale su publikacije sa predloženim algoritmima zasnovanim na priraštajima strujnih signala [14], [15] i [19]. Osnovne prednosti prethodnih algoritama su velika brzina reagovanja i nepotrebnost mjerenja naponskih signala za realizaciju usmjerene karakteristike [22], [72]. Algoritam, koji je predložen u početnoj publikaciji ovog tipa [14], [15], bazira se na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja i primjenjiv je samo u slučaju dvostrano napajanih dvostrukih nadzemnih vodova. U slučaju radijalnih (jednostrano napajanih) dvostrukih vodova, predloženi algoritam se pokazao kao neosjetljiv, pa je predložen novi algoritam, zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, koji se pokazao kao osjetljiv i u slučaju radijalnih dvostrukih vodova [19].

U ovom poglavlju prikazani su osnovni koncepti na kojima se zasniva rad algoritama poprečne diferencijalne zaštite zasnovanih na priraštajima strujnih signala, kao i rezultati ispitivanja njihove osjetljivosti i selektivnosti, koji su dobijeni na osnovu simulacione analize. Osnovni dio poglavlja obuhvata prijedlog novog algoritma zaštite, sa poboljšanom osjetljivošću za radijalne dvostruke vodove, što predstavlja jedan od osnovnih doprinosa ove doktorske disertacije. Takođe, za predloženi algoritam su dati i detaljni rezultati simulacionih ispitivanja osnovnih osobina zaštite. Cilj ovog poglavlja je da kroz uporednu analizu sa postojećim algoritmima potvrdi prednosti primjene novog algoritma u slučaju poprečne diferencijalne zaštite radijalnih dvostrukih vodova.

4.1 Principi rada algoritama zasnovanih na priraštajima signala struja

Pod pojmom priraštaj strujnog signala se podrazumijeva razlika između vrijednosti signala jedne te iste struje u različitim i tačno vremenski pomjerenim trenucima. Karakterističan primjer priraštaja strujnog signala je dat sljedećim izrazom:

$$\Delta i(t) = i(t) - i(t-T), \quad (4.1.1)$$

gdje su: t – proizvoljan vremenski trenutak i T - perioda strujnog signala.

Priraštaj strujnog signala je moguće u digitalnoj relejnoj zaštiti iskoristiti kao pokazatelj poremećaja, jer se u njegovoj osnovnoj definiciji vrši poređenje vrijednosti strujnog signala poslije i prije poremećaja. Kada nema poremećaja, priraštaj strujnog signala je jednak nuli.

4.1.1 Algoritam na bazi priraštaja apsolutnih vrijednosti struja

Autori publikacije [14] su predložili primjenu priraštaja strujnih signala u realizaciji poprečne diferencijalne zaštite dvostrukih nadzemnih vodova. Algoritam koristi priraštaje apsolutnih vrijednosti struja svih faza posebno na početku i kraju dionice dvostrukog voda, koji su definisani uopštenim izrazom u nastavku:

$$GM_{ij-abc}(k) = |i_{ij-abc}(k)| - |i_{ij-abc}(k-m)|, \quad (4.1.2)$$

gdje su: $i(k)$ - „trenutni” odbirak struje; m - ukupan broj odbiraka u osnovnoj periodi signala; i - oznaka individualnog trofaznog voda u sistemu dvostrukih vodova ($i = 1$ - „gornji” vod na šemi (vod 1); $i = 2$ - „donji” vod na šemi (vod 2)); j - oznaka početka ili kraja dionice dvostrukog voda ($j = 1$ - početak dionice; $j = 2$ - kraj dionice); a, b, c - oznake faznih provodnika.

Pokazatelji kvara se definišu identično za releje na početku i kraju dionice dvostrukog voda i dati su sljedećim uopštenim izrazom:

$$GM_{j-abc}(k) = GM_{1j-abc}(k) - GM_{2j-abc}(k). \quad (4.1.3)$$

Na osnovu prethodnog izraza se može zaključiti da za svaku fazu postoji poseban pokazatelj kvara na početku i na kraju dionice dvostrukog voda, koji se računa kao razlika odgovarajućih priraštaja strujnih signala. Dakle, predložena šema poprečne diferencijalne zaštite koristi ukupno 12 priraštaja strujnih signala i 6 pokazatelja kvara. Pošto se svaka faza dvostrukog voda štiti nezavisno, ovakva zaštita se može nazivati i fazna.

Uslovi selektivnog reagovanja releja su dati sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned} GM_{j-abc}(k) > D_{GM} &\rightarrow \text{kvar_na_vodu_1,} \\ GM_{j-abc}(k) < -D_{GM} &\rightarrow \text{kvar_na_vodu_2,} \\ |GM_{j-abc}(k)| < D_{GM} &\rightarrow \text{kvar_nije_u_zoni_zaštite,} \end{aligned} \quad (4.1.4)$$

gdje je D_{GM} podešeni prag reagovanja releja.

4.1.2 Algoritam na bazi priraštaja trenutnih vrijednosti struja

U slučaju kada se na jednom kraju dvostrukog voda nalazi pasivna mreža, prethodno predstavljeni algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja neće biti osjetljiv za relej postavljen na strani pasivne mreže. Iz prethodnog razloga razvijen je algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja [19], koji su definisani sljedećim uopštenim izrazom:

$$EM_{ij-abc}(k) = i_{ij-abc}(k) - i_{ij-abc}(k-m). \quad (4.1.5)$$

Sve oznake iz prethodnog izraza imaju potpuno ista značenja kao i ranije opisane oznake korištene u izrazu (4.1.2).

I kod ovog algoritma, kao i u slučaju prethodnog, pokazatelji kvara se definišu na isti način za releje na početku i kraju dionice dvostrukog voda i dati su sljedećim uopštenim izrazom:

$$EM_{j-abc}(k) = |EM_{1j-abc}(k)| - |EM_{2j-abc}(k)|. \quad (4.1.6)$$

Na osnovu prethodnog izraza, takođe je moguće zaključiti da se radi o faznom konceptu zaštite, jer se svaka faza dvostrukog voda štiti nezavisno. Iz same definicije priraštaja strujnog signala (4.1.5) je očigledno da predloženi princip rada zaštite uvažava i fazne pomjeraje između struja prije i posijle poremećaja, što nije bio slučaj kod algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja. Na ovaj način je postignuta osjetljivost zaštite za relej sa strane pasivne mreže u slučaju radijalnih dvostrukih vodova.

Uslovi selektivnog reagovanja releja su dati sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} EM_{j-abc}(k) > D_{EM} &\rightarrow \text{kvar_na_vodu_1,} \\ EM_{j-abc}(k) < -D_{EM} &\rightarrow \text{kvar_na_vodu_2,} \\ |EM_{j-abc}(k)| < D_{EM} &\rightarrow \text{kvar_nije_u_zoni_zaštite,} \end{aligned} \quad (4.1.7)$$

gdje je D_{EM} podešeni prag reagovanja releja.

4.2 Ispitivanje poprečne diferencijalne zaštite zasnovane na strujnim signalima u slučaju dvostrano napajanog dvostrukog nadzemnog voda

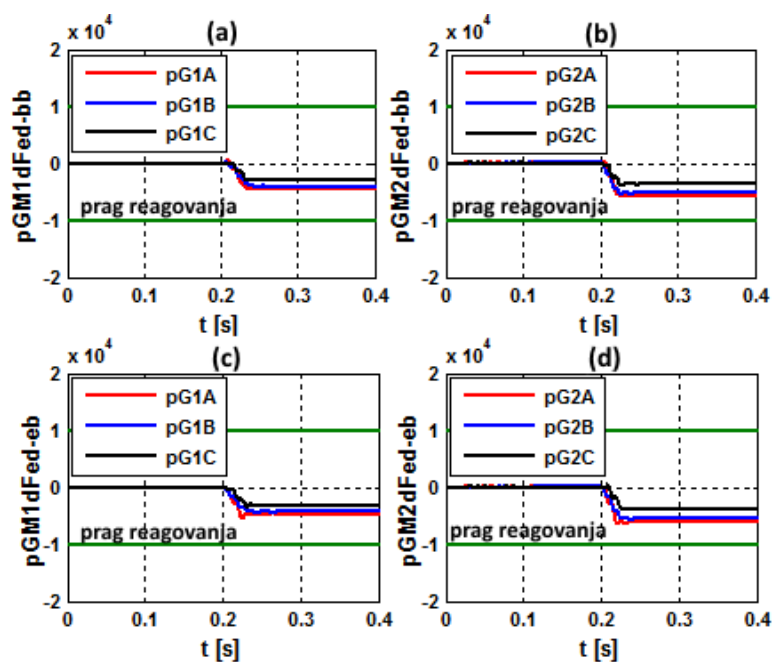
Algoritmi zaštite, zasnovani na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja su ispitivani upotrebom interaktivnog simulatora rada relejne zaštite, koji je predstavljen u poglavlju 2, na modelu dvostrano napajanog DNV-a. Na osnovu rezultata početnog testa, utvrđene su vrijednosti pragova reagovanja predloženih algoritama zaštite, koje je potrebno podesiti zbog ostvarenja njenog selektivnog rada. Potom su na karakterističnim primjerima kvarova analizirane osnovne osobine predložene zaštite: osjetljivost, selektivnost i brzina reagovanja.

4.2.1 Određivanje pragova reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na strujnim signalima u slučaju dvostrano napajanog DNV-a

Kao što je i ranije pomenuto, za sve algoritme poprečne diferencijalne zaštite neophodno je odrediti prag ili granicu reagovanja zbog ostvarenja selektivnosti, što je posljedica fizikalnih razlika između dva trofazna voda u sistemu DNV-a. Prema prvom koraku procedure za određivanje pragova reagovanja, koja je ranije definisana, pretpostavljaju se vrijednosti koeficijenata razlike $k_R = 1,02$ i $k_X = 1,02$. Zatim su analizirane vrijednosti pokazatelja kvara algoritama zasnovanih na priraštajima strujnih signala i definisane konstantne vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trolnog kratkog spoja na početnim i završnim sabirnicama DNV-a (BB i EB sa Sl.3.2.4). Dobijeni rezultati za algoritme, zasnovane na priraštajima apsolutnih (GM) i trenutnih (EM) vrijednosti struja, su prikazani na slikama Sl.4.2.1 i Sl.4.2.2, redom.

Na graficima sa Sl.4.2.1 prikazani su pokazatelji kvara algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja u svakoj fazi i za oba diferencijalna releja R1 i R2 (na početku i kraju DNV-a), čije definicija je data izrazom (4.1.3). Na osnovu dobijenih rezultata, primjetna je razlika između vrijednosti pokazatelja kvara u različitim fazama, što je u stvari posljedica zavisnosti sistema za filtriranje signala od trenutka nastanka kvara. Maksimalne vrijednosti pokazatelja kvara su nešto veće od $0,5 \cdot 10^4$ A po apsolutnoj vrijednosti za relej R2, što predstavlja kritičniji slučaj. Rezultati su vrlo slični za slučajeve trolnog kratkog spoja na početnim i krajnjim sabirnicama DNV-a. Negativne vrijednosti pokazatelja kvara, koje su posljedica manje sopstvene impedanse provodnika nadzemnog voda 2, mogu izazvati neselektivno reagovanje zaštite, koja prethodni rezultat tumači kao kvar na vodu 2. Iz prethodnog razloga

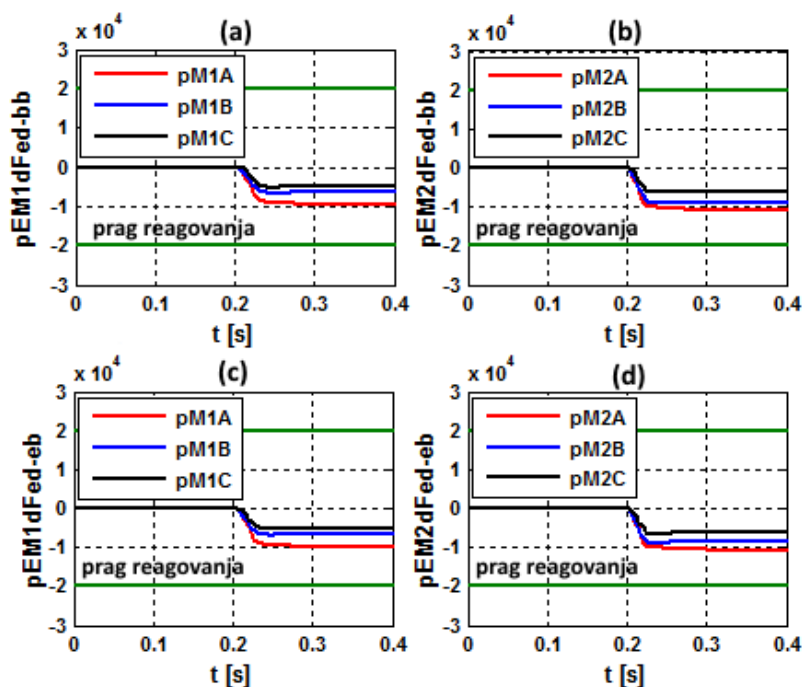
neophodno je definisati konačnu vrijednost praga reagovanja da bi se očuvao selektivan rad zaštite. Za analizirani algoritam usvojena je konstantna vrijednost praga reagovanja od $1 \cdot 10^4$ A, čime je ostvarena i rezerva za slučaj razlika u sekundarnim strujama zbog razlika između SMT-a istofaznih provodnika i mjernih grešaka. Za oba diferencijalna releja usvojena je identična vrijednost praga reagovanja. Algoritam zaštite će reagovati jedino u slučaju kada pokazatelji kvara postignu vrijednosti veće od usvojene vrijednosti praga reagovanja, što se sa velikom sigurnošću neće desiti u slučajevima kvarova van štice zone.



Sl.4.2.1 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja i usvojena vrijednost praga reagovanja: trolni kratak spoj na početnim sabirnicama BB – (a) diferencijalni relej R1; (b) diferencijalni relej R2; trolni kratak spoj na završnim sabirnicama EB – (c) diferencijalni relej R1; (d) diferencijalni relej R2

Prema analognoj proceduri posmatrane su vrijednosti pokazatelja kvara i algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, a odgovarajući rezultati su prikazani na graficima sa Sl.4.2.2. Kao i za prethodni algoritam, može se zaključiti da nema značajnih razlika između slučajeva trolnog kratkog spoja na početnim i završnim sabirnicama DNV-a. Sa aspekta maksimalnih vrijednosti pokazatelja kvara, ponovo je za nijansu kritičniji slučaj sa strane releja R2. Pokazatelji kvara dostižu maksimalne vrijednosti veće od $1 \cdot 10^4$ A, pa je za ovaj algoritam potrebno usvojiti i veću

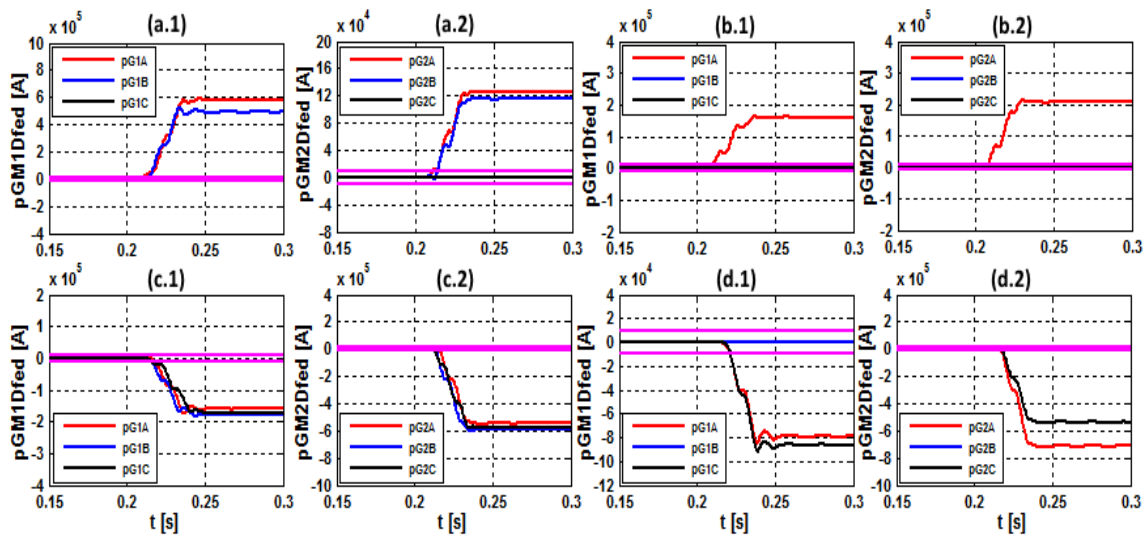
vrijednost praga reagovanja. Zbog ostvarenja ranije pomenute sigurnosne rezerve, za prag reagovanja ovog algoritma usvojena je vrijednost $2 \cdot 10^4$ A.



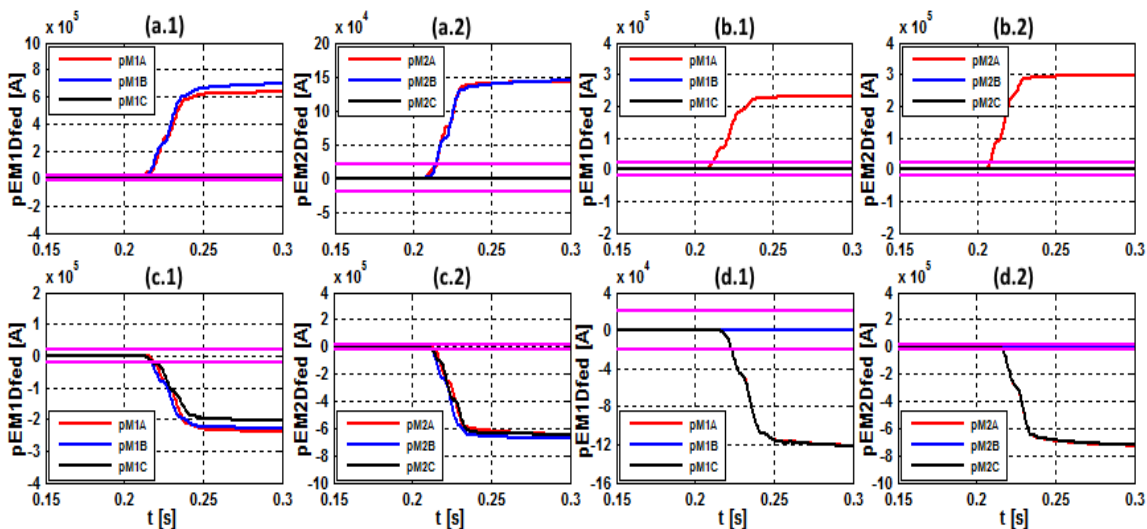
Sl.4.2.2 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i usvojena vrijednost praga reagovanja: tropolni kratak spoj na početnim sabirnicama BB – (a) diferencijalni relej R1; (b) diferencijalni relej R2; tropolni kratak spoj na završnim sabirnicama EB – (c) diferencijalni relej R1; (d) diferencijalni relej R2

4.2.2 Ispitivanje algoritama zaštite za slučajeve različitih lokacija, vrsta i trenutaka nastanka kvara

Osjetljivost i selektivnost zaštite moraju biti zadovoljeni pri različitim lokacijama i vrstama kvara na DNV-u, što predstavlja osnovni preduslov za primjenu predloženih algoritama. Takođe, predloženi algoritmi, zajedno sa odabranim sistemom filtriranja signala, moraju biti sposobni da osjetljivo i selektivno reaguju za svaki potencijalni trenutak nastanka kvara. Na Sl.4.2.3 i Sl.4.2.4 su prikazani pokazatelji kvara za algoritme zasnovane na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja, redom. Analizirana su četiri slučaja kvara: (a) ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s; (b) Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s; (c) ABCz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s; (d) AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0,211 s.



Sl.4.2.3 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja (GM) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0.211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R2



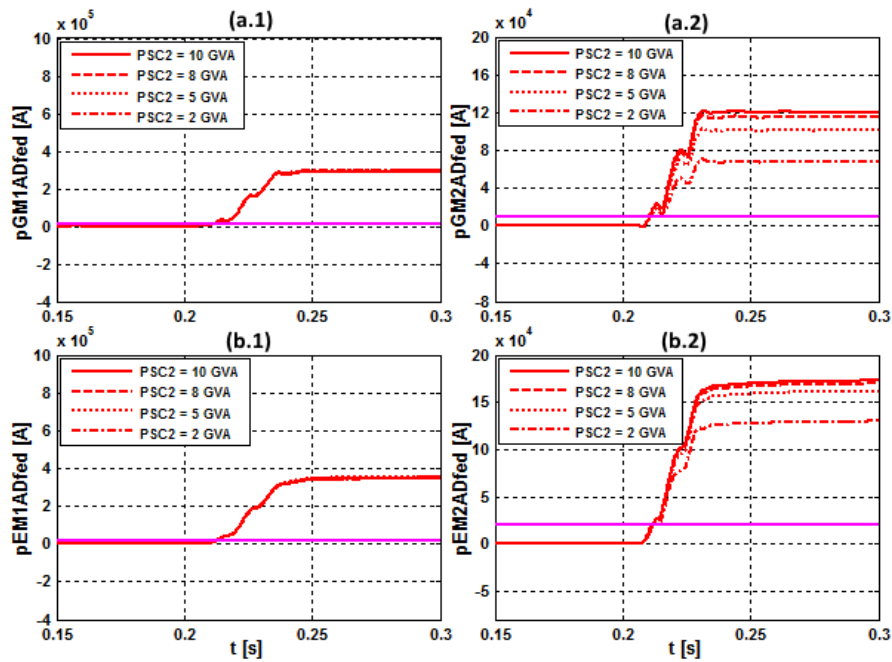
Sl.4.2.4 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj ABCz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0.211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R2

Na osnovu grafika sa Sl.4.2.3 i Sl.4.2.4, može se zaključiti da su oba algoritma osjetljiva i selektivna za svaki analizirani slučaj kvara. Osjetljivost je zadovoljena, jer su u svim slučajevima kvara vrijednosti pokazatelja postale veće od podešenih vrijednosti pragova reagovanja. Algoritmi su u svim slučajevima selektivno utvrdili vod sa kvarom i odgovarajuće faze obuhvaćene kvarom. Osjetljivost i selektivnost algoritama nije narušena ni pri promjeni trenutka nastanka kvara. Trenutak nastanka kvara u određnoj mjeri utiče na konačnu vrijednost pokazatelja kvara, tj. vrijednost na koju pokazatelj konvergira. Različiti trenuci nastanka kvarova utiču na karakteristike pratećih prelaznih procesa, kao npr. na izraženost opadajuće jednosmjerne komponente, što ima uticaj na sistem filtriranja signala, a samim tim i na algoritme. Međutim, ispitivanja su pokazala da su pomenuta odstupanja tolerantna i da ne utiču značajno na osjetljivost zaštite.

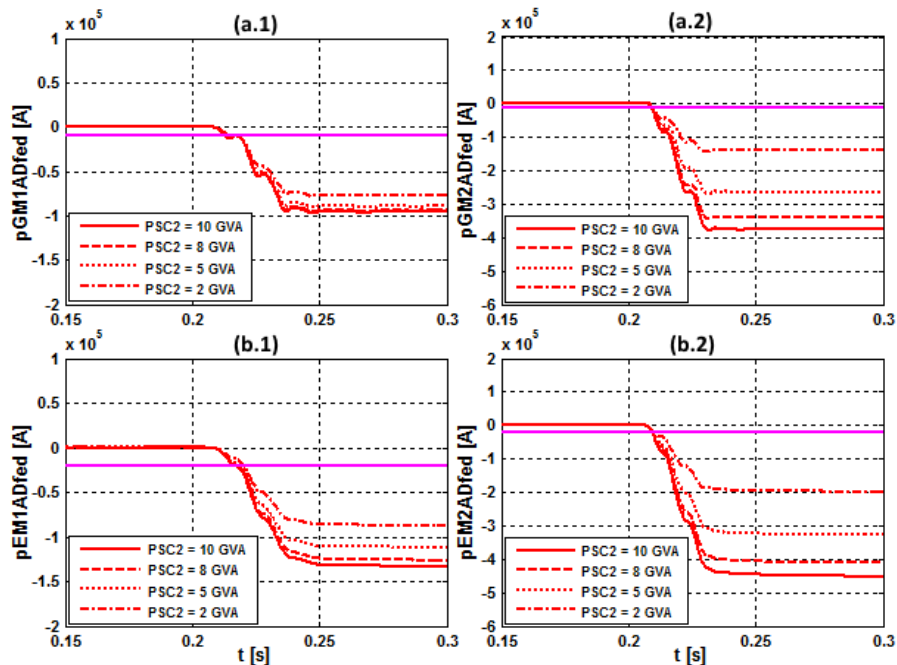
4.2.3 Ispitivanje osjetljivosti algoritama zaštite za slučaj promjenljive snage mreže na kraju DNV-a

Sa aspekta utvrđivanja mogućnosti primjene analiziranih algoritama za zaštitu dvostrano napajanog DNV-a, koji se može nalaziti u proizvoljnom EES-u, neophodno je ispitati osjetljivost zaštite za slučaj različitih snaga mreža koje napajaju DNV. Analizirana su dva slučaja kvara: Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB i Az na vodu 2, 150 km od sabirnica BB. Odgovarajući rezultati su prikazani na Sl.4.2.5 i Sl.4.2.6, redom. Snaga trolejnog kratkog spoja mreže na kraju DNV-a (M2 sa Sl.3.2.4) je mijenjana u opsegu od $P_{2SC3f} = 2$ GVA do $P_{2SC3f} = 10$ GVA, pri konstantnoj snazi mreže na početku DNV-a (M1 sa Sl.3.2.4) $P_{1SC3f} = 12$ GVA.

Na osnovu grafika sa Sl.4.2.5, može se zaključiti da je osjetljivost zaštite skoro potpuno nezavisna od snage mreže na kraju DNV-a za oba algoritma u slučaju diferencijalnog releja R1 (mjesto kvara se dominantno napaja iz bliske mreže na početku DNV-a, čija snaga je konstantna). U slučaju diferencijalnog releja R2, primjetno je značajno smanjenje osjetljivosti zaštite pri manjim snagama mreže na kraju DNV-a. Prethodni zaključak je važeći za oba analizirana algoritma. U slučaju testa sa drugim kvarom (Az na vodu 2, 150 km sabirnica BB), čiji grafički rezultati su prikazani na Sl.4.2.6, može se uočiti značajno smanjenje osjetljivosti zaštite pri smanjenju snage mreže na kraju DNV-a, za oba diferencijalna releja R1 i R2. Prethodni zaključak je približno identičan za oba analizirana algoritma.



Sl.4.2.5 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj snazi troleznog kratkog spoja mreže na kraju DNV-a: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2



Sl.4.2.6 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj snazi troleznog kratkog spoja mreže na kraju DNV-a: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2

Na karakterističnim primjerima dva jednopolna kratka spoja pokazana je zavisnost između osjetljivosti zaštite zasnovane na analiziranim algoritmima i snage trofaznog kratkog spoja mreže, koja sa jednog kraja napaja DNV. Iako je prisutno smanjenje osjetljivosti diferencijalnih releja R1 i R2, vrijednosti pokazatelja kvara analiziranih algoritama su i dalje značajno veće od podešenih pragova reagovanja, za širok opseg promjene snage mreže sa jednog kraja DNV-a. Na osnovu prethodnog se može zaključiti da su predloženi algoritmi primjenjivi i u slučajevima značajnih razlika između snaga mreža koje napajaju DNV.

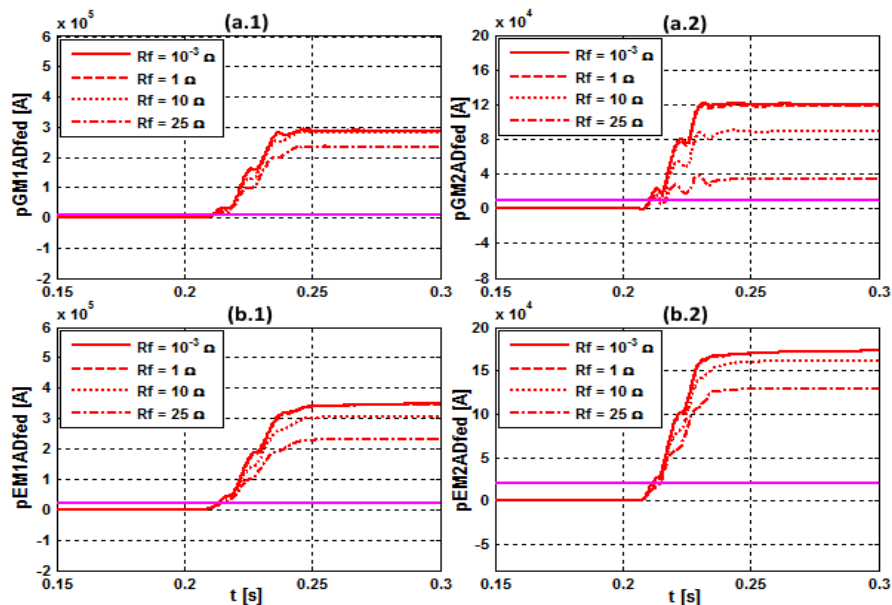
4.2.4 Ispitivanje osjetljivosti algoritama zaštite za slučaj prolaznih kvarova sa velikom otpornošću

Budući da su kvarovi sa električnim lukom veoma česti u EES-u i da je većina njih prolaznog karaktera (nestaju nakon kratkotrajnog prekida napajanja), od posebnog značaja je ispitivanje osjetljivosti analiziranih algoritama baš u ovim slučajevima. Električni luk na mjestu kvara se često u literaturi modeluje čisto aktivnom impedansom sa vrijednošću od nekoliko oma. Zavisno od fizikalne prirode kvara, otpornost na mjestu kvara može imati različite vrijednosti. Pri ispitivanju analiziranih algoritama, vrijednost otpornosti na mjestu kvara je mijenjana u širokom opsegu od $R_f = 10^{-3} \Omega$ do $R_f = 25 \Omega$ (otpornosti na mjestu kvara sa vrijednostima većim od 20Ω su veoma rijetke). Analizirana su dva slučaja kvara: Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB i Bz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB. Odgovarajući rezultati su prikazani na Sl.4.2.7 i Sl.4.2.8, redom.

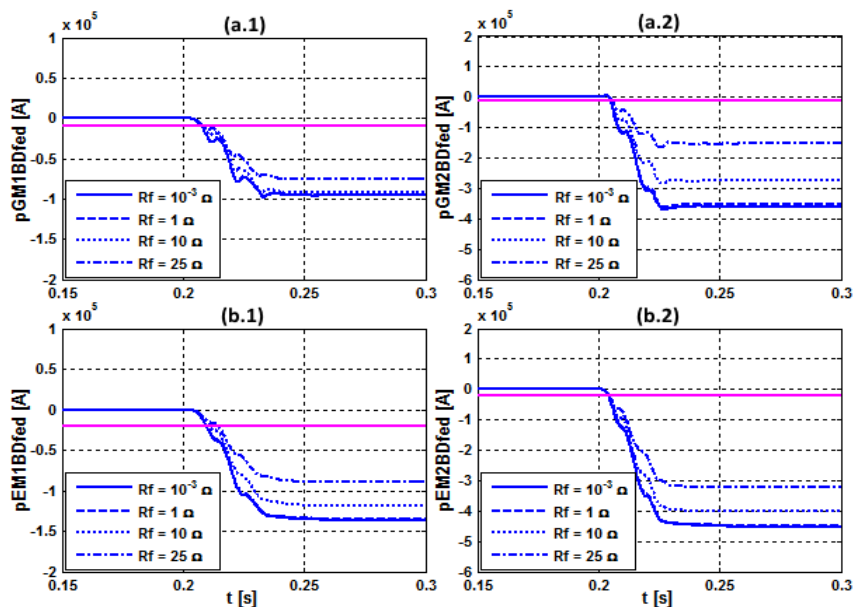
Na osnovu grafika sa Sl.4.2.7, može se zaključiti da je osjetljivost zaštite umanjena pri vrijednostima otpornosti na mjestu kvara koje su veće od 1Ω . Najkritičniji slučaj predstavljaju promjene pokazatelja algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja, sa strane releja R2, koji su prikazani na Sl.4.2.7-(a.2). Može se zaključiti da postoji vjerovatnoća da bi pomenuti algoritam bio neosjetljiv, sa strane releja R2, pri prolaznim kvarovima sa otpornostima na mjestu kvara većim od 20Ω .

Algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja se pokazao kao osjetljiviji u slučaju kvarova sa velikom otpornošću na mjestu kvara, što se može vidjeti sa grafika (b.1) i (b.2) na Sl.4.2.7. Kako su prolazni kvarovi sa otpornostima na mjestu

kvara većim od 20Ω veoma rijetki, može se smatrati da je pri ovom testu, osjetljivost algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja zadovoljavajuća.



Sl.4.2.7 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2



Sl.4.2.8 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Bz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2

U slučaju testa sa kvarom na vodu 2 u fazi B, koji je bliži završnim sabirnicama EB, čiji su rezultati predstavljeni na graficima sa Sl.4.2.8, može se zaključiti da je osjetljivost oba algoritma zadovoljavajuća. Analogno kao kod prethodnog testa, najkritičniji slučaj predstavljaju pokazatelji kvara algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja, sa strane releja R2. Kod ovog testa je osjetljivost manje narušena, u odnosu na prethodni, jer je lokacija kvara sada bliža releju R2.

Na osnovu dobijenih rezultata, za oba slučaja kvara, može se zaključiti da bi oba analizirana algoritma postala neosjetljiva pri nerealno velikim vrijednostima otpornosti na mjestu kvara. Osjetljivost algoritama se smanjuje sa strane oba releje pri povećanju otpornosti na mjestu kvara (postoji značajna korelacija). Međutim, u praktičnim uslovima, velike vrijednosti otpornosti na mjestu kvara, koje bi mogle dovesti do neosjetljivosti zaštite, su veoma rijetke. Zbog prethodnog, opravdano je zaključiti da su analizirani algoritmi osjetljivi pri prolaznim kvarovima sa velikom otpornošću na mjestu kvara. Izuzetak od ovog zaključka bi bio slučaj algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja, sa strane releja R2, pri prolaznim kvarovima praćenim velikom otpornošću na mjestu kvara, koji su bliski početnim sabirnicama BB.

4.2.5 Ispitivanje brzine reagovanja algoritama zaštite

Jedna od osnovnih odlika poprečne diferencijalne zaštite je velika brzina reagovanja. Algoritmi zasnovani na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja rade direktno u vremenskom domenu (koriste pojedinačne odbirke signala), pa stoga za reagovanje zaštite nije potrebno vrijeme za procjenu parametara signala (amplitude i faznog pomjeraja). Vrijeme reagovanja zaštite, u ovoj analizi, obuhvata zbir dva vremena: vrijeme potrebno da pokazatelji kvara dostignu podešenu vrijednost praga reagovanja i vremensko kašnjenje uzrokovano sistemom za filtriranje signala. Ispitivana su vremena reagovanja zaštite za oba analizirana algoritma, pri promjenljivim veličinama lokacije, vrste i trenutka nastanka kvara. Ostvareni rezultati su prikazani u Tab.4.2.1 za oba diferencijalna releja R1 i R2.

Tab.4.2.1 Uporedna analiza brzine reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja

Udaljenost kvara od sabirnica BB		20 km		50 km		100 km		150 km		180 km	
Vrsta kvara	Dif. relej	GM [ms]	EM [ms]	GM [ms]	EM [ms]	GM [ms]	EM [ms]	GM [ms]	EM [ms]	GM [ms]	EM [ms]
<i>Az – 0,2 s vod 1</i>	<i>R1</i>	6	9	7	9	8	9	9	11	11	13
	<i>R2</i>	9	9	8	7	8	6	7	6	6	5
<i>Bz – 0,205 s vod 2</i>	<i>R1</i>	8	9	9	10	10	11	11	13	13	15
	<i>R2</i>	11	10	10	9	10	8	10	7	8	7
<i>Cz – 0,21 s vod 1</i>	<i>R1</i>	7	11	11	12	12	13	14	14	15	16
	<i>R2</i>	11	11	11	10	6	8	4	5	4	4
<i>AB – 0,215 s vod 2</i>	<i>R1</i>	11	11	12	11	13	12	14	14	15	16
	<i>R2</i>	11	11	10	9	5	6	5	6	5	6
<i>BC – 0,2 s vod 1</i>	<i>R1</i>	5	7	6	8	7	8	8	9	10	15
	<i>R2</i>	7	10	6	6	5	5	5	4	4	4
<i>ACz – 0,205 s vod 2</i>	<i>R1</i>	5	7	6	7	7	8	7	9	9	13
	<i>R2</i>	7	8	6	6	6	5	5	4	5	4
<i>BCz – 0,21 s vod 1</i>	<i>R1</i>	5	8	6	8	6	9	8	10	14	16
	<i>R2</i>	7	10	6	6	5	5	5	4	4	4
<i>ABC – 0,215 s vod 2</i>	<i>R1</i>	7	9	8	9	9	10	10	11	12	15
	<i>R2</i>	9	10	9	9	8	7	8	7	6	6

Na osnovu podataka u Tab.4.2.1, moguće je zaključiti da je vrijeme reagovanja zaštite ispitivano za širok opseg lokacija kvara u šticejnoj zoni (20 – 180 km). Lokacije bliske mrtvoj zoni nisu razmatrane u ovoj analizi. Prema ostvarenim rezultatima, moguće je zaključiti sljedeće:

- sva ostvarena vremena reagovanja zaštite, za oba analizirana algoritma, su manja od 20 ms, što je osnovno potrebno vrijeme za procjenu parametara signala kod modernih digitalnih relejnih zaštita,

- većina ostvarenih vremena reagovanja zaštite su manja od 10 ms, što označava veoma brze zaštite,
- što su lokacije kvara bliže diferencijalnim relejima, vremena reagovanja zaštite su manja (za bliske lokacije pojedinih vrsta kvara, u slučaju releja R2, ostvarena su vremena reagovanja manja i od 5 ms),
- za diferencijalni relej R1, algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja se pokazao kao brži, dok za diferencijalni relej R2 nije moguće uočiti značajnu korelaciju na osnovu koje bi se imao zaključak koji, od algoritama je brži (brzina reagovanja diferencijalnog releja R2 se pokazala kao više zavisna od vrste i trenutka nastanka kvara).

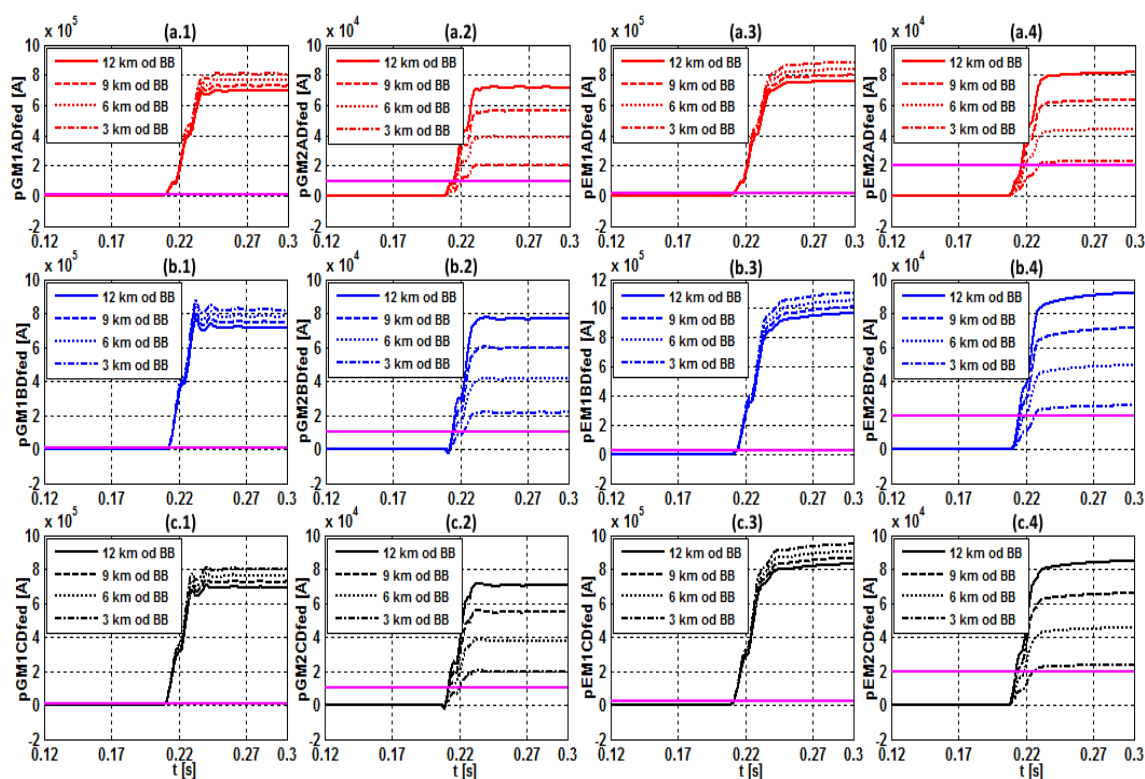
Sva ispitivanja vezana za utvrđivanje brzine reagovanja zaštite su vršena pri predefinisanim pogonskim uslovima sistema (snage i naponi mreža koje napajaju DNV su predefinisane). Otpornost na mjestu kvara nije razmatrana, jer je ranije pokazano da se osjetljivost zaštite ne mijenja značajno pri promjeni otpornosti na mjestu kvara od 1 mΩ do 1 Ω, što su najčešći slučajevi u praksi. Može se zaključiti da je brzina reagovanja zaštite u jakoj korelaciji sa osjetljivošću. Što pokazatelj kvara postiže veću konačnu vrijednost, to je brzina reagovanja zaštite veća. Brzine reagovanja zaštite, za kvarove bliske početnim i krajnjim sabirnicama, nisu razmatrane upravo zbog smanjene osjetljivosti zaštite u blizini granice mrtve zone.

4.2.6 Ispitivanje mrtve zone algoritama zaštite

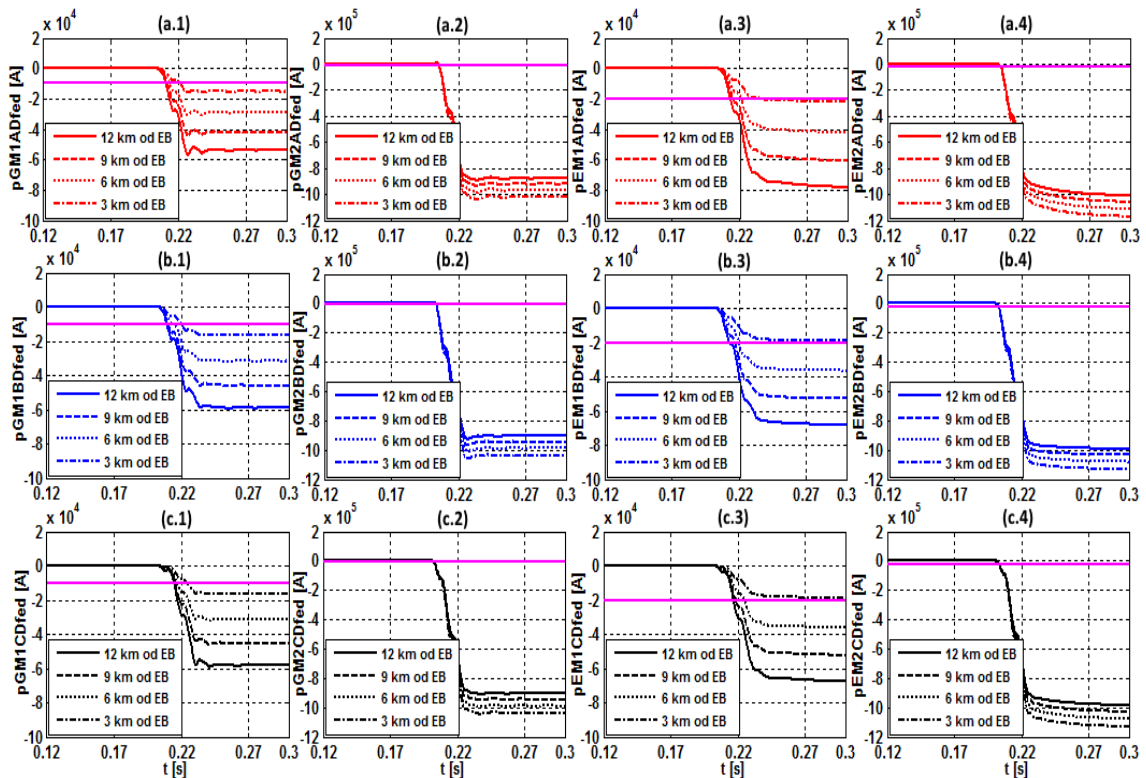
Kao što je već ranije objašnjeno, algoritmi zasnovani na priraštajima strujnih signala imaju mrtvu zonu zbog konačne vrijednosti praga reagovanja. Mrtva zona ove klase algoritma je naslijeđena od klasične usmjerene poprečne diferencijalne zaštite. Njeno postojanje je neophodno da bi se obezbijedila selektivnost zaštite, koja podrazumijeva neosjetljivost zaštite pri kvarovima van DNV-a. Mrtvu zonu zaštite je moguće odrediti samo aproksimativno, tj. da li je ona manja od određene procentualne dužine voda. Tačna dužina mrtve zone zavisi od podešene vrijednosti praga reagovanja, snaga mreža koje napajaju DNV, vrijednosti otpornosti na mjestu kvara, itd. U ovoj analizi, cilj je odrediti maksimalnu dužinu mrtve zone za predefinisane pogonske uslove. Snage trolnog kratkog spoja mreža na početku i kraju DNV-a (M1 i M2 sa Sl.3.2.4) su $P_{1SC3f} = 12$ GVA i $P_{2SC3f} = 10$ GVA, a otpornost na mjestu kvara je

zanemarljiva $R_f = 10^{-3} \Omega$. Da bi se uvažili i različiti trenuci nastanka kvara, ispitivan je slučaj trofaznog kratkog spoja ABCz, jer pri istovremenom kvaru u sve tri faze postoje tri različita relativna trenutka kvara u odnosu na trenutnu vrijednost struje neposredno prije kvara (npr. kvar može nastati u trenutku kada je trenutna vrijednost fazne struje približno jednaka nuli ili maksimumu).

Na Sl.4.2.9 i Sl.4.2.10 prikazani su rezultati ispitivanja analiziranih algoritama za slučajeve kvara ABCz na vodu 1 (u trenutku 0.205 s) i ABCz na vodu 2 (u trenutku 0.2 s), redom, pri promjenljivim udaljenostima lokacije kvara od početnih BB i krajnjih EB sabirnica, redom.



Sl.4.2.9 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trofaznog kratkog spoja ABCz na vodu 1, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica BB: 1. algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C



Sl.4.2.10 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trofaznog kratkog spoja ABCz na vod 2, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica EB: 1.

Algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. Algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C

Na osnovu grafika sa Sl.4.2.9 može se uočiti da su u pogledu analize mrtve zone od interesa pokazatelji kvara diferencijalnog releja R2, dok je promjena osjetljivosti značajno manja za slučaj pokazatelja kvara diferencijalnog releja R1. Ispitivane lokacije kvara su bliske početnim sabirnicama BB (12 km, 9 km, 6 km i 3 km od BB), dok je relej R2 lociran na kraju dionice DNV-a. Smanjenjem udaljenosti lokacije kvara od početnih sabirnica BB (ili povećanjem udaljenosti od završnih sabirnica EB) osjetljivost releja R2 se smanjuje, što je važeći zaključak za oba analizirana algoritma zaštite. Promjena vrijednosti pokazatelja kvara u sve tri faze, u slučaju oba algoritma, je gotovo identična, na osnovu čega je moguće zaključiti da osjetljivost zaštite nije u značajnoj korelaciji sa trenutkom nastanka kvara, iako trenutak nastanka kvara utiče u maloj mjeri na konvergenciju algoritma putem odziva sistema za filtriranje signala.

U slučaju oba analizirana algoritma, sa strane releja R2, moguće je zapaziti da se konačna vrijednost pokazatelja kvara smanjuje za aproksimativno 20 kA, za svaku

promjenu udaljenosti lokacije kvara od početnih sabirnica BB za 3 km. Za usvojene vrijednosti pragova reagovanja, kao manje osjetljiv, sa strane releja R2, pokazao se algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja. Utvrđena dužina njegove mrtve zone, za relej R2, je aproksimativno jednaka 3 km. Pri utvrđivanju dužine mrtve zone, ostavljena je mala rezerva u odnosu na vrijednost praga reagovanja zbog velike vjerovatnoće pojave prolaznih kvarova sa električnim lukom. Na graficima sa Sl.4.2.9, koji prikazuju pokazatelje kvara releja R2 algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja (a.2, b.2 i c.2), može se uočiti da je dužina mrtve zone aproksimativno jednaka 2 km, takođe uz uvažavanje male rezerve.

Prilikom pregleda rezultata sa Sl.4.2.10, moguće je uočiti da je problem mrtve zone izražen za slučaj diferencijalnog releja R1, za oba analizirana algoritma. Ispitivane lokacije kvara su bliske krajnjim sabirnicama EB (12 km, 9 km, 6 km i 3 km od EB), dok je relej R1 lociran na početku dionice DNV-a. Smanjenjem udaljenosti lokacije kvara od krajnjih sabirnica EB (ili povećanjem udaljenosti od početnih sabirnica BB) osjetljivost releja R1 se smanjuje, što je važeći zaključak za oba analizirana algoritma zaštite. Promjene pokazatelja u različitim fazama su približno jednake, kao i u slučaju prethodnog testa. Kod ovog testa, primjetne su male razlike u smanjenju osjetljivosti zaštite, pri promjeni lokacije kvara, za dva ispitivana algoritma. U slučaju algoritma, zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja, konačna vrijednost pokazatelja kvara smanjuje se za približno 16 kA, za svaku promjenu udaljenosti lokacije kvara od krajnjih sabirnica EB za 3 km. Smanjenje osjetljivosti, prisutno u slučaju algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, je nešto veće za identičnu vrijednost promjene lokacije kvara od 3 km i ono približno iznosi 20 kA, što je identično kao u prošlom testu. Na osnovu prethodnog, može se zaključiti da je promjena osjetljivosti algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja približno identična za oba diferencijalna releja, R1 i R2, dok je u slučaju algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja, promjena osjetljivosti veća za diferencijalni relej R2.

Dužine mrtvih zona releja R1 su aproksimativno jednake 2,5 km i 4 km za algoritme zasnovane na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja, redom (uvažena je mala rezerva). Na osnovu grafika (a.3), (b.3) i (c.3), sa Sl.4.2.10, može se uočiti da je algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja neosjetljiv u

slučaju kvara udaljenog 3 km od završnih sabirnica EB, za faze B i C (konačna vrijednost pokazatelja u fazi A je malo veća u odnosu na podešenu vrijednost praga reagovanja).

Uzimajući u obzir dužine mrtvih zona oba diferencijalna releja, R1 i R2, moguće je približno utvrditi ukupne dužine mrtvih zona za oba analizirana algoritma. Prema tome, odgovarajuće vrijednosti ukupnih dužina mrtvih zona iznose $m_1 = 4,5$ km i $m_2 = 7$ km, za algoritme zasnovane na priraštajima apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja, redom. Prethodne vrijednosti dužina mrtvih zona uvažavaju malu rezervu za slučaj smanjenja osjetljivosti pri prolaznim kvarovima sa malom otpornošću na mjestu kvara. Takođe, ove vrijednosti su utvrđene za predefinisane pogonske uslove (naponi i snage mreža na krajevima DNV-a) i podešene vrijednosti pragova reagovanja. Posmatrano u odnosu na dužinu DNV-a, približne dužine mrtvih zona iznose 2,25% i 3,5%, što je dobar rezultat, budući da je mala vjerovatnoća da se kvarovi pojave baš u blizini zajedničkih sabirnica. Iz prethodne analize je jasno da algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja ima manju dužinu mrtve zone ili veću osjetljivost u slučaju dvostrano napajanog DNV-a.

4.2.7 Diskusija

U ovom odjeljku doktorske disertacije vršena su detaljna ispitivanja algoritama zasnovanih na strujnim priraštajima za poprečnu diferencijalnu zaštitu dvostrano napajanih DNV-ova. Osnovni cilj ispitivanja je bilo utvrđivanje osnovnih osobina relejne zaštite: selektivnosti, osjetljivosti i brzine reagovanja.

U svim analiziranim testovima, oba algoritma su se pokazala kao selektivna. Pravilno definisanje vrijednosti pragova reagovanja je obezbijedilo selektivnost algoritama u slučaju kvarova izvan DNV-a, tj. spriječeno je reagovanje zaštite pri kvarovima izvan štice zone. Oba algoritma su, u svakom testu, selektivno prepoznala koji od paralelnih vodova je u kvaru, čime je ostvaren osnovni preduslov za selektivno isključenje samo onog voda na kome je kvar.

Osjetljivost analiziranih algoritama zaštite je detaljno ispitivana kroz uporednu analizu. Utvrđeno je da su oba algoritma osjetljiva pri kvarovima na različitim lokacijama (različite udaljenosti od početnih i krajnjih sabirnica), različitih vrsta (tropolni, dvopolni sa zemljospojem i bez zemljospoja i jednopolni) i različitih

trenutaka nastanka kvara (referentno u odnosu na periodu signala). Oba algoritma su se pokazala kao osjetljiva u širokom opsegu promjene pogonskih uslova sistema, prije nastanka kvara (različite snage trolnih kratkih spojeva mreža koje napajaju DNV). Pokazano je da se osjetljivost algoritama sa strane diferencijalnog releja R2 značajno smanjuje sa smanjenjem snage mreže priključene na završne sabirnice EB. Na osnovu rezultata velikog broja testova, utvrđeno je da su algoritmi osjetljivi i pri prolaznim kvarovima sa velikom otpornošću na mjestu kvara i da se njihova osjetljivost smanjuje sa povećanjem otpornosti na mjestu kvara. Kao najkritičniji slučaj (najmanja osjetljivost) pokazao se algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja, sa strane diferencijalnog releja R2. Kroz detaljna ispitivanja slučaja trolnog kratkog spoja na lokacijama u blizini početnih i završnih sabirnica, utvrđene su dužine mrtvih zona oba algoritma za predefinisane pogonske uslove sistema prije kvara. Pokazano je da algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja ima manju dužinu mrtve zone u odnosu na algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja.

Posebna ispitivanja su vršena u svrhu utvrđivanja brzine reagovanja zaštitnih algoritama. Na osnovu rezultata je pokazano da su oba algoritma zaštite veoma brza sa vremenima reagovanja manjim od 20 ms u svim analiziranim slučajevima kvara. Sa strane diferencijalnog releja R1, algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja se pokazao kao malo brži. Utvrđena je značajna korelacija između brzine reagovanja oba algoritma i udaljenosti lokacije kvara od diferencijalnih releja. Što je lokacija kvara bliža, algoritmi reaguju brže. U pojedinim testovima, u okviru ispitivanja, vremena reagovanja algoritama su bila manja od 5 ms, što je veoma značajan rezultat, s obzirom da su u vremena reagovanja zaštite uključena i vremenska kašnjenja sistema za filtriranje signala. Došlo se i do veoma važnog zaključka da je brzina reagovanja u jakoj korelaciji sa osjetljivošću algoritama zaštite. Što je osjetljivost veća, po pravilu je i vrijeme reagovanja zaštite manje.

4.3 Algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu radijalnog dvostrukog nadzemnog voda

Ranije ispitivani algoritam zasnovan na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja nije primjenjiv u slučaju radijalno napajanih DNV-ova [19], zbog neosjetljivosti zaštite sa strane diferencijalnog releja R2 [22], [71], [72], [78]. Takođe, na osnovu rezultata ispitivanja njegove osjetljivosti u slučaju promjenjive snage trolejnog kratkog spoja mreže sa strane završnih sabirnica EB, vidljivo je značajno smanjenje osjetljivosti pokazatelja kvara sa strane releja R2 pri smanjenju snage odgovarajuće mreže. Slučaj male snage trolejnog kratkog spoja mreže sa strane završnih sabirnica EB („slab izvor”) je veoma sličan slučaju radijalno napajanih DNV-a sa strane početnih sabirnica BB, jer mreža manje snage utiče manje na struju kvara u odnosu na mrežu veće snage. Iz prethodnog razloga je i došlo do razvoja algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, koji direktno uvažava i promjene faznih uglova struja DNV-a [22].

U prethodnom istraživanju [22], uočen je značajan nedostatak algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, prvobitno predloženog u [19]. Pokazano je da je prethodni algoritam neosjetljiv u slučaju kvarova na radijalno napajanom DNV-u, sa strane diferencijalnog releja R2, kada na završnim sabirnicama EB nema potrošnje (slučaj praznog hoda). Problematika se može uopštiti i proširiti na slučaj kvarova na radijalno napajanom DNV-u, preko koga se napajaju potrošači malih snaga. Radi se o režimu bliskom praznom hodu DNV-a, koji prethodi režimu kvara. Razlog neosjetljivosti, kada kvar nastaje iz režima praznog hoda, je vidljiv i u samoj definiciji pokazatelja kvara analiziranog algoritma, jednačine (4.1.5) i (4.1.6), jer ne postoje konačne vrijednosti odbiraka strujnih signala prije kvara koje algoritam koristi pri proračunu vrijednosti pokazatelja kvara. Ovaj problem nije izražen kod diferencijalnog releja R1, jer se struje na početku DNV-a, i pri kvaru iz režima praznog hoda, dovoljno razlikuju po amplitudama, pa vrijednosti pokazatelja kvara releja R1 postaju veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Nasuprot tome, sa strane releja R2, razlika amplituda struja kvara iz režima praznog hoda praktično ne postoji, dok razliku faznih stavova nije moguće procijeniti, jer su odbirci struja prije kvara približno jednaki nuli (ne postoji referentna veličina).

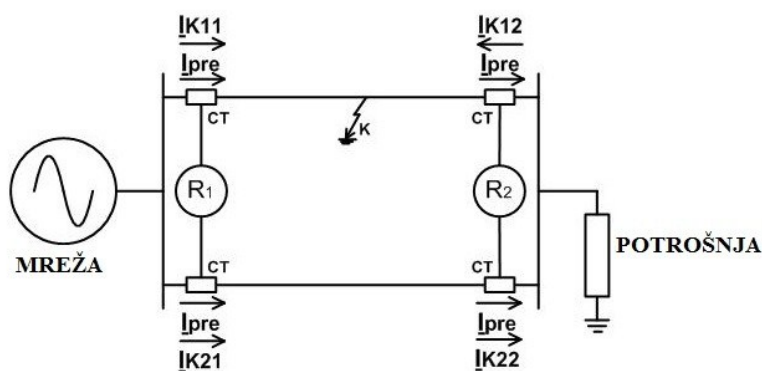
Problem neosjetljivosti poprečne diferencijalne zaštite radijalno napajanih DNV-a, zasnovane na priraštajima strujnih signala, u slučaju režima kvara kome prethodi režim

praznog hoda ili male potrošnje, je predstavljao osnovnu motivaciju za razvoj novog algoritma. Novi algoritam je razvijan specifično za slučaj radijalno napajanog DNV-a, sa osnovnim ciljem poboljšanja osjetljivosti zaštite. Ideja je inspirisana postojećim algoritmom za procjenu smjera struje kvara direktnog redoslijeda, koji kao referentnu veličinu koristi istu struju, ali iz režima prije kvara [79]. Pomenuti algoritam je razvijen za detekciju smjera struje kvara na radijalno napajanom JNV-u. Promjena faznog ugla struje pri kvaru je procijenjena primjenom Kalmanovog filtera [80], a potrebno vrijeme procjene je 20 ms. Osnovna razlika između koncepta prethodnog algoritma u odnosu na algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja je proračun priraštaja fazora struje prije i posle kvara. Za analizu fazora signala je potreban određeni postupak procjene, koji zahtijeva značajno vremensko kašnjenje.

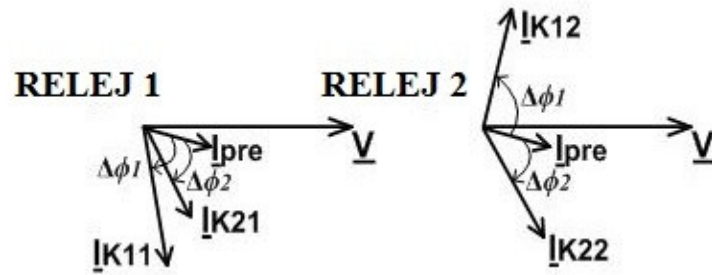
Da bi se razvio novi algoritam za poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a, konkurentan postojećim algoritmima po brzini reagovanja zaštite, zasnovanim na priraštajima strujnih signala, primjenjen je koncept digitalnog faznog komparatora [81], [82]. Algoritam je razvijen za slučaj radijalno napajanog DNV-a u direktno uzemljenim mrežama.

4.3.1 Teorijske osnove algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala

Teorijske osnove principa rada predloženog algoritma su objašnjene na jednostavnom primjeru radijalno napajanog DNV-a u direktno uzemljenom EES-u, koji je prikazan na Sl.4.3.1 [71], [72]. Odgovarajući fazorski dijagram za slučaj kvara u šticejnoj zoni je prikazan na Sl.4.3.2 [71], [72].



Sl.4.3.1 Pojednostavljena jednopolna šema radijalno napajanog DNV-a sa prikazanim kvarom u šticejnoj zoni poprečne diferencijalne zaštite [72]



Sl.4.3.2 Fazorski dijagram koji prikazuje struje DNV-a za slučaj kvara sa Sl.4.3.1 u odnosu na referentne fazore napona odgovarajućih sabirnica [72]

Kada se kvar dogodi na vodu 1 (gornji vod sa S.4.3.1), fazori struja DNV-a će biti aproksimativno raspoređeni kao što je prikazano na fazorskom dijagramu sa Sl.4.3.2. Pretpostavljeno je da fazor struje vodova prije kvara odgovara pretežno aktivnom opterećenju (I_{pre}). U toku kvara, važe sljedeće relacije sa strane releja R1 [72]:

$$|I_{K11}| \gg |I_{K21}|, \quad (4.3.1)$$

$$|\Delta\phi_1| > |\Delta\phi_2|, \quad (4.3.2)$$

gdje su: I_{K11} i I_{K21} fazori struja kvara vodova 1 i 2 sa strane releja R1, respektivno, $\Delta\phi_1$ i $\Delta\phi_2$ fazni pomjeraji fazora struja kvara vodova 1 i 2, sa strane releja R1, u odnosu na fazor struje prije kvara I_{pre} .

Relacija (4.3.1) je uspješno korišćena kao kriterijum selektivnosti kod algoritma zasnovanog na priraštajima apsolutnih vrijednosti struja. Fazni pomjeraji $\Delta\phi_1$ i $\Delta\phi_2$ su istog znaka (oba su negativna u odnosu na pozitivni matematički smjer), ali kriterijum (4.3.2) ipak može u nekoj mjeri da ukaže na činjenicu koji od vodova je u kvaru. Obje analizirane relacije ukazuju da je lokacija kvara na vodu 1, što je iskorišćeno i implementirano u novi algoritam u vremenskom domenu.

Na osnovu fazorskog dijagrama za relej R2, može se zaključiti da su važeće sljedeće relacije [72]:

$$|I_{K12}| < |I_{K22}|, \quad (4.3.3)$$

$$\Delta\phi_1 > 0, \quad (4.3.4)$$

$$\Delta\phi_2 < 0, \quad (4.3.5)$$

gdje su: I_{K12} i I_{K22} fazori struja kvara vodova 1 i 2 sa strane releja R2, respektivno, $\Delta\phi_1$ i $\Delta\phi_2$ fazni pomjeraji fazora struja kvara vodova 1 i 2, sa strane releja R2, u odnosu na fazor struje prije kvara I_{pre} .

Poređenje amplituda fazora struja sa strane releja R2, definisano relacijom (4.3.3), ne predstavlja baš pouzdan kriterijum za ostvarivanje selektivnosti zaštite u slučaju radijalno napajanog DNV-a. Često pri kvarovima, na bilo kom od dva voda, amplitude struja sa strane releja R2 imaju dosta bliske vrijednosti, pa vrijednost njihove razlike nije dovoljna da bi se postigla vrijednost podešenog praga reagovanja. Zbog prethodnog, poprečna diferencijalna zaštita, koja je zasnovana samo na poređenju amplituda struja, nije osjetljiva sa strane releja R2 u slučaju radijalno napajanog DNV-a.

Da bi zaštita postala osjetljiva sa strane releja R2, potrebno je iskoristiti i relacije (4.3.4) i (4.3.5) pri definisanju pokazatelja kvara novog algoritma. Takođe, promjene faznih uglova struja je potrebno procijeniti bez prethodne klasične procjene fazora struja, da bi novi algoritam po brzini reagovanja bio konkurentan ranije ispitivanim algoritmima zasnovanim na priraštajima struja, koji rade direktno sa odbircima signala u vremenskom domenu.

4.3.2 Princip rada i implementacija algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala

Ideja digitalnog faznog komparatora, zasnovana na integralu trenutne snage signala [81]-[83], je prilagođena i primijenjena samo na strujne signale. Princip rada je baziran na poređenju faznog ugla struja DNV-a prije kvara i faznog ugla istih tih struja nakon kvara. Kao referentna vrijednost za utvrđivanje smjera struje kvara $i(t)$, koristi se ista, ali vještački vremenski (fazno) pomjerena struja $i(t - T/4)$ (struja iz prošlosti), gdje parametar T predstavlja osnovnu periodu signala. U radnim režimima DNV-a, prije pojave kvara (početna stacionarna stanja), odgovarajući fazori struja $i(t)$ i $i(t - T/4)$ su fazno pomjereni za ugao $\pi/2$, pa je vrijednost digitalnog faznog komparatora (DFK) jednaka nuli [71]:

$$\int_{t-T/2}^t i(t)i(t-T/4)dt = 0. \quad (4.3.6)$$

Na osnovu prethodnog izraza, moguće je zaključiti da prilagođeni digitalni fazni komparator sa matematičkog aspekta predstavlja integral proizvoda dva strujna signala na vremenskom intervalu od jedne poluperiode. Prethodni integral je uvijek jednak nuli u stacionarnim režimima rada pri konstantnoj frekvenciji signala. Međutim, kada dođe do poremećaja u sistemu (pojava kvara), fazni ugao strujnog signala se mijenja i za vrijeme prelaznog procesa vrijednost integrala je različita od nule. Nakon što se uspostavi novo stacionarno stanje, kada prođe prelazni proces, vrijednost integrala ponovo postaje jednaka nuli.

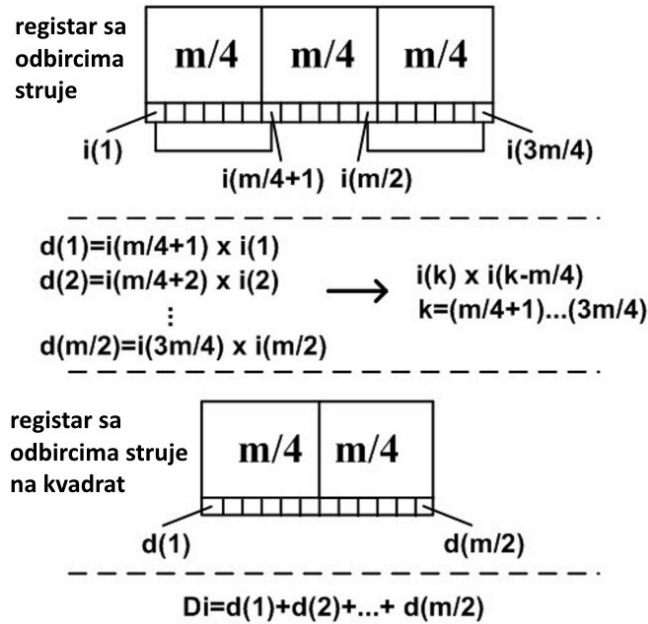
Suština principa rada novog algoritma je bazirana na detekciji promjene vrijednosti integrala, definisanog izrazom (4.3.6). U direktno uzemljenim mrežama petlje kvara su induktivne (struje kvara fazno zaostaju za naponima), dok su u režimima neposredno prije kvara struje radijalnih nadzemnih vodova obično rezistivne ili „blago” induktivne (definisane potrošnjom). Stoga, kada nastane kvar, novi odbirci struje, tj. odbirci iz režima nakon nastanka kvara, vremenski zaostaju u odnosu na odgovarajuće odbirke iste te struje iz režima neposredno prije kvara. Novi odbirci se u prilagođenom DFK-u porede sa odbircima vještački formirane struje $i(t - T/4)$. Ukoliko je petlja kvara idealno induktivna, onda bi neposredno nakon nastanka kvara struje $i(t)$ i $i(t - T/4)$ bile u fazi, pa bi tada prilagođeni DFK imao maksimalnu pozitivnu vrijednost [71]:

$$\int_{t-T/2}^t i(t)i(t - T/4)dt > 0. \quad (4.3.7)$$

Princip formiranja usmjerenog elementa D_i u računarskim registratorima, kojem je pridružen naziv „pokazatelj promjene faznog ugla signala struje”, je prikazan na Sl.4.3.3 [71].

Na osnovu simboličkog prikaza računarskih registara sa Sl.4.3.3, moguće je zaključiti da je dovoljna dužina registra sa odbircima struje jednaka $3m/4$, da bi se formirao registar sa kvadratnim vrijednostima odbiraka, dužine $m/2$, čiji sadržaj je potrebno sumirati u svrhu približnog proračuna integrala (4.3.6). m predstavlja ukupan broj odbiraka u periodu T signala struje. U prvom koraku proračuna izračunavaju se proizvodi odbiraka struje, vremenski pomjereni za $T/4$ (udaljeni u registru za dužinu $m/4$), i pamte se u registru kvadratnih odbiraka struje. Drugi i istovremeno završni korak

obuhvata sumiranje svih kvadratnih odbiraka u registru što odgovara dužini vremenskog intervala integraljenja od $T/2$.



Sl.4.3.3 Princip formiranja pokazatelja promjene faznog ugla signala struje D_i u računarskim registrima [71]

Za relej R1, pokazatelji promjene faznih uglova struja u istoj fazi na početku DNV-a D_{11} i D_{21} se numerički izračunavaju na osnovu sljedećih izraza [71], [72]:

$$D_{11} = \sum_{k=(m/4)+1}^{3m/4} i_{11}(k) i_{11}\left(k - \frac{m}{4}\right), \quad (4.3.8)$$

$$D_{21} = \sum_{k=(m/4)+1}^{3m/4} i_{21}(k) i_{21}\left(k - \frac{m}{4}\right), \quad (4.3.9)$$

gdje su $i_{11}(k)$ i $i_{21}(k)$ trenutni odbirci struja u istoj fazi vodova 1 i 2, sa strane releja R1.

Analogno releju R1, i za relej R2 se numerički izračunavaju promjene faznih uglova struja u istoj fazi na kraju DNV-a D_{12} i D_{22} , prema sljedećim izrazima [71], [72]:

$$D_{12} = \sum_{k=(m/4)+1}^{3m/4} i_{12}(k) i_{12}\left(k - \frac{m}{4}\right), \quad (4.3.10)$$

$$D_{22} = \sum_{k=(m/4)+1}^{3m/4} i_{22}(k) i_{22}\left(k - \frac{m}{4}\right), \quad (4.3.11)$$

gdje su $i_{12}(k)$ i $i_{22}(k)$ trenutni odbirci struja u istoj fazi vodova 1 i 2, sa strane releja R2.

Nakon definisanja pokazatelja promjene faznih uglova struja, neophodno je definisati pokazatelje kvara predloženog algoritma poprečne diferencijalne zaštite. Za slučaj kvara na vodu 1, analizom fazorskih dijagrama sa Sl.4.3.2, može se doći do zaključka da važe sljedeće relacije, posmatrano sa strane oba releja:

$$\begin{aligned} R1 &\rightarrow D_{11} > 0 \wedge D_{21} > 0 \wedge D_{11} \gg D_{21}, \\ R2 &\rightarrow D_{12} < 0 \wedge D_{22} > 0. \end{aligned} \quad (4.3.12)$$

Na osnovu fazorskog dijagrama za relej R1, sa Sl.4.3.2, može se uočiti da su oba fazna pomjeraja istofaznih struja $\Delta\phi_1$ i $\Delta\phi_2$ (vodovi 1 i 2, redom) negativna u odnosu na pozitivan matematički smjer. Međutim, vrijednosti odgovarajućih pokazatelja promjene faznih uglova struja D_{11} i D_{21} su pozitivne, jer struje nakon nastanka kvara fazno zaostaju u odnosu na struje prije nastanka kvara. Dakle, pokazatelj promjene faznog ugla struje D_i je pozitivan, prema izrazu (4.3.7), ukoliko je odgovarajuća promjena faznog ugla $\Delta\phi_i$ negativna.

Za kvarove na većem dijelu dionice voda 1, važeća je relacija $D_{11} \gg D_{21}$, iako se vrijednosti faznih pomjeraja struja $\Delta\phi_{11}$ i $\Delta\phi_{21}$ ne razlikuju značajno. Na vrijednosti pokazatelja D_{11} i D_{21} će uticati i promjene amplituda struja. Vrijednost amplitude struje kvara voda 1 će biti značajno veća u odnosu na vrijednost amplitude struje kvara voda 2, što je i istaknuto izrazom (4.3.1). Uticaj promjene amplitude struje kvara se može uočiti i iz same definicije modifikovanog DFK, koja je data izrazom (4.3.6). Pri većim vrijednostima amplitude struje kvara $i(t)$, vrijednosti proizvoda $i(t) \cdot i(t - T/4)$ će biti veće, a samim tim i vrijednosti integrala (4.3.6). Na osnovu prethodnog, moguće je doći do zaključka da na razliku vrijednosti pokazatelja D_{11} i D_{21} ($D_{11} \gg D_{21}$), dominantno utiče razlika između vrijednosti amplituda struja kvara $i_{11}(t)$ i $i_{21}(t)$.

Na osnovu fazorskog dijagrama za relej R2, sa Sl.4.3.2, može se uočiti da za fazne pomjeraje istofaznih struja važi $\Delta\phi_1 > 0$ i $\Delta\phi_2 < 0$ što je i istaknuto relacijama (4.3.4) i (4.3.5). Prema definicijama pokazatelja promjene faznih uglova struja $i_{12}(t)$ i $i_{22}(t)$, analognom logikom, kao u slučaju releja R1, vrijede relacije $D_{12} < 0$ i $D_{22} > 0$. Sa strane releja R2, pri analiziranom kvaru na vodu 1, na razlike između vrijednosti pokazatelja D_{12} i D_{22} dominantno utiču razlike faznih pomjeraja struja $i_{12}(t)$ i $i_{22}(t)$ ($\Delta\phi_{12}$ i $\Delta\phi_{22}$). Razlike između vrijednosti amplituda struja $i_{12}(t)$ i $i_{22}(t)$ nisu dominantne, što je karakteristično za radijalno napajan DNV.

Analognom analizom, kao kod slučaja kvara na vodu 1, dolazi se i do relacija između pokazatelja promjene faznih uglova struja, sa strane oba releja, za slučaj kvara na vodu 2:

$$\begin{aligned} R1 &\rightarrow D_{11} > 0 \wedge D_{21} > 0 \wedge D_{11} \ll D_{21}, \\ R2 &\rightarrow D_{12} > 0 \wedge D_{22} < 0. \end{aligned} \quad (4.3.13)$$

Detaljnijom analizom slučajeva kvara na vodovima 1 i 2, u pogledu vrijednosti pokazatelja promjene faznih uglova struja nakon nastanka kvara, dolazi se do ideje za definisanje pokazatelja kvara poprečne diferencijalne zaštite zasnovane na novom algoritmu. Da bi se ostvarila selektivnost zaštite, vrijednosti pokazatelja kvara sa strane oba releja moraju biti različitog znaka za kvarove na vodovima 1 i 2 (zaštita mora selektivno odrediti koji od dva voda je u kvaru). Usvojen je kriterijum da su potrebne vrijednosti pokazatelja kvara pozitivne za slučaj kvara na vodu 1, a negativne za slučaj kvara na vodu 2. Na osnovu relacija (4.3.12) i (4.3.13), koje opisuju slučajeve kvara na vodovima 1 i 2, redom, moguće je definisati pokazatelje kvara sa strane releja 1 i 2, redom, pomoću sljedećih izraza:

$$R1 \rightarrow D_1(k) = D_1(k-1) + D_{11} - D_{21}, \quad (4.3.14)$$

$$R2 \rightarrow D_2(k) = D_2(k-1) + D_{22} - D_{12}. \quad (4.3.15)$$

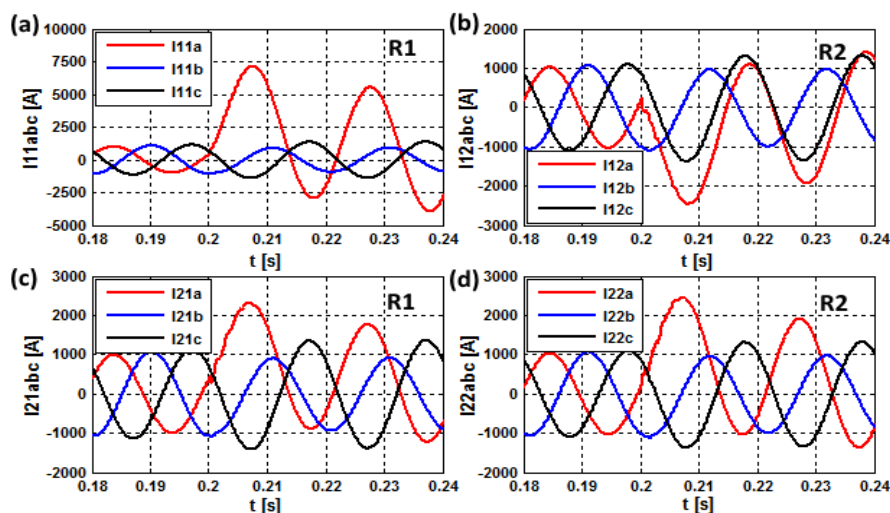
Na osnovu prethodnih izraza i analizom relacija (4.3.12) i (4.3.13), moguće je zaključiti da je ispunjen traženi kriterijum selektivnosti zaštite, tj. da pokazatelji kvara D_1 i D_2 imaju pozitivne vrijednosti pri kvaru na vodu 1, a negativne pri kvaru na vodu 2. Za prethodne pokazatelje kvara usvojena je simbolična oznaka FS prema početnim slovima prezimena autora naučnog članka [71]. Upotrebom ovakvih definicija pokazatelja kvara, postižu se analogni uslovi selektivnog reagovanja releja kao kod algoritama zasnovanih na priraštajima struja DNV-a:

$$\begin{aligned} FS_{j-abc}(k) &> D_{FS} \rightarrow \text{kvar_na_vodu_1}, \\ FS_{j-abc}(k) &< -D_{FS} \rightarrow \text{kvar_na_vodu_2}, \\ |FS_{j-abc}(k)| &< D_{FS} \rightarrow \text{kvar_nije_u_zoni_zaštite}, \end{aligned} \quad (4.3.16)$$

gdje su: j - oznaka releja na početku ili kraju dionice DNV-a ($j = 1 - R1$ na početku dionice DNV-a; $j = 2 - R2$ na kraju dionice DNV-a); a, b, c - oznake faznih provodnika; D_{FS} podešeni prag reagovanja releja.

4.3.3 Primjer rada algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala

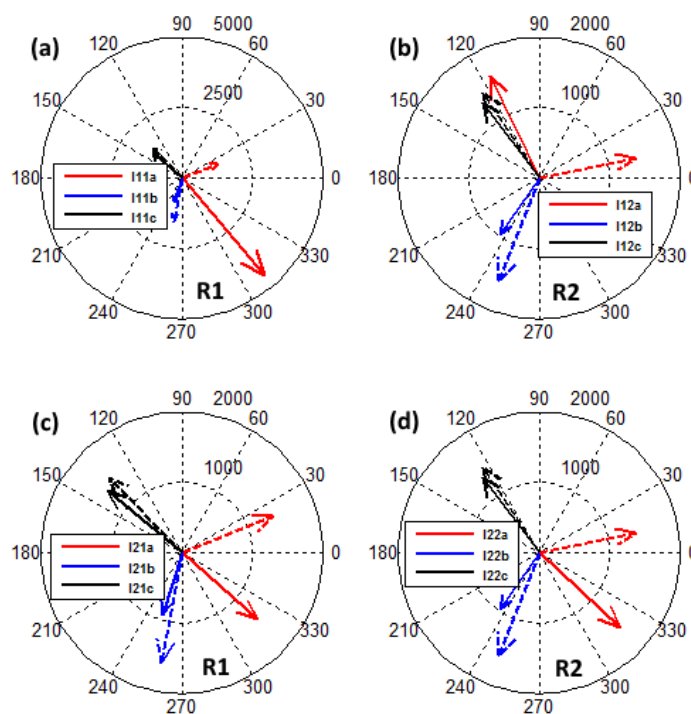
Koristeći ranije formirani i analizirani model 400 kV DNV-a, čiji detalji su prikazani na Sl.3.2.4, modelovan je jednofazni kratak spoj Az na sredini dionice voda 1 (100 km od početnih sabirnica BB). Predloženi algoritam, zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala je računarski implementiran pomoću simulatora rada relejne zaštite u realnom vremenu koji je detaljno predstavljen u poglavlju 2. Ispitivani slučaj kvara ima za svrhu da posluži kao pokazni primjer, koji ističe karakteristične korake pri formiranju pokazatelja kvara predloženog algoritma. U analiziranom modelu, za slučaj radialno napajanog DNV-a, kvar je iniciran u fazi A i u trenutku 0,2 s od početka simulacije. Odgovarajuće promjene u vremenu struja DNV-a su prikazane na Sl.4.3.4 dok su njima odgovarajući fazori prikazani na Sl.4.3.5.



Sl.4.3.4 Promjene u vremenu struja DNV-a prije i poslije jednofaznog kratkog spoja Az na vodu 1 (trenutak 0.2 s): (a) struje na početku voda 1 – lokacija 11; (b) struje na kraju voda 1 – lokacija 12; (c) struje na početku voda 2 – lokacija 21; (d) struje na kraju voda 2 – lokacija 22

Na osnovu grafika sa Sl.4.3.4, može se uočiti da je vrijednost amplitude struje u fazi A, voda 1, značajno veća u odnosu na istofaznu struju voda 2 (poređenje slučaja (a) i (c) – strana releja R1). Analizirajući grafike (b) i (d), na istoj slici, koji odgovaraju strani releja R2, može se zaključiti da su vrijednosti amplitude istofaznih struja vodova 1 i 2 veoma bliske, ali da se njihovi fazni uglovi značajno razlikuju. Da bi se jasnije uočile promjene strujnih signala pri razmatranom kvaru, neophodno je posmatrati fazorske dijagrame sa Sl.4.3.5. Fazori struja prije kvara su označeni isprekidanom linijom dok su odgovarajući fazori struja poslije kvara označeni punom linijom. Na

osnovu dijagrama za relej R1, (a) i (c), primjetno je da je vrijednost modula fazora struje u fazi A, voda 1, značajno veća od vrijednosti modula fazora struje u fazi A, voda 2. Vrijednosti faznih uglova prethodnih fazora struja se ne razlikuju značajno. Može se zaključiti da sa strane releja R1, nakon kvara, oba fazora struja faze A, vodova 1 i 2, fazno zaostaju u odnosu na fazor struje faze A, oba voda, ali prije kvara (označen isprekidanom crvenom strelicom). Prethodni zaključak potvrđuje teorijsku analizu vezanu za fazorski dijagram sa Sl.4.3.2.

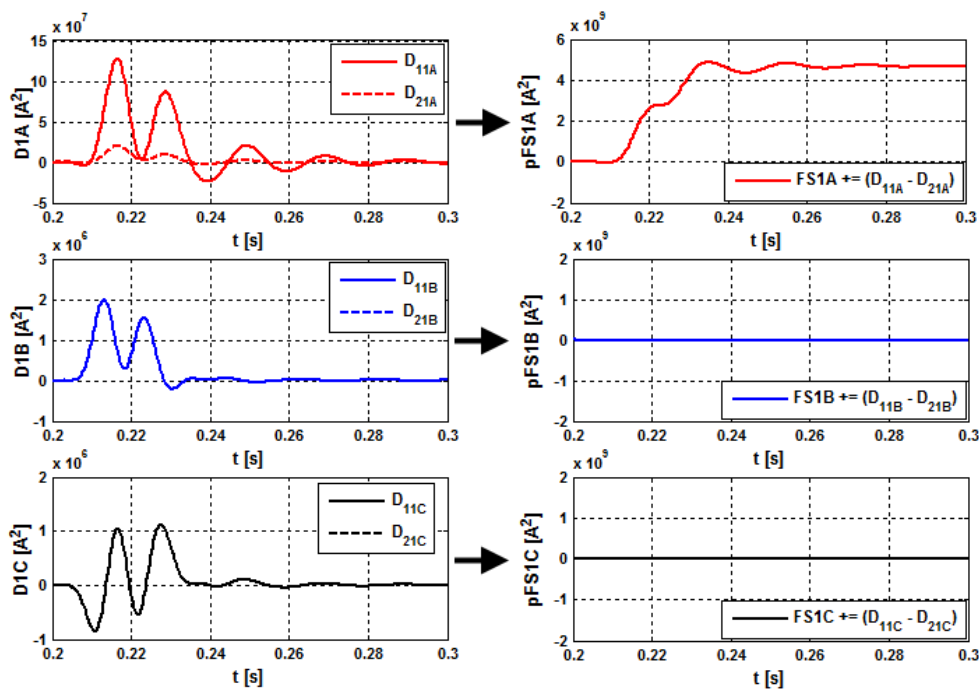


Sl.4.3.5 Fazori struja DNV-a prije i poslije jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1 (trenutak 0.2 s): (a) struje na početku voda 1 – lokacija 11; (b) struje na kraju voda 1 – lokacija 12; (c) struje na početku voda 2 – lokacija 21; (d) struje na kraju voda 2 – lokacija 22

Sa strane releja R2, na osnovu fazorskih dijagrama (b) i (d) sa Sl.4.3.5, jasno je uočljiva razlika između faznih uglova fazora struja faze A vodova 1 i 2. Fazor struje faze A, voda 1, nakon kvara, fazno prednjači odgovarajućem fazoru struje faze A, voda 1, prije kvara. Dok odgovarajući fazor struje faze A, voda 2, nakon kvara, fazno zaostaje u odnosu na ranije pomenuti fazor struje faze A, voda 2, prije kvara. Promjena vrijednosti modula fazora struja faze A, sa strane releja R2, nije značajna. Prethodna analiza takođe potvrđuje teorijske pretpostavke fazorskog dijagrama sa Sl.4.3.2.

Promjene faznih uglova fazora struja faza B i C su zanemarljive u odnosu na odgovarajuće promjene fazora struje faze A, posebno sa strane releja R1. Fazori struja faza B i C, vodova 1 i 2, su gotovo identični nakon nastanka kvara, jer pomenute faze nisu obuhvaćene kvarom. Bez obzira na vrstu kvara, značajno su izražene samo promjene struja onih faza koje su obuhvaćene kvarom.

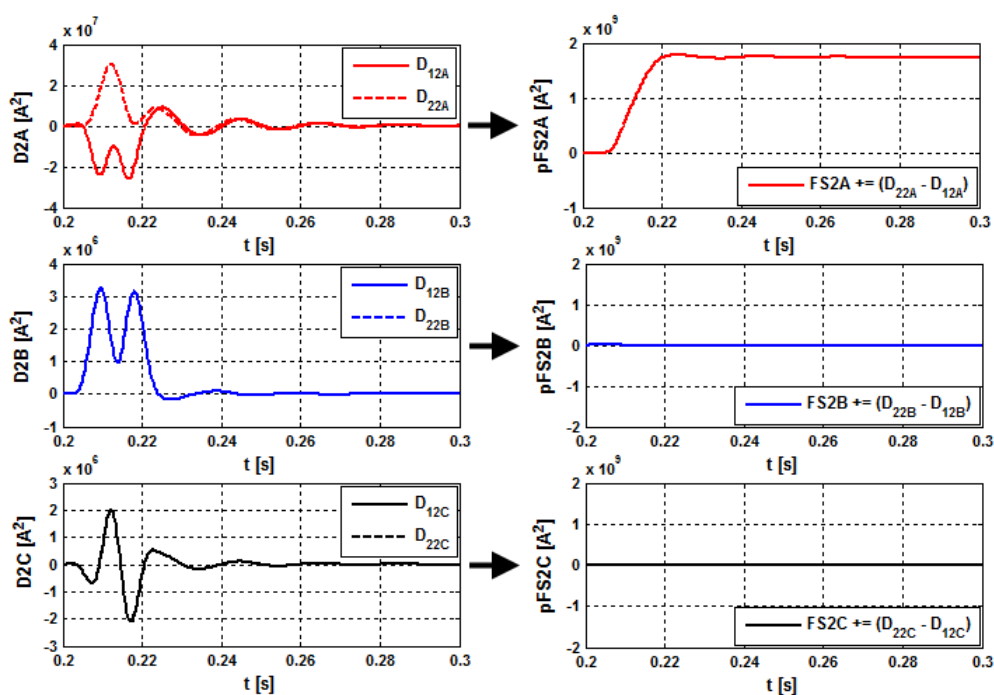
Na Sl.4.3.6 i Sl.4.3.7 prikazani su pokazatelji promjene faznih uglova struja DNV-a, kao i pokazatelji kvara predloženog algoritma, u slučaju analiziranog kvara, za releje R1 i R2, redom.



Sl.4.3.6 Promjene u vremenu pokazatelja promjene faznih uglova struja u svakoj fazi na početku DNV-a (releji R1) i odgovarajućih pokazatelja kvara predloženog algoritma u slučaju jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB, trenutak 0.2 s

Na osnovu grafika sa Sl.4.3.6, moguće je zapaziti da razlika između pokazatelja promjene faznih uglova istofaznih struja na početku DNV-a postoji samo u slučaju faze A, koja je i obuhvaćena kvarom. Pokazatelji promjene faznih uglova struja faze A, sa strane releja R1, su obilježeni sa D_{11A} i D_{21A} , za vodove 1 i 2, redom. Vrijednosti prethodnih pokazatelja se izračunavaju pomoću izraza (4.3.8) i (4.3.9). Za pokazatelj promjene faznog ugla struje faze A, voda 1, vrijedi relacija $D_{11A} > 0$, jer fazor date struje nakon kvara značajno zaostaje za fazorom struje prije kvara, što se može vidjeti sa Sl.4.3.5.(a). Takođe, vrijednost pokazatelja promjene faznog ugla struje faze A, voda

2, je pozitivna nakon nastanka kvara $D_{21A} > 0$, jer fazor posmatrane struje ponovo zaostaje za odgovarajućim fazorom struje prije kvara. Iako su analizirani pokazatelji istog znaka, oni će se razlikovati po vrijednosti $D_{11A} \gg D_{21A}$, jer je vrijednost amplitude struje $i_{11A}(t)$ značajno veća od vrijednosti amplitude struje $i_{21A}(t)$. Zbog prethodnog, vrijednost pokazatelja kvara u fazi A $pFS1A$, sa strane releja R1, koji je definisan izrazom (4.3.14), je pozitivna, što selektivno ukazuje na kvar u fazi A, voda 1. Pokazatelji promjene faznih uglova struja u fazama B i C, sa strane releja R1, imaju približno jednake vrijednosti nakon nastanka kvara. Posljedica prethodnog su zanemarljive vrijednosti pokazatelja kvarova u fazama B i C, $pFS1B \approx 0$ i $pFS1C \approx 0$.



Sl.4.3.7 Promjene u vremenu pokazatelja promjene faznih uglova struja u svakoj fazi na kraju DNV-a (releji R2) i odgovarajućih pokazatelja kvara predloženog algoritma u slučaju jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica BB, trenutak 0,2 s

Pokazatelji promjene faznih uglova struja faze A, sa strane releja R2, obilježeni su sa D_{12A} i D_{22A} , za vodove 1 i 2, redom. Njihove vrijednosti se izračunavaju pomoću izraza (4.3.10) i (4.3.11). Na osnovu grafika sa Sl.4.3.7, za fazu A, moguće je zapaziti da važe relacije $D_{12A} < 0$ i $D_{22A} > 0$, što je u skladu sa ranije uočenim relacijama za relej R2, koje su date izrazom (4.3.12). Zbog prethodnog, vrijednost pokazatelja kvara u fazi A $pFS2A$, releja R2, koji je definisan izrazom (4.3.15), je pozitivna, što selektivno ukazuje na kvar u fazi A, voda 1. Vrijednosti pokazatelja kvara u fazama B i C, sa

strane releja R2, su zanemarljive, jer su važeće relacije $D_{12B} \approx D_{22B}$ i $D_{12C} \approx D_{22C}$ (grafici sa Sl.4.3.7 za faze B i C).

4.4 Ispitivanje poprečne diferencijalne zaštite zasnovane na strujnim signalima u slučaju radijalnog dvostrukog nadzemnog voda

U slučaju radijalno napajanog DNV-a, ispitivana su dva algoritma usmjerene poprečne diferencijalne zaštite:

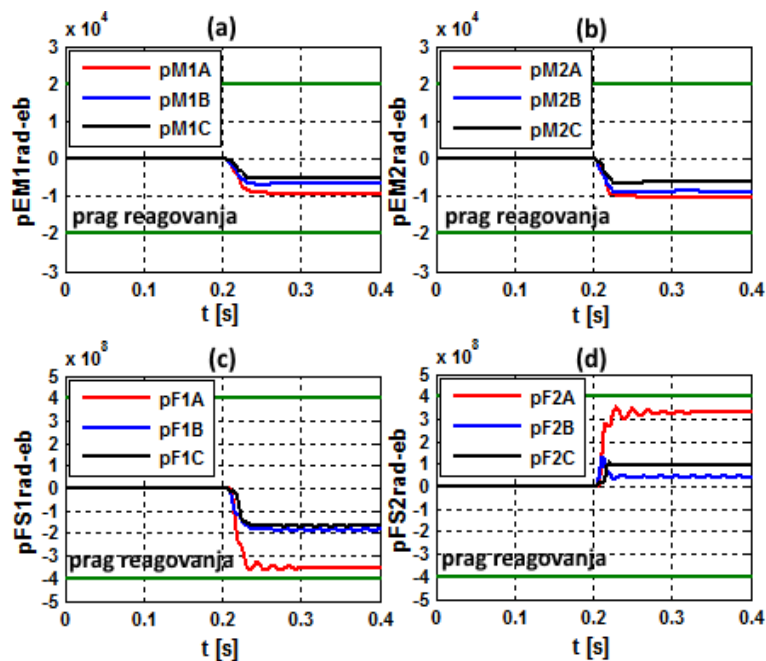
- (1) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja [19],
- (2) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja [71].

Algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja je već u ranijoj analizi ispitivan za slučaj dvostrano napajanog DNV-a. Ovaj algoritam je primjenljiv i u slučaju radijalno napajanog DNV-a [22], zbog čega je u nastavku ispitivan zajedno sa novim predloženim algoritmom, zasnovanim na promjeni faznih uglova struja. U toku ispitivanja vršena je uporedna analiza rezultata.

Ispitivanje je vršeno upotrebom simulatora rada relejne zaštite u realnom vremenu, koji je predstavljen u poglavlju 2, na modelu radijalno napajanog DNV-a sa Sl.3.2.4. Na osnovu rezultata početnog testa, utvrđene su vrijednosti pragova reagovanja za oba analizirana algoritma zaštite, koje je potrebno podesiti zbog ostvarenja njenog selektivnog rada. Zatim su na karakterističnim primjerima kvarova analizirane osnovne osobine predložene zaštite: osjetljivost, selektivnost i brzina reagovanja.

4.4.1 Određivanje pragova reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na strujnim signalima u slučaju radijalno napajanog DNV-a

Analogno, kao za slučaj algoritama zaštite dvostrano napajanog DNV-a, vršeno je ispitivanje algoritama zaštite predloženih za radijalno napajan DNV u cilju utvrđivanja vrijednosti odgovarajućih pragova reagovanja. Prema ranije definisanoj opštoj proceduri za određivanje praga reagovanja, čiji koraci su dati u poglavlju 3, pretpostavljaju se sljedeće vrijednosti koeficijenta razlike vodova $k_R = 1,02$ i $k_X = 1,02$. U ovom slučaju analiziran je tropolni kratak spoj samo na završnim sabirnicama EB, jer se radi o radijalnom napajanju DNV-a. Dobijeni rezultati za algoritam, zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) i novi algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja (FS), prikazani su na Sl.4.4.1.



Sl.4.4.1 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trofaznog kratkog spoja na završnim sabirnicama EB: algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a) dif. relej R1; (b) dif. relej R2; algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja – (c) dif. relej R1; (d) dif. relej R2

Na osnovu grafika (a) i (b), sa Sl.4.4.1, moguće je zaključiti da je maksimalna vrijednost pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM), sa strane releja R1, približno jednaka $1 \cdot 10^4$ A. Sa strane releja R2, vrijednost razmatranog pokazatelja je veća od $1 \cdot 10^4$ A. Dobijene vrijednosti su veoma slične dobijenim vrijednostima u slučaju određivanja pragova reagovanja analiziranog algoritma u slučaju trofaznog kratkog spoja na završnim sabirnicama EB kod dvostrano napajanog DNV-a (Sl.4.2.2). Prethodni rezultat je veoma logičan, jer se analizirani EES-a sa DNV-om, za ova dva slučaja, razlikuje jedino u režimu rada prije kvara. Kao i u slučaju dvostranog napajanja, usvojena je vrijednost praga reagovanja od $2 \cdot 10^4$ A, čime je ostvarena i dodatna sigurnosna rezerva značajna za ostvarenje selektivnosti zaštite.

Prilikom određivanja vrijednosti pragova reagovanja algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja, što je prikazano na graficima (c) i (d), sa Sl.4.4.1, uočava se razlika u znaku pokazatelja kvara sa strane releja R1 i R2. Pozitivna vrijednost pokazatelja kvara sa strane releja R2 posljedica je same definicije pokazatelja, date izrazom (4.3.15) gdje se pokazatelj promjene faznog ugla struje na kraju voda 1 (D_{12}) uzima sa negativnim predznakom.

Promjene u vremenu pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja su po apsolutnoj vrijednosti približno identične, sa strane releja R1 i R2, i njihove vrijednosti približno iznose $3.5 \cdot 10^8 \text{ A}^2$. Za prag reagovanja je usvojena vrijednost $4 \cdot 10^8 \text{ A}^2$, čime je ostvarena značajna sigurnosna rezerva u pogledu ostvarenja selektivnosti zaštite. Interesantno je uočiti da je na osnovu usvojenih vrijednosti pragova reagovanja, za oba analizirana algoritma, važeći sljedeći izraz:

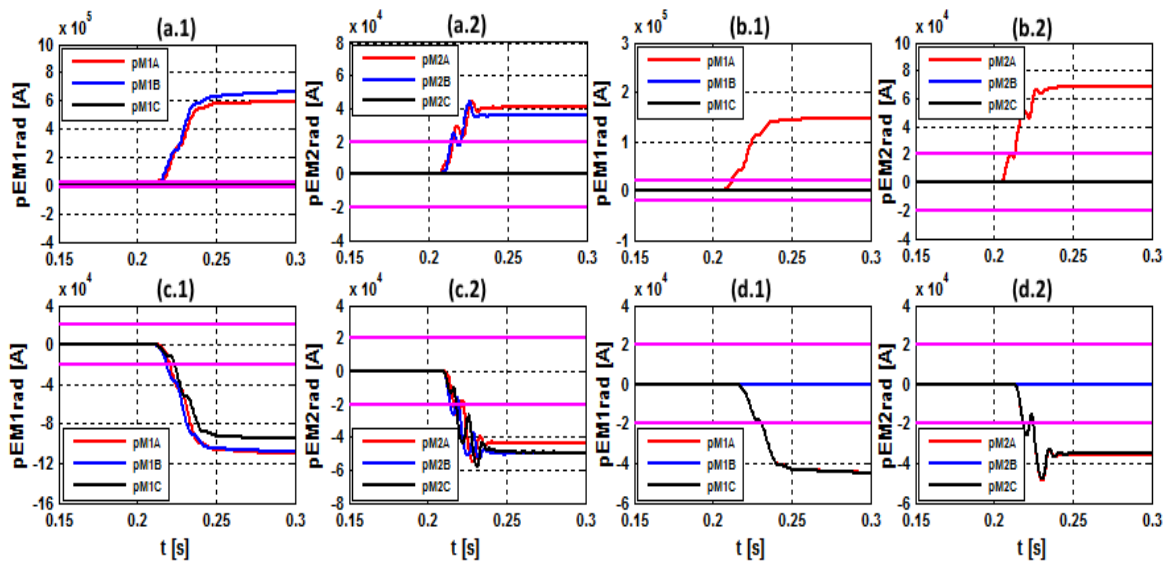
$$|\text{pragFS}| = |\text{pragEM}|^2. \quad (4.4.1)$$

Prethodni izraz je isključiva posljedica približno usvojenih vrijednosti pragova reagovanja za dva analizirana algoritma.

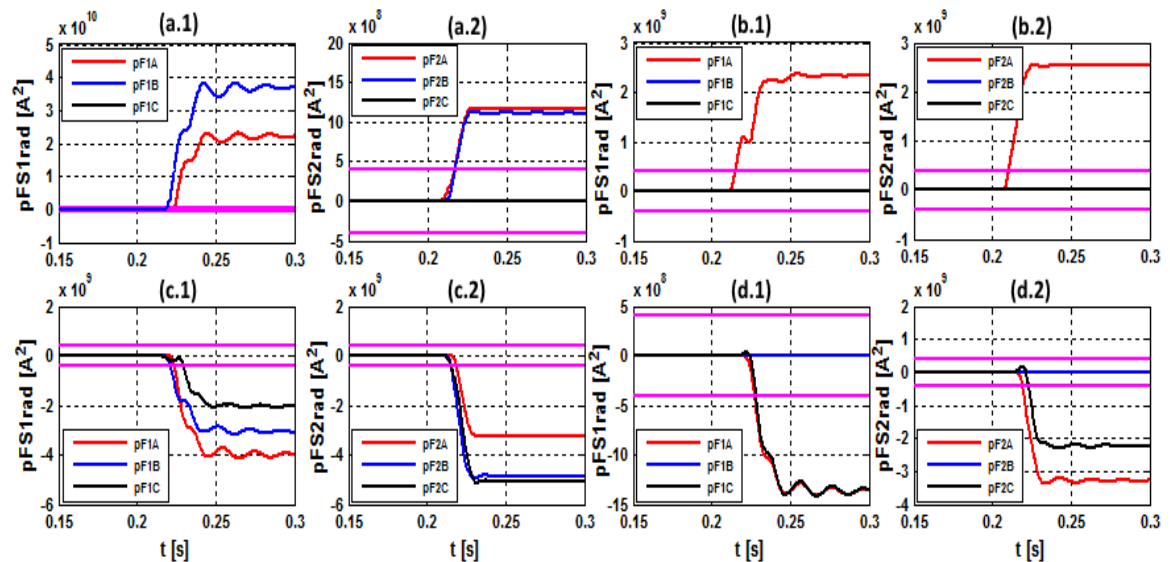
4.4.2 Ispitivanje algoritama zaštite za slučajeve različitih lokacija, vrsta i trenutaka nastanka kvara

Ispitivanje reagovanja algoritama zaštite za različite lokacije i vrste kvara na DNV-u, predstavlja osnovni kriterijum za utvrđivanje osjetljivosti i selektivnosti. Takođe, kvarovi mogu da nastanu u proizvoljnom trenutku, referentno u odnosu na periodu strujnog signala, pa se od algoritma zaštite zahtijeva da osjetljivo i selektivno reaguje u svakom potencijalnom trenutku nastanka kvara. Na Sl.4.4.2 i Sl.4.4.3 su prikazani pokazatelji kvara za algoritme zasnovane na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) i promjenama faznih uglova struja (FS), redom. Analizirana su četiri slučaja kvara: (a) ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s; (b) Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s; (c) ABCz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s; (d) AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0.211 s.

Na osnovu grafika sa Sl.4.4.2, može se zaključiti da je algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja osjetljiv i selektivan u svim analiziranim slučajevima kvara. Selektivnost i osjetljivost je ostvarena sa strane oba releja R1 i R2. Vrsta i trenutak nastanka kvara ne utiču značajno na osjetljivost analiziranog algoritma. Za razliku od slučaja dvostrano napajnog DNV-a, pokazatelji kvara sa strane releja R2 imaju nepravilniji oblik, što je posljedica drugačijeg prelaznog procesa (mjesto kvara se napaja samo iz izvora na početku DNV-a, a napon završnih sabirnica EB zavisi isključivo od pada napona na DNV-u).



Sl.4.4.2 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0,211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R2



Sl.4.4.3 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja (FS) za različite vrste, lokacije i trenutke nastanka kvara: (a) dvopolni kratak spoj sa zemljospojem ABz na vodu 1, 25 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, 100 km od sabirnica BB, trenutak 0,203 s - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2; (c) trolpolni kratak spoj na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,209 s - (c.1) dif. relej R1; (c.2) dif. relej R2; (d) dvopolni kratak spoj AC na vodu 2, 175 km od sabirnica BB, trenutak 0.211 s - (d.1) dif. relej R1; (d.2) dif. relej R2

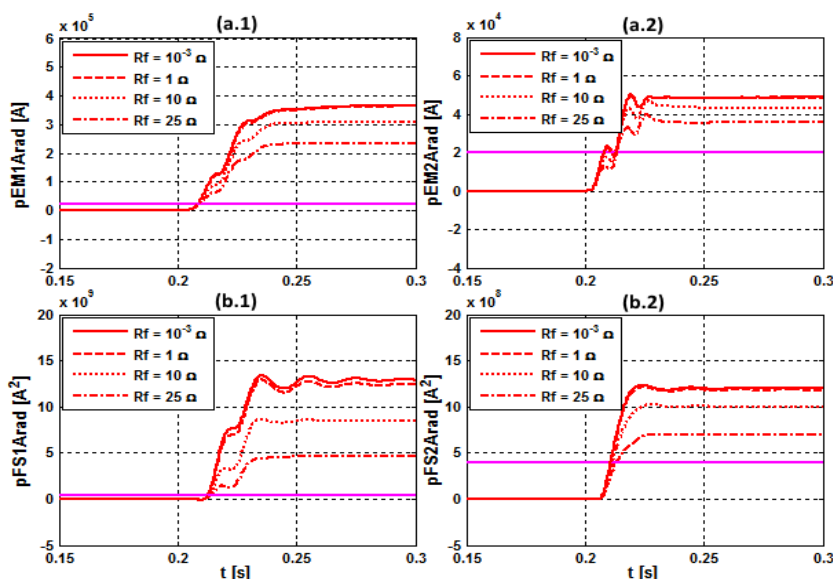
Analizom rezultata za algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja DNV-a, koji su prikazani na graficima sa Sl.4.4.3, takođe je moguće zaključiti da je zaštita osjetljiva i selektivna za svaki analizirani slučaj kvara. Predloženi algoritam je u najmanju ruku konkurentan algoritmu zasnovanom na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, prema prethodno dobijenim rezultatima ispitivanja zaštite. Moguće je i uočiti da je osjetljivost predloženog algoritma pod značajnijim uticajem trenutka nastanka kvara u odnosu na algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja. Prethodni zaključak je posebno uočljiv kod višefaznih kvarova (Sl.4.4.3 – (a.1), (c.1), (c.2) i (d.2)). Bez obzira na veću osjetljivost predloženog algoritma od sistema filtriranja signala, osjetljivost i selektivnost zaštite nisu ugrožene u svim analiziranim slučajevima kvara.

4.4.3 Ispitivanje osjetljivosti algoritama zaštite za slučaj prolaznih kvarova sa velikom otpornošću

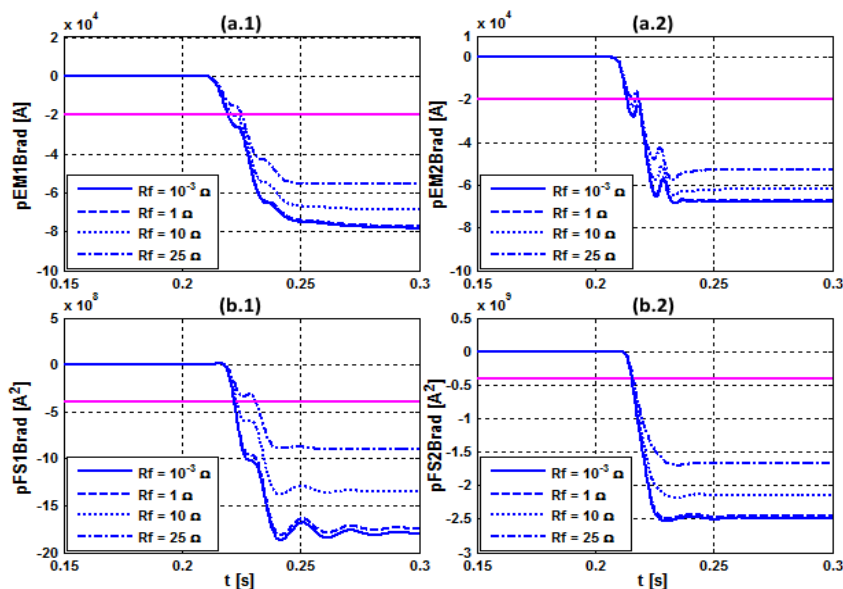
Zbog česte pojave kvarova sa električnim lukom u EES-u, ispitivanje osjetljivosti analiziranih algoritama u ovim slučajevima je od posebne važnosti. Pri ispitivanju analiziranih algoritama, kao i u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, vrijednost otpornosti na mjestu kvara je mijenjana u širokom opsegu od $R_f = 10^{-3} \Omega$ do $R_f = 25 \Omega$. Analizirana su dva slučaja kvara: Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB i Bz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB. Dobijeni rezultati za algoritme zasnovane na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM) i promjeni faznih uglova struja (FS) su prikazani na Sl.4.4.4 i Sl.4.4.5, redom.

Na osnovu grafika sa Sl.4.4.4 i Sl.4.4.5, moguće je zaključiti da su ispitivani algoritmi osjetljivi za oba analizirana slučaja kvara sa velikom vrijednošću otpornosti na mjestu kvara. Povećanje vrijednosti otpornosti na mjestu kvara uzrokuje smanjenje osjetljivosti oba analizirana algoritma zaštite, sa strane oba diferencijalna releja. Osjetljivost algoritma, zasnovanog na promjeni faznih uglova struja, je više zavisna od otpornosti na mjestu kvara u odnosu na osjetljivost drugog ispitivanog algoritma. Pokazatelji kvara algoritma, zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, sa strane releja R2, imaju nepravilniji oblik u odnosu na odgovarajuće pokazatelje kvara algoritma zasnovanog na promjenama faznih uglova struja. Rezultati prethodnog uporednog ispitivanja ukazuju na činjenicu da je predloženi algoritam, zasnovan na promjeni faznih uglova struja, osjetljiv u slučaju prolaznih kvarova sa velikom

vrijednošću otpornosti na mjestu kvara, zbog čega je konkurentan postojećem algoritmu zasnovanom na priraštajima trenutnih vrijednosti struja.



Sl.4.4.4 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Az na vodu 1, 50 km od sabirnica BB, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2

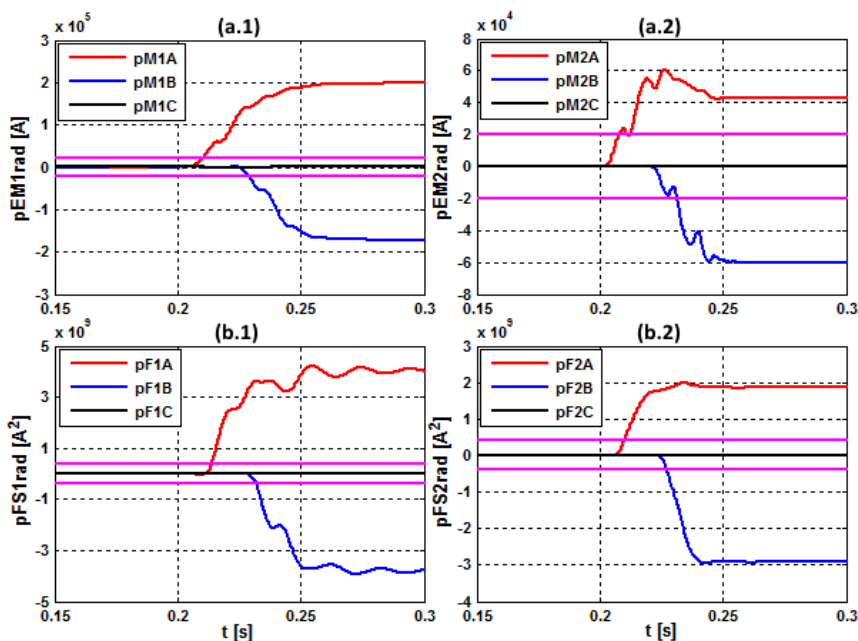


Sl.4.4.5 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj prolaznog jednopolnog kratkog spoja Bz na vodu 2, 150 km od sabirnica BB, trenutak 0,205 s, pri promjenljivoj otpornosti na mjestu kvara: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2

4.4.4 Ispitivanje selektivnosti algoritama zaštite za slučaj uzastopnih kvarova na oba voda u sistemu DNV-a

Prilikom posebnih okolnosti na mjestu kvara kod DNV-a, može se pojaviti slučaj da su dvije faze različitih vodova istovremeno obuhvaćene petljom kvara. Ovakav slučaj najčešće počinje pojavom jednofaznog kvara sa električnim lukom na jednom od dva voda u sistemu DNV-a, neposredno nakon čega se kvara razvija i obuhvata neku od faza drugog voda. U ovoj situaciji zaštita ima komplikovan zadatak da selektivno prepozna odgovarajuće faze obuhvaćene kvarom na oba voda.

U ovoj analizi ispitivan je slučaj jednopolnog kvara u fazi A, voda 1, vrijednost otpornosti na mjestu kvara 1Ω , i uzastopnog jednopolnog kvara u fazi B, voda 2, vrijednost otpornosti na mjestu kvara $1 m\Omega$. Početni jednopolni kvar u fazi A voda 1 iniciran je u trenutku 0,2 s od početka simulacije, dok je proširenje kvara na fazu B voda 2 inicirano u trenutku 0,22 s od početka simulacije. Pretpostavljeno vrijeme potrebno za proširenje kvara sa jednog na drugi vod je 20 ms. Dobijeni rezultati ispitivanja za algoritme zasnovane na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i promjenama faznih uglova struja prikazani su na Sl.4.4.6.



Sl.4.4.6 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj istovremenog kvara sa zemljospojem na vodovima 1 i 2, u fazama Az i Bz, i trenucima 0,2 s i 0,22 s, redom, 100 km od sabirnica BB: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2

Na osnovu grafika sa Sl.4.4.6, može se zaključiti da oba ispitivana algoritma zaštite selektivno određuju uzastopne kvarove na oba voda u sistemu DNV-a. Kod ovog testa do izražaja dolazi „fazna priroda” zaštite zasnovane na ispitivanim algoritmima (pokazatelj kvara u proizvoljnoj fazi voda je nezavisan od struja u ostalim fazama voda), koja je pogodna za selektivno određivanje uzastopnih kvarova na oba voda. Iako se radi o specifičnoj i rijetkoj vrsti kvara, oba ispitivana algoritma zadovoljavaju u pogledu selektivnosti zaštite.

4.4.5 Ispitivanje brzine reagovanja algoritama zaštite

Analogno slučaju dvostrano napajanog DNV-a, ispitivana je brzina reagovanja algoritama zaštite za radijalno napajan DNV. Algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja radi direktno u vremenskom domenu, dok algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja vrši procjenu pomenutih faznih uglova struja što je nepovoljnije u pogledu brzine reagovanja zaštite. Kao što je ranije pomenuto, vrijeme reagovanja zaštite obuhvata zbir dva vremenska intervala: vrijeme potrebno da pokazatelji kvara dostignu podešenu vrijednost praga reagovanja i vremensko kašnjenje uzrokovano sistemom za filtriranje signala. Ispitivana su vremena reagovanja zaštite za oba analizirana algoritma, pri promjenljivim lokacijama, vrstama i trenucima nastanka kvara. Ostvareni rezultati su prikazani u Tab.4.4.1 za oba diferencijalna releja R1 i R2.

Na osnovu rezultata ispitivanja, prikazanih u Tab.4.4.1, moguće je zaključiti da su u slučaju diferencijalnog releja R1, vremena reagovanja veća što je lokacija kvara udaljenija od početka dionice DNV-a. Pomenuta korelacija je primjetna za svaku ispitivanu vrstu kvara. Posmatrajući ostvarena vremena reagovanja pri kvarovima na lokaciji 180 km od početnih sabirnica BB, moguće je uočiti da su ona značajno duža u odnosu na odgovarajuća vremena reagovanja u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, prikazana u Tab.4.2.1. Njihove vrijednosti dostižu i 30 ms pri pojedinim kvarovima. Nepostojanje napajanja DNV-a, sa strane završnih sabirnica EB, uzrokuje sporije reagovanje diferencijalnog releja R1, jer se istofazne struje na početku DNV-a manje razlikuju pri udaljenijim kvarovima. Logično je zaključiti da bi vremena reagovanja bila i duža pri kvarovima koji su još bliži završnim sabirnicama EB. Prethodni zaključak ukazuje na potencijalno postojanje duže mrtve zone zaštite u odnosu na slučaj dvostrano

napajano DNV-a. Prednost u brzini reagovanja zaštite sa strane diferencijalnog releja R1 ima algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja (EM), što je i očekivan rezultat.

Tab.4.4.1 Usporedna analiza brzine reagovanja zaštite za algoritme zasnovane na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i promjenama faznih uglova struja

Udaljenost kvara od sabirnica BB		20 km		50 km		100 km		150 km		180 km	
Vrsta kvara	Dif. relej	EM [ms]	FS [ms]	EM [ms]	FS [ms]	EM [ms]	FS [ms]	EM [ms]	FS [ms]	EM [ms]	FS [ms]
<i>Az – 0,2 s vod 1</i>	R1	8	12	8	13	10	14	13	16	25	26
	R2	15	13	14	11	14	10	8	9	7	8
<i>Bz – 0,205 s vod 2</i>	R1	9	13	10	14	11	16	14	17	25	27
	R2	16	15	14	12	14	11	9	10	8	10
<i>Cz – 0,21 s vod 1</i>	R1	12	16	12	17	14	18	17	20	30	33
	R2	17	14	10	12	9	11	9	10	8	8
<i>AB – 0,215 s vod 2</i>	R1	11	17	11	18	13	18	15	20	25	23
	R2	18	17	16	14	16	12	9	10	9	9
<i>BC – 0,2 s vod 1</i>	R1	7	10	8	11	10	13	15	22	25	26
	R2	12	13	10	10	10	8	10	7	9	6
<i>ACz – 0,205 s vod 2</i>	R1	7	10	7	11	9	12	15	16	20	20
	R2	13	12	10	9	10	8	10	7	10	6
<i>BCz – 0,21 s vod 1</i>	R1	8	18	10	18	14	19	16	22	25	25
	R2	17	13	12	10	11	9	10	8	10	7
<i>ABC – 0,215 s vod 2</i>	R1	9	14	9	14	10	15	15	22	23	25
	R2	15	14	14	11	14	10	9	9	9	9

U slučaju diferencijalnog releja R2, vremena reagovanja su veća što je lokacija kvara bliža početku dionice DNV-a. Uočena korelacija je važeća za svaku ispitanu vrstu kvara. Sva dobijena vremena reagovanja su manja od 20 ms, čak i pri kvarovima na lokaciji 20 km od početnih sabirnica BB. Na osnovu prethodnog, moguće je zaključiti da je zaštita sa strane releja R2 brža u odnosu na zaštitu sa strane releja R1,

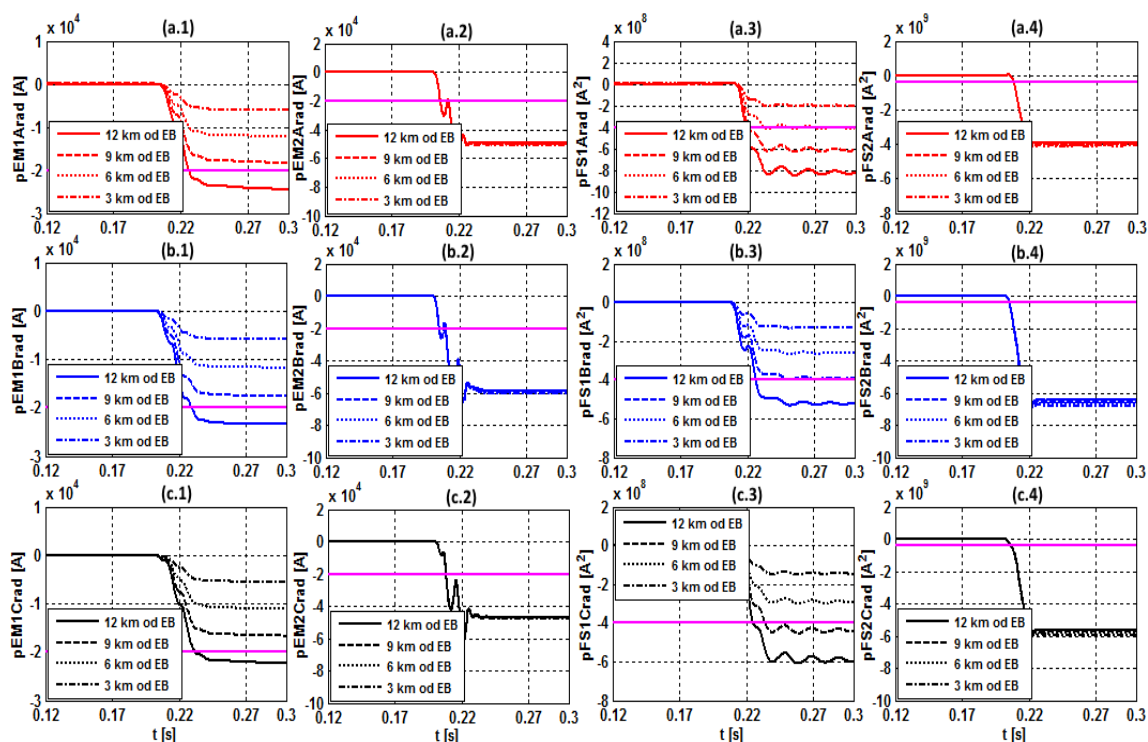
što je važeće za oba ispitivana algoritma. Pri kvarovima bliskim završnim sabirnicama EB, vremena reagovanja zaštite su manja i od 10 ms. Predloženi algoritam, zasnovan na promjenama faznih uglova struja, se pokazao kao brži sa strane releja R2.

Pri ispitivanjima brzine reagovanja zaštite predefinisani su pogonski uslovima sistema. Snaga trolnog kratkog spoja, odnos X/R i napon mreže na početku dionice DNV-a su predefinisani, kao i vrijednost otpornosti potrošnje. Otpornost na mjestu kvara nije razmatrana, jer je ranije pokazano da se u opsegu promjene otpornosti na mjestu kvara od $1 \text{ m}\Omega$ do 1Ω (najčešći slučaj u praksi) osjetljivost zaštite ne mijenja značajno.

4.4.6 Ispitivanje mrtve zone algoritama zaštite

Analogno, kao kod ranije ispitivane zaštite dvostrano napajanog DNV-a, dužina mrtve zone algoritama za zaštitu radijalno napajanog DNV-a je približno utvrđivana na osnovu dva karakteristična testa kvara. Zbog uvažavanja različitih trenutaka nastanka kvara, ispitivani su slučajevi trolnog kratkog spoja ABCz na vodovima 1 i 2. Ova analiza ima za cilj da približno odredi maksimalnu dužinu mrtve zone ispitivanih algoritama za predefinisane pogonske uslove. Postojanje mrtve zone je uzrokovano konačnom vrijednošću praga reagovanja, koja je sa druge strane neophodna zbog obezbjeđivanja selektivnosti zaštite. Njena dužina se određuje približno, tako što se utvrđuje da li je ona manja od određene procentualne dužine DNV-a, dok je precizna dužina mrtve zone zavisna od mnogo parametara, uključujući npr. i vrijednost otpornosti na mjestu kvara. Usvojeni su sljedeći pogonski uslovi sistema, koji prethode pojavi kvara: snaga trolnog kratkog spoja mreže na početku DNV-a je $P_{ISC3f} = 12 \text{ GVA}$, odnos reaktivnog i aktivnog dijela impedanse mreže je $X/R = 10$, otpornost na mjestu kvara je zanemarljiva $R_f = 10^{-3} \Omega$ i impedansa potrošnje je definisana kao čisto aktivna sa vrijednošću otpornosti $R_p = 150 \Omega$.

Na Sl.4.4.7 i Sl.4.4.8 prikazani su rezultati ispitivanja analiziranih algoritama (EM i FS) za slučajeve kvara ABCz na vodu 1 (u trenutku 0,205 s) i ABCz na vodu 2 (u trenutku 0,2 s), redom, pri promjenljivim udaljenostima lokacije kvara od početnih BB i krajnjih EB sabirnica, redom.

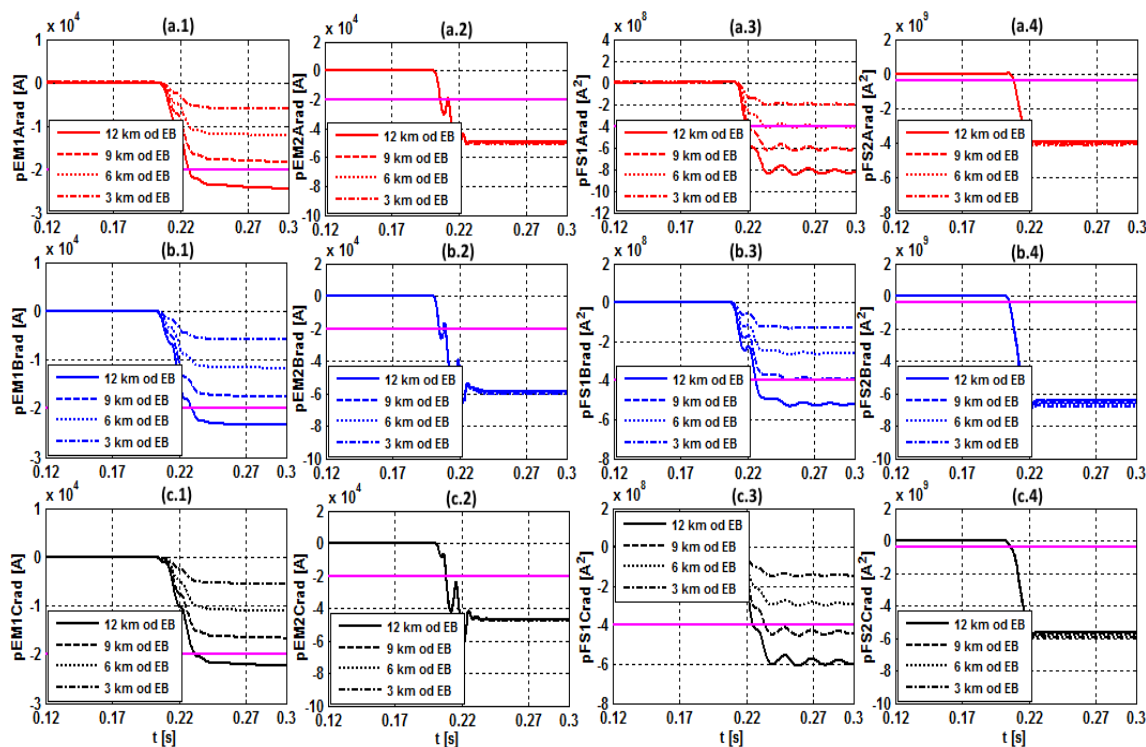


Sl.4.4.7 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trofaznog kratkog spoja ABCz navodu 2, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica EB: 1. algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C

Na osnovu grafika sa Sl.4.4.7, može se uočiti da su u pogledu analize mrtve zone od interesa pokazatelji kvara diferencijalnog releja R2. Analiza promjene osjetljivosti zaštite sa strane diferencijalnog releja R1 nije od velikog značaja pri ovom testu, jer su ispitivane lokacije kvara bliske početnim sabirnicama BB (12 km, 9 km, 6 km i 3 km od BB). Budući da je relej R2 lociran na kraju dionice DNV-a, ispitivane lokacije kvara mogu biti u njegovoj mrtvoj zoni. Smanjenjem udaljenosti lokacije kvara od početnih sabirnica BB (ili povećanjem udaljenosti od završnih sabirnica EB) osjetljivost releja R2 se smanjuje, što je primjetno kod oba analizirana algoritma zaštite. Promjena vrijednosti pokazatelja kvara u sve tri faze, pri promjenama lokacije kvara, u slučaju oba algoritma, je gotovo identična, na osnovu čega je moguće zaključiti da promjena osjetljivosti zaštite nije u značajnoj korelaciji sa relativnom promjenom trenutka nastanka kvara (trenutak u odnosu na periodu signala). Kao što je i ranije pomenuto, trenutak nastanka kvara u maloj mjeri utiče na konvergenciju algoritma putem odziva sistema za filtriranje signala, zbog čega se konačne vrijednosti pokazatelja kvara, nakon

konvergencije, razlikuju u pojedinim fazama (najmanje vrijednosti pokazatelja kvara sa strane releja R2 su prisutne u fazi B).

Utvrđena maksimalna dužina mrtve zone za relej R2, u slučaju algoritma zasnovanog na promjenama trenutnih vrijednosti struja, je približno jednaka 10 km, što je moguće uočiti na graficima sa Sl.4.4.7 (a.2, b.2 i c.2). Dobijena dužina mrtve zone je više od tri puta veća u odnosu na dužinu mrtve zone istog algoritma u slučaju dvostrano napajanog DNV-a. Moguće je zaključiti da je osjetljivost ovog algoritma zaštite značajno manja u slučaju radialno napajanog DNV-a. Na osnovu grafika sa Sl.4.4.7 (a.4, b.4 i c.4), moguće je približno utvrditi dužinu mrtve zone predloženog algoritma zasnovanog na promjenama faznih uglova struja, sa strane releja R2. Maksimalna dužina mrtve zone je prisutna u fazi B i približno iznosi 8 km. Na osnovu prethodnog je moguće zaključiti da predloženi algoritam ima manju dužinu mrtve zone i samim tim veću osjetljivost sa strane releja R2.



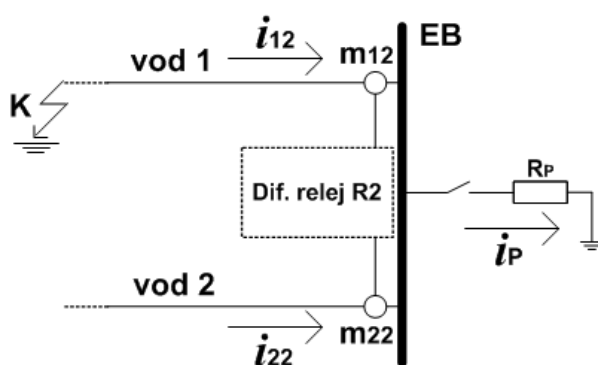
Sl.4.4.8 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj trofaznog kratkog spoja ABCz na vodu 2, trenutak 0,2 s, pri promjenljivoj udaljenosti lokacije kvara od sabirnica EB: 1. algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (1) dif. relej R1: (a.1), (b.1) i (c.1) – faze A, B i C, (2) dif. relej R2: (a.2), (b.2) i (c.2) – faze A, B i C; 2. algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja – (3) dif. relej R1: (a.3), (b.3) i (c.3) – faze A, B i C, (4) dif. relej R2: (a.4), (b.4) i (c.4) – faze A, B i C

Da bi se utvrdile približne dužine mrtvih zona ispitivanih algoritama sa strane releja R1, neophodno je analizirati dobijene rezultate za slučajeve kvarova, čije lokacije su bliske završnim sabirnicama EB. Pomenuti rezultati su predstavljeni na graficima sa Sl.4.4.8. Utvrđena maksimalna dužina mrtve zone za relej R1, u slučaju algoritma zasnovanog na promjenama trenutnih vrijednosti struja, je približno jednaka 11 km, što je moguće uočiti na graficima sa Sl.4.4.8 (a.2, b.2 i c.2). Dobijena dužina mrtve zone istog algoritma, u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, je bila približno jednaka 4 km, što je skoro 3 puta manja vrijednost. Na osnovu prethodnog, moguće je zaključiti da je osjetljivost algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja značajno manja u slučaju radijalno napajanog DNV-a, i sa strane releja R1. Na osnovu grafika sa Sl.4.4.8 (a.4, b.4 i c.4), moguće je približno utvrditi dužinu mrtve zone algoritma zasnovanog na promjenama faznih uglova struja, sa strane releja R1. Maksimalna dužina mrtve zone je prisutna u fazi B, kao i u slučaju releja R1, i približno iznosi 9 km. Na osnovu prethodnog je moguće zaključiti da predloženi algoritam ima manju dužinu mrtve zone i samim tim veću osjetljivost i sa strane releja R1.

Uzimajući u obzir približne dužine mrtvih zona oba diferencijalna releja, R1 i R2, moguće je utvrditi i ukupne približne dužine mrtvih zona za oba analizirana algoritma. Prema tome, odgovarajuće vrijednosti ukupnih dužina mrtvih zona iznose $m_1 = 21$ km i $m_2 = 17$ km, za algoritme zasnovane na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i promjenama faznih uglova struja, redom. Ove vrijednosti su utvrđene za predefinisane pogonske uslove i podešene vrijednosti pragova reagovanja. Posmatrano u odnosu na dužinu DNV-a, približne dužine mrtvih zona, za odgovarajuće algoritme, redom iznose 10,5% i 8,5%. Zbog značajno većih dužina mrtvih zona, u odnosu na slučaj dvostrano napajanog DNV-a, moguće je zaključiti da je osjetljivost ispitivanih algoritama značajno manja u slučaju radijalno napajanog DNV-a. Na osnovu kompletne prethodne uporedne analize, važno je uočiti da predloženi algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja, ima manju dužinu mrtve zone sa strane oba diferencijalna releja R1 i R2, a samim tim i nešto veću osjetljivost u odnosu na algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja.

4.4.7 Uticaj promjene potrošnje na osjetljivost algoritama zaštite

U svim prethodnim ispitivanjima algoritama zaštite radijalno napajanog DNV-a potrošnja je modelovana kao čisto aktivna sa vrijednošću otpornosti po fazi $R_P = 150 \Omega$ (vrijednost koja odgovara predefinisanim pogonskim uslovima). Potrošnja u EES-u može da bude značajno promjenjiva i u manjim vremenskim intervalima (dnevni diagram potrošnje), što može da ima značajan uticaj na rad algoritama relejne zaštite. Osjetljivost i selektivnost relejne zaštite radijalno napajanih nadzemnih vodova moraju biti obezbijeđeni pri svim očekivanim vrijednostima potrošnje. Algoritmi za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu radijalno napajanog DNV-a, zasnovani samo na strujnim signalima, imaju problem smanjene osjetljivosti, sa strane diferencijalnog releja R2, u slučaju male snage potrošnje, priključene na završne sabirnice DNV-a [71]. Prethodni problem je najjednostavnije objasniti na primjeru kvara na DNV-u u praznom hodu (teorijski ekstreman slučaj kada uopšte nema potrošnje), što je prikazano na Sl.4.4.9.



Sl.4.4.9 Kvar na DNV-u u praznom hodu

Pri proračunu pokazatelja kvara, algoritam diferencijalne zaštite, implementiran u releju R2 sa Sl.4.4.9, kao ulazne podatke koristi odbirke signala struja $i_{12}(t)$ i $i_{22}(t)$. U slučaju praznog hoda na završnim sabirnicama EB, prije nastanka kvara, važi sljedeća relacija:

$$i_{12}(t) = i_{22}(t) = 0. \quad (4.4.2)$$

Nakon pojave kvara na vodu 1, važeća je naredna relacija:

$$i_{12}(t) = -i_{22}(t). \quad (4.4.3)$$

Analizom izraza (4.1.5), za proračun priraštaja trenutnih vrijednosti struja, koji dalje formiraju odgovarajući pokazatelj kvara, definisan izrazom (4.1.6), moguće je

zaključiti da su za pravilan rad algoritma, zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja, potrebni odbirci signala struja iz prošlosti (referentna veličina). U slučaju kvara iz režima praznog hoda odbirci strujnih signala iz prošlosti ne postoje, što je jasno iz jednakosti (4.4.2). Predznaci priraštaja struja, definisani izrazom (4.1.5), zavisice od trenutka nastanka kvara, jer će se od odbiraka signala struja, nakon nastanka kvara, oduzimati odbirci jednaki nuli, koji odgovaraju signalima struja prije nastanka kvara. Apsolutne vrijednosti priraštaja, koji formiraju pokazatelje kvara, definisane izrazom (4.1.6), sa strane releja R2, biće jednake:

$$|EM_{12-abc}(k)| = |EM_{22-abc}(k)|. \quad (4.4.4)$$

Posljedica prethodne relacije je neosjetljivost algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja u slučaju kvara iz režima praznog hoda.

Algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja DNV-a koristi pokazatelje promjene faznih uglova struja definisane izrazima (4.3.8)-(4.3.11), pri formiranju odgovarajućih pokazatelja kvara. I ovaj algoritam za pravilan rad koristi odbirke strujnih signala prije nastanka kvara. Kako su, u slučaju nastanka kvara iz režima praznog hoda, odbirci strujnih signala iz prošlosti jednaki nuli, sasvim je sigurno da će osjetljivost i ovog algoritma biti ugrožena. Iz samih izraza (4.3.8)-(4.3.11), moguće je zaključiti da će vrijednosti pokazatelja promjena faznih uglova struja biti jednaki nuli nakon nastanka kvara, upravo zbog odbiraka strujnih signala iz prošlosti, koji su jednaki nuli.

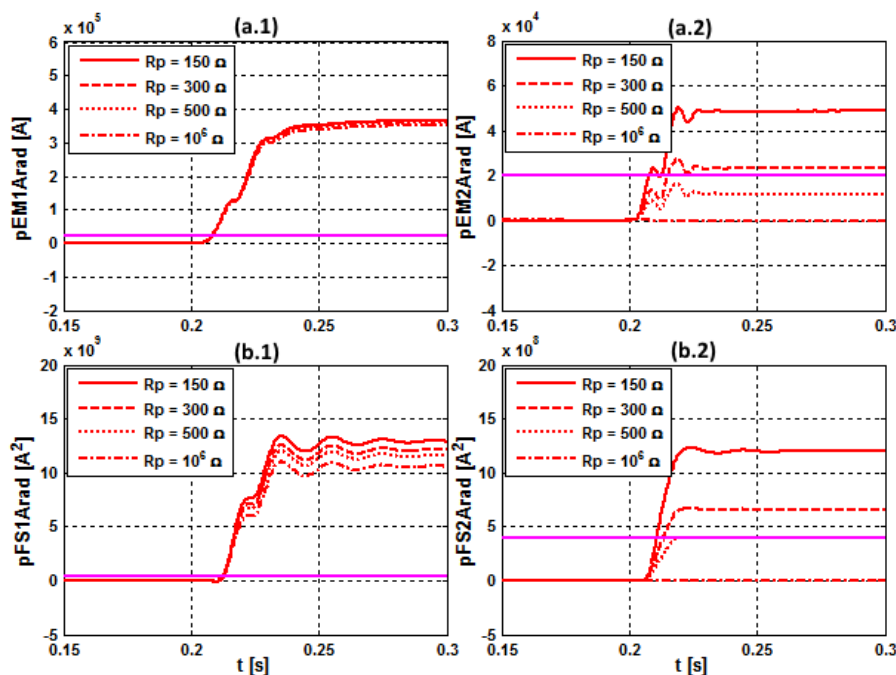
Prethodna teorijska razmatranja odziva analiziranih algoritama pri pojavi kvara na DNV-u, kome prethodi režim praznog hoda, je neophodno provjeriti kroz odgovarajuće simulacije. Posebno je značajno ispitati odzive pomenutih algoritama, ne samo pri kvarovima iz režima praznog hoda, nego i pri kvarovima kojima prethodi režim male snage potrošnje radijalno napajanog DNV-a. U praktičnim uslovima, mnogo je vjerovatnija pojava kvara na DNV-u kada postoji neka snaga potrošnje, pa makar bila i mala, u odnosu na slučaj pojave kvara kome prethodi prazan hod DNV-a.

Na osnovu rezultata ranijih simulacionih ispitivanja osjetljivosti algoritma zasnovanog na priraštajima trenutnih vrijednosti struja [22], u slučaju radijalno napajanog DNV-a, uočeno je značajno smanjenje osjetljivosti zaštite sa strane diferencijalnog releja R2, pri smanjivanju snage potrošnje priključene na završne

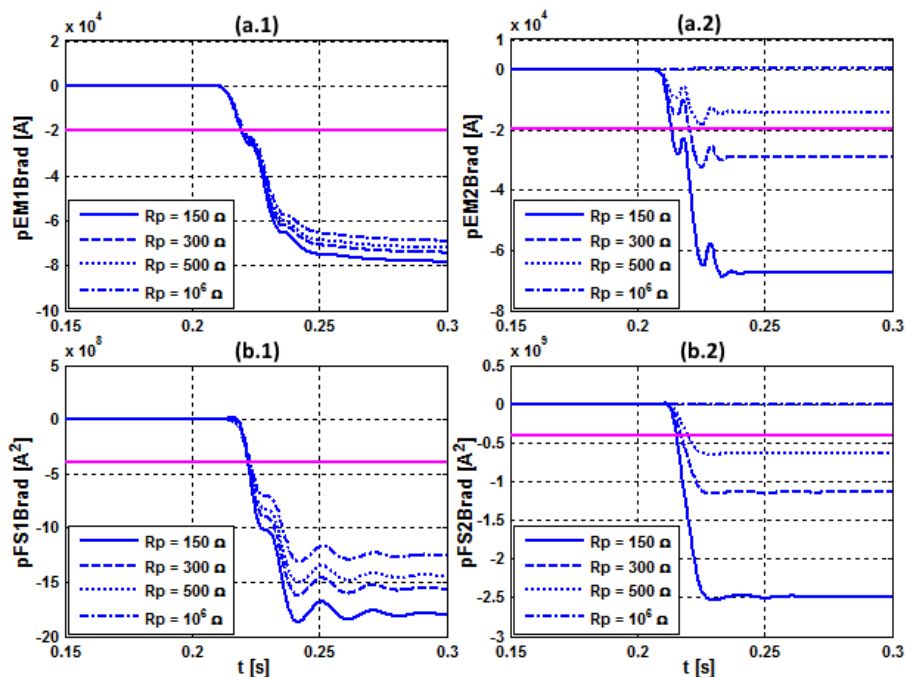
sabirnice EB. Prethodni zaključak je i poslužio kao osnovna podloga za dalja istraživanja i razvoj novog algoritma sa poboljšanom osjetljivošću, koji je i predstavljen ranije u ovoj disertaciji.

U nastavku su predstavljeni rezultati uporednog ispitivanja osjetljivosti algoritama zaštite radijalno napajanog DNV-a, za dva karakteristična slučaja kvara. Otpornost potrošnje priključene na završne sabirnice EB mijenjana je u opsegu $R_P = 150-10^6 \Omega$. Za vrijednost otpornosti $R_P = 150 \Omega$, definisan je režim rada DNV-a prije nastanka kvara, dok je za vrijednost $R_P = 10^6 \Omega$ približno definisan režim praznog hoda.

Na Sl.4.4.10 prikazane su promjene pokazatelja kvara u vremenu, za oba ispitivana algoritma i oba diferencijalna releja R1 i R2, u slučaju jednopolnog kratkog spoja Az, na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica BB. Promjena osjetljivosti algoritama je ispitivana i u slučaju jednopolnog kratkog spoja Bz, na vodu 2, 150 km od početnih sabirnica BB. Odgovarajuće promjene pokazatelja kvara u vremenu, za oba diferencijalna releja, prikazane su na Sl.4.4.11.



Sl.4.4.10 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja na vodu 1, u fazi A, u trenutku 0,2 s, 50 km od sabirnica BB, pri promjenljivoj otpornosti potrošnje priključene na završne sabirnice EB: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2



Sl.4.4.11 Vrijednosti pokazatelja kvara za slučaj jednopolnog kratkog spoja na vodu 2, u fazi B, u trenutku 0,205 s, 150 km od sabirnica BB, pri promjenljivoj otpornosti potrošnje priključene na završne sabirnice EB: (a) algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja – (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2; (b) algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja - (b.1) dif. relej R1; (b.2) dif. relej R2

Rezultati predstavljeni na graficima (a.2) i (b.2), sa Sl.4.4.10, prikazuju suštinu problema osjetljivosti algoritama sa strane releja R2. Povećanje otpornosti potrošnje (smanjenje snage potrošnje) uzrokuje značajno smanjenje osjetljivosti u slučaju oba ispitivana algoritma. Na osnovu rezultata sa grafika (a.2), može se zapaziti da algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja postaje neosjetljiv sa strane releja R2, za analiziran slučaj kvara, pri približno dvostruko većoj otpornosti potrošnje ($R_P = 300 \Omega$) u odnosu na predefinisanu otpornost ($R_P = 150 \Omega$). Dakle, ako se snaga potrošnje približno smanji samo dva puta, osjetljivost analiziranog algoritma je ugrožena. Rezultati sa grafika (b.2) pokazuju da će algoritam, zasnovan na promjenama faznih uglova struja, postati neosjetljiv sa strane releja R2, pri približno tri puta većoj otpornosti potrošnje ($R_P = 450 \Omega$), ili približno tri puta manjoj snazi potrošnje. Prethodni rezultat otkriva značajno veću osjetljivost algoritma zasnovanog na promjenama faznih uglova struja u slučaju smanjenja snage potrošnje. Za slučaj nastanka kvara iz režima približnog praznom hodu oba algoritma biće neosjetljiva sa strane releja R2.

Analizom rezultata predstavljenih na graficima sa Sl.4.4.11, u slučaju jednopolnog kratkog spoja faze B, na vodu 2, dolazi se do sličnih zaključaka. Oba ispitivana algoritma su osjetljiva sa strane releja R1, što je vidljivo sa grafika (a.1) i (b.1). Problem neosjetljivosti ispitivanih algoritama sa strane releja R2 je prisutan i u ovom slučaju kvara, što se može zapaziti sa grafika (a.2) i (b.2). Uporedna analiza otkriva da je ovaj slučaj kvara nešto povoljniji u pogledu osjetljivosti ispitivanih algoritama u odnosu na prethodni, jer je lokacija kvara bliža releju R2. Na osnovu rezultata sa grafika (a.2), može se zapaziti da algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja postaje neosjetljiv sa strane releja R2, pri približno trostruko većoj otpornosti potrošnje ($R_p = 450 \Omega$) ili približno trostruko manjoj snazi potrošnje. Rezultati sa grafika (b.2) potvrđuju da algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja ima veću osjetljivost, jer postaje neosjetljiv pri približno četiri puta većoj otpornosti potrošnje ($R_p = 600 \Omega$) ili približno četiri puta manjoj snazi potrošnje. Pri nastanku kvara iz režima bliskog praznom hodu ($R_p = 10^6 \Omega$), oba ispitivana algoritma su neosjetljiva sa strane releja R2 kao i u prethodno analiziranom slučaju kvara.

4.4.8 Diskusija

U odjeljku 4.4 vršena su detaljna ispitivanja algoritama zasnovanih na strujnim signalima za poprečnu diferencijalnu zaštitu radialno napajanih DNV-ova. Ispitivane su osnovne osobine relejne zaštite: selektivnost, osjetljivost i brzina reagovanja.

Na osnovu rezultata svih testova, oba ispitivana algoritma su se pokazala kao selektivna. U svim slučajevima algoritmi uspješno detektuju vod na kome je nastao kvar. Razlikovanje slučajeva kvara na šticejnoj dionici DNV-a i iza završnih sabirnica EB, je obezbijedeno je pravilnim definisanjem odgovarajućih pragova reagovanja. Kao poseban slučaj, ispitana je selektivnost algoritama pri uzastopnim kvarovima na oba voda u sistemu DNV-a. Algoritmi su se pokazali kao selektivni, što je posljedica međusobne nezavisnosti pokazatelja kvara u različitim fazama („fazna priroda” zaštite).

Osjetljivost ispitivanih algoritama je testirana za mnoge različite kvarove na DNV-u. U okviru osnovnog testa, oba algoritma su se pokazala kao osjetljiva pri kvarovima na različitim lokacijama, različitih vrsta i trenutaka nastanka što je osnovni preduslov za primjenu zaštite. Rezultati karakterističnih testova su pokazali da postoji korelacija između vrijednosti pokazatelja kvara algoritama i vrijednosti otpornosti na mjestu

kvara. Osjetljivost algoritama se smanjuje pri povećanju otpornosti na mjestu kvara. Međutim, osjetljivost nije ugrožena u velikom opsegu očekivanih vrijednosti otpornosti na mjestu kvara, pa se može zaključiti da su ispitivani algoritmi osjetljivi i pri prolaznim kvarovima sa velikom vrijednošću otpornosti na mjestu kvara.

Radi utvrđivanja brzine reagovanja algoritama zaštite, vršena su posebna ispitivanja. Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da su vremena reagovanja algoritama manja od 20 ms, u većini ispitivanih slučajeva kvara. Izuzetak od prethodnog zaključka su kvarovi bliski završnim sabirnicama EB, gdje vremena reagovanja releja R1 često dostižu 25 ms i više, što je značajan nedostatak oba algoritma. Potrebno je naglasiti da su u proračun vremena reagovanja uključena i vremenska kašnjenja sistema za filtriranje signala. Algoritam zasnovan na priraštajima trenutnih vrijednosti struja se pokazao kao brži sa strane releja R1, što je posebno izraženo pri kvarovima bliskim početnim sabirnicama BB. U većini slučajeva kvara, sa strane releja R2, algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja se pokazao kao brži. Generalno, može se zaključiti da je poprečna diferencijalna zaštita zasnovana na strujnim signalima sporija u slučaju radijalno napajanog DNV-a u odnosu na dvostrano napajan DNV. Međutim, postizanje vrlo brze zaštite često nije od najvećeg značaja kod radijalno napajanih vodova, jer kvarovi u takvim sistemima obično nisu kritični u pogledu stabilnosti EES-a u odnosu na kvarove u dvostrano napajanim sistemima.

Kao i u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, posebnim ispitivanjem odziva algoritama, pri trolnim kratkim spojevima na lokacijama u blizini početnih i završnih sabirnica radijalno napajanog DNV-a, utvrđene su odgovarajuće dužine mrtvih zona za predefinisane pogonske uslove sistema prije kvara. Približno utvrđene ukupne dužine mrtvih zona algoritama, zasnovanih na priraštajima trenutnih vrijednosti struja i promjenama faznih uglova struja, iznose 10,5% i 8,5% ukupne dužine DNV-a, redom. Dobijene dužine mrtvih zona su višestruko veće u odnosu na dužine mrtvih zona algoritama zaštite dvostrano napajanog DNV-a, što ukazuje na značajno manju osjetljivost algoritama pri radijalnom napajanju DNV-a.

Kroz posebno ispitivanje osjetljivosti algoritama pri promjenljivoj otpornosti potrošnje, uočen je i teorijski obrazložen problem nastanka kvara kome prethodi pogonski režim blizak praznom hodu. Pokazano je da se osjetljivost ispitivanih

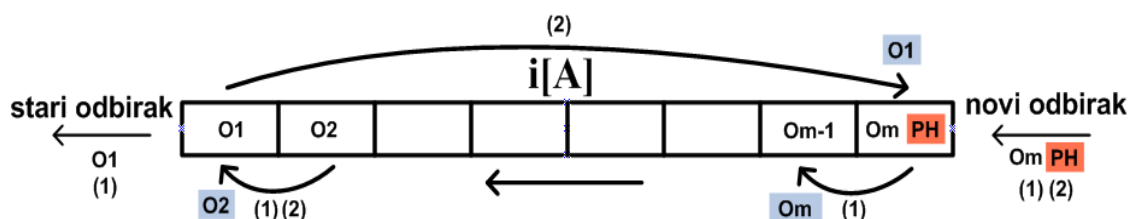
algoritama, pri smanjivanju snage potrošnje, značajno smanjuje i da su algoritmi potpuno neosjetljivi u slučaju kvara kome prethodi prazan hod DNV-a. Algoritam, zasnovan na promjenama faznih uglova struja, pokazao se kao više osjetljiv u slučaju kvarova kojima prethode pogonski uslovi DNV-a sa malom snagom potrošnje.

4.5 Zaključavanje registara signala struja kao rješenje problema neosjetljivosti algoritama poprečne diferencijalne zaštite radijalnog dvostrukog nadzemnog voda

U odjeljku 4.4 opisan je problem neosjetljivosti algoritama zasnovanih na signalima struja, pri nastanku kvara kome prethodi pogonski režim DNV-a blizak praznom hodu. Pokazano je da se osjetljivost algoritama značajno smanjuje pri smanjenju snage potrošnje, priključene na završne sabirnice EB. U ovom odjeljku disertacije predstavljeno je rješenje opisanog problema, zasnovano na zaključavanju registara signala struja [71], [72]. Pomenuto rješenje predstavlja nadogradnju na predloženi algoritam zasnovan na promjenama faznih uglova struja DNV-a (FS).

4.5.1 Koncept zaključavanja memorijskih registara signala struja

Osnovna ideja koncepta zaključavanja memorijskih registara signala struja se zasniva na detekciji pogonskog režima DNV-a prije nastanka kvara, koji je blizak praznom hodu. Kada nastane režim, označen kao prazan hod, memorijski registri, koji se koriste za formiranje pokazatelja promjene faznih uglova signala struja, definisanih izrazima (4.3.8)-(4.3.11), se zaključavaju, kako bi ulazak novih odbiraka iz režima praznog hoda, bio spriječen. Zaključavanjem registara, čuva se njihov sadržaj iz perioda prije nastanka režima praznog hoda, što je predstavljeno na Sl.4.5.1.



Sl.4.5.1 Postupak zaključavanja memorijskih registara signala struja pri nastanku režima praznog hoda DNV-a

Na prethodnoj slici prikazana su dva načina čuvanja odbiraka signala struja u memorijskim registrima. Prvi način, označen sa (1), predstavlja klasično memorisanje vrijednosti odbiraka signala, gdje se vrijednost trenutnog odbirka (najnovija izmjerena vrijednost signala) memoriše na kraju registra (O_m), čemu prethodi brisanje vrijednosti

najstarijeg odbirka sa početka registra (O1) i „kaskadno pomjeranje” memorisanih vrijednosti svih odbiraka za jednu memorijsku lokaciju, sa desna na lijevo. Na početku opisanog postupka, vrijednost odbirka koja je bila memorisana na lokaciji O2, memoriše se na lokaciju O1, na taj način se briše vrijednost najstarijeg odbirka, koja je prethodno bila memorisana na toj istoj lokaciji. Postupak se nastavlja tako što se sve memorisane vrijednosti odbiraka pomjeraju sa desna na lijevo za po jednu memorijsku lokaciju, zaključno sa vrijednošću odbirka na lokaciji Om, koja sada biva memorisana na lokaciju Om-1. Postupak se završava upisivanjem vrijednosti najnovijeg odbirka na memorijsku lokaciju Om.

Drugi način čuvanja odbiraka signala, označen sa (2), prikazuje predloženi koncept zaključavanja memorijskih registara, u slučaju kada vrijednost najnovijeg odbirka pripada režimu označenom kao prazan hod. Postupak počinje identično kao i u prethodnom slučaju, brisanjem vrijednosti najstarijeg odbirka sa lokacije O1 i „kaskadnim pomjeranjem” memorisanih vrijednosti svih ostalih odbiraka za jednu memorijsku lokaciju, sa desna na lijevo. Potom se vrijednost najnovijeg odbirka memoriše na lokaciju Om. Ukoliko se utvrdi da vrijednost najnovijeg odbirka pripada režimu praznog hoda, onda se ona briše, tako što se na tu memorijsku lokaciju upisuje vrijednost odbirka koja je prethodno bila na lokaciji O1. Zatim se ponovo memorisane vrijednosti svih odbiraka „kaskadno pomjeraju” za jednu memorijsku lokaciju, sa desna na lijevo, nakon čega se ponovo na memorijsku lokaciju Om upisuje vrijednost najnovijeg odbirka. Ukoliko se zaključi da i ta vrijednost pripada režimu praznog hoda, ponovo se vrši njeno brisanje, tako što se na tu memorijsku lokaciju (Om) upisuje vrijednost odbirka sa lokacije O1. Na osnovu prethodnog, moguće je zaključiti da se postupak ciklično ponavlja, sve dok su vrijednosti najnovijih odbiraka identifikovane kao vrijednosti iz režima praznog hoda. Na ovaj način, u memorijskom registru „kruže” vrijednosti jednih te istih odbiraka, koje pripadaju pogonskom režimu DNV-a neposredno prije nastanka praznog hoda. Kako je spriječeno čuvanje vrijednosti novih odbiraka u memorijskom registru, koje pripadaju režimu praznog hoda, za postupak se koristi termin „zaključavanje registra”. Opisani postupak se prekida kada vrijednost najnovijeg odbirka bude identifikovana kao vrijednost koja ne pripada režimu praznog hoda, nakon čega se pokreće klasični postupak (1).

Da bi se memorijski registar zaključao, prema prethodno opisanom postupku, neophodno je definisati uslov zaključavanja, koji služi kao identifikacija režima praznog hoda. Uslov zaključavanja mora biti definisan u skladu sa principima rada predloženog algoritma. Logično bi bilo mjeriti amplitude struja i porediti njihove vrijednosti sa prethodno definisanom vrijednošću, koja bi predstavljala uslov nastanka praznog hoda. Npr. kada vrijednosti amplituda struja postanu manje od 10% ili 5%, vrijednosti amplituda nazivnih struja provodnika DNV-a. Međutim, klasične metode mjerenja amplitude signala zahtijevaju ulazak određenog broja novih odbiraka u memorijske registre, što predstavlja problem za princip rada predloženog algoritma zaštite. Ako se pretpostavi pogonski režim DNV-a, sa npr. 50% nazivne snage potrošnje (vrijednosti struja provodnika DNV-a su približno jednake 50% vrijednosti nazivnih struja), nakon čega nastane pogonski režim blizak praznom hodu. Da bi se izmjerilo smanjenje amplituda struja, neophodno je da u memorijske registre uđu odbirci iz pogonskog režima bliskog praznom hodu. Novi odbirci, iz režima bliskog praznom hodu, ne smiju biti memorisani u registre, jer se onda u slučaju nastanka kvara može ponovo pojaviti problem neosjetljivosti predloženog algoritma koji je analiziran u odjeljku 4.4. Ovdje se pojavljuju dva međusobno protivrječna uslova, detekcija režima praznog hoda zahtijeva ulazak određenog broja novih odbiraka upravo iz tog režima, a sa druge strane prisustvo pomenutih odbiraka narušava osjetljivost predloženog algoritma. Nameće se ključno pitanje, na koji način je moguće detektovati režim praznog hoda, a istovremeno spriječiti ili minimizovati ulazak određenog broja odbiraka upravo iz tog režima. Odgovor na prethodno pitanje je sadržan u upotrebi priraštaja strujnih signala pri definisanju uslova zaključavanja memorijskih registara. U skladu sa prethodnim, predložen je sljedeći uslov zaključavanja memorijskih registara [71]:

$$|i(k)| - |i(k-m)| < -C_1 I_n, \quad (4.5.1)$$

gdje su: C_1 – konstanta brzine zaključavanja memorijskog registra; I_n – nazivna struja provodnika DNV-a.

Osnovna ideja, sadržana u definiciji uslova (4.5.1), predlaže zaključavanje memorijskog registra pri detekciji određene negativne vrijednosti priraštaja signala struje. Kada nastane režim praznog hoda, vrijednost priraštaja struje će veoma brzo postati negativna, čime je omogućeno brzo zaključavanje memorijskog registra, uz

minimalan broj odbiraka struje iz režima praznog hoda. Vrijednost konstante C_1 određuje brzinu zaključavanja memorijskog registra. Što je vrijednost pomenute konstante manja, to će se memorijski registar brže zaključati i sadržati manje odbiraka iz režima praznog hoda. Na osnovu rezultata simulacija, u okviru prethodnog istraživanja [71], došlo se do zaključka o preporučenim vrijednostima konstante C_1 . Zaključavanje memorijskih registara se pokazalo kao veoma brzo i efikasno za vrijednosti konstante $C_1 = 0,05 - 0,1$.

Upotrebom priraštaja, definisanog izrazom (4.5.1), omogućeno je brzo zaključavanje memorijskih registara pri smanjenju amplituda signala struja. Međutim, amplitude struja se mogu smanjiti i kao posljedica proizvoljnog smanjenja snage potrošnje, što ne odgovara režimu praznog hoda. Sa odabranim opsegom vrijednosti konstante C_1 , i najmanje smanjenje snage potrošnje, u odnosu na prethodnu vrijednost, će izazvati zaključavanje memorijskih registara. Dakle, memorijski registri neće biti zaključani samo pri pojavi praznog hoda, nego i pri proizvoljnom smanjenju snage potrošnje. Prethodni problem ne može biti izbjegnuto, jer su male vrijednosti konstante C_1 potrebne da bi se spriječio ulazak novih odbiraka signala struja, pri pojavi praznog hoda, što je ranije objašnjeno. Kao rješenje ovog problema predlaže se uvođenje dodatnog uslova za otključavanje memorijskih registara, koji bi bio zadovoljen u svim slučajevima smanjenja potrošnje koji nisu identifikovani kao režim blizak praznom hodu. Sljedeći izraz definiše pomenuti uslov otključavanja memorijskih registara [71]:

$$|i(k)| > C_2 I_n, \quad (4.5.2)$$

gdje je C_2 konstanta brzine otključavanja memorijskog registra.

Osnovna ideja uslova otključavanja podrazumijeva vraćanje na postupak (1) memorisanja odbiraka signala struja u registru (Sl.4.5.1), nakon identifikacije smanjenja snage potrošnje koje ne odgovara režimu praznog hoda. Ukoliko apsolutna vrijednost najnovijeg odbirka signala struje, nakon zaključavanja memorijskog registra, postane veća od podešene vrijednosti $C_2 I_n$, trenutni pogonski režim neće biti identifikovan kao blizak praznom hodu i doći će do otključavanja memorijskog registra. Vrijednost konstante C_2 definiše brzinu otključavanja memorijskog registra, ali i granicu za identifikaciju režima praznog hoda. Predložen je sljedeći opseg vrijednosti konstante $C_2 = 0,1 - 0,2$ [71]. Ukoliko apsolutna vrijednost odbirka signala struje postane veća od 10

ili 20% vrijednosti nazivne struje, režim rada DNV-a nije blizak praznom hodu i memorijski registri se otključavaju.

Uslovima zaključavanja i otključavanja memorijskih registara signala struja postignuto je sljedeće:

- (1) pri proizvoljnom smanjenju snage potrošnje, memorijski registri se brzo zaključavaju što je omogućeno uslovom (4.5.1),
- (2) ukoliko proizvoljno smanjenje snage potrošnje nije blisko režimu praznog hoda DNV-a, memorijski registri se brzo otključavaju dok u suprotnom oni ostaju zaključani, što je ostvareno uslovom (4.5.2),
- (3) pri nastanku kvara iz pogonskog režima bliskog praznom hodu, predloženi algoritam zaštite će biti osjetljiv, jer su memorijski registri signala struja prethodno bili zaključani sa minimalnim sadržajem odbiraka iz režima praznog hoda.

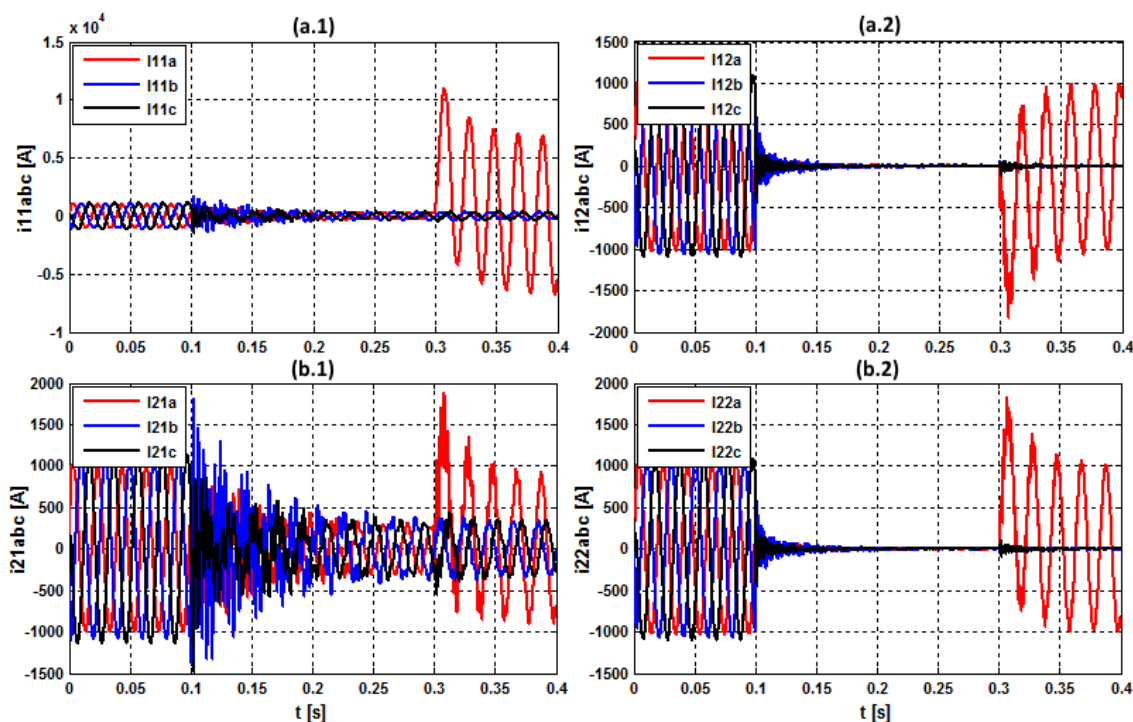
4.5.2 Ispitivanje koncepta zaključavanja memorijskih registara signala struja

U svrhu provjere primjene tehnike zaključavanja memorijskih registara signala struja za rješenje problema neosjetljivosti predloženog algoritma zaštite DNV-a, zasnovanog na promjenama faznih uglova struja, definisana su četiri karakteristična testa:

- (1) Jednopolni kratak spoj Az na vodu 1, u trenutku 0,3 s, 50 km od početnih sabirnica BB, kome prethodi događaj praznog hoda u trenutku 0,1 s.
- (2) Dvopolni kratak spoj BC na vodu 1, u trenutku 0,305 s, 100 km od početnih sabirnica BB, kome prethode događaji: prazan hod u trenutku 0,1 s i povratak snage potrošnje na predefinisanu vrijednost u trenutku 0,2 s.
- (3) Dvopolni kratak spoj ACz na vodu 2, u trenutku 0,41 s, 100 km od početnih sabirnica BB, kome prethode događaji: smanjenje snage potrošnje u trenutku 0,1 s, porast snage potrošnje na vrijednost veću od predefinisane u trenutku 0,2 s i prazan hod u trenutku 0,3 s.
- (4) Tropolni kratak spoj ABCz na vodu 2, u trenutku 0,315 s, 150 km od početnih sabirnica BB, kome prethode događaji: smanjenje snage potrošnje u trenutku 0,1 s i prazan hod u trenutku 0,2 s.

U svim ispitivanjima, potrošnja je predefinisana sa vrijednošću otpornosti $R_P = 150 \Omega$ po fazi (vrijednost prije pojave događaja praćenih prelaznim procesima). Pogonski režim rada DNV-a, blizak praznom hodu, definisan je sa vrijednošću otpornosti $R_P = 1 M\Omega$ po fazi. Vrijednost nazivne struje snopa faznih provodnika je $I_n = 2440 A$. Usvojene vrijednosti konstanti brzina zaključavanja i otključavanja memorijskih registara strujnih signala, koje se nalaze u izrazima (4.5.1) i (4.5.2), redom, su $C_I = 0,05$ i $C_2 = 0,2$, takođe redom.

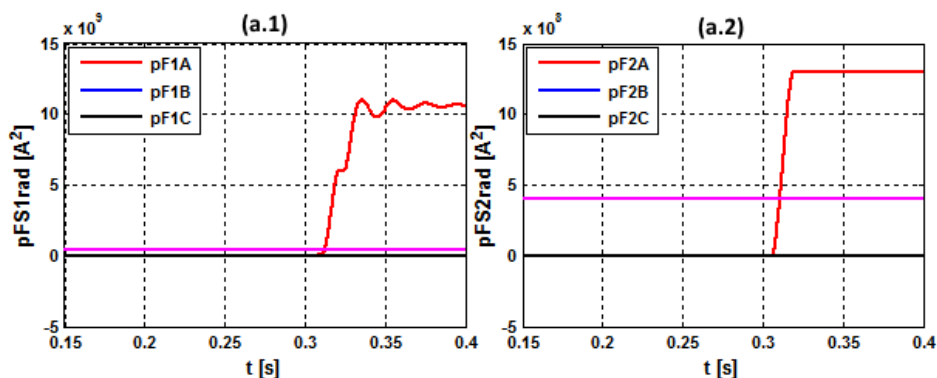
Kroz test (1) vršena je provjera osjetljivosti predloženog algoritma zaštite pri nastanku kvara iz režima bliskog praznom hodu. Promjene signala struja DNV-a u vremenu su prikazane na Sl.4.5.2, dok su promjene pokazatelja kvara diferencijalnih releja R1 i R2 u vremenu prikazane na Sl.4.5.3.



Sl.4.5.2 Promjene struja DNV-a u vremenu za slučaj nastanka praznog hoda u trenutku 0,1 s, praćenog jedнопolnim kratkim spojem Az, na vodu 1, u trenutku 0,3 s, 50 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22

Na osnovu rezultata sa grafika (a.1) i (b.1) na Sl.4.5.2, moguće je zaključiti da je događaj praznog hoda (trenutak 0.1 s) praćen veoma „dinamičnim” prelaznim procesima, sa strane releja R1. U posmatranom periodu praznog hoda, postoje značajne vrijednosti struja na početku DNV-a, što je uzrokovano postojanjem otočnih admitansi

u modelu. Sa strane releja R2, odgovarajući prelazni procesi su manje izraženi, što je vidljivo na graficima (a.2) i (b.2). Zahvaljujući uslovu (4.5.1), memorijski registri bi trebali biti zaključani, neposredno nakon trenutka 0,1 s, a ponovo i otključani, neposredno nakon nastanka kvara Az u trenutku 0,3 s, zbog uslova (4.5.2). Pomenuti uslovi bi trebalo da obezbijede osjetljivost algoritma zaštite sa strane releja R2.



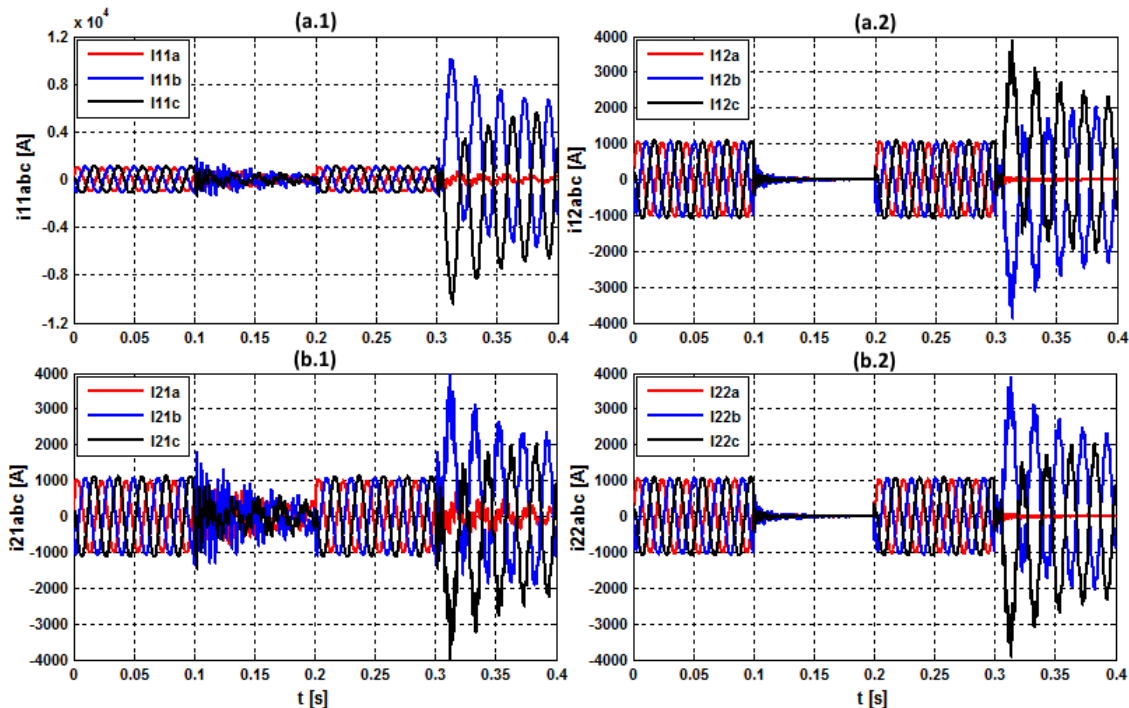
Sl.4.5.3 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj jednopolnog kratkog spoja Az, na vodu 1, u trenutku 0,3 s, 50 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2

Posmatrajući rezultate sa grafika (a.1) i (a.2), na Sl.4.5.3, moguće je zaključiti da je predloženi algoritam zaštite osjetljiv i selektivan u analiziranom slučaju kvara sa strane oba diferencijalna releja, R1 i R2. Primjena tehnike zaključavanja memorijskih registara je omogućila osjetljivost predloženog algoritma sa strane releja R2, što je predstavljalo i njen osnovni cilj. Promjena faznog ugla struje kvara je određena u odnosu na fazni ugao iste struje iz perioda prije događaja praznog hoda.

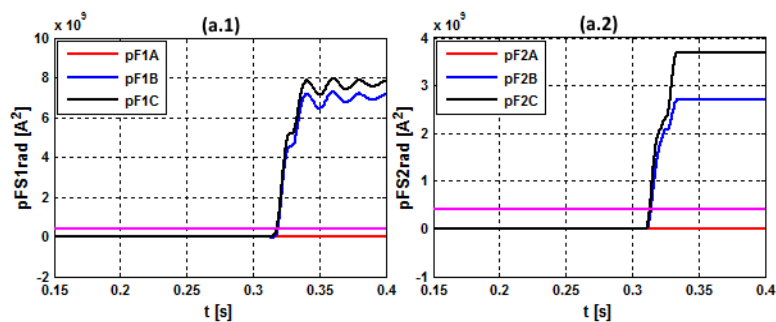
Test (2) ima za cilj da ispita osjetljivost predloženog algoritma pri kvaru nakon događaja praznog hoda i povratka potrošnje na predefinisanu vrijednost. Na ovaj način se vrši provjera uticaja tehnike zaključavanja memorijskih registara na rad algoritma, pri kvarovima kojima ne prethodi neposredno prazan hod. Lokacija, trenutak i tip kvara su promijenjeni u odnosu na test (1). Promjene signala struja DNV-a u vremenu su prikazane na Sl.4.5.4, dok su promjene pokazatelja kvara releja R1 i R2 u vremenu prikazane na Sl.4.5.5.

Na osnovu rezultata sa grafika na Sl.4.5.4, mogu se uočiti prelazni procesi koji nastaju u karakterističnim trenucima. Događaj praznog hoda, u trenutku 0,1 s, uzrokuje veoma „dinamičan” prelazni proces sa strane releja R1, što je prikazano na graficima (a.1) i (b.1), nakon čega se potrošnja ponovo uspostavlja u trenutku 0,2 s, što dalje

dovodi do uspostavljanja stacionarnog stanja, koje traje sve do nastanka kvara u trenutku 0,305 s. Grafici (a.2) i (b.2) prikazuju slične promjene signala struja u vremenu, sa strane releja R2, pri identičnoj hronologiji događaja.



Sl.4.5.4 Promjene struja DNV-a u vremenu pri nastanku praznog hoda u trenutku 0,1 s, ponovnog uspostavljanja početne snage potrošnje u trenutku 0,2 s i dvopolnog kratkog spoja BC, na vodu 1, u trenutku 0,305 s, 100 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22

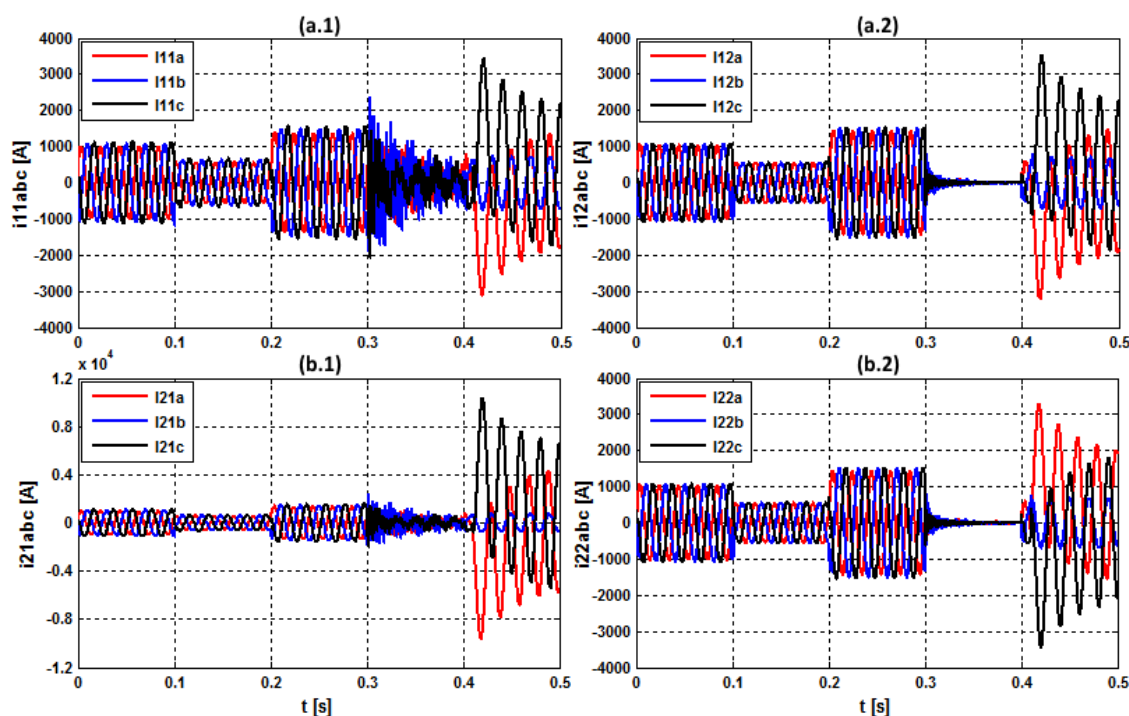


Sl.4.5.5 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj dvopolnog kratkog spoja BC, na vodu 1, u trenutku 0,305 s, 100 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2

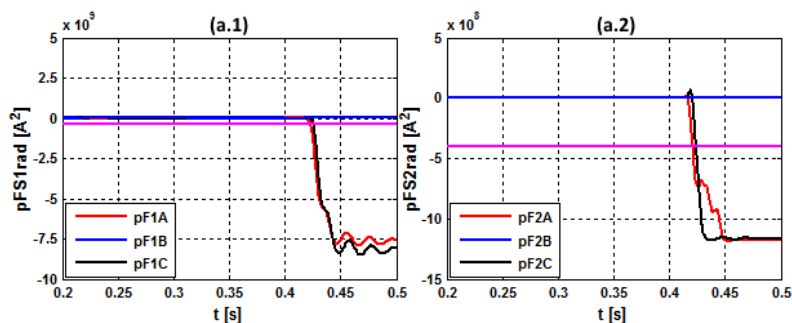
Promjene pokazatelja kvara u vremenu, prikazane na graficima (a.1) i (a.2) sa Sl.4.5.5, pokazuju da je ispitivani algoritam osjetljiv pri analiziranom kvaru, kome prethodi opisana hronologija događaja. Osjetljivost algoritma, sa strane releja R2, nije

narušena događajima praznog hoda i ponovnog uspostavljanja potrošnje, što potvrđuje pravilan rad tehnike zaključavanja memorijskih registara. Memorijski registri su se zaključali u trenutku nastanka praznog hoda (0,1 s), zbog uslova (4.5.1), ali su se i ponovo otključali u trenutku ponovnog uspostavljanja potrošnje (0,2 s), zahvaljujući uslovu (4.5.2), što je saglasno sa očekivanim odzivom ispitivanog algoritma.

Ispitivanje, predviđeno testom (3), ima za cilj da utvrdi osjetljivost predloženog algoritma, u slučaju kvara kome prethodi režim blizak praznom hodu, i istovremeno uticaj dvostruke promjene snage potrošnje u kratkom vremenskom intervalu, koji prethodi događaju praznog hoda, na ispravnost rada tehnike zaključavanja memorijskih registara. Događaj praznog hoda je iniciran nakon prethodnog povećanja snage potrošnje. Promjene signala struja DNV-a u vremenu su prikazane na Sl.4.5.6, dok su promjene pokazatelja kvara u vremenu, za releje R1 i R2, prikazane na Sl.4.5.7.



Sl.4.5.6 Promjene struja DNV-a u vremenu pri smanjenju snage potrošnje u trenutku 0,1 s, povećanja snage potrošnje u trenutku 0,2 s, nastanku praznog hoda u trenutku 0,3 s i dvopolnog kratkog spoja ACz, na vodu 2, u trenutku 0,41 s, 100 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22

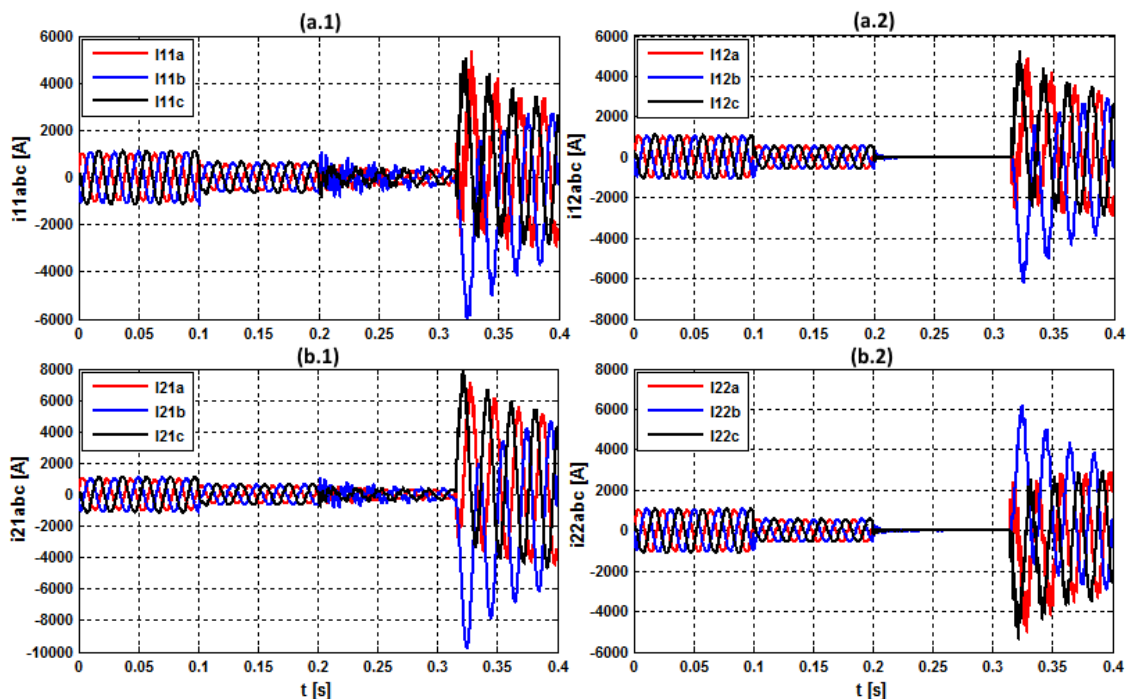


Sl.4.5.7 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj dvopolnog kratkog spoja ACz, navodu 2, u trenutku 0,41 s, 100 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. relej R2

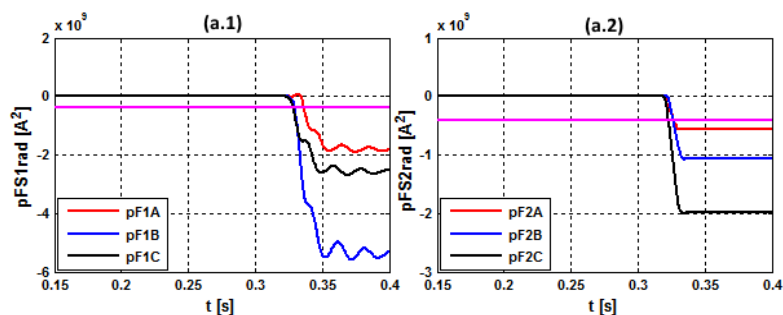
Na osnovu grafika sa Sl.4.5.6, moguće je zapaziti tri prelazna procesa prije nastanka kvara. Prvi je izazvan smanjenjem snage potrošnje, u trenutku 0,1 s ($R_p = 300 \Omega$). Uzrok drugog je povećanje snage potrošnje na vrijednost veću od predefinisane, u trenutku 0,2 s ($R_p = 100 \Omega$). Treći prelazni proces, uzrokovan događajem praznog hoda u trenutku 0,3 s, je i „najdinamičniji”, što je posebno izraženo kod struja na početku DNV-a, čije promjene u vremenu su prikazane na graficima (a.1) i (b.1). Odgovarajući prelazni proces signala struja na kraju DNV-a, je mnogo manje „dinamičan” i brže prigušen, što se može zapaziti sa grafika (a.2) i (b.2). Događaj kvara ACz, u trenutku 0.41 s, uzrokuje značajno povećanje struja na početku i kraju DNV-a, uz izražene opadajuće jednosmjerne komponente.

Promjene pokazatelja kvara u vremenu, prikazane na graficima (a.1) i (a.2), sa Sl.4.5.7, potvrđuju osjetljivost ispitivanog algoritma. Osjetljivost sa strane releja R2 nije ugrožena, iako događaju kvara prethodi događaj praznog hoda. Memorijski registri su se uspješno zaključali neposredno nakon događaja praznog hoda i na taj način onemogućili ulazak odbiraka signala struja iz režima praznog hoda. Dvostruka promjena snage potrošnje, koja je prethodila događaju praznog hoda, nije imala uticaj na ispravan rad tehnike zaključavanja memorijskih registara.

Kroz ispitivanje u okviru testa (4), analizirana je osjetljivost algoritma zaštite u slučaju trolnog kratkog spoja, kome je prethodio režim praznog hoda, nastao nakon prvobitnog smanjenja snage potrošnje. Odgovarajuće promjene signala struja DNV-a u vremenu, prikazane su na Sl.4.5.8, dok su promjene pokazatelja kvara u vremenu, za releje R1 i R2, prikazane na Sl.4.5.9.



Sl.4.5.8 Promjene struja DNV-a u vremenu pri smanjenju snage potrošnje u trenutku 0,1 s, nastanku praznog hoda u trenutku 0,2 s i troleznog kratkog spoja ABC, na vodu 2, u trenutku 0,315 s, 150 km od početnih sabirnica BB: (a.1) početak voda 1 – lokacija 11; (a.2) kraj voda 1 – lokacija 12; (b.1) početak voda 2 – lokacija 21; (b.2) kraj voda 2 – lokacija 22



Sl.4.5.9 Vrijednosti pokazatelja kvara algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja za slučaj troleznog kratkog spoja ABCz, na vodu 2, u trenutku 0,315 s, 150 km od sabirnica BB: (a.1) dif. relej R1; (a.2) dif. Relej R2

Slično kao u svim prethodnim testovima, moguće je uočiti prelazne procese signala struja na početku i kraju DNV-a, koji nastaju nakon karakterističnih trenutaka. Sa strane releja R1, na graficima (a.1) i (b.1), sa Sl.4.5.8, uočljivi su veoma „dinamični” prelazni procesi, koji počinju u trenucima 0,2 s i 0,315 s i uzrokovani su događajima praznog hoda i troleznog kratkog spoja, redom. Na strani releja R2, sa grafika (a.2) i (b.2), na Sl.4.5.8, može se zapaziti veoma brzo „prigušeni” prelazni proces nakon događaja

praznog hoda, u trenutku 0,2 s, i veoma „dinamičan” prelazni proces nakon nastanka trolnog kratkog spoja, u trenutku 0,315 s.

Pregledom promjena pokazatelja kvara u vremenu, prikazanih na graficima (a.1) i (a.2), sa Sl.4.5.9, moguće je zaključiti da je predloženi algoritam zaštite osjetljiv i selektivan u analiziranom slučaju kvara. Osjetljivost algoritma je najmanja u fazi A, zbog najvećeg izobličenja signala struje u pomenutoj fazi, nakon nastanka kvara.

Kao i u svim prethodnim testovima, tehnika zaključavanja memorijskih registara se pokazala kao efikasno rješenje problema neosjetljivosti ispitivanog algoritma zaštite i pri trolnom kratkom spoju, kome je prethodio režim praznog hoda. Smanjenje snage potrošnje, koje je prethodilo događaju praznog hoda, nije narušilo ispravnost rada tehnike zaključavanja memorijskih registara.

5. POPREČNA DIFERENCIJALNA ZAŠTITA SA JEDNOFAZNYM AUTOMATSKIM PONOVMIM UKLJUČENJEM

Jednofazno APU je dobro poznata i naširoko korišćena tehnika za eliminisanje prolaznih kvarova na nadzemnim vodovima u visokonaponskim mrežama. Višestruke prednosti njene primjene i uticaj na različite šeme relejnih zaštita su detaljno objašnjeni u [24]. Ukoliko se primjena jednofaznog APU-a ne uvaži pri samom razvoju algoritama relejne zaštite, njihov selektivan rad može biti narušen u pogonskim uslovima [25], [26]. Kako se poprečna diferencijalna zaštita najčešće koristi u visokonaponskim mrežama, analiza primjene tehnike jednofaznog APU-a na njen rad je od velike važnosti. U naučnim člancima [27], [28] predložene su interesantne tehnike APU-a za DNV-ove, ali bez analize primjenjivosti sa usmjerenom poprečnom diferencijalnom zaštitom. Veoma interesantan algoritam za poprečnu diferencijalnu zaštitu DNV-a, koji obuhvata strategiju jednofaznog APU-a, nedavno je objavljen u naučnom članku [29]. Međutim, prethodni algoritam koristi naponske signale pri proračunu usmjerenih elemenata zaštite. U ovom poglavlju disertacije, osnovni cilj je razvoj novog algoritma, koji ima zadatak da obezbijedi selektivan rad poprečne diferencijalne zaštite pri primjeni jednofaznog APU-a, a da pri tome koristi samo strujne signale.

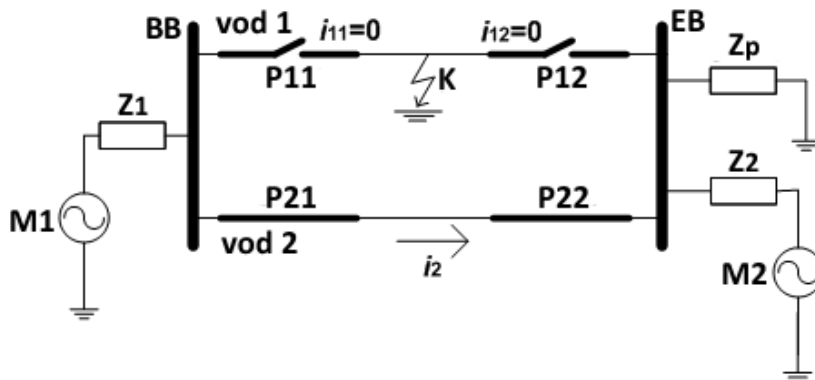
U prvom dijelu poglavlja predstavljen je problem primjene tehnike jednofaznog APU-a na DNV štice usmjerenom poprečnom diferencijalnom zaštitom, koja koristi samo strujne signale. Osnovni dio poglavlja obuhvata prijedlog novog algoritma, zasnovanog na pokazateljima uspješnosti jednofaznog APU-a, kao rješenja prethodno pomenutog problema, što ujedno predstavlja i drugi najvažniji doprinos ove disertacije. U trećem dijelu poglavlja dati su rezultati detaljnih simulacionih ispitivanja osnovnih osobina zaštite zasnovane na novom algoritmu, za slučajeve dvostrano napajanog i radijalnog DNV-a. Završni dio poglavlja sadrži analizu rada poprečne diferencijalne zaštite kada je u pogonu samo jedan vod u sistemu DNV-a.

5.1 Problem u radu poprečne diferencijalne zaštite zasnovane na signalima struja pri primjeni jednofaznog APU-a

Konvencionalna usmjerena poprečna diferencijalna zaštita koristi naponske signale kao referentne veličine za određivanje smjera kvara. U ovom slučaju, primjena jednofaznog APU-a ne bi trebalo da predstavlja problem u smislu određivanja smjera kvara, jer su naponski signali uvijek dostupni diferencijalnim relejima. Međutim, uobičajena je praksa da se poprečna diferencijalna zaštita blokira kada je samo jedan vod u pogonu, jer se ne može izvršiti proračun diferencijalne struje [23]. Pravilan rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, zasnovane na strujnim signalima, može biti narušen primjenom jednofaznog APU-a u smislu određivanja smjera struje kvara, zbog čega je neophodno dalje istraživanje u cilju pronalaska funkcionalnog rješenja.

5.1.1 Teorijska analiza problema

Pokazatelji kvara svih prethodno analiziranih algoritama poprečne diferencijalne zaštite, zasnovanih na strujnim signalima, su definisani posebno za svaku fazu DNV-a [84]. Iz prethodnog razloga, za ovakvu zaštitu se može reći i da je fazna. Ovo predstavlja preduslov za primjenu tehnike jednofaznog APU-a. Osnovni uzrok problema primjene jednofaznog APU-a u kombinaciji sa algoritmima poprečne diferencijalne zaštite, koji su zasnovani na strujnim signalima, može biti uočen sa pojednostavljene jednopolne šeme na Sl.5.1.1.



Sl.5.1.1 Pojednostavljena jednopolna šema DNV-a nakon isključenja voda u kvaru i prije primjene tehnike APU-a [84]

DNV, prikazan na Sl.5.1.1 povezuje početne i završne sabirnice, označene sa BB i EB, redom. Analiza je vršena na primjeru dvostrukog napajanja DNV-a, gdje su na odgovarajuće sabirnice povezani realni izvori M1 i M2 sa impedansama Z_1 i Z_2 , redom,

koji modeluju ostatak EES-a. Na sabirnice EB povezana je i impedansa potrošnje Z_p . Pretpostavljeno je da se kvar dogodio na vodu 1 i da je isključen od strane prekidača P11 i P12, nakon selektivnog reagovanja usmjerene poprečne diferencijalne zaštite.

Na osnovu analize date u poglavlju 4, kod svih ispitivanih algoritama, zasnovanih na signalima struja, može se zaključiti da je referentna veličina za određivanje smjera struje kvara u stvari ista ta struja, ali iz vremenskog perioda koji prethodi nastanku kvara. Prethodni zaključak je očigledan na osnovu izraza koji se koriste u proračunu pokazatelja kvara ispitivanih algoritama. Za algoritme na bazi priraštaja apsolutnih i trenutnih vrijednosti struja to su izrazi (4.1.2)-(4.1.4) i (4.1.5)-(4.1.7), redom. Dok za predloženi algoritam, zasnovan na promjeni faznih uglova struja, izrazi (4.3.8)-(4.3.11) jasno ukazuju na ranije pomenutu referentnu veličinu. Suština problema primjene jednofaznog APU-a je ta što struje voda 1, koji je isključen, više nisu dostupne kao referentne veličine ($i_{11} = 0$ i $i_{12} = 0$) za proračun smjera struje kvara nakon ponovnog uključjenja. U nedostatku referentne veličine, ne može se garantovati selektivan rad algoritama usmjerenih zaštita. Opisani problem je prisutan u istom obliku i kod slučaja radijalnog DNV-a. Ovo je veoma važan nedostatak algoritama zasnovanih na signalima struja u odnosu na konvencionalne algoritme koji koriste napone kao referentne veličine [70], [18]. Da bi algoritmi zasnovani na strujnim signalima bili konkurentni konvencionalnim algoritmima usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, problem primjene jednofaznog APU-a mora biti riješen.

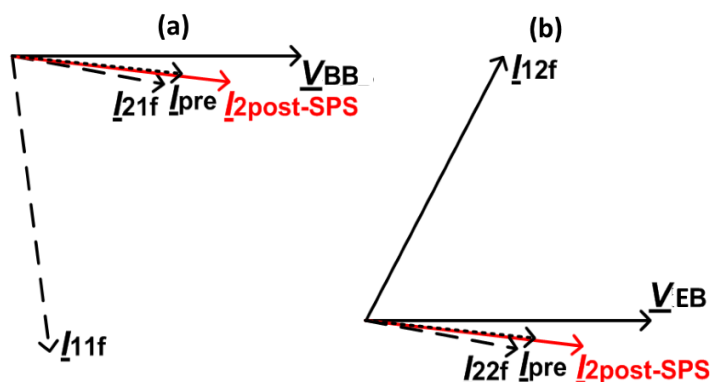
5.2 Algoritam za poprečnu diferencijalnu zaštitu sa jednofaznim APU

Za rješenje problema primjene jednofaznog APU-a na usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, zasnovanu na strujnim signalima, potrebno je pronaći adekvatnu zamjenu za struju prije nastanka kvara, koja se koristi kao referentna veličina. Nova referentna veličina mora biti ponovo struja, jer se analizira princip zaštite bez naponskih signala.

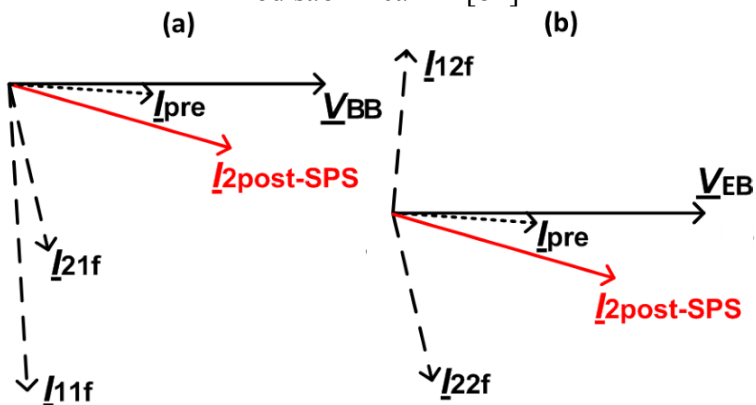
5.2.1 Teorijska analiza predloženog rješenja

Da bi se došlo do zaključka o najpovoljnijoj novoj referentnoj veličini za određivanje smjera struje kvara nakon APU-a faze u kvaru, neophodno je nacrtati i analizirati fazorske dijagrame, koji odgovaraju jednopolnoj šemi sa Sl.5.1.1 Na Sl.5.2.1 i Sl.5.2.2 prikazani su pojednostavljeni fazorski dijagrami sa karakterističnim

veličinama, koji odgovaraju dvostrano napajanom i radijalnom DNV-u u slučaju trajnog kvara, redom [84]. Za referentne ose fazorskih dijagrama usvojeni su fazori napona sabirnica BB i EB, označeni sa \underline{V}_{BB} i \underline{V}_{EB} , redom (zaštita ne koristi ove napone, ali su oni prikazani u svrhu boljeg razumijevanja fazorskih dijagrama). Pomoću \underline{I}_{ijf} su obilježeni fazori struja kvara nakon jednofaznog APU-a, dok oznake u indeksu ij označavaju mjerne lokacije. Vrijednosti $i = 1$ i 2 ukazuju na struje vodova 1 i 2, redom, dok vrijednosti $j = 1$ i 2 ukazuju na struje na početku i kraju DNV-a, redom. Oznake \underline{I}_{pre} i $\underline{I}_{2post-SPS}$, predstavljaju fazor struje prije nastanka kvara (identičan na svim mjernim lokacijama) i fazor struje voda 2 nakon isključenja voda 1 i prije APU-a, redom.



SI.5.2.1 Fazorski dijagrami koji odgovaraju slučaju dvostrano napajanog DNV-a nakon APU-a voda 1: (a) dif. relej R1 – lociran kod sabirnica BB; (b) dif. relej R2 – lociran kod sabirnica EB [84]



SI.5.2.2 Fazorski dijagrami koji odgovaraju slučaju radijalnog DNV-a nakon APU-a voda 1: (a) dif. relej R1 – lociran kod sabirnica BB; (b) dif. relej R2 – lociran kod sabirnica EB [84]

Svi do sada ispitivani algoritmi za poprečnu diferencijalnu zaštitu, zasnovani na strujnim signalima, koristili su struju \underline{I}_{pre} kao referentnu veličinu za određivanje smjera struje kvara. Kao što je ranije objašnjeno, nakon APU-a voda 1, struja \underline{I}_{pre} nije dostupna kao referentna veličina (vod 1 je bio isključen). Analizirajući fazorske dijagrame sa

Sl.5.2.1 i Sl.5.2.2, moguće je zaključiti da je struja $I_{2post-SPS}$ približno u fazi sa strujom I_{pre} (prije nastanka kvara). Greška prethodne aproksimacije je skoro potpuno zanemarljiva u slučaju dvostrano napajanog DNV-a. Budući da je struja $I_{2post-SPS}$ dostupna diferencijalnim relejima neposredno prije APU-a voda 1, ona se može iskoristiti kao nova referentna veličina za određivanje smjera struje kvara nakon APU-a voda 1. Razlika između amplituda struja I_{pre} i $I_{2post-SPS}$ ne bi trebalo značajno da utiče na rad prethodno ispitivanih algoritama, jer su oni prvenstveno zasnovani na faznoj komparaciji.

Odabirom struje $I_{2post-SPS}$ kao referentne veličine, razlike između faznih uglova struja I_{11f} , I_{21f} , I_{12f} i I_{22f} , koje odgovaraju slučaju trajnog kvara nakon APU-a voda 1, mogu biti određene, što je osnovni preduslov za selektivan rad algoritama zasnovanih na strujnim signalima. U slučaju prolaznog kvara, fazni ugao struje voda 1, nakon APU-a, bio bi približno jednak faznom uglu struje $I_{2post-SPS}$, pa bi zaštita bila neosjetljiva. Nakon uspješnog APU-a, struja voda 1 bi ponovo postala jednaka I_{pre} . Na osnovu prethodnih razmatranja, pojavljuje se ideja za novi algoritam zaštite, koji bi razlikovao slučajeve prolaznog i trajnog kvara, selektivno određivao smjer trajnog kvara i u proračunu koristio samo strujne signale.

5.2.2 Pokazatelj uspješnosti jednofaznog APU-a

Osnovni preduslov za implementaciju predloženog algoritma, koji koristi struju voda koji nije u kvaru, kao referentnu veličinu za određivanje smjera struje kvara, nakon APU-a drugog voda, je detektovanje razlike između prolaznog i trajnog kvara. Zbog prethodnog, neophodno je matematički definisati odgovarajući pokazatelj uspješnosti APU-a [84]:

$$SPR_{ijn} = \pm \left| \sum_{k=(m/4)+1}^{3m/4} i_{ijn}(k) i_{i^{inv}jn} \left(k - \frac{m}{4}\right) \right|, \quad (5.2.1)$$

gdje su: i i j ranije definisane oznake u indeksima strujnih signala; i^{inv} je oznaka u indeksu strujnog signala sa invertovanom vrijednošću u odnosu na i (za $i = 1 \rightarrow i^{inv} = 2$ i obrnuto); n je oznaka faze A, B ili C voda; znak $+$ je usvojen kao indikacija kvara na vodu 1 ($i = 1$), dok je znak $-$ usvojen kao indikacija kvara na vodu 2 ($i = 2$).

Pokazatelji uspješnosti APU-a, dati izrazom (5.2.1), su definisani posebno za svaku fazu dva voda u paraleli, što znači da postoji ukupno po 6 pokazatelja na početku i kraju DNV-a. Kriterijum za detekciju uspješnosti jednofaznog APU-a je dat sljedećim uslovom [84]:

$$SPR_{ijn} < SPR_{pragAPU}, \quad (5.2.2)$$

gdje je $SPR_{pragAPU}$ unaprijed određeni prag reagovanja zaštite.

Ukoliko je uslov (5.2.2) ispunjen, algoritam detektuje prolazan kvar i jednofazno APU se smatra uspješnim. U suprotnom, algoritam detektuje trajan kvar i jednofazno APU se smatra neuspješnim.

5.2.3 Predložena šema poprečne diferencijalne zaštite

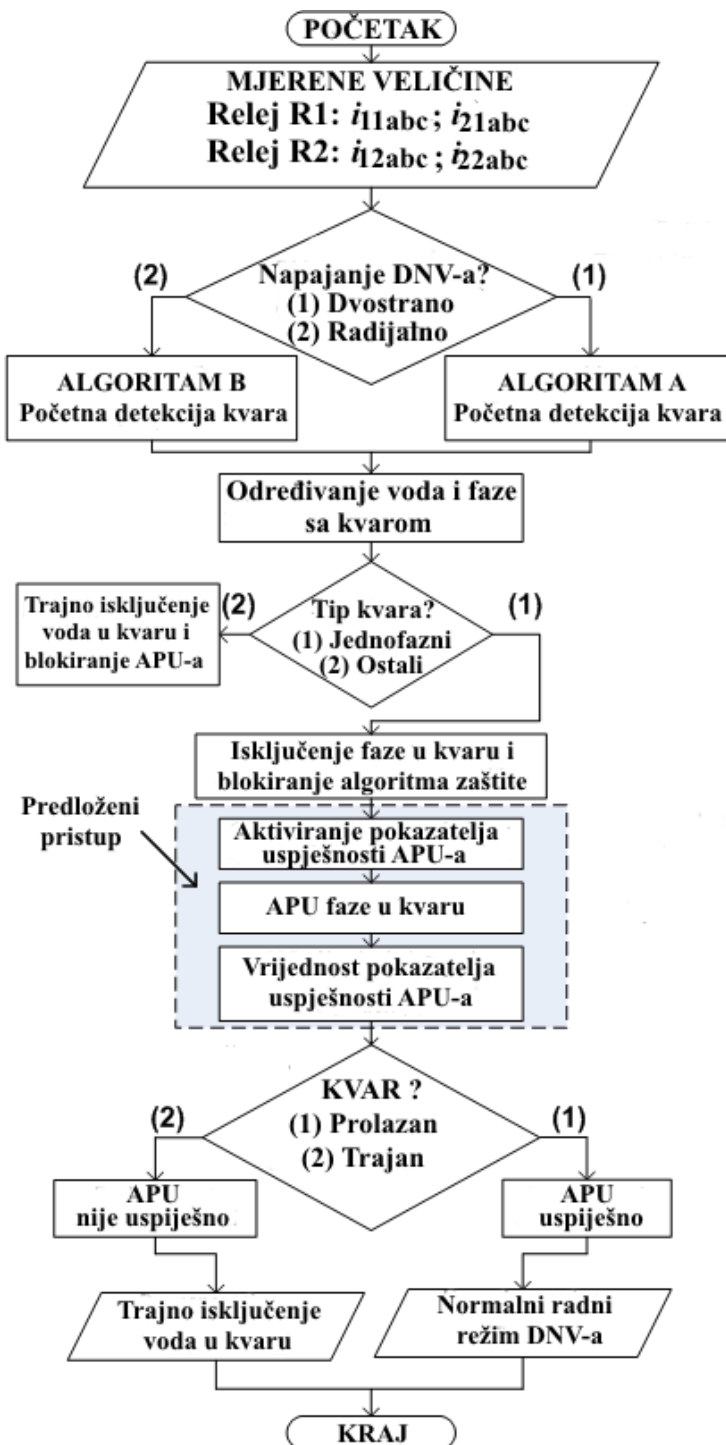
Predložena šema poprečne diferencijalne zaštite sa jednofaznim APU, zasnovana na algoritmu koji koristi samo strujne signale, sastoji se od dva osnovna dijela:

- početna detekcija kvara,
- detekcija uspješnosti jednofaznog APU-a.

Početna detekcija kvara podrazumijeva primjenu nekog od ranije ispitivanih algoritama u prethodnom poglavlju. Izbor odgovarajućeg algoritma za početnu detekciju kvara zavisi od napajanja DNV-a. U slučaju dvostrano napajanog DNV-a, odabran je algoritam na bazi priraštaja trenutnih vrijednosti struja (EM – algoritam A), čiji pokazatelji kvara su dati izrazom (4.1.6), dok je za radijalno napajan DNV odabran algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala (FS – algoritam B) čiji pokazatelji kvara su dati izrazima (4.3.14) i (4.3.15).

Nakon početne detekcije kvara vrši se blokiranje odgovarajućeg algoritma zaštite, jer ranije ispitivani algoritmi nisu primjenjivi sa jednofaznim APU. Na osnovu informacije o vrsti kvara donosi se odluka o pokretanju APU-a. Ukoliko je detektovan dvofazni ili trofazni kvar, ne pokreće se ciklus APU-a i vod u kvaru se trajno isključuje (postoji veća vjerovatnoća da se radi o trajnom kvaru). U suprotnom, ako je detektovan jednofazni kvar, pokreće se ciklus APU-a koji počinje beznaponskom pauzom, samo za fazu u kojoj je kvar. Slijedi aktivacija pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a, datog izrazom (5.2.1), samo za fazni provodnik na kome je detektovan kvar. Nakon jednofaznog APU-a, predloženi algoritam detektuje prisustvo kvara i donosi odluku o

trajnom isključenju voda. Ukoliko je kvar eliminisan ciklusom jednofaznog APU-a, DNV se vraća u normalni pogon. U suprotnom, trajno se isključuje samo vod koji je u kvaru. Pojednostavljeni algoritam toka predložene šeme poprečne diferencijalne zaštite sa jednofaznim APU je prikazan na Sl.5.2.3.



Sl.5.2.3 Algoritam toka predložene usmjerene poprečne diferencijalne zaštite sa jednofaznim APU [84]

Osnovna prednost predložene šeme zaštite sa jednofaznim APU je mogućnost otklanjanja prolaznog kvara na DNV-u privremenim isključenjem samo jednog od šest provodnika u sistemu. Na ovaj način se poboljšavaju uslovi tranzijentne stabilnosti EES-a, posebno u slučaju kada se DNV-om prenose velike snage. DNV ne može trajno da radi sa pet faznih provodnika u pogonu zbog dugotrajnog preopterećenja odgovarajućeg provodnika voda koji nije u kvaru. Međutim, trajanje jednocikličnog APU-a nije dovoljno dugo da bi preopterećeni provodnik u ovom slučaju bio i oštećen.

5.3 Ispitivanje poprečne diferencijalne zaštite sa jednofaznim APU

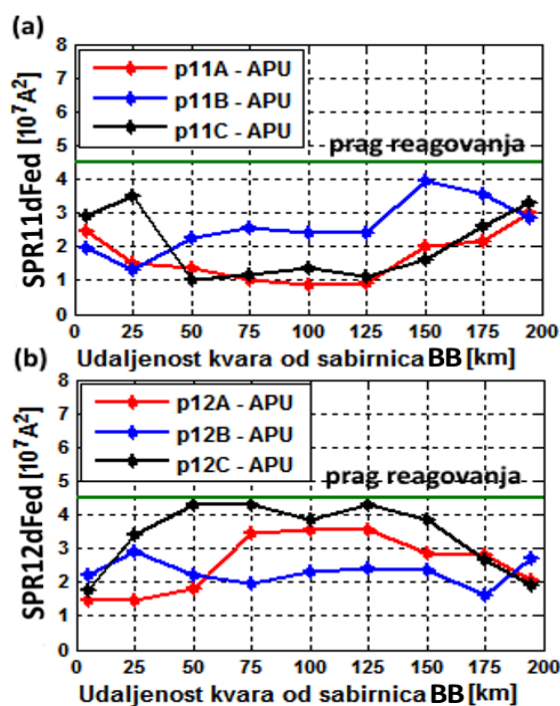
Predloženi algoritam zaštite sa jednofaznim APU je ispitivan upotrebom identičnog simulatora rada relejne zaštite u realnom vremenu, koji je ranije predstavljen u poglavlju 2, na modelima dvostrano napajanog i radijalnog DNV-a (Sl.3.2.4). Za potrebe simulacije rada sistema jednofaznog APU-a korišćeni su i modeli trolnih prekidača sa mogućnošću kontrolisanog jednopolnog isključenja i uključanja. Vremena otvaranja i zatvaranja kontakata prekidača su podešena na 40 ms. Vrijeme beznaponske pauze u okviru ciklusa jednofaznog APU-a je podešeno na 500 ms.

U poglavlju 4, već ranije su određene vrijednosti pragova reagovanja predloženih algoritama za početnu detekciju kvara. Za dvostrano napajan DNV u upotrebi je algoritam A (EM), čije vrijednosti pragova reagovanja su podešene na $2 \cdot 10^4$ A, dok je za slučaj radijalno napajanog DNV-a u upotrebi algoritam B (FS), čije vrijednosti pragova reagovanja su podešene na $4 \cdot 10^8$ A². Pri ispitivanju predloženog algoritma, čiji algoritam toka je prikazan na Sl.5.2.3, u okviru početnog testa, neophodno je odrediti i pragove reagovanja za pokazatelje uspješnosti jednofaznog APU-a, definisane izrazom (5.2.1). Nakon određivanja pomenutih vrijednosti pragova reagovanja, vršeno je ispitivanje selektivnosti predloženog algoritma za oba karakteristična slučaja, dvostrano i radijalno napajan DNV. Analizirani su različiti slučajevi prolaznih i trajnih jednofaznih kvarova. Mijenjane su lokacije, trenuci nastanka i otpornosti na mjestu kvara. Kao poseban slučaj, analizirani su i uzastopni kvarovi različitih faza vodova koji čine sistem DNV-a. U slučaju dvostrano napajanog DNV-a, analizirana je selektivnost predloženog algoritma i u slučaju promijenjenog toka snage.

5.3.1 Određivanje pragova reagovanja zaštite za pokazatelje uspješnosti jednofaznog APU-a

Prag reagovanja za pokazatelje uspješnosti jednofaznog APU-a je neophodan za razlikovanje prolaznih i trajnih kvarova, što je definisano relacijom (5.2.2). Određivanje njegove vrijednosti zahtijeva prethodno simuliranje jednofaznih prolaznih kvarova duž kompletne dionice jednog od paralelnih vodova u sistemu DNV-a. Dovoljno je simulirati kvarove samo na jednom od dva paralelna voda zbog simetričnosti analiziranog sistema (rezultati su identični i nezavisni od izbora voda u paraleli).

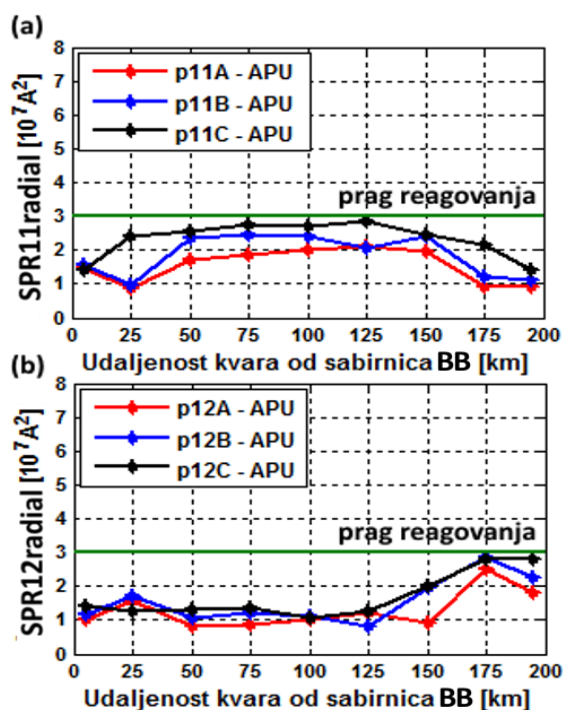
Prilikom testiranja odabran je vod 1, a prva simulaciona procedura je definisana za dvostrano napajanje DNV. Prolazni jednofazni kvarovi su simulirani duž cjelokupne dionice voda 1, na svakih 25 km dužine, sa izuzetkom prvog i posljednjeg kvara, koji su simulirani na udaljenosti 5 km od početnih BB i završnih EB sabirnica, redom. Svi prolazni kvarovi su modelovani sa otpornošću od 1Ω na mjestu kvara. Svaka faza je analizirana posebno zbog utvrđivanja najkritičnijeg slučaja (najveće vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a SPR_{1jn}). Na Sl.5.3.1 prikazani su rezultati ispitivanja i odabrani pragovi reagovanja pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a za slučaj dvostrano napajano DNV-a [84].



Sl.5.3.1 Vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a za slučajeve jednofaznih prolaznih kvarova na vodu 1 u sistemu dvostrano napajano DNV-a: (a) dif. relej R1; (b) dif. relej R2 [84]

Na osnovu rezultata prikazanih na Sl.5.3.1, moguće je uočiti da pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a dostižu različite vrijednosti u različitim fazama i za različite lokacije kvara. Pomenute vrijednosti zavise i od trenutaka ponovnih uključenja prekidača, koji utiču na signale struja u toku prelaznih procesa, što dalje utiče na rad sistema za filtriranje signala. U slučaju diferencijalnog releja R1, najveća vrijednost pokazatelja je zabilježena u fazi B, dok je odgovarajuća vrijednost za diferencijalni relej R2 zabilježena u fazi C. Maksimalne zabilježene vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a određuju odabrane vrijednosti pragova reagovanja. Za oba diferencijalna releja odabrana je vrijednost praga reagovanja $SPR_{prag,APU} = 4,5 \cdot 10^7 A^2$, prikazana zelenom linijom na Sl.5.3.1, koja obezbjeđuje i određenu rezervu za slučaj pojave mjernih grešaka.

Na potpuno identičan način, definisana je simulaciona procedura i za radijalno napajan DNV. Odgovarajući rezultati ispitivanja i odabrani pragovi reagovanja pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a prikazani su na Sl.5.3.2 [84].



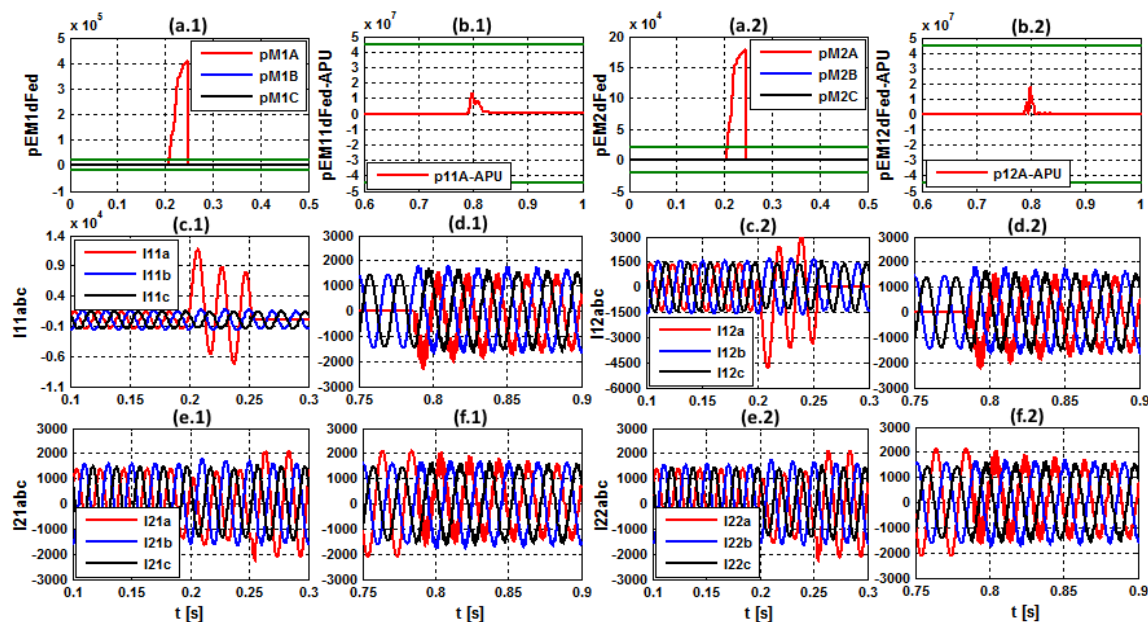
Sl.5.3.2 Vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a za slučajeve jednofaznih prolaznih kvarova na vodu 1 u sistemu radijalno napajanog DNV-a: (a) dif. relej R1; (b) dif. relej R2 [84]

Na osnovu rezultata sa Sl.5.3.2 moguće je zaključiti da su vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a generalno manje u odnosu na slučaj dvostrano napajanog DNV-a. Prethodna činjenica je i logična s obzirom da u ovakvom sistemu

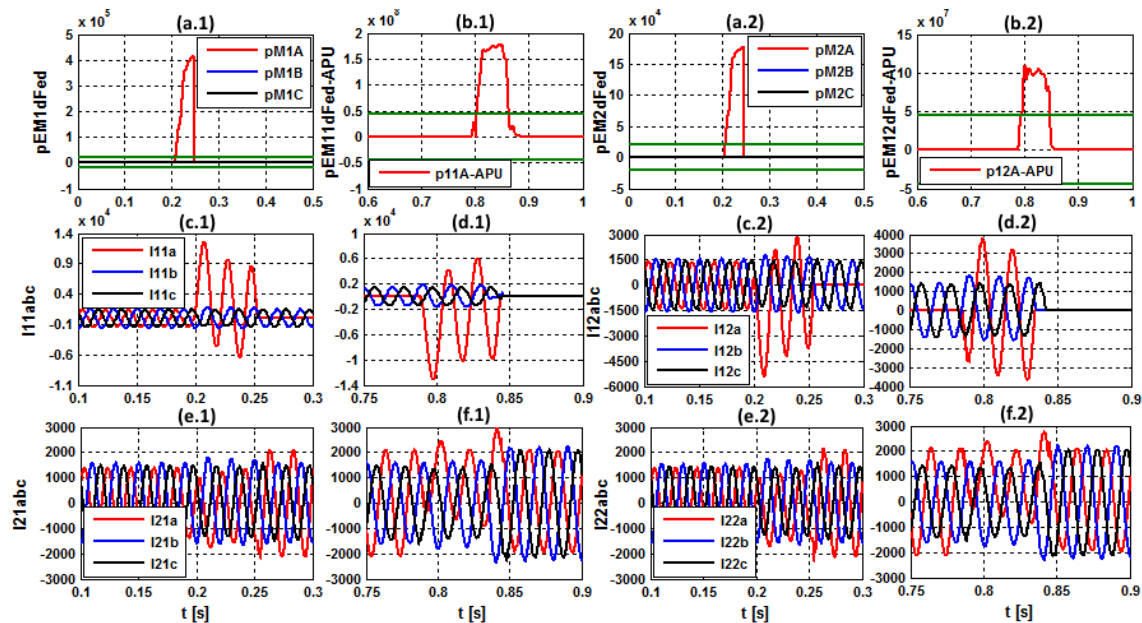
postoji samo jedna aktivna mreža iz koje se napaja mjesto kvara. Najveće vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a se dostižu u fazi C za slučajeve oba diferencijalna releja. Za oba diferencijalna releja odabrana je vrijednost praga reagovanja $SPR_{pragAPU} = 3 \cdot 10^7 A^2$, prikazana zelenom linijom na Sl.5.3.2, čime je obezbijedena i mala rezerva za slučaj mjernih grešaka.

5.3.2 Ispitivanje algoritma zaštite u slučaju dvostrano napajanog DNV-a

U svrhu testiranja selektivnosti predloženog algoritma sa jednofaznim APU, za slučaj dvostrano napajanog DNV-a, prolazni i trajni kvarovi su simulirani na istim lokacijama. U prvom testu simuliran je jednofazni prolazni kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od početnih sabirnica BB i u trenutku 0,2 s od početka simulacije. Drugi test je zasnovan na simulaciji odgovarajućeg trajnog kvara na istoj lokaciji, u istom trenutku, ali sa zanemarljivom otpornošću na mjestu kvara ($0,001 \Omega$). Rezultati ova dva uzastopna testa su prikazani na Sl.5.3.3 i Sl.5.3.4, redom. Na slikama su istovremeno prikazani pokazatelji za početnu detekciju kvara (algoritam A) i detekciju uspješnosti jednofaznog APU-a. Takođe, prikazane su i promjene u vremenu struja na početku i kraju DNV-a.



Sl.5.3.3 Dvostrano napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2



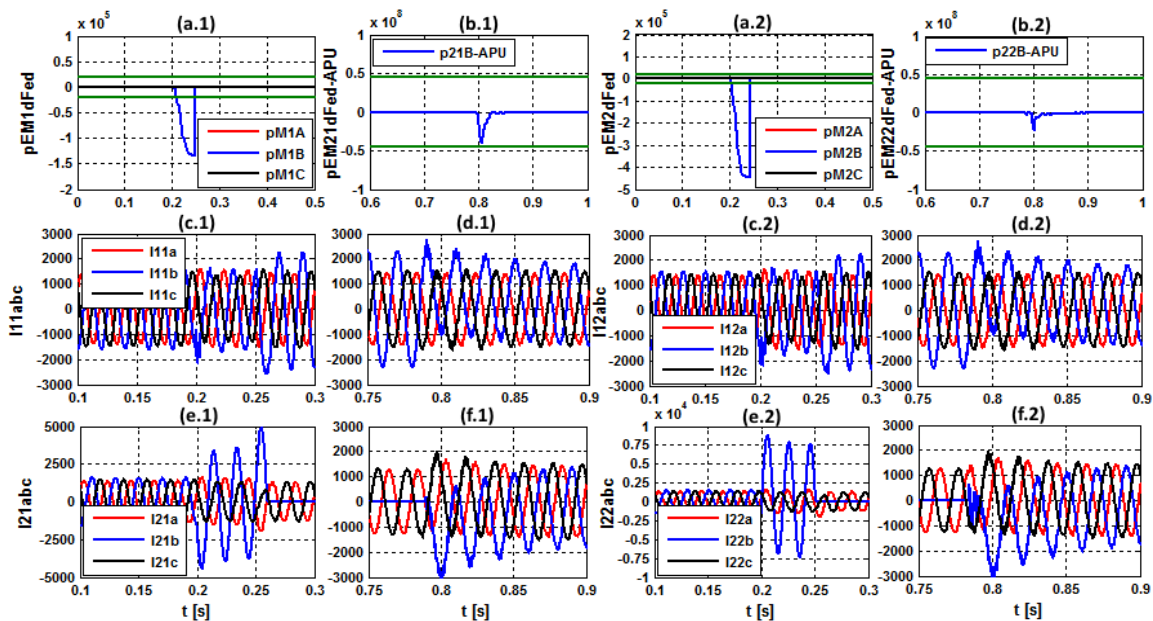
Sl.5.3.4 Dvostrano napajanje DNV – rezultati za trajan kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

Na osnovu rezultata sa Sl.5.3.3 može se zapaziti da je algoritam za početnu detekciju kvara (algoritam A) selektivno odredio fazu i vod sa kvarom. Pokazatelji kvara diferencijalnih releja 1 i 2 dostižu značajno veće vrijednosti u odnosu na podešeni prag reagovanja, što je primjetno sa grafika (a.1) i (a.2). Struja kvara zatim biva isključena od strane prekidača na početku i kraju voda 1, što potvrđuju rezultati sa grafika (c.1) i (c.2), dok istofazni provodnik voda 2, koji nije u kvaru, preuzima opterećenje i dolazi do povećanja odgovarajuće struje, kao što je prikazano na graficima (e.1) i (e.2) za početak i kraj dionice DNV-a, redom. U sljedećem koraku dolazi do blokade algoritma A, počinje beznaponska pauza i aktiviraju se pokazatelj uspješnosti jednofaznog APU-a samo za fazu koja je u kvaru (SPR_{11A} ili $pEM11Dfed-APU$ za dif. relej 1 i SPR_{12A} ili $pEM12Dfed-APU$ za dif. relej R2). Nakon jednofaznog APU-a, analizom rezultata sa grafika (b.1) i (b.2) može se zaključiti da je algoritam selektivno reagovao i detektovao prolazan kvar i na početku i na kraju DNV-a, jer su vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a manje od podešene vrijednosti praga reagovanja, čime je uslov (5.2.2) ispunjen. DNV se potom vraća u normalni radni režim, što je očigledno iz prikazanih rezultata sa grafika (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2).

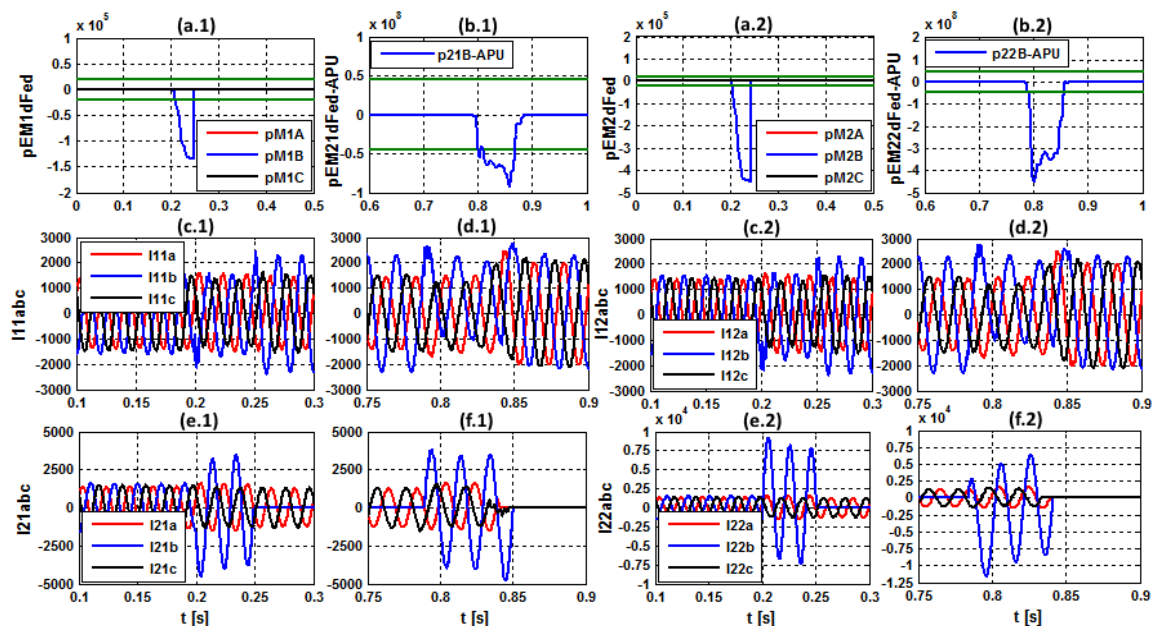
Analizom rezultata za trajan kvar, koji su prikazani na Sl.5.3.4, ponovo se može zapaziti da je algoritam za početnu detekciju kvara selektivno reagovao. Promjene u vremenu odgovarajućih pokazatelja kvara su skoro identične kao u slučaju prolaznog kvara (male razlike postoje zbog različitih vrijednosti otpornosti na mjestu kvara), što je očigledno na osnovu rezultata sa grafika (a.1) i (a.2). Takođe, odgovarajuće vremenske promjene struja su približno identične kao u slučaju prolaznog kvara, što se može zaključiti analizom rezultata sa grafika (c.1), (e.1), (c.2) i (e.2). Struja u fazi sa kvarom na vodu 1 ponovo biva isključena, dok istofazni provodnik voda 2 preuzima opterećenje u toku beznaponske pauze. Nakon ponovnog uključjenja, vrijednosti pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a postaju veće od podešene vrijednosti praga reagovanja, što je prikazano na graficima (b.1) i (b.2). Predloženi algoritam je selektivno detektovao trajan kvar, nakon čega slijedi trajno isključenje voda 1, kako je prikazano na graficima (d.1) i (d.2). Vod 2 ostaje u pogonu sa povećanim opterećenjem, što je vidljivo na osnovu rezultata sa grafika (f.1) i (f.2). Vremenski interval u kome vod 2 može da bude u pogonu, nakon isključenja voda 1, zavisi od vrijednosti snage koja se prenosi od sabirnica BB do EB. Ukoliko vod 2 postane preopterećen, njegovo isključenje će biti diktirano upravo zaštitom od preopterećenja.

Da bi se dodatno ispitala selektivnost predloženog algoritma, u nastavku su simulirani prolazan i trajan kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB. U prvom testu, prolazan kvar je simuliran sa otpornošću na mjestu kvara od 1Ω , dok je u drugom testu trajan kvar simuliran sa zanemarljivom otpornošću na mjestu kvara. Rezultati prvog i drugog testa su prikazani na Sl.5.3.5 i Sl.5.3.6, redom. Analogno prethodno analiziranom slučaju kvara, praćene su promjene pokazatelja za početnu detekciju kvara (algoritam A) i detekciju uspješnosti jednofaznog APU-a, baš kao i promjene struja na početku i kraju DNV-a.

Na osnovu rezultata prvog testa, prikazanih na Sl.5.3.5, može se zaključiti da je algoritam reagovao selektivno pri početnoj detekciji kvara, ali i nakon jednofaznog APU-a. Vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara su značajno veće od podešenih vrijednosti pragova reagovanja za oba diferencijalna releja, što se može uočiti sa grafika (a.1) i (a.2). Pomenute vrijednosti su takođe negativne, što ukazuje na činjenicu da se kvar nalazi na vodu 2. Struja u fazi sa kvarom na vodu 2 je uspješno isključena i na početku i na kraju DNV-a, što je vidljivo na osnovu grafika (e.1) i (e.2).



SI.5.3.5 Dvostrano napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi B voda 2, sa otpornošću na mjestu kvara od 1Ω , na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

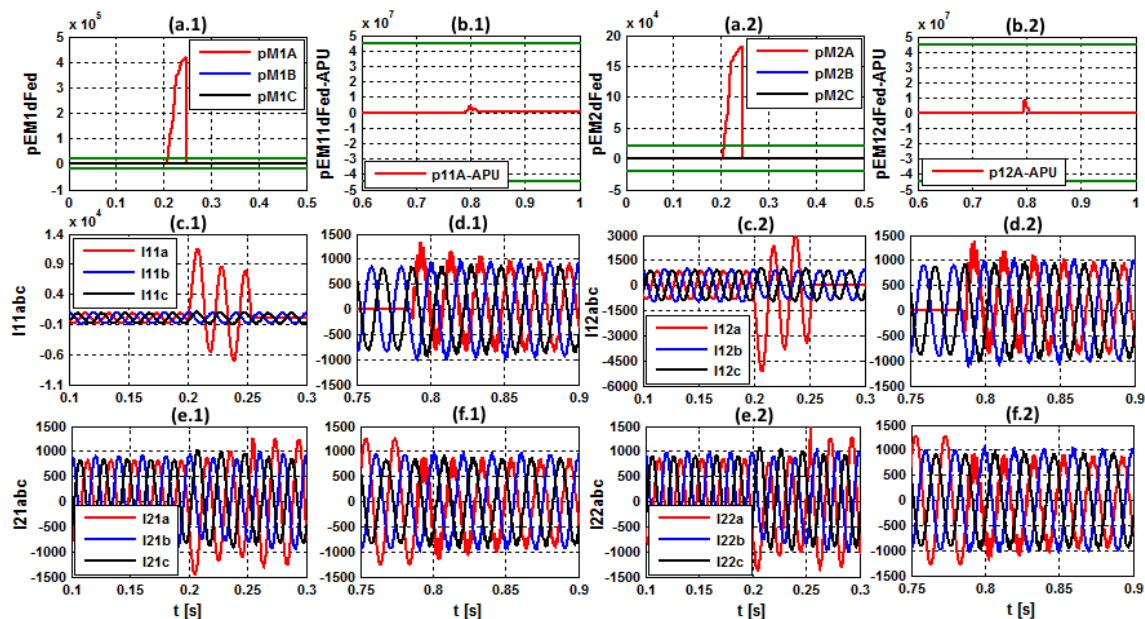


SI.5.3.6 Dvostrano napajan DNV – rezultati za trajan kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

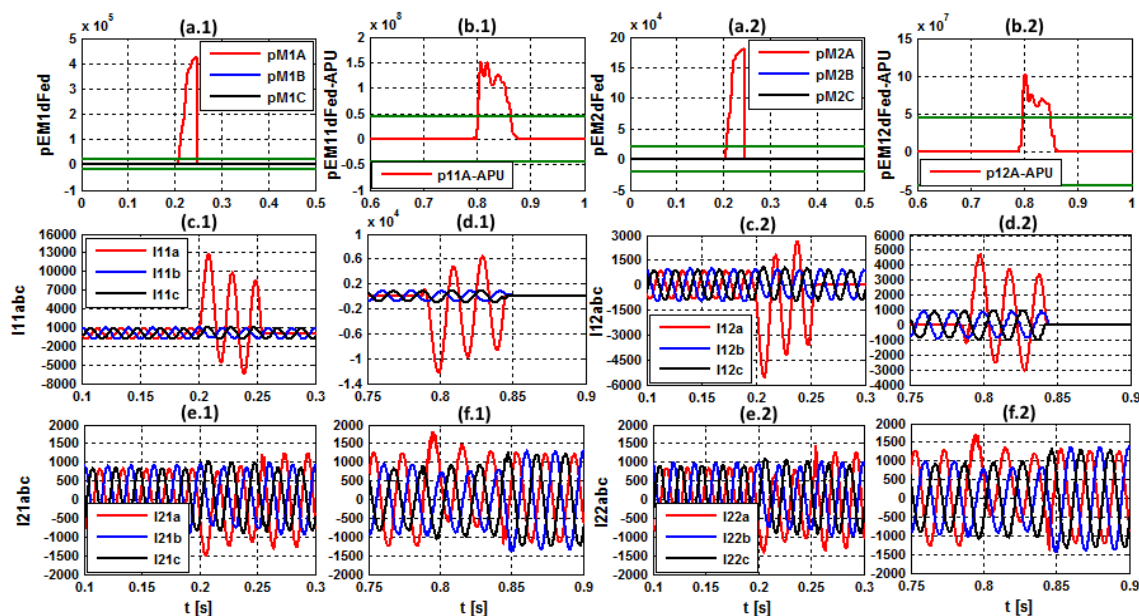
Nakon isključenja provodnika faze B voda 2, opterećenje preuzima istofazni provodnik voda 1, što je prikazano na odgovarajućim graficima (c.1) i (c.2) sa Sl.5.3.5. Nakon isteka beznaponske pauze dolazi do APU-a faze B voda 2 i detektovanja prolaznog kvara od strane odgovarajućih pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a (SPR_{21B} ili $pEM21Dfed-APU$ za dif. relej R1 i SPR_{22B} ili $pEM22Dfed-APU$ za dif. relej R2), čije promjene u vremenu su prikazane na graficima (b.1) i (b.2). Algoritam je selektivno detektovao ciklus jednofaznog APU-a kao uspješan i DNV je vraćen u normalan radni režim, što je vidljivo iz promjena u vremenu struja na početku i kraju DNV-a, koje su prikazane na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2).

U slučaju drugog testa sa trajnim kvarom, za koji su rezultati prikazani na Sl.5.3.6, selektivnost algoritma je ponovo potvrđena. Pokazatelji početnog kvara, čije promjene u vremenu su prikazane na graficima (a.1) i (a.2), za dif. releje R1 i R2, redom, dostižu značajno veće vrijednosti u odnosu na podešeni prag reagovanja. Kao posljedica prethodnog, isključuje se faza B voda 2, što je prikazano na graficima (e.1) i (e.2), dok kompletno opterećenje preuzima faza B voda 1, što je prikazano na graficima (c.1) i (c.2). Nakon beznaponske pauze i uključenja faze B voda 2, pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a dostižu veće vrijednosti u odnosu na podešeni prag reagovanja, što je uočljivo sa grafika (b.1) i (b.2). Selektivno je detektovan trajan kvar i kao posljedica slijedi trajno isključenje voda 2, prikazano na graficima (f.1) i (f.2). Istovremeno, vod 1 preuzima kompletno opterećenje, što je vidljivo sa grafika (d.1) i (d.2).

Selektivnost predloženog algoritma ne bi trebala zavisiti od smjera snage koja se prenosi preko DNV-a. Prethodna konstatacija je ispitana na primjeru identičnog kvara kao u prvom testu, koji je analiziran u ovom odjeljku, ali sa promijenjenim smjerom toka snage (novi tok snage - od sabirnica EB do BB). Simulirani su prolazan i trajan kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od početnih sabirnica BB, sa vrijednostima otpornosti na mjestu kvara od 2Ω i $0,001 \Omega$, redom. Rezultati prethodna dva testa su prikazani na Sl.5.3.7 i Sl.5.3.8, redom. Kao u svim prethodnim testovima, praćene su promjene pokazatelja početne detekcije kvara, uspješnosti jednofaznog APU-a i struja na početku i kraju DNV-a u toku vremena simulacije.



Sl.5.3.7 Dvostrano napajanje DNV – promijenjen tok snage – rezultati za prolazni kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2



Sl.5.3.8 Dvostrano napajanje DNV – promijenjen tok snage - rezultati za trajni kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnice BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

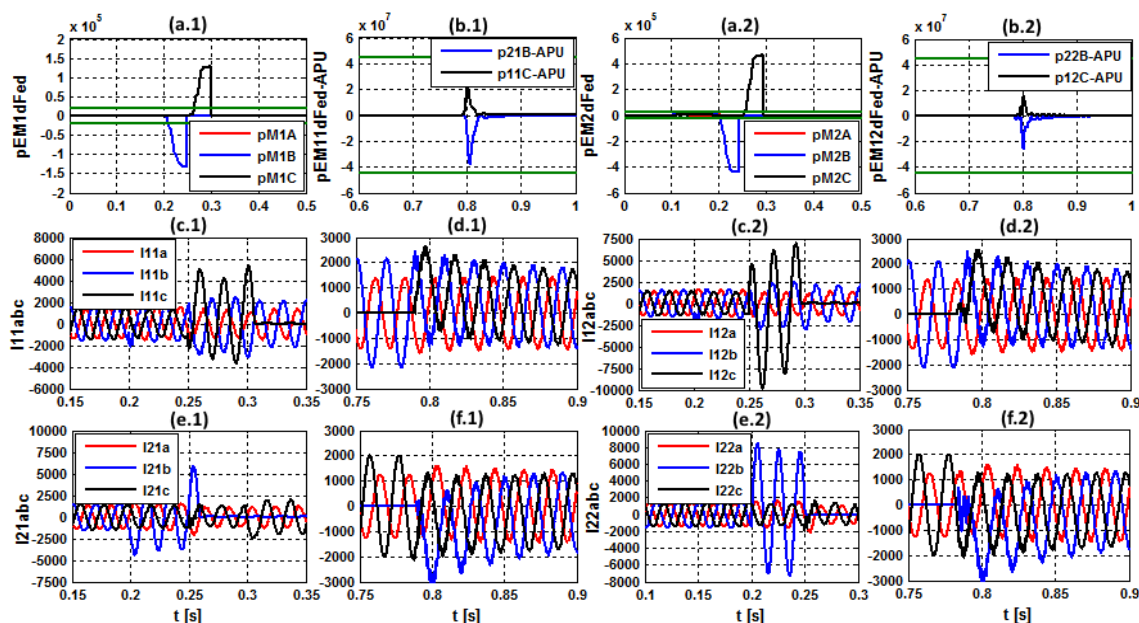
Na osnovu rezultata za prolazan kvar, koji su prikazani na Sl.5.3.7, može se zaključiti da je algoritam selektivan i pri promijenjenom toku snage. Pokazatelji početne detekcije kvara, prikazani na graficima (a.1) i (a.2), dostižu značajno veće vrijednosti od podešene vrijednosti praga reagovanja, čime je ostvarena selektivnost. Zatim se isključuje samo faza u kvaru voda 1, dok istoimena faza voda 2 preuzima opterećenje, što je prikazano na graficima (c.1), (e.1), (c.2) i (e.2). Nakon isteka beznaponske pauze i uključenja faze A voda 1, pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a dostižu vrijednosti značajno manje od podešene vrijednosti praga reagovanja, što je prikazano na graficima (b.1) i (b.2). Jednofazno APU je klasifikovano kao uspješno i DNV se vraća u normalni pogon, što je vidljivo na osnovu promjena u vremenu odgovarajućih struja, koje su prikazane na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2).

Rezultati testa za trajan kvar, prikazani na Sl.5.3.8, potvrđuju selektivnost algoritma pri promijenjenom toku snage. Početna detekcija kvara i odgovarajuće promjene u vremenu struja DNV-a su veoma slične kao u prethodnom testu, o čemu svjedoče grafici (a.1), (a.2), (c.1), (e.1), (c.2) i (e.2). Nakon ponovnog uključenja faze u kvaru, pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a dostižu vrijednosti veće od podešene vrijednosti praga reagovanja, trajan kvar je selektivno detektovan i slijedi trajno isključenje voda 1. Promjene u vremenu pomenutih pokazatelja i odgovarajućih struja DNV-a su prikazane na graficima (b.1), (b.2), (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2).

Ispitivanje selektivnosti predloženog algoritma za slučaj uzastopnih kvarova na oba voda u sistemu DNV-a je od posebnog značaja. Uzastopni kvarovi u različitim fazama vodova koji čine sistem DNV-a mogu biti dosta česti kao posljedica razvoja jednofaznog kvara u dvofazni kvar sa zemljospojem. U slučaju dvofaznog kvara na istom vodu predloženi algoritam blokira sistem APU-a i isključuje trajno dati vod. Međutim, ukoliko kvar obuhvati različite faze dva voda u sistemu DNV-a, algoritam pokreće APU za obje faze u cilju eliminacije prolaznih kvarova. Na ovaj način je moguće spriječiti potpuno isključenje DNV-a, a samim tim i značajnije ugrožavanje stabilnosti EES-a, u slučaju uzastopnih prolaznih kvarova na oba voda.

U prvom testu simulirana su dva uzastopna prolazna kvara u fazama B i C vodova 2 i 1, redom, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB. Vrijednost otpornosti na mjestu kvara u fazi B voda 2 je podešena na 2Ω , dok je vrijednost otpornosti na mjestu kvara u fazi C voda 1 podešena na 1Ω . Prolazni kvarovi u fazama B voda 2 i C voda 1 su

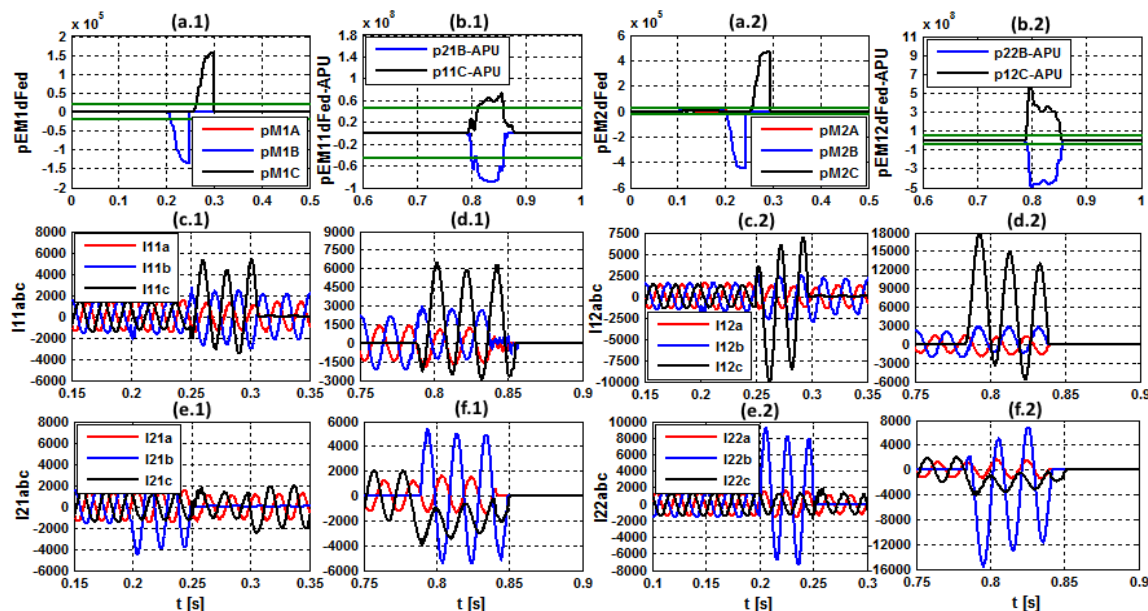
inicirani u trenucima 0.2 i 0.25 s od početka simulacije, redom. Odgovarajući rezultati su prikazani na Sl.5.3.9.



Sl.5.3.9 Dvostrano napajan DNV – rezultati za uzastopne prolazne kvarove u fazama B i C vodova 2 i 1, redom, sa otpornostima na mjestu kvara od 2Ω i 1Ω , redom, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

Na osnovu rezultata sa prethodne slike, može se zaključiti da je predloženi algoritam selektivan i u slučaju uzastopnih prolaznih kvarova u različitim fazama vodova 1 i 2 koji čine sistem DNV-a. Pokazatelji početne detekcije kvara, čije promjene u vremenu su prikazane na graficima (a.1) i (a.2), selektivno određuju vod i fazu u kvaru. Potom odgovarajući prekidači uzastopno isključuju struje u fazi B voda 2 i fazi C voda 1, sa obje strane DNV-a, što je vidljivo sa grafika (c.1), (e.1), (c.2) i (e.2). Po isteku beznaponske pauze, dolazi do ponovnog uključanja faza u kvaru, a promjene u vremenu pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a su prikazane na graficima (b.1) i (b.2), za dif. releje R1 i R2, redom. Na osnovu pomenutih grafika je moguće zaključiti da algoritam selektivno utvrđuje uzastopne prolazne kvarove (nisu postignute vrijednosti veće od podešenih vrijednosti pragova reagovanja). Promjene u vremenu struja, prikazane na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2), ukazuju na ponovno uspostavljanje normalnog pogona DNV-a.

U okviru drugog testa ispitivana je selektivnost predloženog algoritma za slučaj uzastopnih trajnih kvarova. Simulirana su dva uzastopna trajna kvara sa identičnim karakteristikama kao u prethodnom testu (iste faze, trenuci nastanka kvara i lokacija), osim otpornosti na mjestu kvara, koja je u ovom slučaju zanemarljiva. Rezultati drugog testa su prikazani na Sl.5.3.10.



Sl.5.3.10 Dvostrano napajan DNV – rezultati za uzastopne trajne kvarove u fazama B i C vodova 2 i 1, redom, sa zanemarljivim otpornostima na mjestu kvara, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

Rezultati prikazani na prethodnoj slici potvrđuju selektivnost ispitivanog algoritma i u slučaju uzastopnih trajnih kvarova. Promjene u vremenu pokazatelja početne detekcije kvara, prikazane na graficima (a.1) i (a.2), su skoro identične kao u slučaju odgovarajućih uzastopnih prolaznih kvarova. Isti zaključak važi i za promjene u vremenu struja na početku i kraju DNV-a, gdje se struje u fazi B voda 2 i fazi C voda 1 selektivno isključuju, što je prikazano na graficima (c.1), (e.1), (c.2) i (e.2). Kao i u svakom prethodnom testu, nakon beznaponske pauze i ponovnog uključjenja faza u kvaru, analiziraju se pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a, čije promjene u vremenu su prikazane na graficima (b.1) i (b.2). Na osnovu pomenutih grafika može se zaključiti da je jednofazni APU detektovan kao neuspješan (vrijednosti pokazatelja su veće od podešene vrijednosti praga reagovanja), čime je selektivnost algoritma

potvrđena. Slijedi trajno isključenje DNV-a, što je prikazano na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2).

Svi prethodni testovi su potvrdili selektivnost predloženog algoritma za dvostrano napajani DNV. U realnom vremenu simulacije su analizirani karakteristični slučajevi kvarova i primjena jednofaznog APU-a. Posebno su analizirani kvarovi pri promijenjenom toku snage preko DNV-a i uzastopni kvarovi u različitim fazama paralelnih vodova koji čine DNV. Zbog prevelike obimnosti grafičkog prikaza rezultata u realnom vremenu simulacije, rezultati svih ostalih testova su prikazani tabelarno, gdje su praćene samo maksimalne vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara i uspješnosti jednofaznog APU-a. Pri testiranju su mijenjane lokacije, faze i vodovi, trenuci nastanka i otpornosti na mjestu kvara. U svakom individualnom testu simuliran je i prolazni i odgovarajući trajan kvar. Rezultati svih testova su prikazani u Tab.5.3.1.

Tab.5.3.1 Vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara i uspješnosti jednofaznog APU-a pri promjenljivim lokacijama, fazama, trenucima nastanka i vrstama kvara za dvostrano napajanje DNV [84]

Lokacija kvara	Faza u kvaru	Trenutak nastanka kvara	Vrsta kvara	Otpornost na mjestu kvara	Pokazatelj početne detekcije kvara [10^5 A]		Pokazatelj uspješnosti jednofaznog APU-a [10^7 A ²]	
					R1	R2	R1	R2
Vod 1 5 km	AG	0,2 s	prolazan	1 Ω	8,3	0,3	2,4	1,4
			trajan	1 m Ω	8,4	0,3	53,8	20,2
Vod 1 50 km	BG	0,205 s	prolazan	5 Ω	3,8	1,7	1,3	2,9
			trajan	10 m Ω	4	1,8	20	12,9
Vod 1 100 km	CG	0,21 s	prolazan	10 Ω	2,2	2,8	1,2	4,1
			trajan	15 m Ω	2,5	3,0	11,8	22,6
Vod 1 150 km	AG	0,215 s	prolazan	1 Ω	1,3	4,4	2,2	1,2
			trajan	1 m Ω	1,3	4,5	13,6	52,5
Vod 1 195 km	BG	0,2 s	prolazan	5 Ω	0,21	8,5	3,3	2,6
			trajan	10 m Ω	0,24	9,5	12,3	108,9
Vod 2 5 km	CG	0,205 s	prolazan	10 Ω	-3,2	-1,6	-1,2	-1,7
			trajan	15 m Ω	-3,7	-1,7	-18,7	-10,8
Vod 2 50 km	AG	0,21 s	prolazan	1 Ω	-4,2	-1,8	-1,3	-1,8
			trajan	1 m Ω	-4,2	-1,8	-17,9	-11,0
Vod 2 100 km	BG	0,215 s	prolazan	5 Ω	-2,6	-3,0	-1,3	-4,4
			trajan	10 m Ω	-2,7	-3,0	-16,2	-20,4
Vod 2 150 km	CG	0,2 s	prolazan	10 Ω	-1,2	-4,2	-1,9	-3,6
			trajan	15 m Ω	-1,4	-4,6	-8,6	-52,9
Vod 2 195 km	AG	0,205 s	prolazan	1 Ω	-0,3	-9,3	-2,7	-1,7
			trajan	1 m Ω	-0,3	-9,4	-11,3	-110,0

Prema podacima iz Tab.5.3.1, vidljivo je da su kvarovi simulirani na oba voda i na svakih 50 km udaljenosti od početnih sabirnica BB, sa izuzetkom prvog i posljednjeg testa, gdje su simulirani kvarovi u neposrednoj blizini sabirnica BB i EB. Trenuci nastanka kvarova su mijenjani u koracima od 5 ms i u vremenskom opsegu od 20 ms koji pokriva osnovnu periodu signala. Otpornosti na mjestu kvara su mijenjane od 1 do 10 Ω za prolazne kvarove, dok su odgovarajuće otpornosti za trajne kvarove zanemarljive i mijenjane u opsegu od 1 do 15 m Ω . Posmatrane su vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara i uspješnosti jednofaznog APU-a za oba diferencijalna releja R1 i R2.

Analizom rezultata za pokazatelje početne detekcije kvara, primjetno je da je za sve testove minimalna apsolutna vrijednost dobijena u slučajevima kvarova bliskim sabirnicama BB i EB i da je jednaka 30 kA, što je veća vrijednost u odnosu na podešenu vrijednost praga reagovanja koja iznosi 20 kA (algoritam A). Prethodna konstatacija potvrđuje selektivnost algoritma za početnu detekciju kvara. Analizom rezultata za pokazatelje uspješnosti jednofaznog APU-a, moguće je primjetiti da postoje značajne razlike u njihovim vrijednostima za prolazne i trajne kvarove. Maksimalna apsolutna vrijednost pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a za prolazne kvarove iznosi $4,4 \cdot 10^7 \text{ A}^2$, što je manje u odnosu na podešenu vrijednost praga reagovanja koja iznosi $4,5 \cdot 10^7 \text{ A}^2$, dok minimalna apsolutna vrijednost pomenutog pokazatelja za trajne kvarove iznosi $8,6 \cdot 10^7 \text{ A}^2$ što je značajno veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Na ovaj način je potvrđena i selektivnost pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a. U konačnici se može zaključiti da je predloženi algoritam sa jednofaznim APU selektivan u svim analiziranim testovima.

5.3.3 Ispitivanje algoritma zaštite u slučaju radijalno napajanog DNV-a

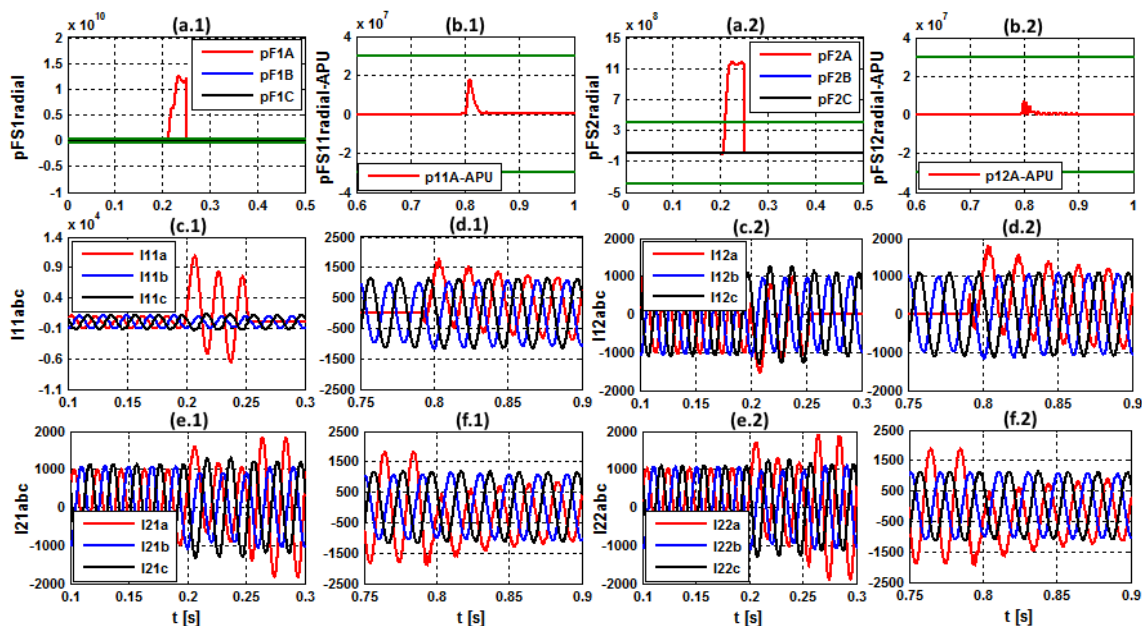
Budući da je predloženi algoritam sa jednofaznim APU razvijen da bude primjenjiv i za radijalno napajane DNV-ove, neophodno je testirati njegovu selektivnost i u ovom slučaju. Upotrijebljena je analogna procedura za testiranje kao i u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, koja obuhvata uzastopno testiranje prolaznih i trajnih kvarova na istim lokacijama i uporednu analizu odgovarajućih rezultata. Rezultati su predstavljeni grafički, gdje su praćene promjene pokazatelja za početnu detekciju kvara, pokazatelja

za detekciju uspješnosti jednofaznog APU-a i struja na početku i kraju DNV-a u toku vremena simulacije.

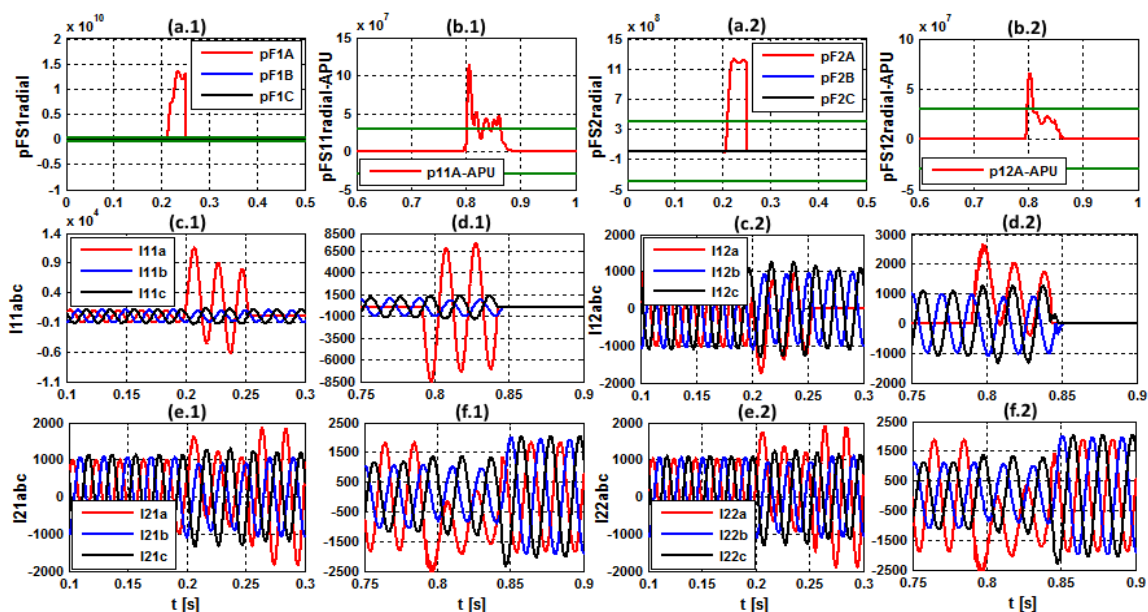
U okviru prvog testa simuliran je jednofazni prolazni kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od početnih sabirnica BB i u trenutku 0,2 s od početka simulacije. Drugi test obuhvata simulaciju odgovarajućeg trajnog kvara na istoj lokaciji, u istom trenutku, ali sa zanemarljivom otpornošću na mjestu kvara ($0,001 \Omega$). Oba prethodna testa su identična kao i u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, a odgovarajući rezultati u slučaju radialno napajanog DNV-a su prikazani na Sl.5.3.11 i Sl.5.3.12, redom.

Uporednom analizom rezultata prikazanih na Sl.5.3.11 i Sl.5.3.12 može se zapaziti da je algoritam za početnu detekciju kvara (algoritam B) selektivno odredio fazu i vod sa kvarom za oba testa (prolazan i trajan kvar). Pokazatelji kvara dif. releja R1 i R2 dostižu značajno veće vrijednosti od podešene vrijednosti praga reagovanja, što je prikazano na graficima (a.1) i (a.2) sa Sl.5.3.11 i Sl.5.3.12. U oba slučaja kvara, prolaznog i trajnog, zaštita daje nalog samo za isključenje struje faze A voda 1. Slijedi uspješno isključenje pomenute struje, što je prikazano na graficima (c.1) i (c.2), za početak i kraj dionice DNV-a, redom. Istovremeno, dolazi do povećanja vrijednosti struje faze A voda 2, jer vod 2, u pomenutoj fazi, preuzima napajanje opterećenja, što je prikazano na graficima (e.1) i (e.2), takođe za početak i kraj dionice DNV-a, redom. Svi do sada pomenuti grafici sa Sl.5.3.11 i Sl.5.3.12 su približno identični, jer algoritam za početnu detekciju kvara nije značajno osjetljiv pri promjeni otpornosti na mjestu kvara u definisanom opsegu ($0,001-2 \Omega$), što potvrđuju i grafici sa Sl.4.2.7 vezani za odgovarajuće prethodno istraživanje.

Nakon isteka vremena predviđenog za beznaponsku pauzu i APU-a faze A voda 1, praćene su promjene u vremenu odgovarajućeg pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a (SPR_{11A} ili $pFSI1radial-APU$ za dif. relej 1 i SPR_{12A} ili $pFSI2radial-APU$ za dif. relej 2), koje su prikazane na graficima (b.1) i (b.2) sa Sl.5.3.11 i Sl.5.3.12, za prolazan i trajan kvar, redom. U slučaju prolaznog kvara, vrijednosti pomenutih pokazatelja su značajno manje od podešene vrijednosti praga reagovanja i jednofazni APU je identifikovan kao uspješan (Sl.5.3.11). U suprotnom, u slučaju trajnog kvara, APU je identifikovan kao neuspješan (Sl.5.3.12).



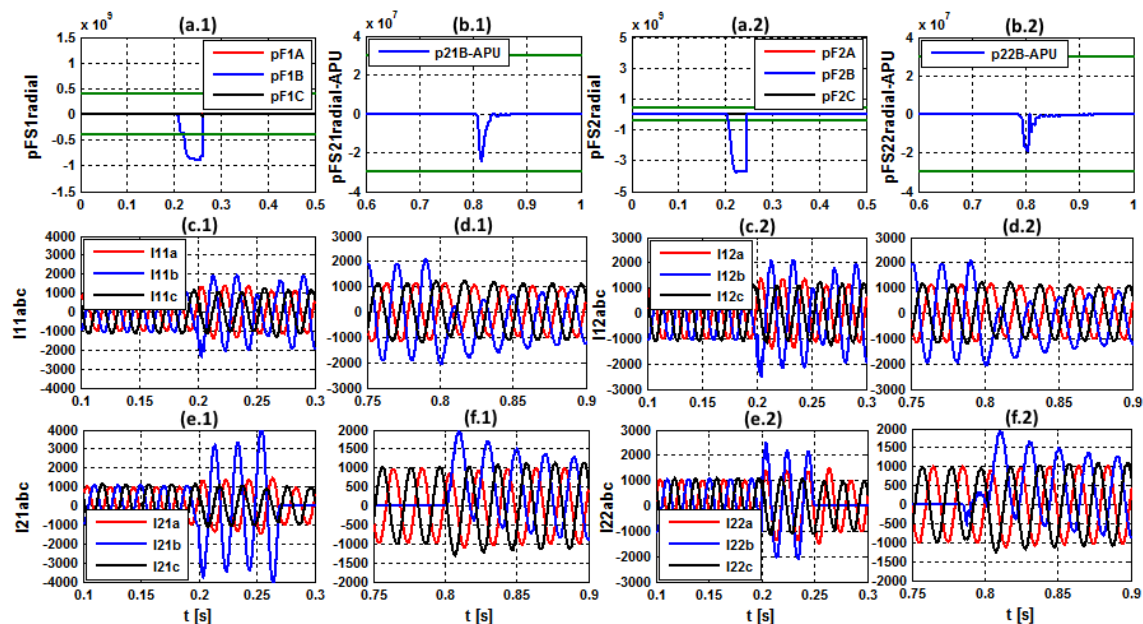
SI.5.3.11 Radijalno napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi A voda 1, sa otpornošću na mjestu kvara od 2Ω , na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2



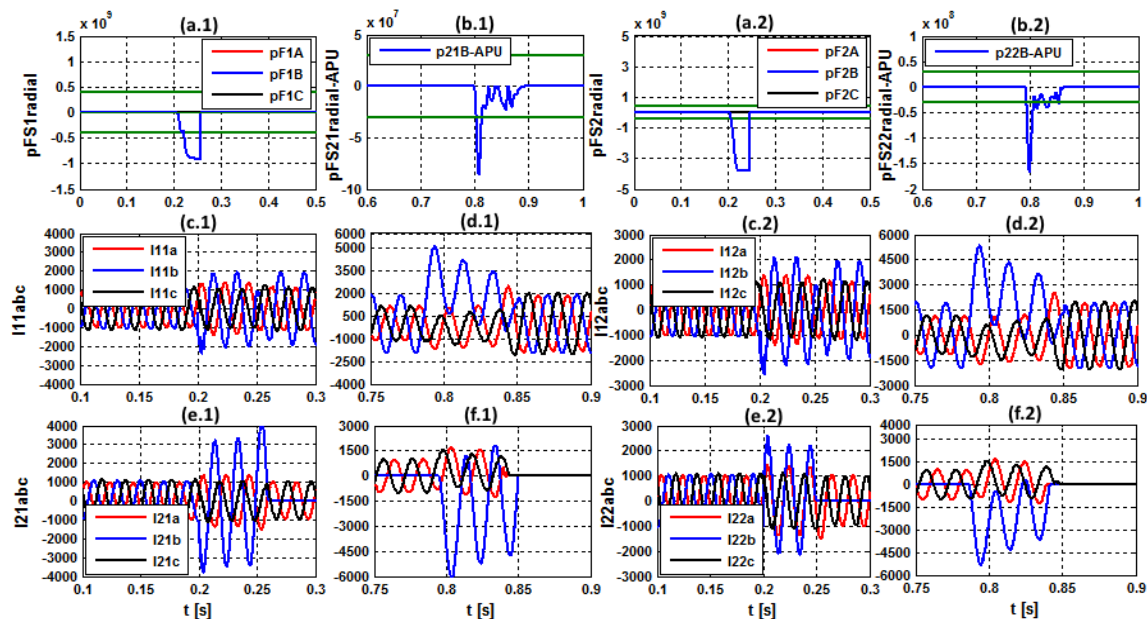
SI.5.3.12 Radijalno napajan DNV – rezultati za trajan kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

Na osnovu promjena u vremenu struja na početku i kraju DNV-a, koje su prikazane na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2), sa Sl.5.3.11, može se zapaziti uspješno uspostavljanje normalnog pogona DNV-a nakon jednofaznog APU-a. Identično označeni grafici sa Sl.5.3.12 prikazuju promjene u vremenu odgovarajućih struja DNV-a nakon jednofaznog APU-a u slučaju trajnog kvara. Sa pomenutih grafika se može uočiti trajno isključenje voda 1 i preuzimanje kompletnog opterećenja od strane voda 2. Zavisno od snage potrošnje može se desiti i preopterećenje voda 2 koje bi izazvalo reagovanje odgovarajuće zaštite od preopterećenja.

U okviru dva naredna testa selektivnosti zaštite, simulirani su prolazan i trajan kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB. Prolazan kvar je simuliran sa otpornošću na mjestu kvara od 1Ω , dok je trajan kvar simuliran sa zanemarljivom otpornošću na mjestu kvara. Rezultati prethodnih testova, za prolazan i trajan kvar, su prikazani na Sl.5.3.13 i Sl.5.3.14, redom. Analogno svim prethodno analiziranim slučajevima kvara, praćene su promjene u vremenu pokazatelja za početnu detekciju kvara (algoritam B), detekciju uspješnosti jednofaznog APU-a i struja na početku i kraju DNV-a u toku vremena simulacije.



Sl.5.3.13 Radijalno napajan DNV – rezultati za prolazan kvar u fazi B voda 2, sa otpornošću na mjestu kvara od 1Ω , na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2



Sl.5.3.14 Radijalno napajan DNV – rezultati za trajan kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

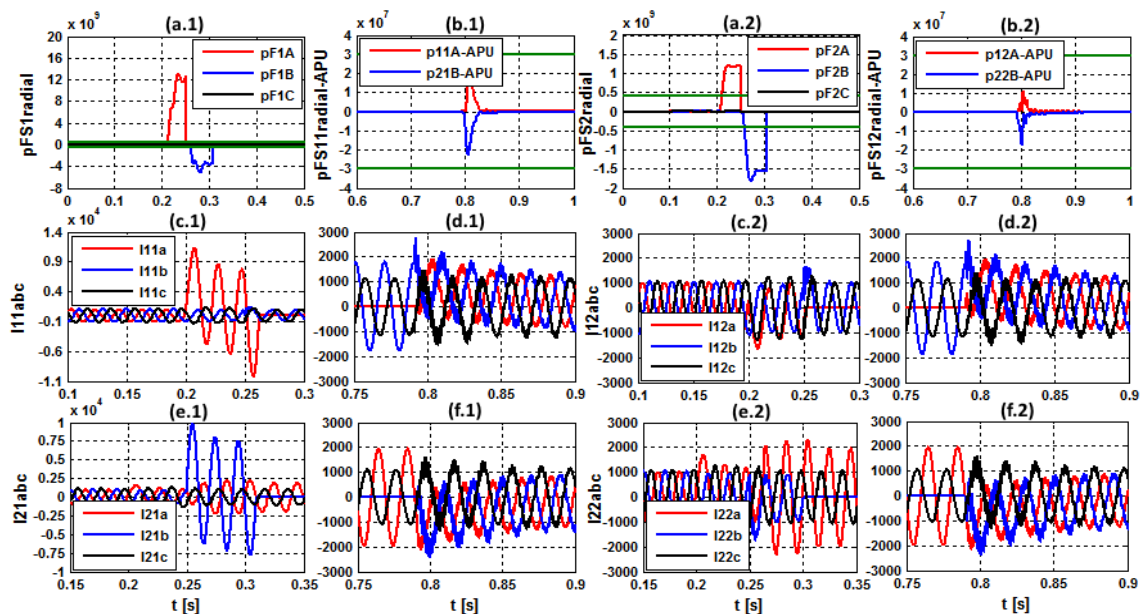
Rezultati prvog testa, prikazani na Sl.5.3.13, potvrđuju selektivnost predloženog algoritma pri početnoj detekciji kvara i nakon jednofaznog APU-a. Pokazatelji početne detekcije kvara dostižu veće vrijednosti od podešene vrijednosti praga reagovanja za oba diferencijalna releja, što se može zapaziti sa grafika (a.1) i (a.2). Znak pomenutih pokazatelja je negativan, što ukazuje na činjenicu da je kvar lociran na vodu 2. Struja faze B voda 2 je uspješno isključena, što se može zapaziti sa grafika (e.1) i (e.2), dok istovremeno dolazi do povećanja struje faze B voda 1 zbog preuzimanja opterećenja, što je prikazano na graficima (c.1) i (c.2). Rezultati koji prate početnu detekciju trajnog kvara, prikazani na identično označenim graficima sa Sl.5.3.14, se skoro potpuno poklapaju sa ranije pomenutim rezultatima prikazanim na graficima sa Sl.5.3.13. Promjena otpornosti na mjestu kvara u definisanom opsegu ne utiče značajno na algoritam za početnu detekciju kvara. Nakon jednofaznog APU-a, predloženi algoritam selektivno detektuje i prolazan i trajan kvar, što se može zaključiti na osnovu promjena u vremenu pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a, prikazanih na graficima (b.1) i (b.2), na Sl.5.3.13 i Sl.5.3.14, redom. Prateće promjene u vremenu struja DNV-a, za prolazan i trajan kvar, prikazane na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2), na Sl.5.3.13 i

Sl.5.3.14, redom, takođe potvrđuju selektivnost algoritma. Za prolazan kvar, DNV se vraća u normalni pogon, dok za trajan kvar dolazi do trajnog isključenja voda 2.

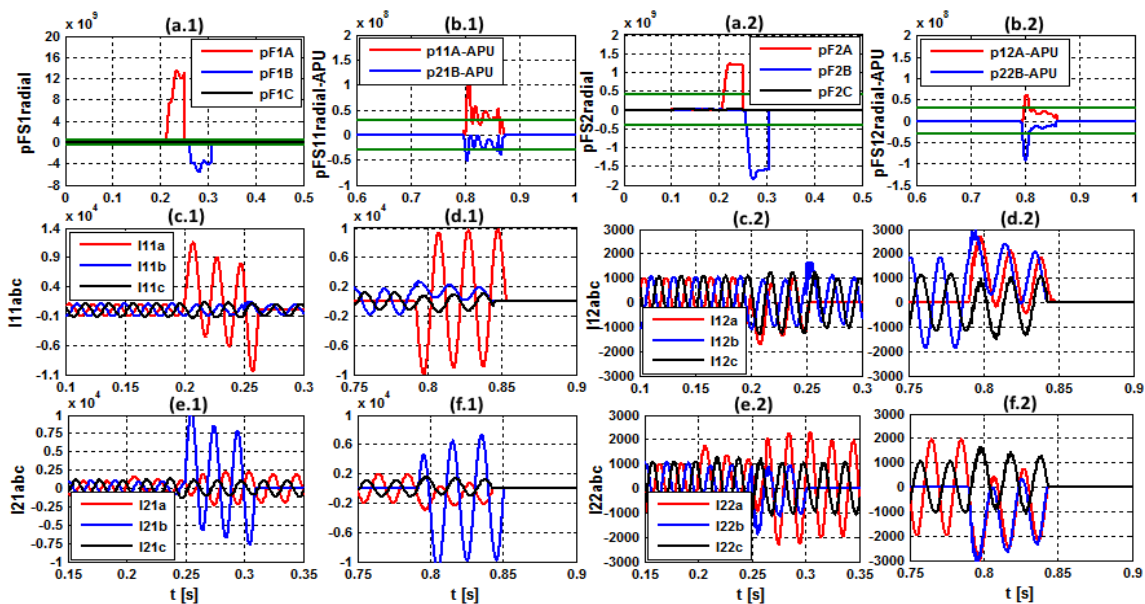
I u slučaju radijalnog napajanja, moguća je pojava uzastopnih kvarova u različitim fazama vodova koji čine sistem DNV-a. Ukoliko su kvarom obuhvaćene različite faze na različitim vodovima, pokreće se jednofazno APU za obje faze u cilju eliminacije prolaznih kvarova. Ukoliko se radi o uzastopnim trajnim kvarovima, nakon jednofaznog APU-a obje faze, dolazi do trajnog isključenja DNV-a i potpunog prekida napajanja potrošnje.

U dva povezana testa simulirana su po dva uzastopna prolazna i trajna kvara u fazama A i B vodova 1 i 2, redom, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB. Za slučaj uzastopnih prolaznih kvarova, vrijednost otpornosti na mjestu kvara u fazi A voda 1 je podešena na 1Ω , dok je vrijednost otpornosti na mjestu kvara u fazi B voda 2 podešena na 2Ω . U narednom testu, za slučaj uzastopnih trajnih kvarova, vrijednosti otpornosti na mjestu kvara su zanemarljive. Kvarovi u fazama A voda 1 i B voda 2 su inicirani u trenucima 0,2 i 0,25 s od početka simulacije, redom (u oba testa). Dobijeni rezultati, koji prate promjene u vremenu pokazatelja početne detekcije kvara, pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a i struja DNV-a, su prikazani na Sl.5.3.15 i Sl.5.3.16, za uzastopne prolazne i trajne kvarove, redom.

Pokazatelji početne detekcije kvara, prikazani na graficima (a.1) i (a.2) sa Sl.5.3.15 i Sl.5.3.16, za releje R1 i R2, redom, ukazuju na selektivan rad algoritma u oba slučaja, uzastopnih prolaznih i trajnih kvarova. Odgovarajuće promjene u vremenu struja DNV-a, prikazane na graficima (c.1), (e.1), (c.2) i (e.2) sa prethodnih slika, prikazuju selektivna uzastopna isključenja faze A voda 1 i faze B voda 2. Pokazatelji uspješnosti jednofaznog APU-a, prikazani na graficima (b.1) i (b.2) sa Sl.5.3.15, potvrđuju selektivnost algoritma u slučaju uzastopnih prolaznih kvarova (APU uspješno) i DNV se vraća u normalni pogon, o čemu svjedoče promjene odgovarajućih struja, prikazane na graficima (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2) sa iste slike. Analizom promjena u vremenu pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU, prikazanih na graficima (b.1) i (b.2) sa Sl.5.3.16, može se zaključiti da je predloženi algoritam selektivan i u slučaju uzastopnih trajnih kvarova. Kao posljedica prethodnog, dolazi do trajnog isključenja DNV-a, što se može zapaziti sa grafika (d.1), (f.1), (d.2) i (f.2) sa Sl.5.3.16.



Sl.5.3.15 Radijalno napajan DNV – rezultati za uzastopne prolazne kvarove u fazama A i B vodova 1 i 2, redom, sa otpornostima na mjestu kvara od 1Ω i 2Ω , redom, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2



Sl.5.3.16 Dvostrano napajan DNV – rezultati za uzastopne trajne kvarove u fazama A i B vodova 1 i 2, redom, sa zanemarljivim otpornostima na mjestu kvara, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB: (a.1) pokazatelj kvara dif. releja R1; (b.1) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R1; (c.1)-(d.1) fazne struje na početku voda 1; (e.1)-(f.1) fazne struje na početku voda 2; (a.2) pokazatelj kvara dif. releja R2; (b.2) pokazatelj uspješnosti APU-a dif. releja R2; (c.2)-(d.2) fazne struje na kraju voda 1; (e.2)-(f.2) fazne struje na kraju voda 2

Selektivnost predloženog algoritma za radijalno napajan DNV je potvrđena u svim prethodnim testovima. Analogno kao kod testiranja algoritma u slučaju dvostrano napajanog DNV-a, izvršeno je još mnogo testova u cilju ispitivanja selektivnosti, čiji rezultati su prikazani tabelarno. Kod individualnih testova mijenjane su lokacije, faze i vodovi, trenuci nastanka i otpornosti na mjestu kvara. Takođe, u uzastopnim testovima su simulirani i prolazni i trajni kvarovi. Rezultati svih pomenutih testova su prikazani u Tab.5.3.2, gdje su praćene znaci i maksimalne vrijednosti odgovarajućih pokazatelja.

Tab.5.3.2 Vrijednosti pokazatelja početne detekcije kvara i uspješnosti jednofaznog APU-a pri promjenjivim lokacijama, fazama, trenucima nastanka i vrstama kvara za radijalno napajan DNV [84]

Lokacija kvara	Faza u kvaru	Trenutak nastanka kvara	Vrsta kvara	Otpornost na mjestu kvara	Pokazatelj početne detekcije kvara [$10^8 A^2$]		Pokazatelj uspješnosti jednofaznog APU-a [$10^7 A^2$]	
					R1	R2	R1	R2
Vod 1 5 km	AG	0,2 s	prolazan	1 Ω	541,2	4,8	1,5	1,0
			trajan	1 m Ω	578,0	4,5	19,0	8,0
Vod 1 50 km	BG	0,205 s	prolazan	5 Ω	119,7	11,8	2,2	0,8
			trajan	10 m Ω	146,6	12,7	12,4	6,8
Vod 1 100 km	CG	0,21 s	prolazan	10 Ω	20,8	20,7	2,7	1,2
			trajan	15 m Ω	38,6	24,2	10,4	11,0
Vod 1 150 km	AG	0,215 s	prolazan	1 Ω	9,5	35,4	1,1	1,5
			trajan	1 m Ω	9,4	36,0	10,3	14,9
Vod 1 195 km	BG	0,2 s	prolazan	5 Ω	12,9	46,4	1,1	2,3
			trajan	10 m Ω	13,0	50,8	7,3	16,5
Vod 2 5 km	CG	0,205 s	prolazan	10 Ω	-175	-9,7	-1,5	-1,4
			trajan	15 m Ω	-390	-6,1	-21,8	-9,1
Vod 2 50 km	AG	0,21 s	prolazan	1 Ω	-130,9	-12,1	-1,7	-1,0
			trajan	1 m Ω	-135,7	-12,3	-11,4	-6,6
Vod 2 100 km	BG	0,215 s	prolazan	5 Ω	-45,3	-17,8	-2,4	-1,2
			trajan	10 m Ω	-52,8	-19,1	-5,9	-10,4
Vod 2 150 km	CG	0,2 s	prolazan	10 Ω	-10,4	-28,9	-1,8	-2,3
			trajan	15 m Ω	-13,8	-33,8	-8,6	-11,0
Vod 2 195 km	AG	0,205 s	prolazan	1 Ω	-13,4	-46,4	-0,6	-2,2
			trajan	1 m Ω	-10,3	-47,2	-6,0	-15,2

Na osnovu prethodne tabele, moguće je zapaziti da je predloženi algoritam ispitivan kroz ukupno dvadeset testova koji su definisani na isti način kao u Tab.5.3.1, za slučaj dvostrano napajanog DNV-a. Korak promjene trenutka nastanka kvara je podešen na 5 ms. Podešeni opsezi promjene otpornosti na mjestu kvara su 1-10 Ω i 1-15 m Ω za prolazne i trajne kvarove, redom.

Analizom rezultata svih testova iz Tab.5.3.2, može se uočiti da je minimalna apsolutna vrijednost pokazatelja početne detekcije kvara dobijena u slučajevima

kvarova bliskih sabirnicama BB i EB i da je jednaka $4,5 \cdot 10^8 A^2$, što predstavlja veću vrijednost u odnosu na podešenu vrijednost praga reagovanja koja iznosi $4 \cdot 10^8 A^2$ (algoritam B). Prethodnom konstatacijom potvrđena je selektivnost algoritma kada se radi o početnoj detekciji kvara. U slučaju analize rezultata za pokazatelje uspješnosti jednofaznog APU-a, uočljive su značajne razlike između njihovih vrijednosti za prolazne i trajne kvarove. Maksimalna apsolutna vrijednost pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a u slučaju prolaznih kvarova iznosi $2,7 \cdot 10^7 A^2$, što je manje u odnosu na odgovarajuću podešenu vrijednost praga reagovanja koja iznosi $3 \cdot 10^7 A^2$. U slučaju trajnih kvarova, minimalna apsolutna vrijednost odgovarajućeg pokazatelja iznosi $5,9 \cdot 10^7 A^2$ što je značajno veća vrijednost od podešene vrijednosti praga reagovanja. Na osnovu prethodnih opažanja, može se zaključiti da je predloženi algoritam selektivan i nakon jednofaznog APU-a u slučaju svih definisanih testova.

5.3.4 Diskusija

Da bi bilo moguće ispitivati selektivnost predloženog algoritma poprečne diferencijalne zaštite sa jednofaznim APU, u početnom testu su određene vrijednosti pragova reagovanja pokazatelja uspješnosti jednofaznog APU-a. Duž kompletne dionice DNV-a simulirani su prolazni kvarovi u različitim fazama. Posebno su analizirani slučajevi dvostrano i radijalno napajanog DNV-a. Utvrđena vrijednost pragova reagovanja predstavlja osnovni kriterijum za razlikovanje prolaznih i trajnih kvarova.

Ispitivanje selektivnosti predloženog algoritma sa jednofaznim APU vršeno je posebno za slučajeve dvostrano i radijalno napajanog DNV-a. U slučaju dvostrano napajanog DNV-a izdvojeni su i prikazani rezultati sljedećih karakterističnih prolaznih i trajnih kvarova: (1) kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB; (2) kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB; (3) kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB, pri promijenjenom toku snage na DNV-u; (4) uzastopni kvarovi u fazi B voda 2 i fazi C voda 1, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB. U svim prethodnim slučajevima kvarova, predloženi algoritam se pokazao kao selektivan i pri početnoj detekciji kvara (algoritam A) i pri detekciji kvara nakon jednofaznog APU-a. Svi prolazni kvarovi su uspješno otklonjeni primjenom jednofaznog APU-a. U toku beznaponske pauze, pet od ukupno šest provodnika DNV-a je ostajalo u pogonu, što je veoma značajno za očuvanje tranzijentne stabilnosti EES-a.

Svi trajni kvarovi su uspješno detektovani i isključeni nakon jednofaznog APU-a. Nakon isključenja voda sa trajnim kvarom, predloženi algoritam ostavlja drugi vod u sistemu DNV-a u pogonu, čime je obezbjeđen nastavak prenosa snage, što dalje utiče na očuvanje stabilnosti EES-a. U slučaju preopterećenja voda koji nije u kvaru, nakon isključenja voda u kvaru, reagovala bi odgovarajuća zaštita od preopterećenja. Utvrđeno je da promjena toka snage koja se prenosi preko DNV-a ne narušava selektivnost predloženog algoritma. Selektivnost predloženog algoritma je očuvana i pri uzastopnim jednofaznim kvarovima na različitim fazama vodova 1 i 2. Pored izdvojenih slučajeva kvara, selektivnost predloženog algoritma je ispitana i potvrđena kroz dodatnih 20 testova sa promjenljivim lokacijama, fazama, trenucima nastanka i vrstama kvara, čiji rezultati su prikazani tabelarno.

Pri testiranju selektivnosti predloženog algoritma u slučaju radijalno napajanog DNV-a prikazani su i analizirani rezultati narednih karakterističnih prolaznih i trajnih kvarova: (1) kvar u fazi A voda 1, na udaljenosti 50 km od sabirnica SB; (2) kvar u fazi B voda 2, na udaljenosti 150 km od sabirnica BB; (4) uzastopni kvarovi u fazi A voda 1 i fazi B voda 2, na udaljenosti 50 km od sabirnica BB. Svi zaključci vezani za rezultate prethodnih testova, u pogledu selektivnosti algoritma, su identični odgovarajućim zaključcima datim u slučaju dvostrano napajanog DNV-a. Kroz dodatno ispitivanje, koje je obuhvatalo 20 testova sa promjenljivim lokacijama, fazama, trenucima nastanka i vrstama kvara, takođe je potvrđena selektivnost predloženog algoritma.

5.4 Koncept zaštite dvostrukog nadzemnog voda sa samo jednim vodom u pogonu

Dosadašnje istraživanje, čiji rezultati su predstavljeni u poglavlju 5, bilo je posvećeno rješavanju problema primjene poprečne diferencijalne zaštite zasnovane samo na signalima struja za zaštitu DNV-a sa sistemom jednofaznog APU-a. Kroz samu analizu rada predloženog algoritma sa sistemom jednofaznog APU-a, uočljivo je da nakon eliminacije trajnih kvarova na jednom od paralelnih vodova, prenos snage preuzima drugi vod (vod bez kvara). Prethodna situacija opisuje slučaj prenosa snage preko DNV-a kada je samo jedan vod u pogonu. U slučaju dvostrano napajanog DNV-a, zavisno od pogonskih uslova EES-a, može doći do preopterećenja voda u pogonu. Identična situacija može nastati i kod radijalno napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu, ukoliko je snaga potrošnje veća od maksimalne snage prenosa datog voda. U

ovakvim slučajevima neophodna je primjena zaštite od preopterećenja. Međutim, moguća je i situacija da vod u pogonu ne bude preopterećen, nakon isključenja voda u kvaru, i da radi pod opterećenjem duže vrijeme. Nameće se ključno pitanje, da li će pomenuti vod biti selektivno zaštićen u slučaju nastanka kvara u ovakvom režimu rada. Sa samo jednim vodom u trajnom pogonu koncept poprečne diferencijalne zaštite je narušen i samu zaštitu je potrebno blokirati [23].

U slučaju radijalno napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu, problem zaštite je ekvivalentan jednostavnom slučaju radijano napajanog jednostrukog voda. Nakon blokiranja poprečne diferencijalne zaštite neophodno je aktivirati neusmjerenu prekostrujnu zaštitu sa definisanim vremenom reagovanja ili inverznom karakteristikom reagovanja [23], [66], [85]. Budući da su sve mjerne veličine potrebne za rad prekostrujne zaštite (struje voda u pogonu) već dostupne prema konceptima predloženih algoritama za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu, zasnovanih na priraštajima struja, potrebno je samo aktivirati odabrani algoritam prekostrujne zaštite i prethodno odrediti odgovarajuće pragove reagovanja.

U slučaju dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu, problem zaštite je ekvivalentan slučaju dvostrano napajanog jednostrukog voda, koji se najčešće štiti usmjerenom prekostrujnom zaštitom [86]. Za implementaciju klasične usmjerene prekostrujne zaštite neophodna su mjerenja napona kao referentnih veličina za određivanje smjera struje kvara [23]. Prema konceptima predloženih algoritama za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu nisu potrebna mjerenja napona, pa pomenute algoritme nije moguće jednostavno prilagoditi slučaju samo jednog voda u pogonu.

5.4.1 Algoritam za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovan na promjenama faznih uglova strujnih signala

Kao alternativa za klasičnu usmjerenu prekostrujnu zaštitu dvostrano napajanog voda, zasnovanu na naponskom usmjerenom elementu, predložen je novi algoritam sa usmjerenim elementom zasnovanim na strujnim signalima. Neusmjereni element predloženog algoritma ostaje identičan kao kod klasične usmjerene prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja, čiji kriterijumi reagovanja su dati izrazima (5.4.1) i (5.4.2).

$$I_m > k_{r1} I_{mR}, \quad (5.4.1)$$

$$t > T_p, \quad (5.4.2)$$

gdje su: I_m – amplituda mjerene struje; I_{mR} – amplituda maksimalne dozvoljene radne struje; k_{r1} – koeficijent rezerve za kompenzaciju mjerne greške; T_p – definisano vrijeme reagovanja zaštite.

U okviru neusmjerenog elementa predloženog algoritma, predložena je i primjena brze kratkospojne zaštite čiji kriterijum reagovanja je definisan sljedećim izrazom:

$$I_m > k_{r2} I_{m3KS}, \quad (5.4.3)$$

gdje su: I_{m3KS} – amplituda struje trofaznog kratkog spoja na završnim sabirnicama DNV-a; k_{r2} – koeficijent rezerve za kompenzaciju mjerne greške.

U nedostatku naponskih signala, koji bi se koristili kao referentne veličine usmjerenog elementa, neophodno je odabrati novu referentnu veličinu za određivanje smjera struje kvara u slučaju dvostrano napajano DNV-a sa jednim vodom u pogonu. Kao rješenje prethodnog problema, u ovoj disertaciji se predlaže primjena pokazatelja promjene faznih uglova struja, koji su ranije definisani izrazima (4.3.8)-(4.3.11). Opšti izraz za predloženi usmjereni element se može definisati na sljedeći način:

$$pUE_{ijn} = \pm \sum_{k=(m/4)+1}^{3m/4} i_{ijn}(k) i_{ijn}\left(k - \frac{m}{4}\right), \quad (5.4.4)$$

gdje su: i i j ranije definisane oznake u indeksima strujnih signala; n je oznaka faze A, B ili C; znak + je usvojen za relej R1, dok je znak – usvojen za relej R2.

Na osnovu prethodnog izraza moguće je zaključiti da postoji ukupno 12 pokazatelja promjene faznih uglova strujnih signala, po 6 na početku i kraju DNV-a. Usmjereni element je definisan sa drugačijim predznakom za releje R1 i R2. Različiti predznaci usmjerenog elementa za releje R1 i R2 ukazuju na važno ograničenje predloženog algoritma, prema kojem je moguća njegova selektivna primjena samo u slučaju radijalnog toka snage po vodu u pogonu. Ukoliko se promijeni tok snage po vodu u pogonu, neophodno je promijeniti predznake usmjerenog elementa za releje R1 i R2. Dakle, selektivna primjena predloženog algoritma zahtijeva informaciju o smjeru snage po vodu u pogonu kao preduslov. U posebnim slučajevima prenosa snage u EES-u postoje vodovi koji povezuju aktivne mreže, a da je pri tome smjer prenosa snage po

vodu uvijek identičan. Karakterističan primjer su vodovi koji povezuju elektrane sa udaljenim razvodnim postrojenjima EES-a, gdje je smjer snage po vodu uvijek identičan, od elektrane prema razvodnom postrojenju. U članku [79] je upravo opisan slučaj prenosa snage po vodu koji povezuje udaljenu vjetroelektranu sa mrežom.

Kriterijum za detekciju smjera struje kvara je definisan sljedećim uslovima:

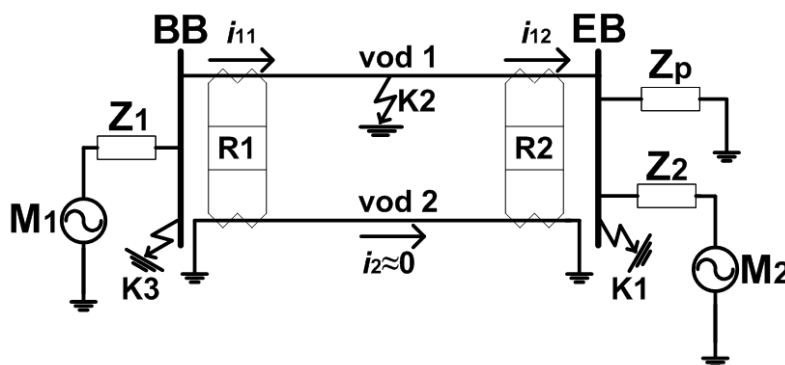
$$\begin{aligned} pUE_{ijn}(k) > TH_{UE} &\rightarrow \text{kvar_u_zoni_zastite,} \\ pUE_{ijn}(k) < -TH_{UE} &\rightarrow \text{kvar_van_zone_zastite,} \\ |pUE_{ijn}(k)| < TH_{UE} &\rightarrow \text{radni_rezim_bez_kvara,} \end{aligned} \quad (5.4.5)$$

gdje je TH_{UE} podešeni prag reagovanja releja.

Prag reagovanja TH_{UE} je potrebno podesiti na vrijednost veću od nule da bi se spriječilo neselektivno reagovanje usmjerenog elementa u slučaju pojave mjernih grešaka. Čak i u slučaju neselektivnog reagovanja usmjerenog elementa neće doći do neselektivnog reagovanja zaštite u radnim režimima bez kvara, jer amplitude struja neće dostići vrijednosti podešenih pragova reagovanja neusmjerenog elementa. Da bi zaštita reagovala, potrebno je da reaguju i neusmjereni i usmjereni element.

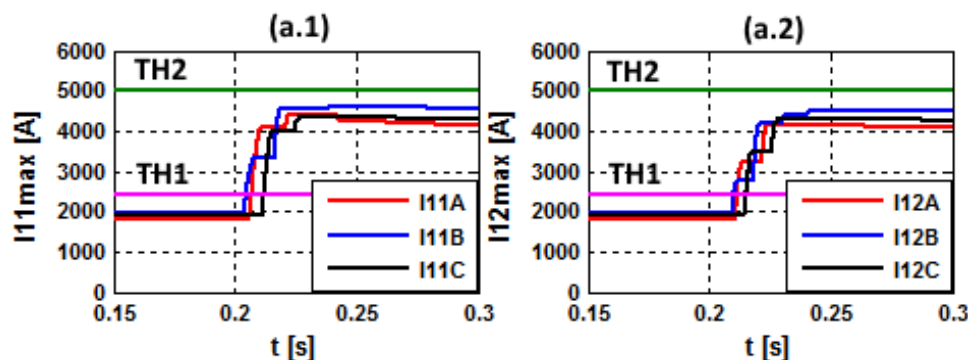
5.4.2 Ispitivanje algoritma za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala

Predloženi algoritam zaštite DNV-a sa jednim vodom u pogonu je ispitivan upotrebom interaktivnog simulatora rada relejne zaštite, koji je predstavljen u poglavlju 2, na modelu dvostrano napajanog DNV-a sa trajno isključenim i uzemljenim vodom 2. Pojednostavljena jednopolna šema EES-a sa DNV-om, koja odgovara analiziranom slučaju (vod 2 trajno isključen i uzemljen) je prikazana na Sl.5.4.1.



Sl.5.4.1 Pojednostavljena jednopolna šema DNV-a sa trajno isključenim i uzemljenim vodom 2

Kao preduslov ispitivanju osjetljivosti i selektivnosti zaštite, neophodno je odrediti vrijednosti pragova reagovanja. Pretpostavljena maksimalna radna struja modelovanog DNV-a je $I_{mR} = 2 \text{ kA}$, dok je usvojena vrijednost koeficijenta rezerve je $k_{rI} = 1,2$. Na osnovu prethodnih vrijednosti moguće je izračunati prag reagovanja neusmjerenog elementa sa definisanim vremenom reagovanja: $TH1 = k_{rI} \cdot I_{mR} = 2,4 \text{ kA}$. Definisano je i vrijeme reagovanja $T_p = 0,3 \text{ s}$. Vrijednost praga reagovanja neusmjerenog elementa kratkospojne zaštite $TH2 = k_{r2} \cdot I_{m3KS}$ se dobija direktno kao rezultat simulacije trolnog kratkog spoja na sabirnicama EB i BB za releje R1 i R2, redom. Rezultati prethodne simulacije trolnih kratkih spojeva su prikazani na Sl.5.4.2 (trolni kratki spojevi K1 i K3 sa Sl.5.4.1).

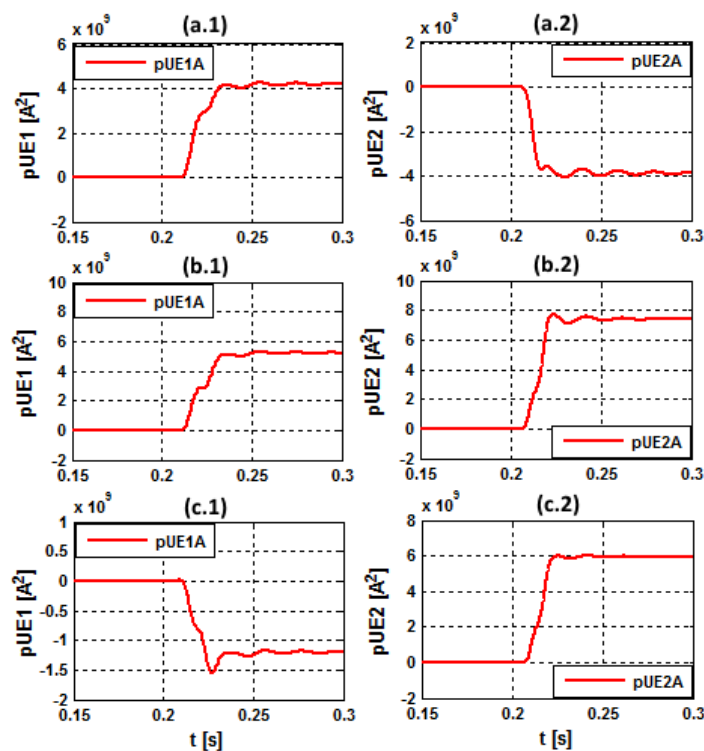


Sl.5.4.2 Amplitude struja i_{11} i i_{12} , mjerenih na početku i kraju voda 1, redom, i usvojene vrijednosti pragova reagovanja: (a.1) relej R1 – trolni kratak spoj na sabirnicama EB (K1); (a.2) relej R2 – trolni kratak spoj na sabirnicama BB (K3)

Na osnovu rezultata sa prethodne slike moguće je zapaziti da se vrijednosti amplituda struja u slučaju oba trolna kratka spoja ne razlikuju značajno, pa je za releje R1 i R2 usvojena identična vrijednost praga reagovanja kratkospojne zaštite $TH2 = 5 \text{ kA}$.

Usmjereni element predloženog algoritma je definisan na način da bude pozitivan za kvarove u šticejnoj dionici (kompletna dužina voda 1), a negativan za kvarove izvan šticejne dionice, što se može zaključiti na osnovu izraza (5.4.5). Da bi se pokazala selektivnost predloženog usmjerenog elementa, ispitana su tri slučaja jednopolnog kratkog spoja u fazi A. Kvarovi su simulirani na lokacijama K1 - završne sabirnice EB, K2 - sredina voda 1 (100 km od početnih sabirnica BB) i K3 - početne sabirnice BB, koje su prikazane na Sl.5.4.1. Dobijeni rezultati su prikazani na Sl.5.4.3.

Prema prikazanim rezultatima sa grafika (a.1) i (a.2) na Sl.5.4.3, moguće je zapaziti da je vrijednost pokazatelja usmjerenog elementa releja R1 pozitivna ($pUE1 > 0$), dok je vrijednost odgovarajućeg pokazatelja releja R2 negativna ($pUE2 < 0$). Na osnovu prethodnih zapažanja moguće je zaključiti da je relej R1 detektovao kvar u svojoj šticienoj zoni, dok je relej R2 detektovao kvar van svoje šticiene zone. Usmjereni element se pokazao kao selektivan, jer je kvar K1 simuliran „iza” releja R2. U slučaju kvara K2 na sredini dionice voda 1, oba pokazatelja usmjerenih elemenata releja R1 i R2 su pozitivna, što se može zapaziti sa grafika (b.1) i (b.2).



Sl.5.4.3 Vrijednosti pokazatelja usmjerenog elementa u slučaju jednopolnog kratkog spoja u fazi A: (a) kvar na lokaciji K1: (a.1) - relej R1, (a.2) - relej R2; (b) kvar na lokaciji K2: (b.1) - relej R1, (b.2) - relej R2; (c) kvar na lokaciji K3: (c.1) - relej R1, (c.2) - relej R2

Prethodni slučaj kvara takođe potvrđuje selektivnost usmjerenog elementa, jer je njegova lokacija u šticienoj zoni oba releja. Na osnovu rezultata za treći slučaj kvara K3, koji je simuliran „iza” releja R1, pokazatelj usmjerenog elementa releja R1 ima negativnu vrijednost ($pUE1 < 0$), dok odgovarajući pokazatelj releja R2 ima pozitivnu vrijednost ($pUE2 > 0$), što se može zapaziti sa grafika (c.1) i (c.2). Prethodna konstatacija potvrđuje selektivnost predloženog usmjerenog elementa i u trećem slučaju kvara. Same vrijednosti pokazatelja usmjerenih elemenata nisu od velikog značaja za

selektivnost zaštite, jer je ona određena samo znakom pokazatelja. Usmjereni elementi reaguju tek nakon neusmjerenih elemenata čije vrijednosti pokazatelja obezbjeđuju selektivnost u smislu razlikovanja kvarova u različitim zonama zaštite (identičan princip kao kod klasične usmjerene prekostrujne zaštite). U svakom slučaju, da bi se spriječilo nepotrebno reagovanje usmjerenih elemenata u režimima bez kvara i u prisustvu mjernih grešaka, definiše se odgovarajući prag reagovanja. Na osnovu reda veličine dostignutih vrijednosti pokazatelja usmjerenih elemenata, prikazanih na Sl.5.4.3, usvojena je sljedeća vrijednost praga reagovanja $TH_{UE} = 10^9 \text{ A}^2$.

U cilju ispitivanja osjetljivosti i selektivnosti predloženog algoritma za različite tipove i lokacije kvara duž dionice voda u pogonu, definisano je pet karakterističnih testova:

(T.1) kvar ABC na udaljenosti 25 km od sabirnica BB,

(T.2) kvar Az na udaljenosti 50 km od sabirnica BB,

(T.3) kvar BC na udaljenosti 100 km od sabirnica BB,

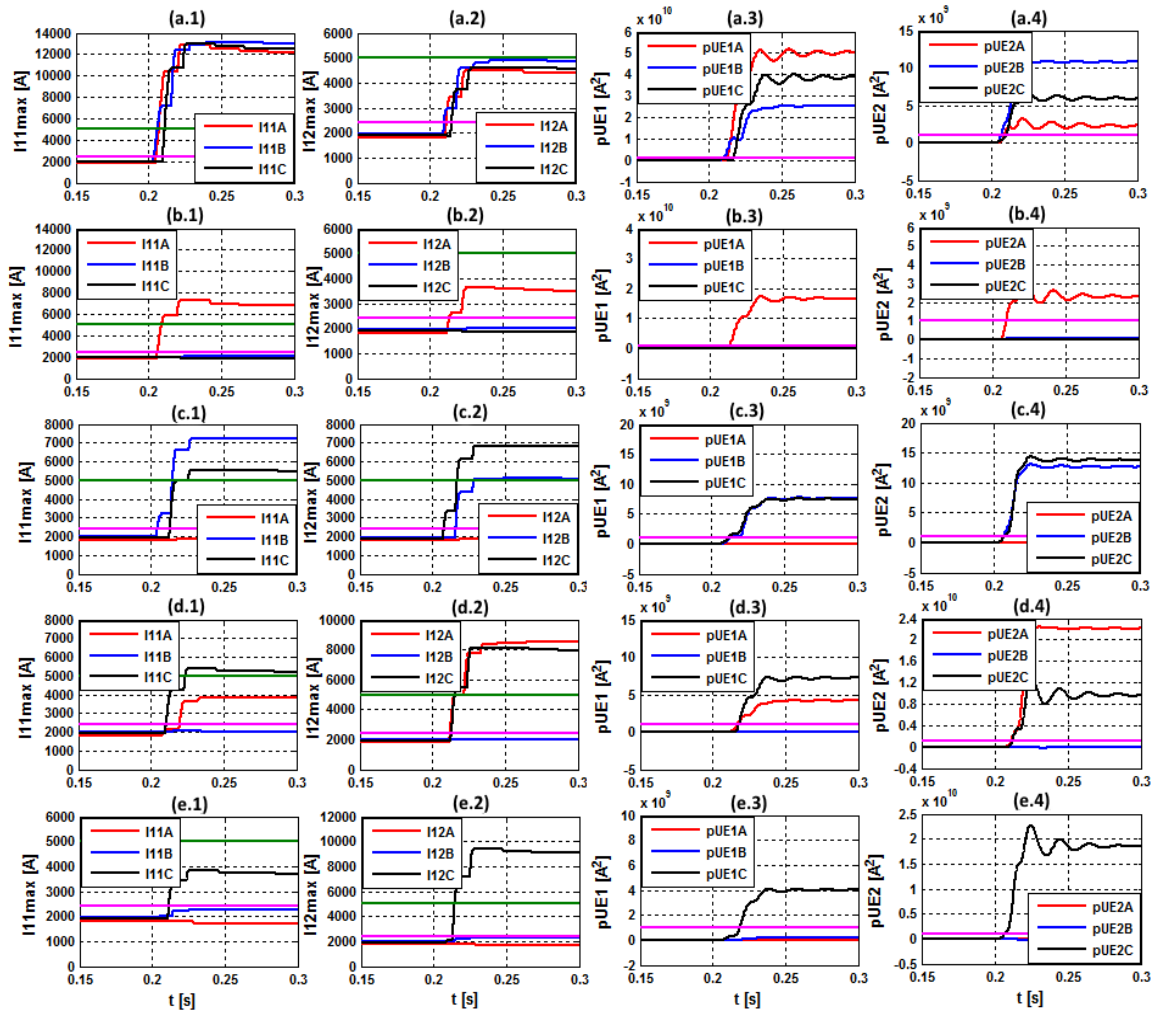
(T.4) kvar ACz na udaljenosti 150 km od sabirnica BB,

(T.5) kvar Cz na udaljenosti 175 km od sabirnica BB.

Analizirane su promjene u vremenu pokazatelja neusmjerenih i usmjerenih elemenata, a odgovarajući rezultati simulacija, za svih pet prethodnih testova, prikazani su na Sl.5.4.4.

Na osnovu grafika (a.1) i (a.2) sa Sl.5.4.4, može se zapaziti da su vrijednosti amplituda struja svih faza mjerenih kod releja R1 i R2 veće od vrijednosti podešenog praga reagovanja $TH1$, čime je trofazni kvar selektivno detektovan. Amplitude struja mjerenih kod releja R1 su veće i od podešenog praga reagovanja kratkospojne zaštite $TH2$, što znači da će u ovom slučaju relej R1 reagovati bez vremenske zadržke. Pošto je lokacija kvara udaljena 175 km od releja R2 i nalazi se u mrtvoj zoni kratkospojne zaštite, on će reagovati sa podešenom vremenskom zadržkom od 0.5 s. Vrijednosti pokazatelja usmjerenih elemenata u svim fazama su pozitivne i veće od podešene vrijednosti praga reagovanja TH_{UE} , što se može vidjeti sa grafika (a.3) i (a.4). Prethodna konstatacija ukazuje da je smjer struje kvara selektivno određen od strane usmjerenih elemenata oba releja R1 i R2. Opravdano je zaključiti da je predloženi algoritam

selektivan u slučaju testa T.1. Osjetljivost algoritma je veća sa strane releja R1, zbog manje udaljenosti lokacije kvara.



Sl.5.4.4 Rezultati ispitivanja osjetljivosti i selektivnosti algoritma za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala: (a) kvar ABC - 25 km od sabirnica BB: (a.1) amplitude struja releja R1 – test T.1; (a.2) amplitude struja releja R2 – test T.1; (a.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.1; (a.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.1; (b) kvar Az - 50 km od sabirnica BB: (b.1) amplitude struja releja R1 – test T.2; (b.2) amplitude struja releja R2 – test T.2; (b.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.2; (b.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.2; (c) kvar BC – 100 km od sabirnica BB: (c.1) amplitude struja releja R1 – test T.3; (c.2) amplitude struja releja R2 – test T.3; (c.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.3; (c.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.3; (d) kvar ACz – 150 km od sabirnica BB: (d.1) amplitude struja releja R1 – test T.4; (d.2) amplitude struja releja R2 – test T.4; (d.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.4; (d.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.4; (e) kvar Cz – 175 km od sabirnica BB: (e.1) amplitude struja releja R1 – test T.5; (e.2) amplitude struja releja R2 – test T.5; (e.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.5; (e.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.5

U slučaju testa T.2, vrijednosti amplituda struja mjerenih kod releja R1 i R2 su veće od podešenog praga reagovanja $TH1$ samo u fazi A, čime je jednofazni kratak spoj selektivno detektovan, što se može zapaziti sa grafika (b.1) i (b.2). Kratkospojna zaštita releja R1 će takođe reagovati, jer je vrijednost amplitude struje u fazi A veća od vrijednosti praga reagovanja $TH2$, dok će relej R2 reagovati sa vremenskom zadržskom, jer se lokacija i ovog kvara nalazi u mrtvoj zoni kratkospojne zaštite sa njegove strane. Na osnovu rezultata sa grafika (b.3) i (b.4), može se zapaziti da su vrijednosti pokazatelja usmjerenih elemenata oba releja pozitivne, čime je i smjer struje kvara selektivno detektovan. Predloženi algoritam se pokazao kao selektivan i u slučaju testa T.2. Njegova osjetljivost je ponovo veća sa strane releja R1, jer je lokacija kvara bliža sabirnicama BB.

Rezultati testa T.3 su prikazani na graficima (c.1)-(c.4). Sa grafika (c.1) i (c.2) može se vidjeti da su vrijednosti amplituda struja mjerenih kod releja R1 i R2 veće od vrijednosti praga reagovanja $TH1$ u fazama B i C, čime je selektivno detektovan dvofazni kratak spoj. Takođe, vrijednosti ranije pomenutih amplituda struja su veće i od vrijednosti praga reagovanja kratkospojne zaštite $TH2$, pa će oba releja R1 i R2 reagovati bez vremenske zadržske. Može se zapaziti da je osjetljivost kratkospojne zaštite releja R2 manja od osjetljivosti kratkospojne zaštite releja R1, iako je lokacija kvara jednako udaljena od oba releja. Prethodna konstatacija je posljedica „jače” mreže sa strane releja R1. Pokazatelji usmjerenih elemenata oba releja su pozitivni, što se može zapaziti sa grafika (c.3) i (c.4), čime je i smjer struje kvara selektivno određen. Osjetljivost pokazatelja usmjerenog elementa releja R2 je veća, jer je promjena faznog ugla struje mjerene kod releja R2 veća. Opravdano je zaključiti da je predloženi algoritam selektivan i u slučaju testa T.3.

Na osnovu grafika (d.1) i (d.2), može se zapaziti da su vrijednosti amplituda struja u fazama A i C, mjerenih kod releja R1 i R2, veće od vrijednosti praga reagovanja $TH1$, čime je i ovaj dvofazni kvar selektivno detektovan. Sa grafika (d.1) se može vidjeti da je amplituda struje kvara u fazi C značajno veća od amplitude struje kvara u fazi A, što je posljedica povećane strujne nesimetrije netransponovanog trofaznog modela voda u analiziranom asimetričnom režimu. Posljedica prethodne konstatacije je ta da će kratkospojna zaštita releja R1 reagovati samo u fazi C, jer je vrijednost odgovarajuće amplitude struje veća od praga reagovanja $TH2$. Zbog odgođenog reagovanja releja R1

u fazi A, doći će do kaskadnog reagovanja različitih polova istog prekidača. Međutim, prethodni nedostatak nije posljedica predloženog algoritma zaštite, nego same fizikalnosti netransponovanog modela voda u asimetričnom režimu. Kratkospojna zaštita releja R2 će biti aktivirana u obje faze obuhvaćene kvarom, što se može zapaziti sa grafika (d.2). Osjetljivost kratkospojne zaštite releja R2 je velika zbog blizine lokacije kvara. Vrijednosti pokazatelja usmjerenih elemenata releja R1 i R2 su pozitivne, što se može vidjeti sa grafika (d.3) i (d.4), redom, čime je smjer struje kvara selektivno određen. Osjetljivost usmjerenog elementa je veća sa strane releja R2. Na osnovu prethodne diskusije, moguće je zaključiti da je predloženi algoritam selektivan i u slučaju testa T.4.

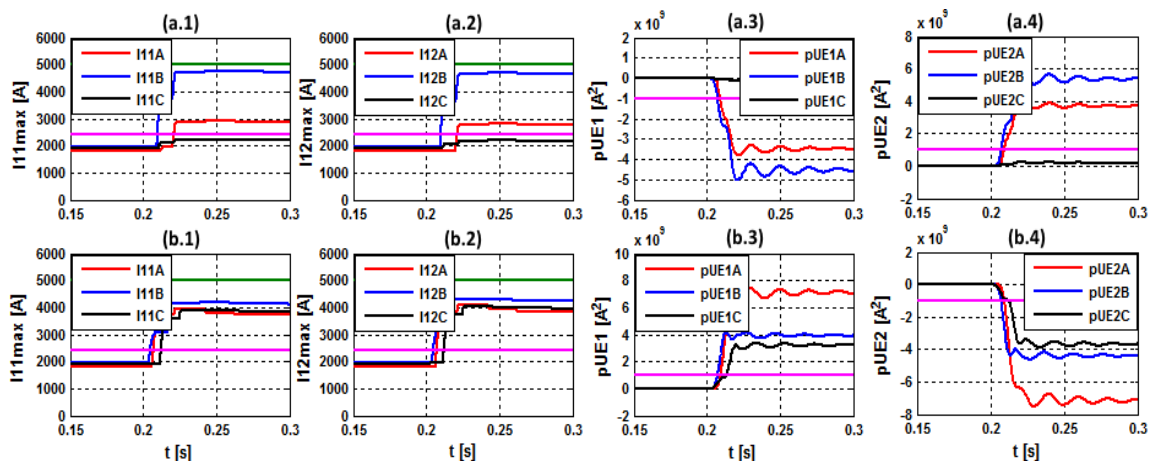
Rezultati posljednjeg testa su prikazani na graficima (e.1)-(e.4). Vrijednosti amplituda struja u fazi C, mjenjenih kod releja R1 i R2, veće su od praga reagovanja $TH1$, čime je jednopolni kratak spoj selektivno detektovan, što se može vidjeti sa grafika (e.1) i (e.2). Kratkospojna zaštita releja R2 će takođe reagovati, jer je vrijednost amplitude odgovarajuće struje veća od vrijednosti praga reagovanja $TH2$. Kako je lokacija kvara u mrtvoj zoni kratkospojne zaštite releja R1, on će reagovati sa podešenom vremenskom zadržskom. Važno je uočiti da je vrijednost amplitude struje u fazi B, mjerene kod oba releja R1 i R2, bliska vrijednosti praga reagovanja $TH1$, iako faza B nije obuhvaćena kvarom. Prethodna konstatacija je posljedica nesimetrije struja netransponovanog modela voda u analiziranom asimetričnom režimu. Vrijednosti pokazatelja usmjerenih elemenata releja R1 i R2 su pozitivne, što se može zapaziti sa grafika (c.3) i (c.4), čime je selektivno određen smjer struje kvara. Predloženi algoritam se pokazao kao selektivan i u posljednjem testu T.5.

U cilju ispitivanja selektivnosti predloženog algoritma za slučajeve kvara izvan zone zaštite, definisana su dva dodatna testa:

(T.6) kvar AB na udaljenosti 5 km od sabirnica BB – izvan zone zaštite releja R1,

(T.7) kvar ABC na udaljenosti 5 km od sabirnica EB – izvan zone zaštite releja R2.

Analizirane su promjene u vremenu pokazatelja neusmjerenih i usmjerenih elemenata, a odgovarajući rezultati simulacija, za prethodna dva testa, prikazani su na Sl.5.4.5.



Sl.5.4.5 Rezultati ispitivanja selektivnosti algoritma za usmjerenu zaštitu dvostrano napajanog DNV-a sa jednim vodom u pogonu zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala u slučaju kvarova izvan zone zaštite: (a) kvar AB - 5 km od sabirnica BB – izvan zone zaštite releja R1: (a.1) amplitude struja releja R1 – test T.6; (a.2) amplitude struja releja R2 – test T.6; (a.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.6; (a.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.6; (b) kvar ABC - 5 km od sabirnica EB – izvan zone zaštite releja R2: (b.1) amplitude struja releja R1 – test T.7; (b.2) amplitude struja releja R2 – test T.7; (b.3) pokazatelji usmjerenog elementa releja R1 – test T.7; (b.4) pokazatelji usmjerenog elementa releja R2 – test T.7

Na osnovu grafika (a.1) i (a.2) sa Sl.5.4.5 može se uočiti da su vrijednosti amplituda struja mjenjenih kod releja R1 i R2 veće od vrijednosti praga reagovanja THI u fazama A i B, čime je selektivno detektovan dvofazni kratak spoj. Vrijednosti pokazatelja usmjerenog elementa releja R1 su negativne, dok su vrijednosti odgovarajućeg pokazatelja releja R2 pozitivne, što je prikazano na graficima (a.3) i (a.4), redom. Smjer struje kvara je selektivno određen, što ima za posljedicu blokiranje releja R1. Releji R2 će reagovati, ali tek nakon podešene vremenske zadržke, čime je obezbijedena koordinacija sa odgovarajućim relejom u čijoj zaštitnoj zoni se kvar nalazi. Selektivnost predloženog algoritma je ostvarena u slučaju testa T.6.

Prema dobijenim rezultatima za test T.7, koji su takođe prikazani na Sl.5.4.5, može se zaključiti da je predloženi algoritam selektivan i u slučaju kvara izvan zone zaštite releja R2. Vrijednosti amplituda struja mjenjenih kod releja R1 i R2 su veće od vrijednosti praga reagovanja THI u svim fazama, čime je selektivno detektovan trofazni kratak spoj, što se može uočiti sa grafika (b.1) i (b.2). Vrijednosti pokazatelja usmjerenog elementa releja R1 su pozitivne, dok su vrijednosti odgovarajućeg pokazatelja releja R2 negativne, što je prikazano na graficima (b.3) i (b.4), redom. Releji R1 će reagovati nakon podešene vremenske zadržke, dok će releji R2 biti blokirani.

Na osnovu rezultata svih prethodnih testova, opravdano je zaključiti da je predloženi algoritam osjetljiv i selektivan, a samim tim i primjenjiv za zaštitu DNV-a sa jednim vodom u pogonu. Potpuno identičan zaključak bi bio validan i u slučaju drugog paralelnog voda u pogonu (kada bi vod 1 bio trajno isključen). Usmjereni element predloženog algoritma ne koristi naponske signale kao referentne veličine za određivanje smjera struje kvara, što predstavlja najveću prednost u odnosu na klasičnu usmjerenu prekostrujnu zaštitu. Najveće ograničenje predloženog algoritma predstavlja neophodnost informacije o smjeru toka snage po vodu u pogonu u radnom režimu koji prethodi kvaru. U slučaju promjene smjera toka snage po vodu u pogonu, neophodno je zamijeniti predznake u izrazima za pokazatelje usmjerenih elemenata releja R1 i R2. Bez obzira na prethodni nedostatak, predloženi algoritam se može primjenjivati u mrežama sa radijalnim tokom snage bez ikakve modifikacije. Njegova primjena je moguća i u mrežama sa promjenljivim smjerovima toka snage, ali je pri svakoj promjeni smjera toka snage neophodno reprogramirati usmjereni element, jer se sa svakom promjenom smjera toka snage mijenja i smjer referentne veličine za određivanje smjera struje kvara.

6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE PREDLOŽENOG ALGORITMA ZA USMJERENU POPREČNU DIFERENCIJALNU ZAŠTITU

Simulaciona analiza rada algoritama digitalnih relejnih zaštita nadzemnih vodova je veoma korisna za testiranje softverskog dijela uređaja, a veoma često predstavlja i jedinu raspoloživu opciju u okviru naučno-istraživačkog razvoja uređaja, jer je veoma zahtjevno fizički modelovati asimetrične režime rada nadzemnih vodova u laboratorijskim uslovima. Takođe, najpoznatiji proizvođači uređaja digitalnih relejnih zaštita ne dozvoljavaju bilo kakve modifikacije fabrički ugrađenih algoritama zaštite, čime je onemogućena implementacija korisnički razvijenih algoritama u postojeće uređaje. Prethodne činjenice značajno otežavaju eksperimentalna ispitivanja novih algoritama digitalnih relejnih zaštita, koji su razvijeni od strane korisnika u okviru naučno-istraživačkog procesa. U ovom poglavlju disertacije, osnovni cilj je razvoj eksperimentalne šeme za laboratorijsko ispitivanje rada algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu radijalnog DNV-a, koji je ranije predložen u poglavlju 4.

U prvom dijelu poglavlja opisan je način realizacije fizičkog modela DNV-a primjenjivog u simetričnim i asimetričnim režimima rada. Potom je prikazan i proračun parametara predloženog fizičkog modela, čije vrijednosti su svedene na sekundarnu stranu mjernih transformatora. Drugi dio poglavlja obuhvata opis realizovane eksperimentalne šeme za ispitivanje predloženog algoritma iz poglavlja 4. Rezultati laboratorijskih ispitivanja rada predloženog algoritma za asimetrične režime fizičkog modela DNV-a su prikazani i opisani u završnom dijelu poglavlja.

6.1 Fizički model dvostrukog nadzemnog voda za simetrične i asimetrične režime rada

Prilikom projektovanja fizičkog modela nadzemnog voda u laboratorijskim uslovima korišten je matematički model nadzemnog voda sa skoncentrisanim parametrima. Na osnovu prethodnog istraživanja [44] i tehničkih preporuka [87], [88], pokazano je da se kaskadnim vezivanjem više dionica nadzemnog voda, koje su modelovane šemama sa skoncentrisanim parametrima, zavisno od njihove maksimalne dužine, može postići zadovoljavajuća preciznost u odnosu na modele sa raspodijeljenim parametrima. U ovoj disertaciji analiziran je 400 kV DNV, čiji geometrijski raspored provodnika je prikazan na Sl.2.2.1. Predloženi algoritam za usmjerenu poprečnu

diferencijalnu zaštitu, zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala, u svom radu koristi samo osnovne harmonike signala struja ($f_l = 50$ Hz). Na osnovu podatka o maksimalnoj vrijednosti frekvencije signala od interesa moguće je procijeniti maksimalnu dužinu dionice nadzemnog voda modelovanog šemom sa skoncentrisanim parametrima. Za maksimalnu dužinu dionice od 50 km, model voda sa skoncentrisanim parametrima se može koristiti u analizi signala frekvencija do 1,2 kHz, sa zadovoljavajuće malim odstupanjem u odnosu na model voda sa raspodijeljenim parametrima, uz pretpostavku da je brzina putujućih talasa po vodu približno jednaka brzini svjetlosti [44]. U skladu sa prethodnim zaključkom, odabrana je dužina dionice $l_d = 50$ km fizičkog modela DNV-a sa skoncentrisanim parametrima, čime je ostvarena sasvim dovoljna preciznost u pogledu analize signala osnovne frekvencije.

Da bi trofazni fizički model DNV-a bio primjenjiv u analizi simetričnih i asimetričnih režima rada, neophodno je pored sopstvenih uvažiti i međusobne induktivnosti faznih provodnika. Neophodno je postići da eksperimentalna šema istovremeno predstavlja šeme direktnog, inverznog i nultog redoslijeda, zavisno od vrste asimetrije koja se razmatra. Direktna izrada fizičkih modela međusobnih induktivnosti je veoma komplikovana, pogotovo u slučaju DNV-a koji se sastoji od šest faznih provodnika. Iz prethodnog razloga se u ovoj analizi preporučuje indirektno modelovanje uticaja međusobnih induktivnosti voda u asimetričnim režimima rada vezivanjem fizičkih induktiviteta u povratni provodnik eksperimentalne šeme. Ovaj pristup je ranije preporučen i korišten u završnom radu iz oblasti Tehnike visokog napona na primjeru jednostrukog voda [89].

U svrhu jednostavnije analize pretpostavljeno je da je DNV potpuno transponovan, kao što je prikazano na Sl.2.2.2. U ovom slučaju važe sljedeći izrazi za induktivnosti DNV-a u različitim komponentnim sistemima:

$$L_d = L_i = L_S - M, \quad (6.1.1)$$

$$L_0 = L_S + 2M, \quad (6.1.2)$$

$$L_{0m} = 3M_{12}, \quad (6.1.3)$$

gdje su L_S , M i M_{12} sopstvena, međusobna i međusistemska induktivnost DNV-a, redom. Prethodne induktivnosti su date sljedećim izrazima:

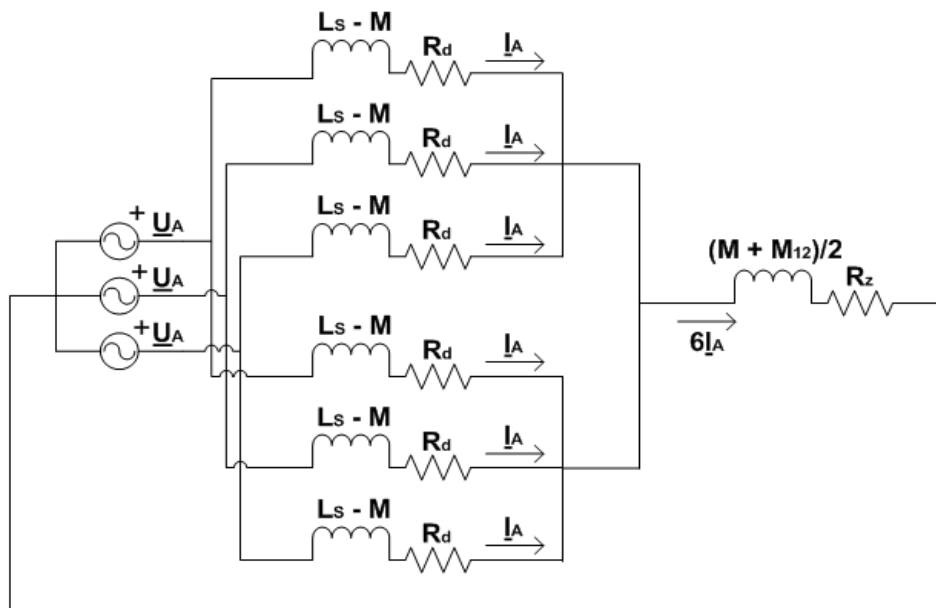
$$L_S = \frac{L_{SA} + L_{SB} + L_{SC}}{3}, \quad (6.1.4)$$

$$M = \frac{L_{MAB} + L_{MAC} + L_{MBC}}{3}, \quad (6.1.5)$$

$$M_{12} = \frac{L_{MA12} + L_{MB12} + L_{MC12} + 2L_{MAB12} + 2L_{MAC12} + 2L_{MBC12}}{9}. \quad (6.1.6)$$

U prethodnim izrazima oznake L_{SA} , L_{SB} i L_{SC} predstavljaju sopstvene induktivnosti faznih provodnika A, B i C, redom. Oznake L_{MAB} , L_{MAC} i L_{MBC} predstavljaju međusobne induktivnosti faznih provodnika jednog sistema DNV-a. Zatim, oznake L_{MA12} , L_{MB12} i L_{MC12} predstavljaju međusobne induktivnosti istofaznih provodnika koji pripadaju različitim sistemima DNV-a, dok oznake L_{MAB12} , L_{MAC12} i L_{MBC12} predstavljaju međusobne induktivnosti provodnika različitih faza koji pripadaju različitim sistemima DNV-a. Za analizirani 400 kV DNV sa Sl.2.2.1, vrijednosti razmatranih parametara iznose: $L_S = 0,97$ mH/km, $M = 0,17$ mH/km i $M_{12} = 0,11$ mH/km.

Na Sl.6.1.1 prikazana je ideja indirektnog uvažavanja uticaja međusobnih induktivnosti DNV-a u šemi nultog redoslijeda. Prikazana šema DNV-a istovremeno predstavlja i šemu direktnog ili inverznog redoslijeda kada se priključi na napajanje direktnog ili inverznog sistema napona (ne postoji struja u povratnom provodniku).



Sl.6.1.1 Šema nultog redoslijeda sa indirektnim uvažavanjem uticaja međusobnih induktivnosti preko induktivnosti u povratnom provodniku

Na osnovu šeme sa Sl.6.1.1 može se zaključiti da važi sljedeća jednačina ravnoteže napona:

$$\underline{U}_A = [R_d + 6R_z + j\omega(L_S + 2M + 3M_{12})] \underline{I}_A, \quad (6.1.7)$$

gdje su R_d i R_z otpornosti faznog provodnika i povratnog puta zemlje.

Zamjenom izraza (6.1.2) i (6.1.3) u izraz (6.1.7) dobija se naredni izraz:

$$\underline{U}_A = [R_d + 6R_z + j\omega(L_0 + L_{om})] \underline{I}_A. \quad (6.1.8)$$

Iz prethodnog izraza se može zaključiti da su induktivnosti u šemi sa Sl.6.1.1 ekvivalentne induktivnostima nultog redoslijeda DNV-a, što potvrđuje opravdanost primjene date šeme u analizi asimetričnih režima DNV-a sa prisustvom zemljospojeva. Može se zaključiti da je predložena šema primjenjiva u analizama simetričnih i asimetričnih režima rada DNV-a, jer zavisno od pobudnog sistema fazora istovremeno može predstavljati šemu direktnog (ili inverznog) i nultog komponentnog sistema.

6.1.1 Proračun parametara fizičkog modela DNV-a

Predložena je realizacija fizičkog modela koja odgovara 400 kV DNV-a sa Sl.2.2.1. Planirane su tri dionice dužine po $l_d = 50$ km modelovane „obrnutim” G šemama nadzemnog voda sa skoncentrisanim parametrima. Sve vrijednosti parametara fizičkog modela će biti svedene na sekundar mjernih transformatora. Pretpostavljeni prenosni odnosi strujnog i naponskog transformatora (ST i NT) su $n_n = 400000/100 \text{ V/V} = 4000$ i $n_s = 1000/1 \text{ A/A} = 1000$. Na osnovu prenosnih odnosa ST-a i NT-a moguće je odrediti i prenosni odnos za impedanse koji iznosi $n_n/n_s = 4$.

Podužnu induktivnost faznih provodnika (induktivnost direktnog redoslijeda) je moguće izračunati pomoću izraza (6.1.1) i njena vrijednost svedena na sekundar iznosi $L_{ds} = 0,2 \text{ mH/km}$. Induktivnost faznog provodnika jedne dionice fizičkog modela DNV-a iznosi $L_1 = l_d \cdot L_{ds} = 10 \text{ mH}$. Podužnu induktivnost povratnog provodnika je moguće izračunati kao aritmetičku sredinu međusobne i međusistemske induktivnosti DNV-a i njena vrijednost svedena na sekundar iznosi $L_{ns} = 0,035 \text{ mH/km}$. Induktivnost neutralnog provodnika jedne dionice fizičkog modela DNV-a iznosi $L_2 = l_d \cdot L_{ns} = 1,75 \text{ mH}$.

Podužna otpornost faznih provodnika analiziranog DNV-a je računata prema izrazu (2.2.3) za temperaturu 50°C i njena vrijednost svedena na sekundar iznosi $R_s = 0,0136 \Omega/\text{km}$. Otpornost faznog provodnika jedne dionice fizičkog modela DNV-a iznosi $R_1 = l_d \cdot R_s = 0,68 \Omega$. Podužna otpornost povratnog provodnika (zemlje) je računata prema prvom članu izraza (2.2.14), za frekvenciju $f = 50 \text{ Hz}$, i njena vrijednost svedena na sekundar iznosi $R_{ns} = 0,012 \Omega/\text{km}$. Otpornost povratnog provodnika jedne dionice fizičkog modela DNV-a iznosi $R_2 = l_d \cdot R_{ns} = 0,6 \Omega$.

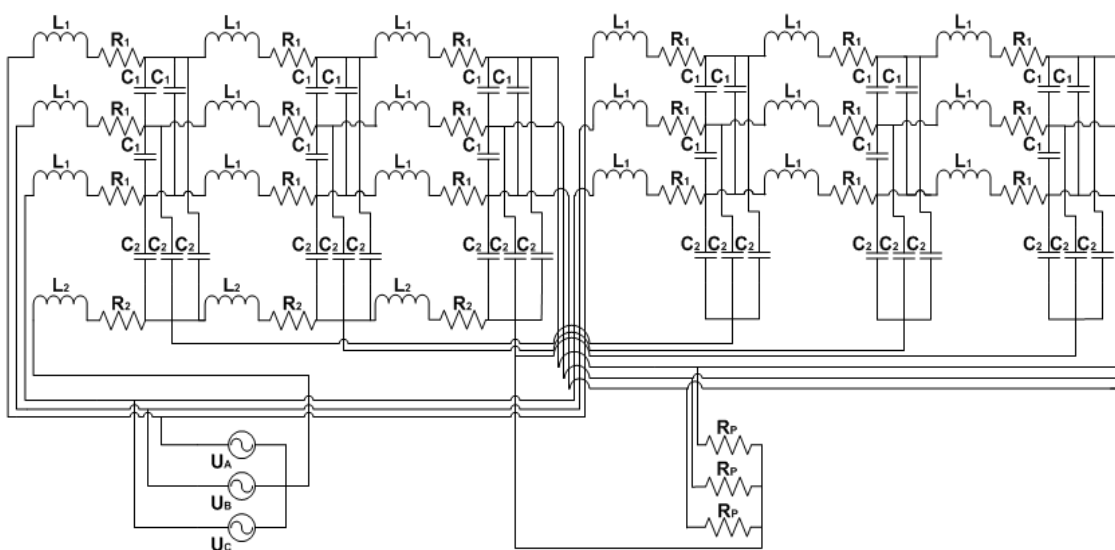
Pri proračunu podužnih kapacitivnosti za potrebe realizacije fizičkog modela, smatrano je da su paralelni vodovi u sistemu DNV-a kapacitivno raspregnuti (zanemarene su međusistemske kapacitivnosti). Pretpostavljeno je i da su oba paralelna voda idealno transponovana. Vrijednosti podužnih otočnih kapacitivnosti faznih provodnika prema zemlji su date u prilogu 1 za analizirani DNV i njihova vrijednost svedena na sekundar iznosi $C_{0s} = 34,1 \text{ nF}/\text{km}$. Otočne kapacitivnosti jedne dionice fizičkog modela DNV-a imaju vrijednost $C_2 = l_d \cdot C_{0s} = 1,7 \mu\text{F}$. Međusobne kapacitivnosti faznih provodnika je moguće jednostavno izračunati kao $C_M = (C_d - C_0) / 3$. Na osnovu odgovarajućih podataka iz priloga 1 dobija se vrijednost međusobnih kapacitivnosti faznih provodnika svedena na sekundar $C_{Ms} = 7,9 \text{ nF}/\text{km}$. Međusobne kapacitivnosti jedne dionice fizičkog modela DNV-a imaju vrijednost $C_1 = l_d \cdot C_{Ms} = 0,4 \mu\text{F}$.

6.1.2 Realizacija fizičkog modela DNV-a

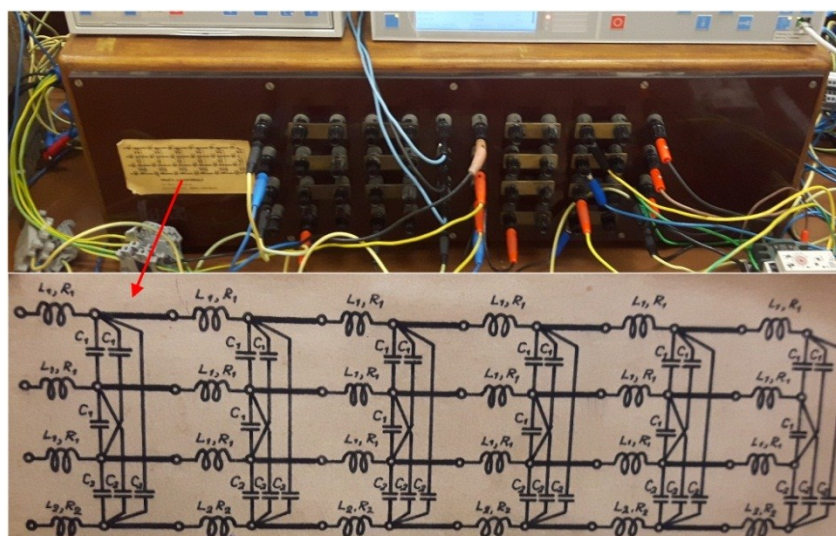
U okviru raspoloživih laboratorijskih uslova realizovan je fizički model DNV-a sa parametrima čije vrijednosti približno odgovaraju prethodnom proračunu. Iskorišćen je postojeći fizički model 110 kV JNV-a sa šest dionica dužina po 50 km, razvijen u toku izrade završnog rada [89]. Na osnovu naznačenih podataka ovaj fizički model ima sljedeće vrijednosti parametara: $L_1 = 10 \text{ mH}$, $L_2 = 5,35 \text{ mH}$, $R_1 = 1,6 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $C_1 = 0,27 \mu\text{F}$ i $C_2 = 2 \mu\text{F}$. Poređenjem proračunatih i dostupnih vrijednosti parametara, moguće je zapaziti da kod najdominantnijeg parametra L_1 ne postoji odstupanje, dok su odstupanja parametara C_1 i C_2 prihvatljivo mala. Najveća odstupanja su prisutna za parametre L_2 , R_1 i R_2 . I pored prethodnih odstupanja može se smatrati da je dostupni fizički model prihvatljiv za ispitivanje predloženog algoritma zaštite. Primjena

predloženog algoritma je univerzalna u pogledu geometrijskih i konstrukcionih karakteristika DNV-a, od kojih vrijednosti parametara upravo i zavise.

U svrhu realizacije fizičkog modela DNV-a neophodno je električno prevezati dionice postojećeg fizičkog modela tako da se kao rezultat dobiju ukupno tri dionice sa po šest faznih provodnika. Na Sl.6.1.2 prikazana je električna šema fizičkog modela 400 kV DNV-a sa tri dionice ukupne dužine 150 km, nastala prevezivanjem električne šeme postojećeg fizičkog modela 110 kV DNV-a sa šest dionica ukupne dužine 300 km, dok je na Sl.6.1.3 prikazan izgled fizičkog modela u laboratorijskom okruženju.



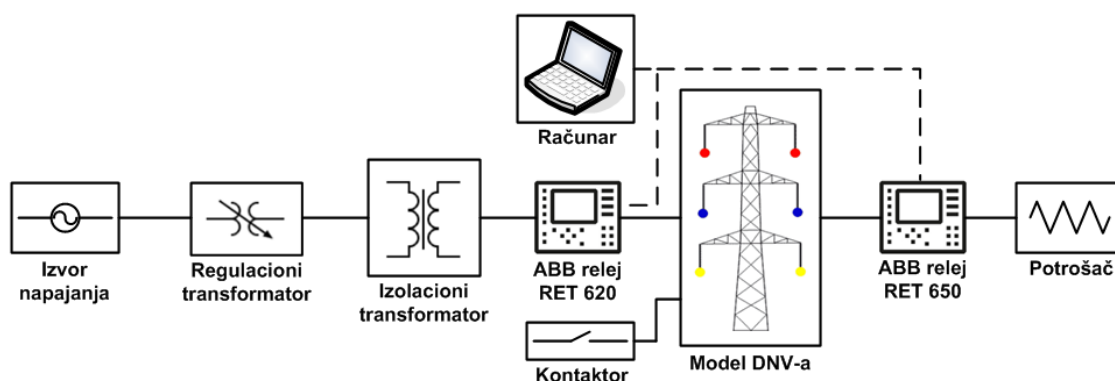
Sl.6.1.2 Električna šema fizičkog modela 400 kV DNV-a sa tri dionice ukupne dužine 150 km



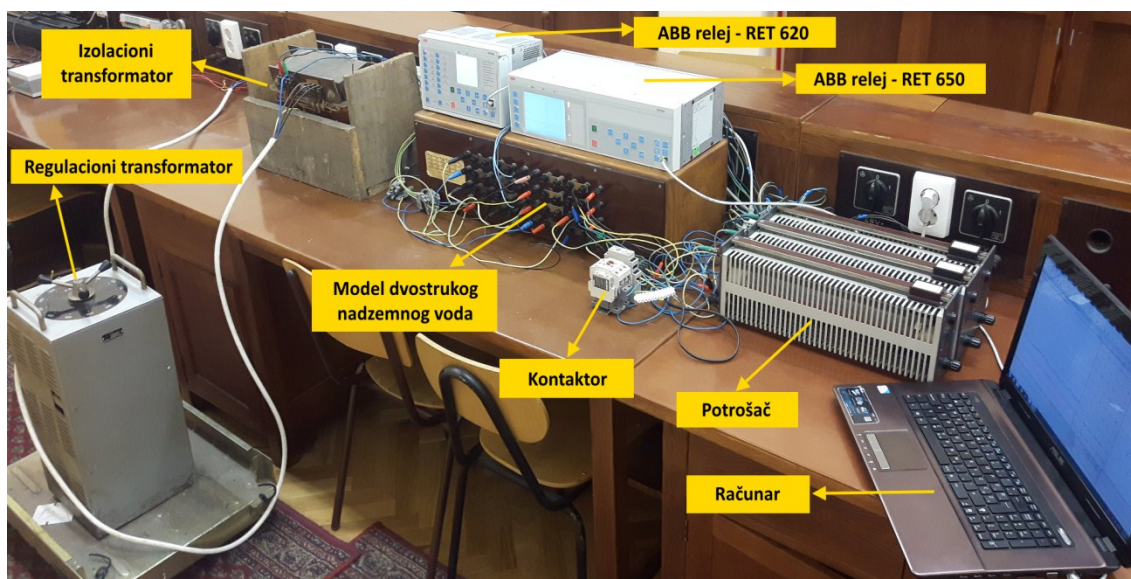
Sl.6.1.3 Izgled fizičkog modela 400 kV DNV-a i ilustracija električne šeme postojećeg fizičkog modela 110 kV JNV-a

6.2 Eksperimentalna šema za ispitivanje predloženog algoritma zaštite

Sa ciljem ispitivanja i potvrde pravilnog rada algoritma, zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu radijalnog DNV-a, realizovana je posebna eksperimentalna šema koja se sastoji od: fizičkog modela DNV-a, dva mikroprocesorska releja za zaštitu transformatora kompanije ABB: RET 620 [90] i RET650 [91], kontaktora za pravljenje kratkih spojeva, regulacionog naponskog transformatora, transformatora za galvansku izolaciju napojnog dijela, trofaznog otpornika kao potrošača i prenosnog računara. Pojednostavljeni blok dijagram eksperimentalne šeme je prikazan na Sl.6.2.1, dok je njen izgled u laboratorijskom okruženju prikazan na Sl.6.2.2.



Sl.6.2.1 Pojednostavljeni blok dijagram eksperimentalne šeme za ispitivanje predloženog algoritma zaštite



Sl.6.2.2 Izgled eksperimentalne šeme za ispitivanje predloženog algoritma zaštite u laboratorijskom okruženju

Na osnovu blok dijagrama sa Sl.6.2.1, moguće je zapaziti da se između napajanja iz niskonaponske 380/220 V/V mreže i glavnog dijela eksperimentalne šeme nalazi transformator za regulaciju napona koji služi za kontrolisano povećavanje napona od nule do vrijednosti koja obezbjeđuje nazivnu struju kroz releje i fizički model DNV-a u vrijednosti $I_n = 1$ A. Iza regulacionog transformatora povezan je transformator prenosnog odnosa 2,5 čija osnovna uloga je da obezbijedi galvansku izolaciju napojnog dijela od glavnog dijela eksperimentalne šeme. Nakon izolacionog transformatora formirane su „sabirnice” (spojevi) poslije kojih polazi šest provodnika prema glavnom dijelu šeme.

Ispred fizičkog modela DNV-a šest faznih provodnika je provedeno kroz strujne priključke releja RET 620, koji ima ulogu uređaja za mjerenje, detekciju promjena i snimanje signala struja. U releju RET 620 aktiviran je algoritam za diferencijalnu zaštitu transformatora koji služi za detekciju kvarova na fizičkom modelu DNV-a. Vrijednost diferencijalne struje reagovanja je podešena na vrijednost $0,1I_n$. Relej je u upotrebi za kontinualno mjerenje struja fizičkog modela DNV-a i snimanje prelaznog procesa pri testovima kratkih spojeva. Frekvencija odabiranja uređaja je 1,6 kHz.

Iza fizičkog modela DNV-a, šest faznih provodnika je provedeno kroz strujne priključke releja RET 650 koji ima identičnu ulogu kao i relej RET 620. U uređaju je takođe aktiviran algoritam za diferencijalnu zaštitu transformatora sa podešenjem vrijednosti diferencijalne struje reagovanja $0,1I_n$. Frekvencija odabiranja je 1 kHz.

Izlazni priključci releja RET 650 su povezani na „sabirnice” (spojve) koje dovode istofazne provodnike u paralelnu električnu vezu na kraju šeme. Na sabirnice je povezan aktivan trofazni potrošač sa vrijednošću otpornosti $R_p = 10 \Omega$ po fazi, spregnut u zvijezdu. Povratni provodnik povezuje zvjezdište potrošača, impedanse u povratnoj grani fizičkog modela DNV-a, zvjezdišta izolacionog i regulacionog transformatora i neutralni provodnik napojne mreže. Na ovaj način neutralna tačka sistema je jednoznačno određena.

Priključke kontaktora je moguće povezati na proizvoljne priključke fizičkog modela DNV-a, čime se postiže mogućnost promjene lokacije kratkog spoja u odnosu na dionice fizičkog modela. Odgovarajućim prevezivanjem priključaka kontaktora moguće je mijenjati i tipove kratkog spoja. Trenutak kratkog spoja je kontrolisan

fizičkim pritiskom na kratkospojni dio kontaktora, dok je trajanje kratkog spoja određeno trajanjem pomenutog pritiska.

Nakon svakog izvršenog testa kratkog spoja na fizičkom modelu DNV-a, aktivni algoritmi diferencijalne zaštite transformatora uređaja RET 620 i RET 650 detektuju kvar i reaguju. Vrijednosti diferencijalnih struja reagovanja služe kao okidač za snimanje prelaznog procesa u definisanim vremenskim intervalima prije i poslije trenutka kvara. Snima se po 6 faznih struja na početku i kraju fizičkog modela DNV-a, što odgovara realnom slučaju poprečne diferencijalne zaštite.

6.2.1 Obrada rezultata mjerenja

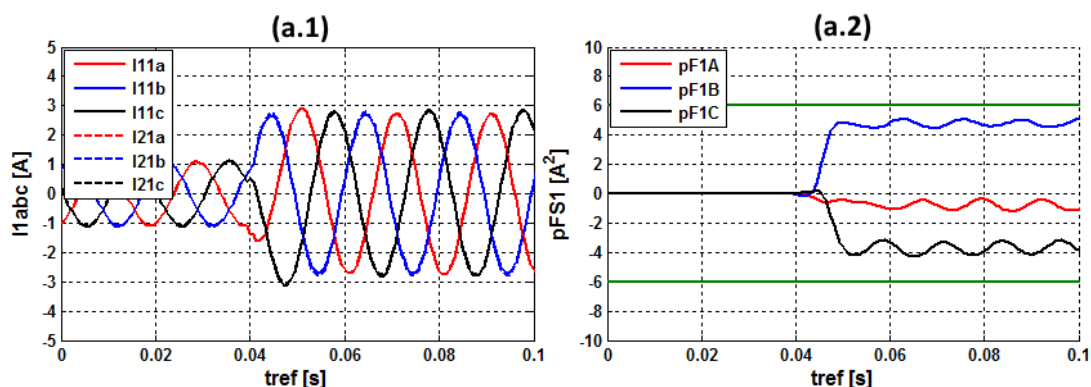
Rezultati mjerenja ostaju zapisani u lokalnoj memoriji releja RET 620 i RET 650. Putem lokalne „Ethernet” komunikacije rezultati mjerenja se prenose iz memorije releja u memoriju prenosnog računara upotrebom profesionalnog softverskog paketa PCM 600 kompanije ABB [92]. Vremenske promjene signala struja je moguće i vizuelno prikazati primjenom programa „Wavewin” koji je dostupan u okviru softverskog paketa PCM 600. Snimci prelaznih procesa se čuvaju u standardnom COMTRADE (uobičajeni format za razmjenu podataka prelaznih procesa u EES-u) formatu [93], u vidu fajlova tipa .CFG i .DAT. Fajlovi snimaka prelaznih procesa se zatim na prenosnom računaru konvertuju u dobro poznati .CSV format zbog dalje obrade primjenom programa Microsoft Excel. Zavisno od frekvencije odabiranja releja formira se posebna kolona sa vremenskim trenucima koji odgovaraju odbircima snimljenih signala. Potom se vrši prilagođenje vremenskih osa svih snimaka u odnosu na istu referentnu tačku (trenutak detekcije kvara). Nakon prethodnih prilagođenja, snimci se čuvaju u memoriji računara u formatu .XLSX, iz koga se kasnije učitavaju u radnu memoriju softverskog paketa MATLAB R2014a.

Za svaki snimak prelaznog procesa u radnoj memoriji softverskog paketa MATLAB R2014a formira se po sedam promjenljivih veličina (šest struja faznih provodnika i vrijeme). Promjenljive se potom aktiviraju u simulacionom modulu Simulink, pomoću blokova „From Workspace”, čime se postiže rekonstrukcija vremenskih promjena signala struja u toku prelaznih procesa snimljenih od strane releja RET 620 i RET 650. Zatim se primjenjuje interaktivni simulator relejne zaštite, ranije objašnjen u odjeljku 2.4, u okviru koga je implementiran algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu.

Primjenom interaktivnog simulatora relejne zaštite indirektno se ispituje rad algoritma za slučajevne kratkih spojeva na eksperimentalnoj šemi.

6.3 Analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja

Sa osnovnim ciljem ispitivanja osjetljivosti i selektivnosti algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova strujnih signala za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu izvršeno je 10 eksperimentalnih testova različitih kratkih spojeva na fizičkom modelu DNV-a. Na samom početku analize neophodno je utvrditi vrijednost praga reagovanja ispitivanog algoritma, pa se u prvom eksperimentalnom testu pravi troljni kratak spoj (ABC) na sabirnicama (spojevima) neposredno iza fizičkog modela DNV-a. Relej RET 620, povezan na početku fizičkog modela DNV-a, se koristi za detekciju ovog kvara i snimanje odgovarajućeg prelaznog procesa. Kako je razmatrani kvar lociran izvan fizičkog modela DNV-a, da bi se osigurala osjetljivost releja RET 620, aktiviran je algoritam prekostrujne zaštite umjesto algoritma diferencijalne zaštite, sa vrijednošću podešene struje reagovanja od $1.3I_n$. Rezultati ovog testa su prikazani na Sl.6.3.1.



Sl.6.3.1 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj trolpnog kratkog spoja ABC na sabirnicama (spojevima) iza fizičkog modela DNV-a: (a.1) struje na početku fizičkog modela DNV-a prije i posle kvara; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R1 algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja

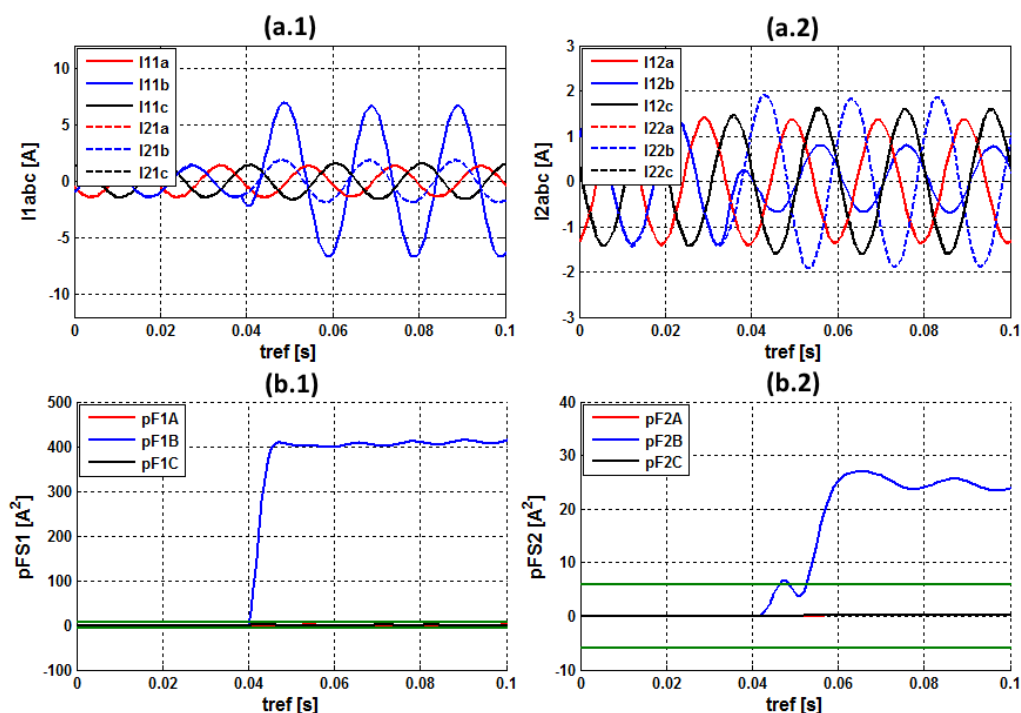
Na osnovu rezultata sa grafika (a.1) na Sl.6.3.1 (moguće je zapaziti da je troljni kratak spoj nastao u referentnom trenutku 0,04 s i da amplitude svih šest struja na početku fizičkog modela DNV-a dostižu vrijednost od oko 3 A. Vrijednosti svih istofaznih struja paralelnih vodova su približno jednake, jer je kvar nastao izvan fizičkog modela DNV-a. Ipak, usljed malih razlika u vrijednostima impedansi paralelnih vodova pokazatelji kvara dif. releja R1 algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova struja imaju vrijednosti različite od nule, kao što se može vidjeti sa

grafika (a.2) na Sl.6.3.1. Na osnovu maksimalnih vrijednosti pokazatelja kvara usvojena je vrijednost praga reagovanja $pragFS = 6 A^2$, prikazana zelenom linijom na grafiku (a.2). Ista vrijednost praga reagovanja je usvojena i za pokazatelje dif. releja R2, koji je ispitivan na osnovu snimaka sa releja RET 650, postavljenog na kraju fizičkog modela DNV-a.

Nakon utvrđivanja vrijednosti praga reagovanja, algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova struja je ispitivan za sljedeće slučajeve eksperimentalnih testova kratkih spojeva:

- (T.1) kvar Bz na kraju prve dionice voda 1 (50 km od početnih sabirnica),
- (T.2) kvarovi ABz i BC na kraju prve dionice voda 1 (50 km od početnih sabirnica),
- (T.3) kvarovi Az i AB na kraju druge dionice voda 1 (100 km od početnih sabirnica),
- (T.4) kvarovi Bz i ACz na kraju prve dionice voda 2 (50 km od početnih sabirnica),
- (T.5) kvarovi Cz i ABC na kraju druge dionice voda 2 (100 km od početnih sabirnica),

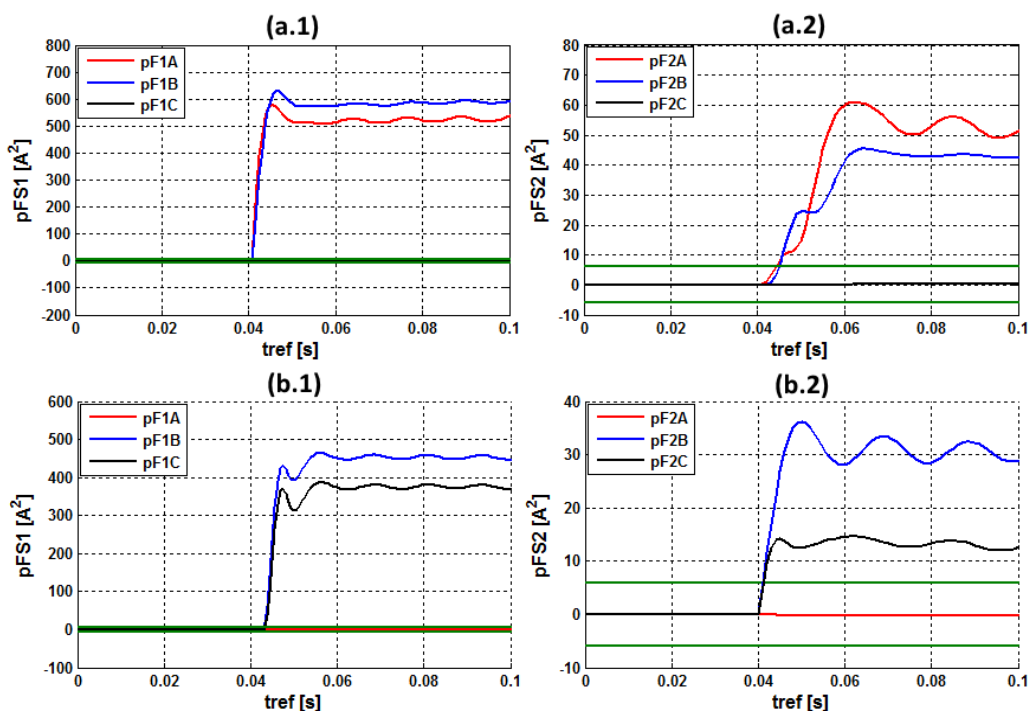
Na Sl.6.3.2 prikazani su rezultati ispitivanja za slučaj testa (T.1).



Sl.6.3.2 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.1) – kvar Bz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica: (a.1) struje na početku fizičkog modela DNV-a; (a.2) struje na kraju fizičkog modela DNV-a; (b.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (b.2) pokazatelji kvara dif. releja R2

Sa grafika (a.1), prikazanog na Sl.6.3.2, može se zapaziti da je amplituda struje faze B voda 1 značajno veća od amplitude faze B voda 2, nakon nastanka kvara, čime su ispunjeni uslovi za reagovanje dif. releja R1. Na osnovu grafika (a.2), nakon nastanka kvara, može se zapaziti značajna promjena faznog stava struje faze B voda 1 u odnosu na struju iste faze voda 2, čime su ispunjeni uslovi za reagovanje dif. releja R2. Prethodni zaključci su potvrđeni na osnovu rezultata sa grafika (b.1) i (b.2), gdje pokazatelji oba dif. releja R1 i R2 dostižu vrijednosti veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Pozitivne vrijednosti pokazatelja ukazuju na činjenicu da je kvar lociran na vodu 1. Ispitivani algoritam se pokazao kao osjetljiv i selektivan u slučaju analiziranog eksperimentalnog testa.

U svim ostalim testovima biće prikazane samo promjene u vremenu pokazatelja kvara ispitivanog algoritma. Na Sl.6.3.3 prikazani su rezultati ispitivanja za slučaj testa (T.2).

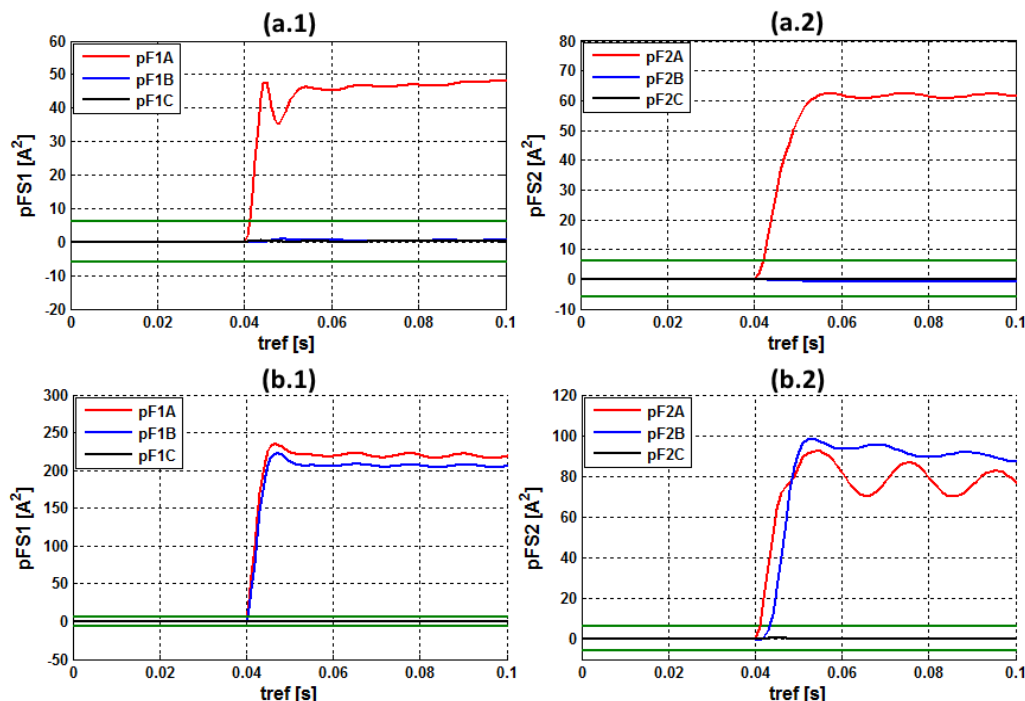


Sl.6.3.3 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.2): (a) kvar ABz na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar BC na vodu 1, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2

Prema rezultatima sa grafika na Sl.6.3.3 moguće je zaključiti da je ispitivani algoritam osjetljiv u oba slučaja kvara ABz i BC, jer pokazatelji kvara dostižu

vrijednosti veće od podešene vrijednosti praga reagovanja. Algoritam je takođe i selektivan, jer su tačno detektovani vod na kome je kvar i faze obuhvaćene kvarom.

Na Sl.6.3.4 prikazani su rezultati ispitivanja za slučaj testa (T.3).

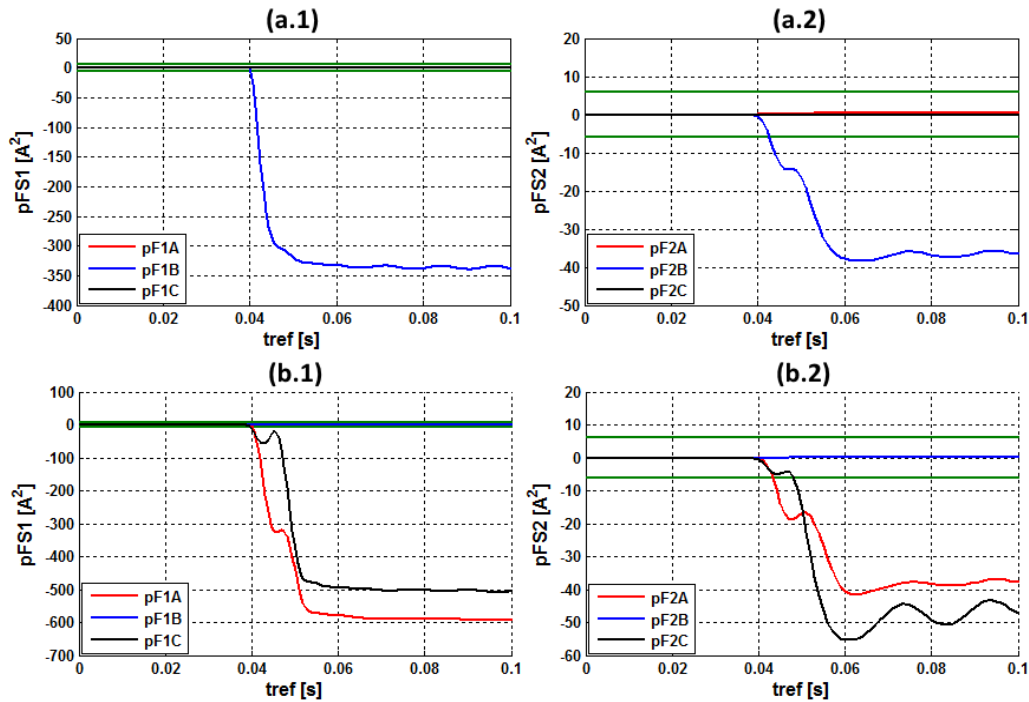


Sl.6.3.4 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.3): (a) kvar Az na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar AB na vodu 1, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2

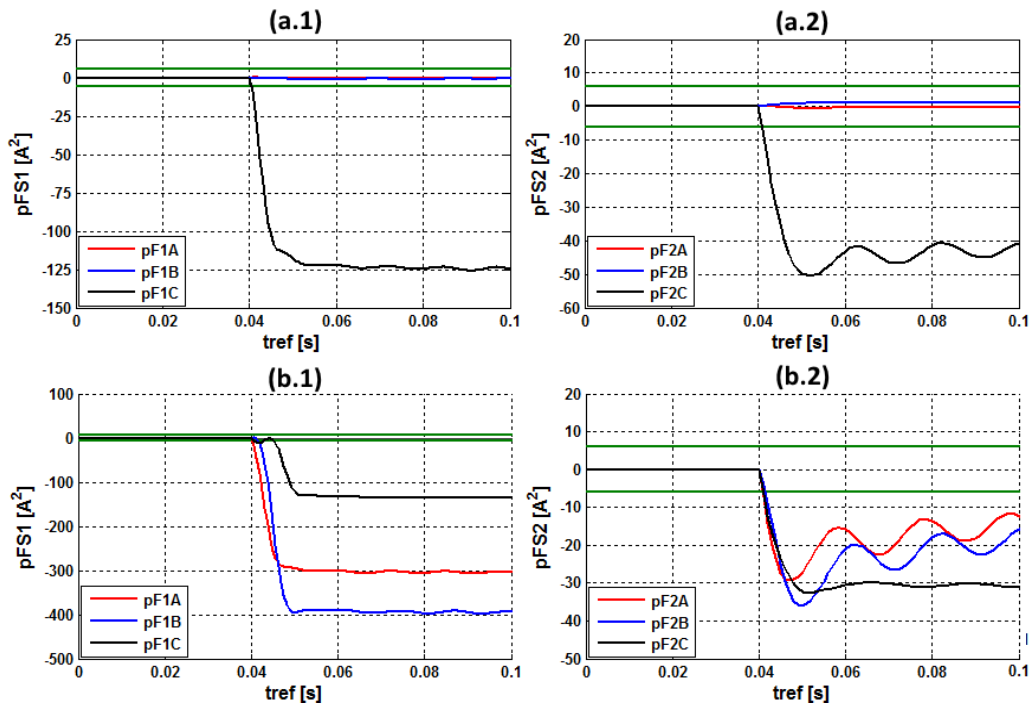
Na osnovu rezultata prikazanih na graficima sa Sl.6.3.4 moguće je zaključiti da je ispitivani algoritam osjetljiv i selektivan u oba slučaja kvara Az i AB na kraju druge dionice, 100 km od početnih i 50 km od završnih sabirnica. Svi pokazatelji kvara dostižu značajno veće vrijednosti od podešene vrijednosti praga reagovanja.

Na Sl.6.3.5 i Sl.6.3.6 prikazani su rezultati ispitivanja za slučajeve testova (T.4) i (T.5) koji obuhvataju dvije lokacije i četiri tipa kvara na vodu 2.

Analizom rezultata prikazanih na graficima sa Sl.6.3.5 i Sl.6.3.6 dolazi se do istog zaključka kao u svim prethodnim slučajevima ispitivanja algoritma za kvarove na vodu 1. Ispitivani algoritam je uspješno prošao oba analizirana testa u pogledu osjetljivosti i selektivnosti. Svi pokazatelji kvarova dostižu vrijednosti veće od podešene vrijednosti praga reagovanja, dok je njihov znak negativan što ukazuje na selektivno određivanje voda u kvaru (vod 2). Takođe, sve faze obuhvaćene kvarom su selektivno određene.



Sl.6.3.5 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.4): (a) kvar Bz na vodu 2, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar ACz na vodu 2, 50 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2



Sl.6.3.6 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja za slučaj testa (T.5): (a) kvar Cz na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2; (b) kvar ABC na vodu 2, 100 km od početnih sabirnica – (a.1) pokazatelji kvara dif. releja R1; (a.2) pokazatelji kvara dif. releja R2

7. ZAKLJUČAK

U okviru ove doktorske disertacije ispitivani su postojeći i razvijeni novi algoritmi za poprečnu diferencijalnu zaštitu dvostrukih nadzemnih vodova. Da bi bilo omogućeno temeljno ispitivanje rada analiziranih algoritama, razvijen je i implementiran softverski precizan matematički model dvostrukog voda, kao i interaktivni simulator rada relejne zaštite. Detaljno prikazana procedura i softverski proračun podužnih električnih parametara, analiza i modelovanje uticaja različitih transpozicionih sistema na simetrične i asimetrične režime rada dvostrukog voda i realizacija grupe programa interaktivnog simulatora rada relejne zaštite predstavljaju posebne doprinose ove disertacije. Kroz precizno modelovanje dvostrukog voda i interaktivnog rada relejne zaštite, napravljeno je prilagodljivo softversko simulaciono okruženje, koje uz manje korekcije može biti primijenjeno za ispitivanje rada algoritama proizvoljnog koncepta relejne zaštite proizvoljnog elementa elektroenergetskog sistema.

Ispitivanjem i analizom rada algoritama tradicionalnih relejnih zaštita dvostrukog voda ostvaren je detaljan uvid u njihove najvažnije osobine i ograničenja, što predstavlja veoma korisnu podlogu za razvoj novih poboljšanih algoritama. Pokazani su nedostaci primjene koncepta distantne zaštite i odgovarajuće prednosti primjene koncepta usmjerene poprečne diferencijalne zaštite za slučaj dvostrukog voda. Predložena je i metoda za određivanje pragova reagovanja algoritama poprečne diferencijalne zaštite, zasnovana na primjeni koeficijenata koji uvažavaju fizikalne razlike između paralelnih vodova i odgovarajuću sigurnosnu rezervu. Ova metoda se odlikuje jednostavnošću i moguće ju je primjenjivati univerzalno za sve algoritme poprečne diferencijalne zaštite. Ispitivanje rada usmjerene poprečne diferencijalne zaštite nedvosmisleno je potvrdilo osjetljivost i selektivnost ovog koncepta u slučajevima dvostrano i jednostrano napajanog dvostrukog voda. Primjena naponskih signala, kao referentnih veličina za određivanje smjera struje kvara, predstavlja tradicionalan i provjeren pristup koji koriste mnogi koncepti usmjerenih relejnih zaštita. Prethodna konstatacija je potvrđena i u ovoj analizi pri ispitivanju koncepta usmjerene poprečne diferencijalne zaštite. Posebna teorijska analiza, posvećena mrtvoj zoni reagovanja, koja predstavlja osnovni nedostatak ovog koncepta zaštite, nedvosmisleno pokazuje zavisnost dužine mrtve zone od podešene vrijednosti praga reagovanja.

Centralni dio analize rada, poprečne diferencijalne zaštite posvećen je algoritmima zasnovanima na strujnim signalima, čija je osnovna prednost ostvarenje selektivnosti zaštite bez upotrebe naponskih signala. Teorijski principi rada dva najpoznatija algoritma, zasnovana na priraštajima strujnih signala, detaljno su objašnjena, čime je kompletiran koristan pregled postojećih koncepata relejne zaštite dvostrukog voda. Ovi algoritmi su u okviru komparativne analize detaljno ispitani za slučaj dvostrano napajanog dvostrukog voda i data je posebna diskusija posvećena vrednovanju dobijenih rezultata.

Za slučaj jednostrano napajanog dvostrukog voda razvijen je i predložen novi algoritam zasnovan na promjeni faznih uglova strujnih signala, koji pripada konceptu usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, što je jedan od dva najvažnija doprinosa ove doktorske disertacije. Suština predložene ideje je predstavljena kroz detaljan opis teorijskih osnova, principa rada i softverske implementacije algoritma. U nastavku istraživanja izvršena je komparativna analiza predloženog i postojećeg algoritma usmjerene poprečne diferencijalne zaštite sa osnovnim ciljem ispitivanja najvažnijih osobina zaštite: osjetljivosti, selektivnosti i brzine reagovanja. Najvažniji rezultati ispitivanja su vrednovani kroz posebnu diskusiju, gdje su istaknute prednosti predloženog algoritma u pogledu osjetljivosti sa strane diferencijalnog releja R2 (postavljenog na kraju dionice dvostrukog voda). Osjetljivost algoritama je sa posebnom pažnjom ispitivana za slučajeve kvarova kada je na završne sabirnice priključena mala potrošnja, pri čemu je takođe uočena prednost predloženog algoritma. Oba ispitivana algoritma su se pokazala kao neosjetljiva pri kvarovima na neopterećenom dvostrukom vodu (slučaj praznog hoda). Kao rješenje prethodnog problema predložena je nadogradnja predloženog algoritma u vidu koncepta zaključavanja memorijskih registara signala struja. Ispitivanjem rada predloženog algoritma, koji je nadograđen prethodnim konceptom, utvrđeno je značajno povećanje osjetljivosti zaštite u slučajevima kvarova na neopterećenom dvostrukom vodu.

Drugi najvažniji doprinos ove doktorske disertacije je sadržan u razvoju algoritma zasnovanog na strujnim signalima za usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu koja obezbjeđuje selektivnost prilikom primjene tehnike jednofaznog automatskog ponovnog uključanja. Privremenim isključenjem faze u kvaru jednog od paralelnih vodova dolazi do gubitka referentne veličine za određivanje smjera struje kvara u konceptu algoritama

zasnovanih na strujnim signalima, zbog čega su oni u svojoj izvornoj formi neprimjenljivi. Novi algoritam u ovakvim slučajevima koristi istofaznu struju paralelnog voda na kome nije nastao kvar kao referentnu veličinu za određivanje smjera struje kvara, što predstavlja suštinu razvijenog koncepta. Pokazatelji uspješnosti jednofaznog automatskog ponovnog uključanja predloženog algoritma mogu biti primijenjeni u slučajevima dvostrano i jednostrano napajano dvostrukog voda. Primjenom interaktivnog simulatora rada relejne zaštite novi algoritam je detaljno ispitan za različite slučajeve prolaznih i trajnih kvarova na dvostrukom vodu i dobijeni rezultati potvrđuju njegovu osjetljivost i selektivnost. U okviru analize predložena je i metoda za određivanje podešenih vrijednosti pragova reagovanja novog algoritma, koji se koriste u svrhu razlikovanja prolaznih i trajnih kvarova. Razvoj algoritma, za selektivnu usmjerenu poprečnu diferencijalnu zaštitu sa jednofaznim ponovnim automatskim uključanjem, predstavlja važan korak za mogućnost praktične primjene ovog koncepta zaštite u visokonaponskim mrežama.

Ranije razvijeni algoritam, zasnovan na promjenama faznih uglova strujnih signala, je prilagođen slučaju zaštite dvostrukog voda kada je samo jedan od paralelnih vodova u pogonu, što predstavlja dodatni doprinos ove disertacije. Novi koncept, zasnovan na kombinaciji neusmjerenog elementa prekostrujne zaštite sa definisanim vremenom reagovanja i pokazatelja promjene faznih uglova struja predloženog algoritma, pokazao se kao dobra alternativa klasičnoj usmjerenoj prekostrujnoj zaštiti, koja koristi naponske signale u slučaju samo jednog paralelnog voda u pogonu. Detaljna simulaciona ispitivanja su potvrdila osjetljivost i selektivnost predloženog koncepta.

Sa osnovnim ciljem dodatne potvrde osjetljivosti i selektivnosti algoritma zasnovanog na promjenama faznih uglova strujnih signala za radijalne dvostruke vodove, u završnom dijelu disertacije, realizovana je eksperimentalna šema za laboratorijska ispitivanja. U okviru šeme korišten je fizički model dvostrukog voda na kome su vršena ispitivanja predloženog algoritma za različite slučajeve kratkih spojeva. Eksperimentalna ispitivanja su dodatno potvrdila osjetljivost i selektivnost predloženog algoritma. Kao poseban doprinos, izdvaja se veliki potencijal razvijene eksperimentalne šeme u oblasti buduće edukacije studenata svih ciklusa studija. Šema koristi realne uređaje relejne zaštite i može jednostavno biti prilagođena za potrebe ispitivanja proizvoljnih algoritama relejne zaštite nadzemnih vodova.

U konačnici se može formirati i kratak pregled osnovnih doprinosa ove doktorske disertacije:

- Predloženim algoritamskim rješenjem unaprijeđena je osjetljivost usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, zasnovane na signalima struja, u slučaju radijalnog DNV-a i dato je rješenje za problem neosjetljivosti zaštite pri kvarovima iz režima praznog hoda.
- Razvijen je poseban algoritam koji omogućava selektivan rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, zasnovane na signalima struja, u slučajevima primjene jednofaznog APU-a. Predloženo rješenje je primjenjivo u slučajevima dvostrano napajanog i radijalnog DNV-a.
- Ponuđeno je i rješenje za selektivan rad usmjerene poprečne diferencijalne zaštite, zasnovane na signalima struja, kada je samo jedan od dva paralelna voda u pogonu. Kao poseban doprinos može se izdvojiti prijedlog metodologije za određivanje pragova reagovanja poprečne diferencijalne zaštite.
- Dat je koristan pregled algoritama relejne zaštite DNV-a i jasno su predstavljena njihova ograničenja u radu, čime je otvorena mogućnost za razvoj novih, boljih rješenja.
- Realizovani su interaktivni simulator rada relejne zaštite i prilagodljiva eksperimentalna šema za laboratorijska ispitivanja, čime su stvoreni uslovi za napredna ispitivanja postojećih i novih algoritama relejne zaštite nadzemnih vodova.
- Na inovativan način je predstavljen postupak modelovanja DNV-a, počevši od električnog proračuna, pa do električne šeme primjenjive u simetričnim i asimetričnim režimima rada. Data je i korisna analiza uticaja različitih transpozicija DNV-a na simulirane električne signale u asimetričnim režimima rada.

Buduće istraživanje na temu obrađenu u okviru ove doktorske disertacije biće dominantno usmjereno prema razvoju novih algoritama poprečne diferencijalne relejne zaštite DNV-a u cilju smanjenja i potpune eliminacije mrtve zone reagovanja.

LITERATURA

- [1] W. Carpenter, "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines," *IEEE Std C*, vol. 2015, Dec. 2015, pp. 1–141.
- [2] "North West Coast Connections Project - Route Corridor Stage Consultation Feedback Report," National Grid, Jun. 2015, [Online]. Available: <http://www.northwestcoastconnections.com/docs/>
- [3] H. M. Ismail, "Effect of tower displacement of parallel transmission lines on the magnetic field distribution," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 1705–1712, Oct. 2008.
- [4] G. N. Alexandrov and M. M. Dardeer, "500 kV transmission system in Egypt solving problem of voltage regulation by means of controlled shunt reactor transformer type (CSRT)," in *2008 12th International Middle East Power System Conference, MEPCON 2008*, 2008, pp. 178–182.
- [5] A. Apostolov et al., "Protection of double circuit transmission lines," in *Proceedings of 60th Annual Conference on Protective Relay Engineers*, 2007, pp. 85–101.
- [6] A. G. Jongepier and L. van der Sluis, "Adaptive distance protection of a double-circuit line," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 3, pp. 1289-1297, Jul. 1994.
- [7] A. G. Jongepier and L. van der Sluis, "Adaptive distance protection of double-circuit lines using artificial neural networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 97-105, Jan. 1997.
- [8] Y. Hu et al., "An adaptive scheme for parallel-line distance protection," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 1, pp. 105-110, Jan. 2002.
- [9] M. Biswal, "Adaptive distance relay algorithm for double circuit line with series compensation," *Measurement*, vol. 53, pp. 206-214, Jul. 2014.
- [10] E. B. Wedmore, "Automatic protective switchgear for alternating-current systems," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, pp. 157-168, 1915.
- [11] J. L. Suonan et al., "WXB-21 double circuit line microprocessor protection – cross differential protection principle," *Electric Automation Equipment*, no.2, 1991.
- [12] Y. Z. Huang and C. G. Li, "Research and application of microprocessor based cross differential protection device," *Tsinghua University Press*, vol. 37, no.1, pp. 45-48, 1997.

- [13] S. L. Chen and Y. F. Wu, "Application of a microprocessor based cross differential protection scheme for parallel transmission lines," *Relay*, vol. 27, no.5, pp. 33-34, 1999.
- [14] M. I. Gilany et al., "A digital protection technique for parallel transmission lines using a single relay at each end," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 1, pp. 118-125, Jan. 1992.
- [15] M. I. Gilany et al., "A laboratory investigation of a digital protection technique for parallel transmission lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 1, pp. 187-193, Jan. 1995.
- [16] B. Bhalja and S. Purohit, "Protection of double-circuit transmission line using superimposed current," *Electr. Pow. Compo. Sys.*, vol. 39, no. 6, pp. 590-604, Apr. 2011.
- [17] Q. P. Wang et al., "Application of percentage cross differential relay in EHV double lines," in *PowerTech2005, St. Petersburg, Russia*, 2005.
- [18] S. Bin et al., "Design of microprocessor-based transverse differential current directional protective device," *Automation of Electric Power System*, vol. 27, no.10, pp. 85-89, 2003.
- [19] M. M. Eissa and O. P. Malik, "A new digital directional transverse differential current protection technique," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 3, pp. 1285-1291, Jul. 1996.
- [20] H. G. Wang et al., "An integrated current differential protection scheme," in *2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing*, 2006, pp. 1-6.
- [21] M. Sanaye-Pasand and P. Jafarian, "Adaptive protection of parallel transmission lines using combined cross-differential and impedance-based techniques," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 3, pp. 1829-1840, Jul. 2011.
- [22] M. Forcan, „Simulacija rada poprečne diferencijalne zaštite vodova”, master rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, septembar, 2014.
- [23] M. Đurić, Z. Stojanović, *Relejna zaštita*, KIZ Centar, Beograd, 2014.
- [24] "IEEE/PSRC single phase tripping and auto reclosing of transmission lines - IEEE Committee report," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 1, pp. 182-192, Jan. 1992.
- [25] P. Jena and A. K. Pradhan, "Directional relaying during single-pole tripping using phase change in negative-sequence current," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1548-1557, Jul. 2013.

- [26] A. R. Adly et al., "A directional protection scheme during single pole tripping," *Electr Power Syst Res*, vol. 144, pp. 197-207, Mar. 2017.
- [27] B. T. Li and Y. L. Li, "Intelligent control technology of tripping and reclosing for double-circuit transmission line on the same tower," in *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010, pp. 1-5.
- [28] Y. Kong et al., "Research on reclosing scheme for parallel lines on the same tower," in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1-5.
- [29] S. Li et al., "Integrated transverse differential protection scheme for double-circuit lines on the same tower," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no 5, pp. 2161-2169, Oct. 2018.
- [30] MATLAB 2014a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, US.
- [31] J. A. Gillespie and G. Stapleton, "Improving double circuit transmission line reliability through lightning design," in *CIGRE Session 2004, Paris, France*, 2004, B2-301.
- [32] T. Miyoshi and A. Kasai, "The application and benefits of multi-phase auto-reclosing," Power System Relaying and Control Committee - Report, [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/MPAR%20PO1-01.pdf>
- [33] I. Voloh et al., "Application of the line differential protection scheme for radial transmission lines," in *69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, 2016, pp. 1-25.
- [34] Alberta Electric System Operator (AESO), "WECC Annual Progress Report," Mar. 2015, [Online]. Available: <https://www.wecc.biz/Reliability/2015-APR-AESO.pdf>
- [35] Z. Q. Bo et al., "Adaptive noncommunication protection of double-circuit line systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 1, pp. 43-49, Jan. 2003.
- [36] P. H. Pretorius, "On particular aspects related 400 KV transmission," 2012. [Online]. Available: <http://www.eskom.co.za/OurCompany/SustainableDevelopment/EnvironmentalImpactAssessments/1600/Documents>
- [37] A. N. D. Tleis, "Three-phase modelling of overhead lines and cables," in *Power Systems Modelling and Fault Analysis*, 1st ed., UK: Elsevier Ltd, 2008, pp. 74-200.
- [38] MathWorks, power_lineparam, 2019. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/power_lineparam.html
- [39] J. R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return," *Bell Systems Technical Journal*, vol. 5, pp. 539-554, 1926.

- [40] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 1027-1140, Jul. 1918.
- [41] M. Đurić, *Elementi EES-a*, Beopres, Beograd, 2009.
- [42] T. Nazarcik and B. Rawn, "Phase current asymmetry on the double-circuit very high voltage overhead transmission line," in *17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE*, 2016.
- [43] M. Forcan, M. Banjanin and G. Vuković, „Analiza simetričnih procesa na nadzemnim vodovima u praznom hodu”, *XV međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, Jahorina*, 2016.
- [44] M. Forcan, M. Banjanin and G. Vuković, „Advanced teaching method for balanced operations of overhead transmission lines based on simulations and experiment,” *International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 55, no. 1, pp. 14–30, 2018.
- [45] S. Milojković, *Teorija električnih kola*, Svjetlost, Sarajevo, 1989.
- [46] H. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiple networks," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-88, no. 4, Apr. 1969.
- [47] *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations*, IEC Standard 60909-2, 2008.
- [48] R. Benato et al., "Zero sequence behaviour of a double-circuit overhead line," *Electr Power Syst Res*, vol. 116, pp. 419-426, Nov. 2014.
- [49] R. Benato et al., "Determination of steady state and faulty regimes of overhead lines by means of multiconductor cell analysis (MCA)," *Energies*, vol. 5, pp. 2771-2793, 2012.
- [50] R. Benato, "Multiconductor analysis of underground power transmission systems: EHV AC cables," *Electr Power Syst Res*, vol. 79, pp. 27-38, Jan. 2009.
- [51] M. Forcan, Z. Stojanović, „Uticaj transpozicije provodnika dvostrukog nadzemnog voda u simetričnim i nesimetričnim režimima rada”, *Časopis Energija (Energetika)*, Zlatibor, mart 2017.
- [52] P.C. Bell and R.M. O’Keefe, "Visual interactive simulation: A methodological perspective," *Ann Oper Res*, vol. 53, no. 1, pp. 321- 342, Dec. 1994.
- [53] A. Antoniou, *Digital Filters: Analysis, Design, and Applications. 2nd ed.* NY: McGraw-Hill, 1993.

- [54] G. Bianchi and R. Sorrentino, *Electronic Filter Simulation & Design*. NY: McGraw-Hill, 2007.
- [55] M. D. Lutovac, D. V. Tomic, et al., *Filter Design for Signal Processing using MATLAB and Mathematica*. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [56] M. Nezami, "Performance assessment of baseband algorithms for direct conversion tactical software defined receivers: I/Q imbalance correction, image rejection, DC removal, and channelization," in *MILCOM*, 2002.
- [57] P. Bogacki, L. F. Shampine, "A 3(2) pair of Runge–Kutta formulas," *Applied Mathematics Letters*, vol. 2, pp. 321–325, 1989.
- [58] D. Solovev, "Selection of Digital Filter for Microprocessor Protection Relays," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 1498-1512, 2018.
- [59] W. Rebizant, J. Szafran and A. Wiszniewski, *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [60] S. A. Skogstad, S. Holm and M. Høvin, "Digital IIR filters with minimal group delay for real-time applications," *2012 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, Cairo, 2012, pp. 1-6.
- [61] M. D. Lutovac, D. V. Tomic and B. L. Evans, *Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2001.
- [62] W. Cauer, *Synthesis of Linear Communication Networks*, McGraw-Hill, New York, 1958.
- [63] S. J. Orfanidis, *Introduction to Signal Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [64] J. Lázaro, J. F. Minambres, M. A. Zorrozuza, B. Larrea, M. Sánchez, I. Antiza, "Newquick-convergence invariant digital filter for phasor estimation," *Electr Power Syst Res*, vol. 79, pp. 705–713, 2009.
- [65] M. Forcan, Z. Stojanović, „Distantna zaštita dvostrukih nadzemnih vodova”, *XVI međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, Jahorina*, 2017.
- [66] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying: Third Edition*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [67] W. A. Lewis and L. S. Tippet, "Fundamental basis for distance relaying," *Electrical Engineering*, vol. 50, pp. 288-293, 1931.

- [68] W. A. Lewis and L. S. Tippet, "Fundamental basis for distance relaying on 3-phase system," *AIEE Transactions*, vol. 66, pp 694-709, 1947.
- [69] A. G. Phadke and L. Jihuang, "A New Computer Based Integrated Distance Relay For Parallel Transmission Lines," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 2, pp. 445-452, Feb. 1985.
- [70] Q. P. Wang et al., "Protection Scheme of Cross Differential Relay for Double Transmission Lines," in *IEEE PES General Meeting, San Francisco*, 2005.
- [71] M. Forcan and Z. Stojanović, "An algorithm for sensitive directional transverse differential protection with no voltage inputs," *Electr Power Syst Res*, vol. 137, pp. 86-95, Aug. 2016.
- [72] M. Forcan, Z. Stojanović, „Osjetljiva usmjerena poprečna diferencijalna zaštita vodova bez naponskih ulaza”, 32. *Savetovanje za velike električne mreže CIGRE, Zlatibor*, 2015.
- [73] J. A. Jiang et al., "Digital protective relaying algorithms for double circuit lines protection," in *International Conference on Power System Technology, PowerCon*, 2002, pp. 2551-2555.
- [74] M. S. Jones et al., "A nonpilot phase selector based on superimposed components for protection of double circuit lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, pp. 1439-1444, Oct. 1997.
- [75] P. Jena and A. K. Pradhan, "An integrated approach for directional relaying of the double-circuit line," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 3, pp. 1783-1792, Jul. 2011.
- [76] A. H. Osman and O. P. Malik, "Protection of parallel transmission lines using wavelet transform," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 49-55, Jan. 2004.
- [77] M. Forcan, Z. Stojanović, „Mrtva zona poprečne diferencijalne zaštite dvostrukih nadzemnih vodova,” *XVII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, Jahorina*, 2018.
- [78] M. Forcan, Z. Stojanović, „Usmjerena poprečna diferencijalna zaštita vodova bez naponskih ulaza,” *XIII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH, Jahorina*, 2014.
- [79] A. K. Pradhan et al., "Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 4, pp. 2065 -2071, Oct. 2007.

- [80] A. A. Girgis and T. L. D. Hwang, "Optimal estimation of voltage phasors and frequency deviation using linear and non-linear Kalman filtering: Theory and limitations," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, no.10, pp. 2943-2951, Oct. 1984.
- [81] Z. Stojanovic and M. Djuric, "The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator," *Electr Power Syst Res*, vol. 81, no. 2, pp. 377-383, Feb. 2011.
- [82] Z. Stojanovic and M. Djurić, "An algorithm for directional earth-fault relay with no voltage inputs," *Electr Power Syst Res*, vol. 96, pp. 144-149, Feb. 2013.
- [83] M. Đurić, V. Terzija, Z. Radojević, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, S. Zubić, V. Bajić, *Algoritmi za digitalne relejne zaštite*, ETA, Beograd, 2012.
- [84] M. Forcan and Z. Stojanovic, "Transverse differential protection scheme for double-circuit lines with single-pole tripping and reclosing," *Int Trans Electr Energ Syst*. 2019; e12152. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12152>
- [85] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications, Fourth Edition*. CRC Press, 2014.
- [86] J. Horak, "Directional overcurrent relaying (67) concepts," in *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX*, 2006.
- [87] CIGRE Subcommittee 33-02 Working Group 02, "Guidelines for representation of network elements when calculating transients," Report, 1990.
- [88] *Computational guide to insulation coordination and modeling of electrical networks*, International Standard IEC 60071-4, 2004.
- [89] V. Janković, „Fizički model nadzemnog voda”, diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 19xx.
- [90] ABB, *620 series: Technical manual*. 2019. [Online]. Available: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS757644&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [91] ABB, *Transformer protection RET650: Technical manual*. 2013. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/07c94698325a4510bb21b545f76f8359/>
- [92] ABB, *Protection and Control IED Manager PCM600: Getting Started Guide*. 2018. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/938d6c3e12fd44cf89082bdbb48a7b15/1MRS757866-C-15352.pdf>
- [93] *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, IEEE Standard C37.111, 1991.

PRILOZI

Prilog 1 - Podužni električni parametri DNV-a sa Sl.2.2.1

Matrica proračunskih podužnih otpornosti:

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} 0.077 & 0.060 & 0.059 & 0.063 & 0.060 & 0.059 \\ 0.060 & 0.072 & 0.057 & 0.060 & 0.058 & 0.057 \\ 0.059 & 0.057 & 0.071 & 0.059 & 0.057 & 0.057 \\ 0.063 & 0.060 & 0.059 & 0.077 & 0.060 & 0.059 \\ 0.060 & 0.058 & 0.057 & 0.060 & 0.072 & 0.057 \\ 0.059 & 0.057 & 0.057 & 0.059 & 0.057 & 0.071 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right].$$

Matrica proračunskih podužnih induktivnosti:

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} 1.498 & 0.712 & 0.596 & 0.663 & 0.590 & 0.548 \\ 0.712 & 1.499 & 0.749 & 0.590 & 0.588 & 0.585 \\ 0.596 & 0.749 & 1.496 & 0.548 & 0.585 & 0.625 \\ 0.663 & 0.590 & 0.548 & 1.497 & 0.712 & 0.596 \\ 0.590 & 0.588 & 0.585 & 0.712 & 1.499 & 0.749 \\ 0.548 & 0.585 & 0.625 & 0.596 & 0.749 & 1.496 \end{bmatrix} \left[\frac{\text{mH}}{\text{km}} \right].$$

Matrica proračunskih podužnih kapacitivnosti:

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 12.07 & -2.470 & -0.748 & -1.816 & -0.795 & -0.415 \\ -2.470 & 12.50 & -2.734 & -0.795 & -0.687 & -0.592 \\ -0.748 & -2.734 & 12.92 & -0.415 & -0.592 & -0.914 \\ -1.816 & -0.795 & -0.415 & 12.07 & -2.470 & -0.748 \\ -0.795 & -0.687 & -0.592 & -2.470 & 12.50 & -2.734 \\ -0.415 & -0.592 & -0.914 & -0.748 & -2.734 & 12.92 \end{bmatrix} \left[\frac{\text{nF}}{\text{km}} \right].$$

Podužni električni parametri DNV-a sa Sl.2.2.1 u domenu simetričnih komponenti uz pretpostavku „potpune“ transpozicije provodnika:

$$R_{d1} = R_{d2} = R_{i1} = R_{i2} = 0.0143 \Omega/\text{km}, R_{01} = R_{02} = 0.191 \Omega/\text{km}, R_{0m} = 0.176 \Omega/\text{km},$$

$$L_{d1} = L_{d2} = L_{i1} = L_{i2} = 0.812 \text{ mH}/\text{km}, L_{01} = L_{02} = 2.87 \text{ mH}/\text{km}, L_{0m} = 1.77 \text{ mH}/\text{km},$$

$$C_{d1} = C_{d2} = C_{i1} = C_{i2} = 14.48 \text{ nF}/\text{km}, C_{01} = C_{02} = 8.53 \text{ nF}/\text{km}, C_{0m} = -2.34 \text{ nF}/\text{km}.$$

Prilog 2 - Programski kod algoritma zasnovanog na promjeni faznih uglova signala struja za diferencijalni relej R1

```
function y = AlgorithmsR1_PhD1(x)

% Definisane dimenzije nizova podataka m
% Perioda odabiranja Tod = 0.25 ms --- m = Ts / Tod = 20/0.25 = 80

persistent m

% Definisane nizova podataka za originalne ulazne signale

persistent reg_i11A reg_i11B reg_i11C
persistent reg_i21A reg_i21B reg_i21C

% Definisane pokazatelja algoritama relejne zastite

persistent pok11A_Forcan pok11B_Forcan pok11C_Forcan
persistent pok21A_Forcan pok21B_Forcan pok21C_Forcan
persistent pokA_Forcan pokB_Forcan pokC_Forcan

% Definisane pomocnih registara za algoritam

persistent reg_i11A_pom reg_i11B_pom reg_i11C_pom reg_i21A_pom
reg_i21B_pom reg_i21C_pom

% Definisane brojac za stabilizaciju pocetnih vrijednosti
pokazatelja

persistent brojac

% Pocetna inicijalizacija parametara (upravljana step funkcijom)

if x(1)==1

    m=80;

    % Struje na pocetku voda 1

    reg_i11A = zeros(1,m+1);
    reg_i11B = zeros(1,m+1);
    reg_i11C = zeros(1,m+1);

    % Struje na pocetku voda 2

    reg_i21A = zeros(1,m+1);
    reg_i21B = zeros(1,m+1);
    reg_i21C = zeros(1,m+1);

    % Inicijalizacija pomocnih registara za algoritam

    reg_i11A_pom = zeros(1,m/2);
    reg_i11B_pom = zeros(1,m/2);
    reg_i11C_pom = zeros(1,m/2);
```

```

reg_i21A_pom = zeros(1,m/2);
reg_i21B_pom = zeros(1,m/2);
reg_i21C_pom = zeros(1,m/2);

% Inicijalizacija pocetne vrijednosti brojaca

brojac = 0;

end

% Unos novih odbiraka

% Struje na pocetku voda 1

reg_i11A(1:m)=reg_i11A(2:m+1);
reg_i11A(m+1)=x(1);

reg_i11B(1:m)=reg_i11B(2:m+1);
reg_i11B(m+1)=x(2);

reg_i11C(1:m)=reg_i11C(2:m+1);
reg_i11C(m+1)=x(3);

% Struje na pocetku voda 2

reg_i21A(1:m)=reg_i21A(2:m+1);
reg_i21A(m+1)=x(4);

reg_i21B(1:m)=reg_i21B(2:m+1);
reg_i21B(m+1)=x(5);

reg_i21C(1:m)=reg_i21C(2:m+1);
reg_i21C(m+1)=x(6);

% Implementacija algoritama relejne zastite

reg_i11A_pom(1:m/2-1)=reg_i11A_pom(2:m/2);
reg_i11A_pom(m/2) = reg_i11A(m) *reg_i11A(m-m/4);

reg_i11B_pom(1:m/2-1)=reg_i11B_pom(2:m/2);
reg_i11B_pom(m/2) = reg_i11B(m) *reg_i11B(m-m/4);

reg_i11C_pom(1:m/2-1)=reg_i11C_pom(2:m/2);
reg_i11C_pom(m/2) = reg_i11C(m) *reg_i11C(m-m/4);

reg_i21A_pom(1:m/2-1)=reg_i21A_pom(2:m/2);
reg_i21A_pom(m/2) = reg_i21A(m) *reg_i21A(m-m/4);

reg_i21B_pom(1:m/2-1)=reg_i21B_pom(2:m/2);
reg_i21B_pom(m/2) = reg_i21B(m) *reg_i21B(m-m/4);

reg_i21C_pom(1:m/2-1)=reg_i21C_pom(2:m/2);
reg_i21C_pom(m/2) = reg_i21C(m) *reg_i21C(m-m/4);

```

```

pok11A_Forcan = sum(reg_i11A_pom);
pok11B_Forcan = sum(reg_i11B_pom);
pok11C_Forcan = sum(reg_i11C_pom);

pok21A_Forcan = sum(reg_i21A_pom);
pok21B_Forcan = sum(reg_i21B_pom);
pok21C_Forcan = sum(reg_i21C_pom);

pokA_Forcan = pokA_Forcan + (pok11A_Forcan - pok21A_Forcan);
pokB_Forcan = pokB_Forcan + (pok11B_Forcan - pok21B_Forcan);
pokC_Forcan = pokC_Forcan + (pok11C_Forcan - pok21C_Forcan);

% Prepododavanje vrijednosti pokazatelja na vrijednost nula na pocetku
% simulacije

if (brojac < (10*m/2))

pokA_Forcan = 0;
pokB_Forcan = 0;
pokC_Forcan = 0;

end

% Redovna inkrementacija brojaca

brojac = brojac + 1;

% Izlazne promjenjive

y(1)=1;

y(2)= pokA_Forcan;
y(3)= pokB_Forcan;
y(4)= pokC_Forcan;

```

BIOGRAFSKI PODACI O AUTORU DISERTACIJE

Miodrag Ž. Forcan je rođen 31.12.1990. godine u Zvorniku. Osnovnu školu završio je 2005. godine na Palama, kao nosilac diplome „Vuk Stefanović Karadžić“. Učestvovao je na brojnim takmičenjima iz matematike, fizike i srpskog jezika, a od nagrada posebno se izdvaja treća nagrada na regionalnom takmičenju iz fizike. Srednju školu, smjer Opšta gimnazija, uspješno je završio 2009. godine, takođe na Palama, kao najbolji učenik generacije. U toku srednjoškolskog obrazovanja, učestvovao je na brojnim takmičenjima iz informatike, a od nagrada posebno se izdvaja treća nagrada na regionalnom takmičenju.

Osnovne akademske studije je upisao na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, smjer Elektroenergetika, gdje je diplomirao 2013. godine, kao najbolji student u generaciji sa prosječnom ocjenom 9.96. Za ostvareni uspjeh dobio je i posebnu plaketu Univerziteta u Istočnom Sarajevu. U toku tri studijske godine bio je stipendista Fonda „Dr Milan Jelić“. Tokom treće godine studija odradio je trosedmičnu stručnu praksu u Javnom preduzeću „Elektrodistribucija a.d. Pale“. Master studije je upisao 2013. godine, na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smjer Elektroenergetski sistemi. U toku master studija ostvario je prosječnu ocjenu 10. Master studije je završio 16.9.2014. odbranom master rada „Simulacija rada poprečne diferencijalne zaštite vodova“ sa ocjenom 10. Mentor na izradi master rada je bio prof. dr Zoran Stojanović.

Doktorske akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu upisao je školske 2014/15. godine. U toku studija položio je sve ispite predviđene studijskim planom i programom Modula za elektroenergetske mreže i sisteme, sa prosječnom ocjenom 10. Na javnoj usmenoj odbrani, pred Komisijom formiranom od strane Nastavno-naučnog vijeća Elektrotehničkog fakulteta, uspješno je položio doktorski ispit, održan 28.8.2017.

Od oktobra 2014. godine zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu u zvanju asistenta. U februaru 2015. godine izabran je u zvanje višeg asistenta na istoj visokoškolskoj ustanovi. Tokom svog rada bio je angažovan na izvođenju auditornih i laboratorijskih vježbi iz predmeta: Sistemi zaštite u elektroenergetskom sistemu, Elektromotorni pogoni, Električna mjerenja, Osnove

telekomunikacija, Osnove elektrotehnike 2, Uvod u menadžment i Menadžment u inženjerskoj praksi.

Autor je 5 naučnih članka u međunarodnim časopisima, od kojih su 4 sa SCI liste, 2 naučna članka na konferencijama međunarodnog značaja, kao i 13 naučnih članaka na konferencijama nacionalnog značaja.

Aktivno se služi engleskim jezikom.

IZJAVA O AUTORSTVU

Potpisani: Miodrag Ž. Forcan

Broj upisa: 5006/2014

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Poprečna diferencijalna zaštita dvostrukih nadzemnih vodova

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u dijelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 21.11.2019.

Potpis doktoranda



IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora: Miodrag Ž. Forcan

Broj upisa: 5006/2014

Studijski program: Elektrotehnika i računarstvo

Naslov rada: Poprečna diferencijalna zaštita dvostrukih nadzemnih vodova

Mentor: dr Zoran Stojanović, vanredni profesor

Potpisani: Miodrag Ž. Forcan

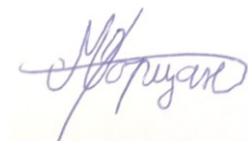
Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 21.11.2019.

Potpis doktoranda



IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Poprečna diferencijalna zaštita dvostrukih nadzemnih vodova

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu** mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

U Beogradu, 21.11.2019.

Potpis doktoranda

