



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Marko Obrenić

**PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA
SA UVAŽENIM NEIZVESNOSTIMA
PROIZVODNJE I POTROŠNJE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2020.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:														
Идентификациони број, ИБР:														
Тип документације, ТД:	Монографска публикација													
Тип записа, ТЗ:	Штампана грађа													
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација													
Аутор, АУ:	Марко Обренић													
Ментор, МН:	др Предраг Видовић													
Наслов рада, НР:	Прорачун кратких спојева са уваженим неизвесностима производње и потрошње													
Језик публикације, ЈП:	Српски													
Језик извода, ЈИ:	Српски / Енглески													
Земља публикавања, ЗП:	Србија													
Уже географско подручје, УГП:	Војводина													
Година, ГО:	2020.													
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт													
Место и адреса, МА:	Нови Сад													
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/цитата/табела/слика/графика/прилога)	10 поглавља / 130 страна / 148 цитата / 14 табела / 49 слика / 0 графика / 3 прилога													
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство													
Научна дисциплина, НД:	Електроенергетика													
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Дистрибутивне мреже, кратки спојеви, неизвесност, интервална аритметика, корелација													
УДК														
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН, Нови Сад													
Важна напомена, ВН:														
Извод, ИЗ:	<p>У дисертацији је предложен алгоритам за прорачун кратких спојева заснован на корелисаним интервалима. У савременим дистрибутивним мрежама постоје различити типови генератора који производе електричну енергију из енергије обновљивих извора. За такве генераторе, као и за потрошаче, карактеристично је то што је њихова производња и потрошња неизвесна. Предложени алгоритам у дисертацији уважава те неизвесности, као и корелације између наведених елемената. Неизвесности су моделоване интервалима и директно су уважене у предложеном алгоритму за прорачун кратких спојева. Алгоритам је првенствено развијен за прорачун кратких спојева савремених дистрибутивних мрежа са великим бројем дистрибуираних генератора и потрошача. Њиме је могуће прорачунавати режиме са кратким спојевима дистрибутивних мрежа великих димензија, што је нумерички верификовано у дисертацији. Предложеним алгоритмом се добија режим дистрибутивне мреже са кратким спојем који је реалистичнији од режима добијених алгоритмима са детерминистичким приступом. Прорачуни као што су: координација, подешавање и провера осетљивости релејне заштите, провера капацитета прекидача и осигурача, локација квара итд. могу на основу реалистичнијег режима, добијеног предложеним алгоритмом, да дају квалитетније резултате, што је нумерички потврђено на примеру координације прекострујне заштите.</p>													
Датум прихватања теме, ДП:	28.5.2020.													
Датум одбране, ДО:														
Чланови комисије, КО:	<table border="1"><tr><td>Председник:</td><td>др Владимир Стрезоски</td><td rowspan="6">Потпис ментора</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>др Андрија Сарић</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>др Душко Бекут</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>др Лука Стрезоски</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>др Александар Савић</td></tr><tr><td>Члан, ментор:</td><td>др Предраг Видовић</td></tr></table>	Председник:	др Владимир Стрезоски	Потпис ментора	Члан:	др Андрија Сарић	Члан:	др Душко Бекут	Члан:	др Лука Стрезоски	Члан:	др Александар Савић	Члан, ментор:	др Предраг Видовић
Председник:	др Владимир Стрезоски	Потпис ментора												
Члан:	др Андрија Сарић													
Члан:	др Душко Бекут													
Члан:	др Лука Стрезоски													
Члан:	др Александар Савић													
Члан, ментор:	др Предраг Видовић													



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Marko Obrenić
Mentor, MN :	PhD Predrag Vidović
Title, TI :	Short-circuit calculation with considered production and consumption uncertainties
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2020.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	10 chapters / 130 pages / 148 references / 14 tables / 49 pictures / 0 graphs / 3 appendix
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering
Scientific discipline, SD :	Power systems
Subject/Key words, S/KW :	Distribution networks, short-circuits, uncertainty, interval arithmetic, correlation
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of technical sciences, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>In this dissertation an algorithm for correlated intervals-based short-circuit calculation is proposed. In modern distribution networks there are various types of generators that produce electric energy from renewable energy resources. For these generators, as well as loads, uncertain production and consumption is characteristic. The proposed algorithm in the dissertation deals with above-mentioned uncertainties, as well as correlations among them. The uncertainties are modeled with intervals and directly taken into account in the proposed algorithm for short-circuit calculation. The algorithm is primarily developed for short-circuit calculation in modern distribution networks with a great number of distributed generators and consumers. The proposed algorithm enables calculation of short circuits states of large-scale distribution networks, which is numerically verified in the dissertation. The proposed algorithm provides short circuit state of distribution network which is more realistic than the one obtained with algorithms with deterministic approach. Calculations such as: coordination, settings and sensitivity check of relay protection, breaker and fuse capacity check, fault location, etc. can give better results, on the basis of the more realistic state obtained by the proposed algorithm for short circuit calculation, which is numerically confirmed by the example of coordination of overcurrent protection.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	28.5.2020.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	PhD Vladimir Strezoski
Member:	PhD Andrija Sarić
Member:	PhD Duško Bekut
Member:	PhD Luka Strezoski
Member:	PhD Aleksandar Savić
Member, Mentor:	PhD Predrag Vidović

Menthor's sign

SADRŽAJ

SRPSKE I ENGLLESKE SKRAĆENICE I TUĐICE

1	UVOD	1
2	MATEMATIČKI MODELI ELEMENATA DISTRIBUTIVNIH MREŽA	9
2.1	POTROŠAČI	9
2.2	DISTRIBUIRANI ENERGETSKI RESURSI	10
2.2.1	Tradicionalni DG	10
2.2.2	DG zasnovani na invertoru	12
2.3	KONDENZATORI I PRIGUŠNICE	15
2.4	SEKCIJE VODOVA	15
2.5	TRANSFORMATORI.....	16
3	INTERVALNA ARITMETIKA	19
3.1	OSNOVNE TEOREME I OPERACIJE	20
3.1.1	Osnovni koncepti.....	22
3.1.2	Aritmetičke operacije nad intervalima	22
3.2	FUNKCIJE SA INTERVALIMA	26
3.3	SISTEMI INTERVALNIH LINEARNIH JEDNAČINA	27
4	KORELACIJA SNAGA PROIZVODNJE I POTROŠNJE	30
4.1	ŠTA JE KORELACIJA	31
4.2	PRORAČUN KORELACIONIH KOEFICIJENATA	35
5	PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA	42
5.1	OPŠTA RAZMATRANJA O PRORAČUNU KRATKIH SPOJEVA	44
5.2	PREGLED POSTUPAKA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA	56
5.2.1	IEC 60909.....	57
5.2.2	ER G7/4	61
5.2.3	IEEE C37.010	62
5.2.4	Kanonični model.....	63
5.2.5	Hibridni kompenzacioni metod	66
5.2.6	Postupak zasnovan na metodu konturnih struja	68
5.2.7	Proračun jednosmerne komponente	71
6	ALGORITAM ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA ZASNOVAN NA KORELISANIM INTERVALIMA	73
7	NUMERIČKA VERIFIKACIJA ALGORITMA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA ZASNOVANOG NA KORELISANIM INTERVALIMA	84

7.1	PRIMER NA DISTRIBUTIVNOJ MREŽI SA 6 ČVOROVA.....	84
7.2	PRIMER NA DISTRIBUTIVNOJ MREŽI SA 1003 ČVORA.....	92
7.3	PRIMER KOORDINACIJE PREKOSTRUJNE ZAŠTITE NA IEEE MREŽI SA 13 ČVOROVA.....	97
8	ZAKLJUČAK.....	102
9	PRILOZI.....	104
9.1	PRORAČUN PARAMETARA VODOVA GOLIH PROVODNIKA	104
9.1.1	Redni parametri	104
9.1.2	Otočni parametri.....	107
9.2	MATEMATIČKI MODELI REŽIMA ANSAMBLA KRATKIH SPOJEVA.....	109
9.3	PRORAČUN STRUJA NA MESTU KRATKOG SPOJA	114
10	LITERATURA	121

SRPSKE I ENGLLESKE SKRAĆENICE I TUĐICE

SRPSKE SKRAĆENICE

DER	Distribuirani energetske resursi
DG	Distribuirani generator
HMC	Hibridna Monte Karlo simulacija
OHMC	Optimalna hibridna Monte Karlo simulacija
TKS	Topologija kratkog spoja

ENGLLESKE SKRAĆENICE

AC/DC	Alternating Current / Direct Current
ADMS	Advanced Distribution Management Systems
EMS	Energy Management Systems
OMS	Outage management system
SO	Switching operation
SCADA	Supervisory control and data acquisition
IBDER	Inverter based distributed energy resource
DFIM	Doubly fed induction machine
ARMA	Autoregressive moving average
PEM	Point estimate method
LHS	Latin hypercube sampling
FRT	Fault ride through
RDM	Relative distance measure
SOM ANN	Self-organized map artificial neural network
FF ANN	Feedforward artificial neural network
FF	Feed forward
AE	Affine arithmetic
IEC	International Electro-technical Commission
IEEE	Institute for Electrical and Electronics Engineers
ER	Engineering Recommendation
BFS	Backward-forward sweep
ANSI	American National Standard Institute
NR	Newton-Raphson
CI	Current injection
BIBC	Bus-Injection to Branch-Current
BCBV	Branch-Current to Bus-Voltage
CTR	Current transformer ratio
PS	Plug setting
TMS	Time multiplier setting
CTI	Coordination time interval

TUĐICE

Smart grid	Pametne mreže
Time series data	Vremenske sekvence podataka
Back propagation	Propagacija unazad
Chooper	Čoper – Noviji elektronski sistem za zaštitu konvertora na strani rotora mašine dvostrukog napajanja (DFIM) od velikih struja
Crowbar	Kroubar – Stariji elektronski sistem za zaštitu

	konvertora na strani rotora DFIM od velikih struja
Strong solution	Jako rešenje
Converter	Konvertor – pretvarač električne energije u električnu energiju zasnovan na energetskej elektronici
Inverter	Invertor – uređaj za pretvaranje električne energije jednosmernog napona u električnu energiju naizmjeničnog napona

1 UVOD

Elektroprivredna preduzeća širom sveta osetila su promene zbog potrebe za dekarbonizacijom električne energije. Elektroenergetski sistemi, kao najveći izvor ugljen-dioksida na zemlji, suočavaju se sa velikim zadatkom da smanje emisiju ugljen-dioksida. Mnoga elektroprivredna preduzeća, kao i preduzeća čiji rad direktno utiče na elektroprivredu, postavila su sebi zadatak da do 2050. godine budu neutralna u pogledu emisije ugljen-dioksida [1]. Da bi se realizovao postavljen cilj potrebno je preći sa tradicionalnih izvora energije (ugalj i gas) na obnovljive izvore (vetar, sunce, itd.) [2]. Pored toga potrebno je unaprediti efikasnost transformacije drugih oblika energije u električnu energiju, smanjiti potrošnju električne energije i unaprediti efikasnost konzumiranja električne energije. Dok se postavljeni cilj ne realizuje potrebno je obezbediti skladištenje ugljen-dioksida dobijenog prilikom transformacije drugih oblika energije u električnu. Zadatak da se dekarbonizuje električna energija doveo je do povećanja korišćenja obnovljivih izvora energije u elektroenergetskim sistemima. Korišćenje obnovljivih izvora je realizovano korišćenjem distribuiranih energetske resursa (DER), kao što su distribuirani generatori (DG), skladišta energije itd.

Promene elektroenergetskih sistema obuhvataju promene u proizvodnji električne energije, upravljanju sistemima i u potrošnji električne energije. Promene u proizvodnji predstavljaju pre svega promene u kretanju energije u smeru proizvodnja – prenos – distribucija – potrošnja. Penetracija intermitentnih i manje predvidivih distribuiranih energetske resursa utiče na kretanje energije u svim smerovima, a samim tim i na koncept podele elektroenergetskih sistema na proizvodni, prenosni, distributivni i deo za isporuku električne energije. Količina energije dobijena iz obnovljivih izvora konstantno raste. Globalna proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora 2017. godine iznosila je 25% od ukupne proizvodnje, a danas iznosi oko 30% [1]. Promene vetra i intenziteta sunčevog zračenja, kao i redukcija proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva, zahtevaju od sistema da pronađu način brze promene energije da bi se održala frekvencija na zahtevanom nivou. Ovo je jedan od uticaja promene proizvodnje na sisteme koji zahtevaju dodatne regulative kojima će se obezbediti brzo povećanje i smanjenje snage, kao i mogućnost skladištenja energije. Skladište energije predstavlja poseban izazov zbog svoje dvojake prirode: proizvodni resurs kada je u stanju pražnjenja i potrošač kada je u stanju punjenja. Promene u upravljanju sistemima podrazumevaju postavku novih mernih tačaka, zamenu starih i sporih elektromehaničkih uređaja novim i bržim elektronskim uređajima, kao i korišćenje novih tehnologija: optimizacija napona i reaktivnih snaga, automatska lokacija kvara, izolacija i restauracija napajanja, itd. Promene u potrošnji električne energije podrazumevaju pre svega instalaciju malih DER koji su u vlasništvu potrošača i koji pokrivaju deo potrošnje tog potrošača. U takvim slučajevima elektroprivredno preduzeće nema mogućnost nadzora i upravljanja tim DER. Pored toga potrošači zahtevaju veću pouzdanost napajanja i dostupnost informacija o ispadima, vremenu restauracije i samoj količini i kvalitetu preuzete električne energije.

Navedene promene savremenih elektroenergetskih sistema utiču pre svega na operatore sistema. Uvođenje digitalizacije, a samim tim i savremenih alata za upravljanje sistemima u uslovima koji su prethodno navedeni, operatori sistema dobijaju mogućnost upravljanja savremenim mrežama i održavanja bilansa svih procesa. Promene elektroenergetskih sistema najizraženije su u distributivno-potrošačkim sistemima gde je najveća penetracija DER i promene u potrošnji, gde se pojavljuje lokalna proizvodnja električne energije za sopstvene potrebe. Savremeni alati koji se primenjuju u distributivnim

mrežama su napredni distributivni menadžment sistemi (ADMS, advanced distribution management systems) [3]. Osim ADMS sistema, čiji se alati primenjuju na distributivne mreže, za nadzor, upravljanje i kontrolu prenosnih mreža koriste se menadžment sistemi prenosnih mreža (EMS, energy management systems). Oba sistema ADMS i EMS predstavljaju softverske platforme koje sadrže mnogobrojne alate za upravljanje, automatizaciju i optimizaciju rada distributivne i prenosne mreže [3]. Poseban izazov za ADMS predstavlja uvažavanje DER i potrošača koji imaju lokalnu proizvodnju električne energije za sopstvene potrebe. Ti elementi imaju stohastično ponašanje i teško je upravljati njima. Stoga, razvijen je koncept pametnih mreža (Smart Grid) koji se sastoji od softverske platforme, pametnih brojlara i drugih hardverskih uređaja za automatizaciju rada mreže. Primenom koncepta pametnih mreža mogu se rešiti savremeni izazovi koji se postavljaju pred operatore sistema.

Centralno mesto u ADMS i EMS sistemima predstavlja model mreže sa analitičkim funkcijama za analizu, upravljanje i optimizaciju rada mreže [4]. Neke od najkorišćenijih analitičkih funkcija su: proračun tokova snaga i estimacije stanja, proračun kratkih spojeva, proračun pouzdanosti, prognoza proizvodnje i potrošnje električne energije, proračun gubitaka električne energije, lokacija i izolacija kvara, restauracija napajanja itd. Model mreže i analitičke funkcije treba da podrže sve varijacije rada mreže. Izazov za model mreže predstavljaju jednofazni, dvofazni i trofazni elementi sa i bez neutralnog provodnika, raznovrsne konfiguracije i dimenzije mreže, kao i raznovrsnost elemenata koje je potrebno uvažiti. Analitičke funkcije se mogu grupisati tako da čine specijalizovane manje sisteme koji rešavaju skup srodnih problema [4]. Neki od takvih sistema su: sistem za analizu mreže, sistem za upravljanje ispadima (OMS, outage management system), sistem za upravljanje prekidačkim operacijama (SO, switching operation), sistem za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka sa mernih uređaja (SCADA, supervisory control and data acquisition) itd.

Osnovne analitičke funkcije u ADMS sistemu su [4]: proračun tokova snaga i estimacije stanja, proračun kratkih spojeva, lokacija kvara i analiza odziva mreže (praćenje operativnih limita i proračun gubitaka). Navedene osnovne analitičke funkcije treba da simultano reše sisteme matematičkih jednačina koji su u vezi sa fizičkim opisima (modelima) elemenata mreže. Proračun tokova snaga i estimacije stanja treba da daju režim svakog elementa u mreži u normalnom pogonskom stanju. Proračun estimacije stanja treba da dodatno uvaži merene vrednosti režimskih veličina u cilju izračunavanja što približnijeg režima realnog sistema. Proračun kratkih spojeva treba da da režim sistema pogođenog kratkim spojem. Lokacija kvara treba da u što kraćem vremenskom intervalu i što preciznije da lokaciju kvara da bi se kvar mogao izolovati i da bi se sistem mogao vratiti u normalno pogonsko stanje. Analiza odziva mreže bitna je kako za normalno tako i za prethavarijsko operativno stanje da bi se prevenirala narušena ograničenja režimskih i nerežimskih veličina koje su od interesa.

Proračun kratkih spojeva predstavlja jedan od najvažnijih proračuna u distributivnim mrežama. On ima širok spektar upotrebe u raznim aplikacijama kao što su: relejna zaštita (koordinacija, podešenje, provera osetljivosti, itd.), provera kapaciteta prekidača i osigurača, lokacija kvara itd. Postoje razni algoritmi za proračun kratkih spojeva. U najvećem broju studija proračun kratkih spojeva je deterministički. Međutim, u savremenim distributivnim mrežama pojavljuju se neizvesnosti čiji su uzroci proizvodnja iz obnovljivih izvora, sistemi za skladištenje energije, potrošači, električna vozila i drugi elementi sa stohastičnom proizvodnjom i potrošnjom električne energije. Neki od navedenih elemenata mogu imati korelisanu potrošnju i/ili proizvodnju. Stoga, proračun kratkih spojeva distributivnih mreža zahteva uvažavanje neizvesnosti kao posledicu neizvesne proizvodnje i potrošnje. Takođe u

distributivnim mrežama postoje druge neizvesnosti kao što su: neizvesnosti parametara vodova, parametara transformatora, kao i odnosi transformacije strujnih mernih transformatora.

U analizama prenosnih mreža algoritmi za proračun kratkih spojeva utvrđeni su i implementirani u poslednjih pedesetak godina [5-7]. S obzirom na to da ove mreže imaju manji broj čvorova u poređenju sa distributivnim mrežama, algoritmi za proračun kratkih spojeva prenosnih mreža zasnovani su na modelovanju i proračunima koji koriste faktorizaciju matrice admitansi. Pored činjenice da su prenosne mreže u većini slučajeva uravnotežene i u simetričnim režimima, proračun kratkih spojeva vrši se u domenu simetričnih komponenti, gde su pogonska kola za simetrične režime direktnog, inverznog i nultog redosleda raspregnute svuda osim na mestu kratkog spoja.

Broj čvorova tipične distributivne mreže znatno je veći od broja čvorova prenosne mreže, što utiče na to da matrica admitansi distributivne mreže ima veoma veliku dimenziju. Implicitna inverzija (faktorizacija) matrice sa tako velikom dimenzijom predstavlja glavni nedostatak u pokušaju da se proračun kratkih spojeva orijentisan na čvorove primeni za distributivne mreže [8-10]. Česte promene topologije distributivnih mreža uslovile bi isto toliko česte faktorizacije matrica admitansi velikih dimenzija.

Prethodno opisani problemi proračuna zasnovanih na čvorovima dovode do inovativnih proračuna kratkih spojeva zasnovanih na granama, koji su mnogo pogodniji za velike, slaboupetljane distributivne mreže [11-15]. Ti metodi ne zavise niti zahtevaju kreiranje i faktorizaciju matrice admitansi. To predstavlja glavni momenat koji čini ove metode visoko efikasnim za analize distributivnih mreža velikih dimenzija.

U referencama [14, 15] autori koriste hibridni kompenzacioni metod za proračun kratkih spojeva. Ovaj metod koristi kompenzacionu tehniku da izračuna struje kvara na mestu kvara, struje u petljama kao i doprinos struji kvara od generatora. Nakon toga utvrđen je proračun čišćenja napred/nazad za proračun celokupnog režima sa kvarom. Međutim, u ovom metodu pretpostavlja se da su sinhroni generatori jedini tipovi generatora koji postoje, što nije slučaj u savremenim distributivnim mrežama sa velikim brojem DER baziranih na energetskoj elektronici, kao na primer DER zasnovani na invertoru (IBDER) kao i dvostrano napajane asinhronne mašine (DFIM).

Penetracija elektronski spregnutih DER konstantno raste širom sveta, tako da oni treba da budu uvaženi u proračunima kratkih spojeva [16-19]. Pored toga IBDER i u nekim slučajevima DFIM mogu ograničiti svoje struje kvara na najviše 1,5 puta nominalne struje. Zbog toga oni ne mogu biti predstavljeni modelima tradicionalnih sinhronih mašina za proračun kvarova. U najnovijoj verziji IEC standarda za proračun kratkih spojeva [20], date su preporuke za uvažavanje elektronski spregnutih DER. Međutim, te preporuke su previše pojednostavljene jer u velikoj meri zavise od podataka proizvođača. Stoga, u referenci [21] predstavljen je algoritam za proračun kratkih spojeva koji uvažava sve savremene tipove DER i verifikovan je na nekoliko velikih distributivnih mreža.

Još jedan jako bitan izazov nalazi se u prirodi neizvesnosti obnovljivih resursa čije je korišćenje povećano u elektroenergetskim sistemima. Proizvodnja DG zasnovanih na obnovljivim resursima i potrošnja nekih tipova potrošača ne može se precizno odrediti [22-25] i zbog toga je u nedavno objavljenoj literaturi [26-32] predložen novi algoritam za proračun tokova snaga distributivnih mreža koji uvažava pomenute neizvesnosti.

Proračun tokova snaga sa fazi brojevima predstavljen je u [26, 27]. Uvažavanje neizvesnosti DG i potrošača predstavljeno je u proračunu tokova snaga distributivnih mreža sa fazi brojevima [28]. U referenci [29] metodom za proračun optimalnih tokova snaga

omogućena je robusna analiza elektroenergetskih sistema sa neizvesnostima, koje potiču od proizvodnje iz obnovljivih izvora i potrošnje u operativnim stanjima. Neizvesnost proizvodnje DG zasnovanih na obnovljivim i neobnovljivim resursima i neizvesnost cene električne energije predstavljeni su u referenci [30]. Proračun tokova snaga sa verovatnoćama, koji uvažava korelisane neizvesnosti, predstavljen je u referenci [31]. Proračun tokova snaga sa korelacijama zasnovan na intervalima, koji uvažava neizvesnosti potrošača i DG koristeći intervale, predstavljen je u referenci [32]. On takođe uvažava korelacije između potrošača i DG.

Obnovljivi izvori koji se koriste za proizvodnju električne energije klasifikuju se u: geotermalne, hidro, one koji koriste biomasu, solarnu energiju, energiju vetra itd. [33]. Tradicionalni izvori, koji koriste fosilna goriva ili nuklearnu energiju, za razliku od obnovljivih izvora karakteristični su po tome što primenom različitih tehnologija za konverziju energije iz tih izvora u električnu dobija se kontrolisana energija, odnosno DG koji koriste te izvore su upravljivi. Kada se govori o upravljivosti misli se na mogućnost trenutnog angažovanja DG u željenom vremenskom trenutku i pouzdano planiranje angažovanja koje ne zavisi od trenutnih vremenskih uslova. Zbog toga i zbog korišćenja obnovljivih izvora u elektroenergetskom sistemu potrebno je da uvek postoji dovoljna rezerva električne energije. Da bi se održao trend priključenja savremenih DG koji koriste obnovljive izvore potrebno je obezbediti dovoljnu rezervu koja će pokriti svu neizvesnost obnovljivih izvora. Najveći broj DG koji koriste obnovljive izvore su oni koji koriste energiju vetra i sunca [33]. Stoga, kada se govori o obnovljivim izvorima uglavnom se misli na energiju vetra i sunca koji zavise od vremenskih uslova. Iako oba izvora zavise od vremenskih uslova, njihova dostupnost se u toku dana razlikuje, i sa prognozom njihove dostupnosti mogu se utvrditi karakteristični dnevni dijagrami proizvodnje DG koji koriste energiju vetra i sunca. Proizvodnja električne energije DG iz solarne energije prati dnevni ciklus Sunca (noću je proizvodnja nula) i zavisi od lokacije DG na površini Zemlje sa koje se Sunce vidi pod različitim uglom u odnosu na površinu Zemlje. Proizvodnja električne energije DG iz energije vetra prisutna je tokom celog dana (za razliku od proizvodnje iz solarne energije) i najčešće je noću veća i manje varijabilna. Dostupnost energije vetra zavisi od lokacije u smislu da na nekim lokacijama brzina vetra ima veći intenzitet koji je manje varijabilan, i da je prisutnost vetra učestalija. Na površini iznad mora energija vetra je dostupnija i prisutnost vetra je učestalija za razliku od površine iznad kopna.

Za potrebe navedene analize angažovanja DG, kao i za potrebe drugih analiza, neophodno je dovoljno detaljno modelovati DG i prognozirati njihovu proizvodnju. U većini analiza i istraživanja, u kojima je potrebno uvažavanje stohastičnog ponašanja vetrogeneratora, koriste se prognoze aktivne snage DG zasnovane na statističkim modelima ili na modelima zasnovanim na vremenskim sekvencama podataka (time series data) [22]. U statističkim modelima koriste se funkcije raspodele proizvodnje DG dobijene na osnovu uzoraka proizvodnje. Modeli zasnovani na istorijskim podacima (sekvencama podataka) obuhvataju pored funkcije raspodele proizvodnje DG karakteristične varijacije proizvodnje DG u vremenu. U većini modela izlazna snaga vetrogeneratora se dobija indirektno, na osnovu poznavanja podataka o vetru, i proračuna pomoću funkcija karakterističnih za vetrogeneratore koje povezuju izlaznu snagu sa ulaznim podacima. U [34] koriste se Monte Karlo simulacije u vremenu na sistemu sa velikim brojem obnovljivih izvora da bi se dobili zahtevi za operativnom rezervom u prisustvu neizvesnosti. U [35] za potrebe ekonomskog dispečinga stohastički modeli vetrogeneratora dobijeni su koristeći Veibulovu funkciju raspodele za brzinu vetra. Slična tehnika koristi se u [36] gde se koriste korelisani nizovi podataka za modelovanje izlazne snage farme vetrogeneratora. Drugačiji pristup, koji dodatno obuhvata vremenske sekvence podataka, potvrđuje da se mogu pojaviti greške ukoliko se ne

uvaže vremenske sekvence podataka [37]. Koristeći vremenske sekvence podataka potvrđeno je da se brzina vetra ponaša slično na geografski bliskim lokacijama i da se na osnovu toga mogu utvrditi korelacije u određenim satima [38]. Model sa vremenskim sekvencama podataka o brzini vetra i sa njegovim autokorelacijama, dobijenim koristeći rekurzivne koeficijente u modelu, predstavljen je u [39]. Sličan pristup modelovanju primenjen je u [40] gde su dodatno korišteni elementi statistike. Za analizu pouzdanosti model izlazne snage vetrogeneratora utvrđen je koristeći Markovljeve procese [41]. Autokorelacija i marginalna raspodela u modelima sa stohastičnim diferencijalnim jednačinama predstavljena je u [42].

Stohastično ponašanje solarnih generatora može se modelovati na sledeća tri načina: vremenskim sekvencama podataka [43, 44], modelima zasnovanim na verovatnoći [45, 46] i primenom stohastičnih metoda [47, 48]. Korišćenje vremenskih sekvenci za modelovanje solarnih generatora zahteva veliku količinu podataka koji se koriste za indirektno predviđanje varijacija proizvodnje solarnih generatora na osnovu solarne radijacije na lokacijama gde se nalaze DG. Modeli zasnovani na verovatnoći najčešće koriste Monte Karlo simulacije. Proizvodnja se može modelovati slučajnim promenljivama koje imaju pridruženu funkciju raspodele verovatnoće [49-51], gde su beta i normalna raspodela najzastupljenije. Takvi pristupi su u pogledu proračuna vremenski veoma zahtevni zbog velikog broja simulacija potrebnih za modelovanje proizvodnje. Stohastični metodi koji se primenjuju za modele proizvodnje zasnivaju se na fazi brojevima [48], Markovljevim procesima [52], neuronskim mrežama [53] itd. Takav pristup daje prognoziranje vrednosti proizvodnje dobijene indirektno na osnovu prognoziranja vrednosti solarne radijacije.

Korelacije proizvodnje i potrošnje neophodno je uvažiti u modelima jer one značajno utiču na ukupnu neizvesnost proizvodnje i potrošnje [23]. Prostorno-vremenske korelacije [54] kada se uvažava u modelima uočava se da značajno utiču na analize rada i planiranja elektroenergetskih sistema [55]. Simulacije koje daju odzive sistema, koji su hronološki strukturirani, zahtevaju da prostorno-vremenske korelacije proizvodnje budu uvažene u njima [56], odnosno da njihovi modeli budu što efikasniji, što se postiže uvažavanjem korelacija. Prostorne korelacije proizvodnje vetrogeneratora mogu se dobiti korišćenjem multidimenzionalne Gausove raspodele [57]. Za određivanje prostorne korelacije proizvodnje i potrošnje koristi se teorija „kopule“ [58, 59] kojom se modeluje zajednička i marginalna raspodela više varijabli. Često se postavlja zahtev za modelovanjem simultanog odziva većeg broja DG, što povlači sa sobom zahtev za modelovanjem pored prostornih korelacija i korelacije u vremenu. ARMA (autoregressive moving average) modeli i Markovljevi lanci [60] koriste se za određivanje korelacija u vremenu na osnovu vremenske sekvence podataka. Još jedan pristup za određivanje korelacija je zasnovan na proračunu matrice korelacija. Metod zasnovan na estimaciji tačaka (PEM, point estimate method) [61] uvažava matricu kovarijansi, gde su težinski faktori estimiranih tačaka određeni dekomponovanom matricom kovarijansi. Matricom kovarijansi kvantifikuje se linearna zavisnost između promenljivih i na nju ne utiče marginalna raspodela promenljivih. Više korelisanih promenljivih mogu biti transformisane u nekoliko nezavisnih Gausovih raspodela korišćenjem Čoleskijeve dekompozicije. Na taj način se matricom kovarijansi, čija je inverzna matrica korelacija, modeluje veći broj korelacija između većeg broja elemenata. Navedeni pristup u kombinaciji sa Monte Karlo simulacijama predstavljen je u [62]. Korelacije se mogu modelovati između transformisanih varijabli koristeći Čoleskijevu dekompoziciju i Monte Karlo simulacije [63] ili LHS (Latin hypercube sampling) statistički metod [64], pri čemu se takve korelacije minimalno razlikuju od korelacija između originalnih varijabli. Sa razvojem računarske tehnologije i porastom računarske moći korišćenje neuronskih mreža sa velikim brojem podataka postalo je moguće, pa je proračun korelacija na osnovu velikog broja podataka u vremenskim sekvencama predstavljen u [65].

Proračun kratkih spojeva sa uvaženim neizvesnostima u početku je obuhvatao niz proračuna sa Monte Karlo simulacijama gde su simulirani parametri vodova, lokacije kvara i vremena kada se kvar desio [66]. Takvi proračuni nisu bili praktični zbog velikog broja simulacija i proračuna pa je pokušano analitičkim pristupom smanjiti potrebe za računarskom moći korišćenjem raspodele verovatnoće modula struje kvara [66]. Sa povećanom penetracijom DG u mrežu razvili su se proračuni koji koriste Monte Karlo simulacije proizvodnje DG, odnosno isti pristup kao prethodno pomenuti ali sa simulacijom neizvesnosti većeg broja elemenata: potrošnje potrošača, konfiguracije mreže, lokacije kvara, impedanse na mestu kvara, tipa kvara i proizvodnje DG [67]. Postupak za proračun struje kratkog spoja detaljno modelovane električne mašine sa uvaženom zajedničkom gustinom verovatnoće normalne raspodele predstavljen je u [68]. Metod estimacije tri tačke, predstavljen u [69], primenjen je za proračun kratkih spojeva slabopetlanih distributivnih mreža. Metod je zasnovan na primeni verovatnoće za modelovanje neizvesnosti proizvodnje DG i potrošnje potrošača u cilju smanjenja broja scenarija koji treba da se simuliraju za proračun, u odnosu na broj scenarija primenom Monte Karlo simulacija. Unapređenje pristupa primenom Monte Karlo simulacija predstavljeno je u [70] gde su data poređenja hibridne Monte Karlo simulacije (HMC) i optimalne hibridne Monte Karlo simulacije (OHMC). U navedenim simulacijama uvaženi su savremeni DG zasnovani na inverteru. Generalno posmatrano, navedeni postupci za proračun kratkih spojeva sa uvaženim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje mogu se podeliti na postupke koji koriste analitičke funkcije teorije verovatnoće i postupke u kojima se vrši niz proračuna sa različitim simulacijama ulaznih parametara u proračun. Navedeni postupci zahtevaju veliku računarsku moć i njihova primena na realnim sistemima ograničena je zbog vremena potrebnog za proračun. Direktno uvažavanje neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva korišćenjem analitičkih funkcija teorije verovatnoće izuzetno je komplikovano i neprimenjivo čak i kada su u pitanju primene na mrežama manjih dimenzija sa nekoliko stotina čvorova.

Trenutno u literaturi ne postoji algoritam za proračun kratkih spojeva koji direktno uvažava neizvesnosti obnovljivih izvora i potrošača kao u prethodno pomenutim algoritmima za proračun tokova snaga. Stoga, motivacija za ovo istraživanje bio je nedostatak proračuna kratkih spojeva zasnovanih na intervalima koji efikasno uvažavaju neizvesnosti obnovljivih izvora i potrošača u savremenim distributivnim mrežama. Umesto determinističkog proračuna kratkih spojeva, algoritam predstavljen u ovoj disertaciji uvodi proračun kratkih spojeva sa uvaženim neizvesnostima proizvodnje DG i potrošnje potrošača. Neizvesnost proizvodnje i potrošnje je opisana intervalima i uvažena u matematičkim modelima DG i potrošača. S obzirom na to da distributivne mreže imaju veliki broj DG i potrošača, uvažavanje neizvesnosti toliko velikog broja elemenata može uticati na ogromne neizvesnosti režimskih veličina i dovesti do neupotrebljivih rezultata. Zbog toga je potrebno odrediti grupe DG i potrošača, čije su proizvodnje i potrošnje u korelaciji, a samim tim i njihove neizvesnosti, i primenom tih korelacija smanjiti neizvesnosti režimskih veličina. Kao dodatak u algoritmu su uvažene korelacije između proizvodnje i potrošnje. Stoga, glavni doprinos ovog rada je:

1. Neizvesnosti i korelacije između potrošača i DG direktno su uvažene u predloženom algoritmu za proračun kratkih spojeva;
2. Predloženi algoritam daje izračunat režim sistema sa kratkim spojem koji je dosta realističniji od režima sistema sa kratkim spojem izračunatim determinističkim pristupima;
3. Predloženi algoritam se efikasno primenjuje na realne sisteme velikih dimenzija sa velikim brojem DG i potrošača;

4. Relejna zaštita se može mnogo preciznije podesiti i koordinisati koristeći maksimalne i minimalne vrednosti intervala režimskih veličina, koji su rezultat predloženog algoritma za proračun kratkih spojeva, umesto rezultata determinističkih algoritama. Provera osetljivosti relejne zaštite može se bolje izvršiti koristeći minimalne vrednosti intervala režimskih veličina umesto vrednosti dobijenih determinističkim algoritmima. Osim za relejnu zaštitu, rezultati predloženog algoritma mogu se koristiti i za druge proračune koji koriste proračun kratkih spojeva. Na taj način će drugi proračuni moći da daju kvalitetnije rezultate na osnovu realističnijeg režima sistema sa kratkim spojem.

Disertacija je organizovana u deset glava. Nakon uvoda koji predstavlja prvu glavu, u drugoj glavi su predstavljeni matematički modeli elemenata distributivnih mreža. Elementi su modelovani kolima koja će se koristiti za potrebe proračuna kratkih spojeva. Osnovni otočni elementi, koje čine potrošači, tradicionalni DG i DG zasnovani na invertoru, otočni kondenzatori i prigušnice, predstavljeni su modelima u faznom domenu. Osnovni redni elementi, koje čine redni kondenzatori i prigušnice, sekcije vodova i transformatori, predstavljeni su svojim ekvivalentnim kolima u faznom domenu.

U trećoj glavi predstavljena je intervalna aritmetika sa osnovnim definicijama, teoremama i operacijama nad intervalima. S obzirom na to da se proračun režima kola sa kratkim spojem dekomponuje na proračun režima kola pre kratkog spoja i režima Δ -kola, u predloženom algoritmu u disertaciji navedeni proračuni režima kola pre kratkog spoja i režima Δ -kola vrše se sa intervalnom aritmetikom. Stoga, funkcije sa intervalima i sistemi intervalnih jednačina, koji se koriste u proračunu režima kola sa kratkim spojem, opisani su u trećoj glavi.

U četvrtoj glavi predstavljene su korelacije snaga proizvodnje DG i potrošnje potrošača. Integracijom korelacija u predloženi algoritam smanjuje se neizvesnost režimskih veličina režima sa kratkim spojem. Stoga, u četvrtoj glavi je predstavljen način na koji bi se mogle izračunati korelacije koje su integrisane u predloženi algoritam. Osnovni pojmovi u vezi sa korelacijom dati su u delu 4.1. Korelacije se mogu izračunati na osnovu istorijskih podataka, podataka trenutnih merenja i podataka prognoze. Podaci koji bi se koristili su vremenski podaci i istorijski podaci o proizvodnji i potrošnji, pa su u četvrtoj glavi opisane osnovne karakteristike navedenih podataka. S obzirom na veliku dimenzionalnost podataka opisana je klasterizacija primenom samoorganizovane mape veštačke neuronske mreže, kojom bi se obezbedio skup ulaznih vremenskih podataka za proračun. Za aproksimaciju izlaznih aktivnih snaga nenadgledanih elemenata može se koristiti algoritam pohranjivanja unapred veštačkim neuronskim mrežama sa klasterovanim vremenskim podacima. Statističkom obradom podataka nadgledanih i nenadgledanih elemenata mogu se izračunati korelacioni koeficijenti.

U petoj glavi su prikazana opšta razmatranja distributivnih mreža sa kratkim spojevima. Pored toga predstavljen je matematički model distributivne mreže za proračun kratkih spojeva zasnovan na primeni principa dekompozicije-superpozicije i proračun režima Δ -kola. U petoj glavi opisani su reprezentativni postupci za proračun kratkih spojeva. Opisani postupci su predloženi u najpopularnijim standardima (IEC 60909, ER G7/4 i IEEE C37.010) u kojima su uvedena različita zanemarenja i aproksimacije u cilju jednostavnosti i praktičnosti primene proračuna. Pored standardizovanih postupaka opisani su i reprezentativni postupci koji se primenjuju u prenosnim i distributivnim mrežama.

U šestoj glavi predstavljen je predloženi algoritam za proračun kratkih spojeva zasnovan na korelisanim intervalima. Pored toga predstavljen je algoritam za proračun tokova snaga koji se koristi za proračun režima kola pre kratkog spoja. U predloženom algoritmu za proračun kratkih spojeva opisan je način na koji su neizvesnosti proizvodnje i potrošnje

direktno uvažene. Algoritam je razvijen za proračun kratkih spojeva u faznom domenu s obzirom na to da je namenjen prvenstveno za distributivne mreže koje imaju nesimetrične režime i elemente sa različitim brojem faza.

U sedmoj glavi predstavljena je numerička verifikacija predloženog algoritma u disertaciji za proračun kratkih spojeva zasnovanog na korelisanim intervalima. Proračun je izvršen na dva test primera distributivnih mreža: mali primer sa 6 čvorova i primer sa 1003 čvora na kome je pokazano da se predloženi algoritam može efikasno primeniti na realnim mrežama velikih dimenzija. Dobijeni rezultati ukazuju da predloženi algoritam može da se primeni na realne probleme kratkih spojeva, koji takođe spadaju u skup problema drugih proračuna kao što je koordinacija relejne zaštite. Stoga, u sedmoj glavi je prikazan primer korišćenja rezultata predloženog algoritma za koordinaciju prekostrujne zaštite na primeru IEEE test mreže sa 13 čvorova.

U osmoj glavi data su zaključna razmatranja sa postignutim ciljevima definisanim u uvodu. Osim toga dati su i predlozi za dalja istraživanja kako u oblasti proračuna kratkih spojeva tako i u drugim oblastima u kojima se proračun kratkih spojeva koristi za dobijanje režima sa kratkim spojem. U devetoj glavi dati su prilozi koji su važni za obrađenu materiju u disertaciji, a koji su izdvojeni da ne opterećuju glavni deo disertacije. U desetoj glavi data je literatura koja je korištena za istraživanje i pisanje disertacije.

2 MATEMATIČKI MODELI ELEMENATA DISTRIBUTIVNIH MREŽA

Matematički modeli rednih i otočnih elemenata distributivnih mreža predstavljani su u ovoj glavi. Predstavljani modeli su modeli uravnoteženih i neuravnoteženih elemenata koji se koriste za izvođenje matematičkog modela mreže u simetričnom i nesimetričnom režimu. Otočni elementi kao što su potrošači, distribuirani energetske resursi, kondenzatori i prigušnice, predstavljani su u delovima 2.1, 2.2 i 2.3, respektivno. Redni elementi kao što su kondenzatori i prigušnice, sekcije vodova i transformatori, predstavljani su u delovima 2.3, 2.4 i 2.5, respektivno.

2.1 POTROŠAČI

Generalno, potrošnja potrošača (aktivne i reaktivne snage) zavisna je od napona čvora u kome je potrošač priključen na mrežu, i to na sledeći način [71]:

$$P_{xk} = P_{0xk} + P_{1xk}u_{xk} + P_{2xk}u_{xk}^2, \quad (2.1.1)$$

$$Q_{xk} = Q_{0xk} + Q_{1xk}u_{xk} + Q_{2xk}u_{xk}^2, \quad (2.1.2)$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad k = 1, 2, \dots, N_{\check{c}v},$$

gde su:

$P_{0xk} = k_{sp}P_{xk}^{spec}$, $Q_{0xk} = k_{sq}Q_{xk}^{spec}$ – komponente fazne aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača, respektivno, priključenog u čvor k i fazu x , koje ne zavise od napona (komponente konstantne snage),

$P_{1xk} = k_{ip}P_{xk}^{spec}$, $Q_{1xk} = k_{iq}Q_{xk}^{spec}$ – komponente fazne aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača, respektivno, priključenog u čvor k i fazu x , koje linearno zavise od napona (komponente konstantnog modula struje i faktora snage),

$P_{2xk} = k_{yp}P_{xk}^{spec}$, $Q_{2xk} = k_{yq}Q_{xk}^{spec}$ – komponente fazne aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača, respektivno, priključenog u čvor k i fazu x , koje zavise od kvadrata napona (komponente konstantne impedanse/admitanse),

P_{xk}^{spec} , Q_{xk}^{spec} – specificirana fazna aktivna i reaktivna snaga potrošnje potrošača pri nominalnom naponu, respektivno, pri čemu su snage uzete sa dnevne krive opterećenja,

k_{sp} , k_{ip} , k_{yp} , k_{sq} , k_{iq} , k_{yq} – koeficijenti učešća delova fazne aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača pri nominalnom naponu, respektivno, pri čemu važe sledeće relacije:

$$k_{sp} + k_{ip} + k_{yp} = 1,$$

$$k_{sq} + k_{iq} + k_{yq} = 1,$$

$u_{xk} = U_{xk}/U_n$ – relativna vrednost modula faznog napona potrošača priključenog u čvor k i fazu x ,

U_{xk} – moduo faznog napona potrošača priključenog u čvor k i fazu x ,

U_n – nominalni fazni napon potrošača.

Za proračun kratkih spojeva koriste se dve predstave potrošača [72]:

1. Potrošači konstantne impedanse/admitanse – modelovani na prethodno opisan način, pri čemu koeficijenti učešća delova fazne aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača imaju vrednosti $k_{sp} = 0$, $k_{ip} = 0$, $k_{yp} = 1$, $k_{sq} = 0$, $k_{iq} = 0$ i $k_{yq} = 1$. Potrošač predstavljen konstantnom impedansom \hat{Z}_{xk} , ili admitansom \hat{Y}_{xk} , modeluje se na sledeći način:

$$\hat{Z}_{xk} = \frac{U_n^2}{P_{2xk} - jQ_{2xk}}, \quad (2.1.3)$$

$$\hat{Y}_{xk} = \frac{P_{2xk} - jQ_{2xk}}{U_n^2}; \quad (2.1.4)$$

2. Potrošači konstantnog modula struje i faktora snage – modelovani na prethodno opisan način, pri čemu koeficijenti učešća delova fazne aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača imaju vrednosti $k_{sp} = 0$, $k_{ip} = 1$, $k_{yp} = 0$, $k_{sq} = 0$, $k_{iq} = 1$ i $k_{yq} = 0$. Potrošač predstavljen idealnim strujnim generatorom sa konstantnim modulom struje i faktorom snage, pri čemu je \hat{I}_{xk} struja idealnog strujnog generatora, modeluje se na sledeći način:

$$\hat{I}_{xk} = \frac{P_{1xk} - jQ_{1xk}}{U_n}. \quad (2.1.5)$$

2.2 DISTRIBUIRANI ENERGETSKI RESURSI

U tradicionalnim mrežama tradicionalni DG imaju najveći doprinos vrednostima struja kratkih spojeva. Stoga, modelovanje takvih DG za potrebe proračuna kratkih spojeva utvrđeno je standardom IEC 60909 [20], i njihovi modeli predstavljeni su u paragrafu 2.2.1.

Pored tradicionalnih sinhronih i asinhronih DG koji su direktno priključeni na mrežu, veliki broj DG koji koriste obnovljive izvore energije (solarna energija, energija vetra, hidroenergija, geotermalna energija, energija biomase itd.) prisutan je u mrežama [73-75]. Razvoj energetske elektronike za konverziju jednosmerne u naizmeničnu električnu energiju i obrnuto, preko koje se DG priključuju ma mrežu, uticali su na to da se struje kratkih spojeva razlikuju od dosadašnjih [18, 21, 74, 76]. Brza energetska elektronika (ispravljači i invertori) ima mogućnost kontrole injektirane struje DG tokom kratkih spojeva pa se modelovanje takvih DG razlikuje od tradicionalnih DG. Savremeni DG zasnovani na invertoru predstavljeni su u paragrafu 2.2.2.

2.2.1 Tradicionalni DG

Tradicionalni DG (sinhroni i asinhroni mašine, direktno povezane na mrežu) modelovani su kao naponski generatori iza impedanse u subtranzitnom, tranzitnom ili u ustaljenom režimu za potrebe proračuna kratkih spojeva [17, 18, 20, 77, 78]. Takav model predstavlja Tevenenov ekvivalent DG.

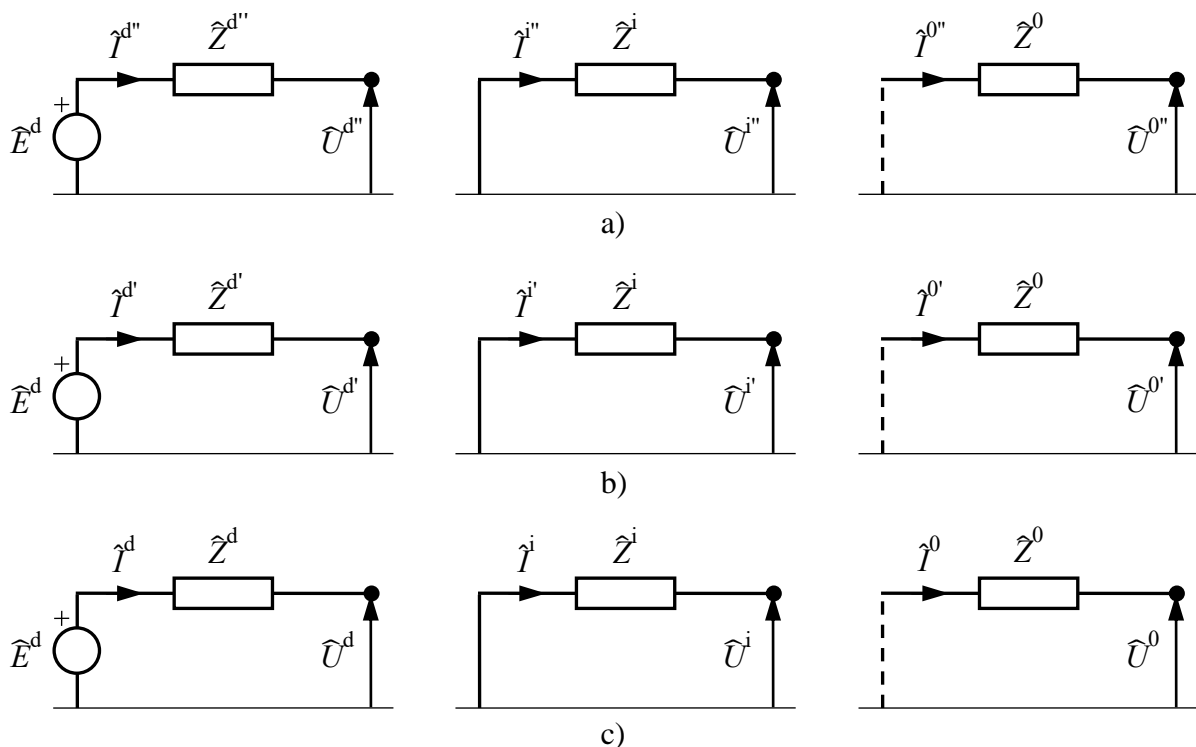
Na slici 2.2.1.1 [77] prikazana su pogonska kola sinhroni mašine koja predstavljaju linearan model potreban za proračun kratkih spojeva. Režim sa kratkim spojem generalno je

nesimetričan. Sinhrona mašina su uravnoteženi elementi pa je model na slici 2.2.1.1 predstavljen raspregnutim kolima u simetričnim režimima za tri vremenske sekvence: pod a) subtranzitnu, b) tranzitnu i pod c) ustaljenu.

U pogonskim kolima za direktan režim postoji idealni naponski generator sa elektromotornom silom \hat{E}^d . On predstavlja indukovanu elektromotornu silu namotaja statora usled obrtanja (sinhronom brzinom) konstantnog elektromagnetnog polja rotora izazvanog strujom pobude nezavisnog jednosmernog generatora u kolu rotora. U pogonskim kolima za inverzan i nulti režim ne postoje idealni naponski generatori jer su ti režimi posledica nesimetričnih kvarova, gde se i nalaze ekscitacije režima tih pogonskih kola.

Pogonska kola za nulti režim razlikuju se topološki u zavisnosti od načina na koji su povezani namotaji statora. Ukoliko su namotaji statora povezani u trougao ili neuzemljenu zvezdu, prekid nulte komponente struje modeluje se prekidom u kolima za nulti režim. Ukoliko su namotaji statora povezani u uzemljenu zvezdu, ne postoji prekid nulte komponente struje. Stoga, u pogonskim kolima za nulti režim isprekidanom linijom označeno je modelovanje prekida nulte komponente struje.

Impedanse u pogonskom kolu direktnog redosleda razlikuju se za sve tri vremenske sekvence. One predstavljaju pesimističku aproksimaciju impedanse u subtranzitnom $\hat{Z}^{d''}$, tranzitnom $\hat{Z}^{d'}$ i ustaljenom režimu \hat{Z}^d . Njima se, u prelaznim procesima sinhrona mašine usled kratkih spojeva, aproksimiraju impedanse koje se menjaju (povećavaju) u vremenu, pri čemu su uzete vrednosti na početku vremenskih sekvenci. Impedanse u pogonskim kolima inverznog \hat{Z}^i i nultog \hat{Z}^0 redosleda ne menjaju se u vremenskim sekvencama.



Slika 2.2.1.1 – Pogonska kola sinhrona mašine direktnog, inverznog i nultog redosleda za a) subtranzitnu, b) tranzitnu i c) ustaljenu vremensku sekvencu

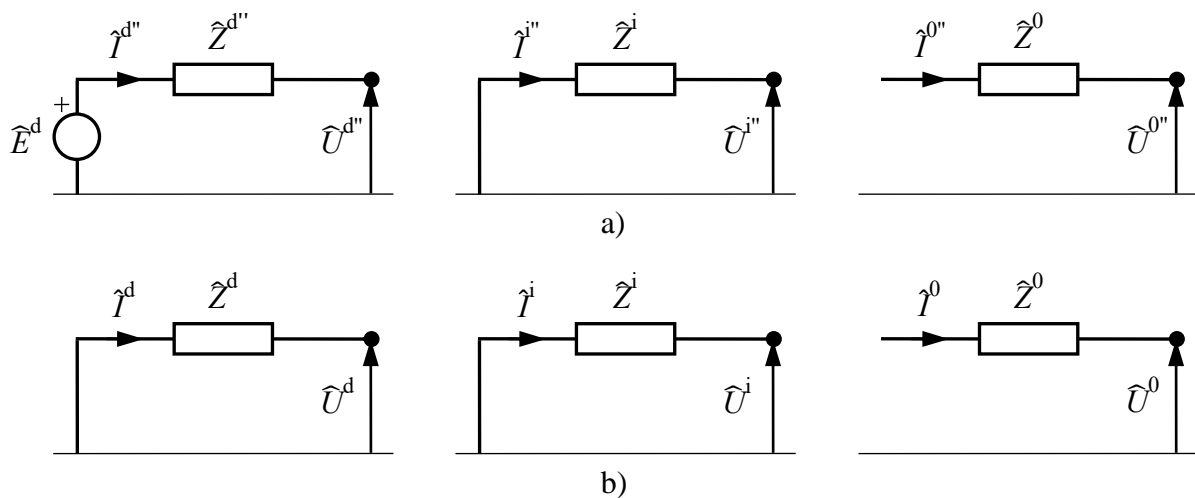
Pogonska kola asinhrona mašine prikazana su na slici 2.2.1.2 [5, 17]. Ona predstavljaju linearan model potreban za proračun kratkih spojeva. Za razliku od pogonskih

kola sinhronne mašine, kod asinhronih mašina ne postoji tranzitna vremenska sekvenca [5, 17, 77] zbog toga što je struja pobude u kolu rotora obezbeđena iz mreže.

U subtranzitnoj vremenskoj sekvenci indukovana elektromotorna sila \hat{E}^d u namotajima statora posledica je pobude koja brzo nestane jer je obezbeđena iz mreže. Zbog toga u ustaljenom režimu nema indukovane elektromotorne sile koja je posledica pobude.

Namotaji statora asinhronne mašine povezani su u neuzemljenu zvezdu ili trougao. Stoga, u pogonskom kolu za nulti režim postoji prekid nulte komponente struje.

Impedanse u direktnom režimu razlikuju se u vremenskim sekvencama iz istog razloga kao kod sinhronih mašina. Impedanse inverznog i nultog redosleda ne menjaju se u vremenskim sekvencama.



Slika 2.2.1.2 – Pogonska kola asinhronne mašine direktnog, inverznog i nultog redosleda za a) subtranzitnu i b) ustaljenu vremensku sekvencu

Pored linearnih modela, DG se mogu modelovati nelinearnim modelima specificiranjem aktivnih snaga DG koje su definisane krivama proizvodnje. Specificirane reaktivne snage DG definisane su specificiranim aktivnim snagama i željenim faktorima snage [79]. Ovakvi modeli karakteristični su za proračune tokova snaga [80] koji su potrebni za proračune režima sa kratkim spojevima.

2.2.2 DG zasnovani na invertoru

Elektronski spregnuti DG, poznati kao DG zasnovani na invertoru (IBDG) modelovani su u skladu sa [21]. S obzirom na to da oni imaju mogućnost da ograniče svoju struju kratkog spoja, modelovani su kao idealni strujni generatori sa predefinisanim strujnim ograničenjima. Proračun struja u subtranzitnoj vremenskoj sekvenci je zasnovan na naponima pre kratkog spoja kao i proizvodnji pre kratkog spoja, na šta utiče i neizvesna brzina vetra i osunčanost. Odnos delova aktivnih i reaktivnih komponenti struja kratkih spojeva određeni su na osnovu implementirane kontrolne strategije. U tranzitnoj i ustaljenoj vremenskoj sekvenci proračun struja je zasnovan na definisanim upravljačkim strategijama (FRT karakteristike, fault ride through). U nastavku su opisani modeli dva tipa DG zasnovanih na invertoru.

Na slici 2.2.2.1 prikazana je principna šema dvostrano napajane asinhronne mašine [18, 73, 74]. Mreža se napaja električnom energijom preko statora i rotora. Stator je direktno priključen na mrežu, a rotor je priključen preko uređaja energetske elektronike. Kod ovog tipa

DG u odnosu na tradicionalne DG veći je koeficijent korisnog dejstva, manje mehaničko opterećenje usled promene snage vetra i poboljšan je kvalitet električne energije koja se predaje mreži zbog mogućnosti kontrole napona i struje. Konvertori omogućuju da snaga ide u oba smera. Postoje dve zaštite energetske elektronike: kroubar, koji štiti AC/DC (Alternating Current / Direct Current) konvertor, i čoper, koji štiti kondenzator u jednosmernom kolu. Kroubar se nalazi u kolu rotora povezan redno, a čoper u jednosmernom kolu. U slučaju pada napona usled kratkog spoja, struja statora i rotora se povećava. Ukoliko je napon ispod unapred definisane vrednosti, kroubar će kratko spojiti rotorske namotaje i zaštititi AC/DC konvertor. Otpornost kroubara je oko 20 puta veća od otpornosti rotora, pa se u tom slučaju DG može tretirati kao tradicionalna asinhrona mašina sa uvaženom dodatnom impedansom u kolu rotora. Najčešće reagovanje kroubara je u slučaju kada su kratki spojevi blizu DG, jer takvi kratki spojevi izazivaju jako niske napone. Ukoliko su kvarovi dovoljno udaljeni od DG da pad napona nije veliki, kroubar neće odreagovati ali će reagovati čoper koji će energiju potrošiti na svom otporniku i time zaštititi kondenzator u jednosmernom kolu. U tom slučaju AC/DC konvertor neće biti aktivan. Postoje slučajevi kada je AC/DC konvertor dimenzionisan da u slučaju kvarova može i dalje da kontroliše injektiranje u mrežu. U svakom slučaju DC/AC konvertor može da kontroliše direktnu komponentu struje i u nekim slučajevima da ograniči (prekine) inverznu komponentu struje. Na osnovu opisanog, korišćenjem uređaja energetske elektronike omogućeno je da se realizuju upravljačke strategije prilikom pojave kratkih spojeva [76, 81].

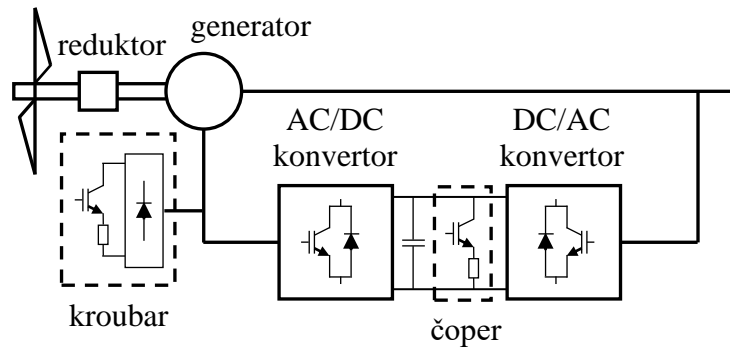
Na osnovu opisanog, modeli dvostrano napajanih DG u vremenskim sekvencama mogu se modelovati kao što je prikazano na slici 2.2.2.2 [74].

U subtranzitnoj sekvenci [21] u kolu za direktan režim postoji kontrolisan idealni strujni generator koji modeluje DC/AC konvertor. Idealni naponski generator \hat{E}^d može biti kontrolisan ukoliko nije odradila zaštita (kroubar ili čoper), ili u suprotnom nekontrolisan kada se može modelovati kao idealni naponski generator kao kod tradicionalnih asinhronih mašina. Impedansa $\hat{Z}^{d''}$, u slučaju da je odradio kroubar, predstavlja impedansu DG sa uvaženom impedansom kroubara. U slučaju da nije odradio kroubar, onda je to impedansa tradicionalnih asinhronih mašina. Impedansa u inverznom režimu \hat{Z}^i jednaka je impedansi tradicionalnih asinhronih mašina. Jedina razlika u inverznom kolu od tradicionalnih asinhronih mašina je mogućnost prekida inverzne komponente struje, što je označeno isprekidanom linijom. U nultom režimu postoji prekid zbog povezanosti statorskih namotaja u trougao ili neuzemljenu zvezdu.

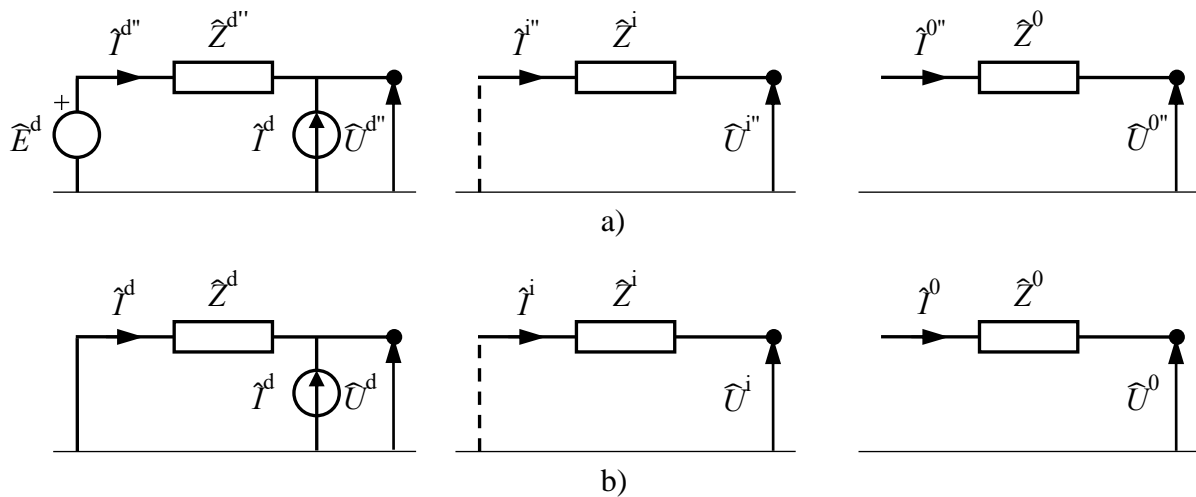
U tranzitnoj sekvenci postoji mogućnost kontrole direktne komponente struje zbog predefinisanih upravljačkih strategija. U suprotnom ne postoji tranzitna sekvenca nego odmah nastupa ustaljena u kojoj, zbog delovanja zaštite, ne postoji kontrolisan napon u kolu rotora, a idealni strujni generator u tom slučaju ne postoji jer pobuda potiče iz mreže. Idealni strujni generator u kolu direktne komponente može i dalje da kontroliše direktnu komponentu struje. Impedanse u inverznom i nultom režimu su ostale nepromenjene u odnosu na subtranzitnu vremensku sekvencu, i može se obezbediti prekid inverzne komponente struje, dok u kolu za nulti redosled ostaje prekid nulte komponente struje zbog odgovarajuće povezanosti namotaja.

Pored prethodno opisanog tipa DG postoje i DG koji su povezani na mrežu isključivo preko uređaja energetske elektronike, kao što je prikazano na slici 2.2.2.3 [74]. Ovakvi DG (vetro i solarni generatori) imaju mogućnost potpune kontrole injektirane struje prilikom pojave kratkih spojeva. Struja se u tim slučajevima ograničava na vrednost od 1,1 do 1,4 puta veću od nominalne struje. U prvoj periodu, odmah nakon pojave kratkog spoja, struja može dostići do 2,5 puta veću vrednost od nominalne vrednosti, ali se takva struja brzo ograničava konvertorima. Zbog mogućnosti kontrole injektirane struje u sve tri vremenske sekvence,

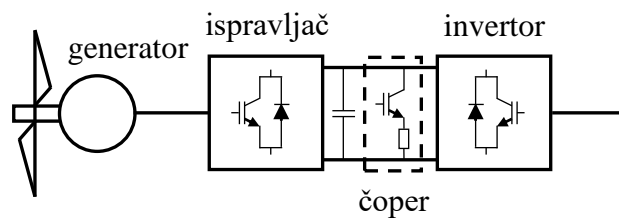
pogonska kola ovakvih DG prikazana su na slici 2.2.2.4 [73, 74]. U kolu za direktan režim kontroliše se direktna komponenta injektirane struje, dok se u inverznom i nultom režimu mogu modelovati prekidi inverzne i nulte komponente struje jer se te komponente mogu konvertorima ograničiti.



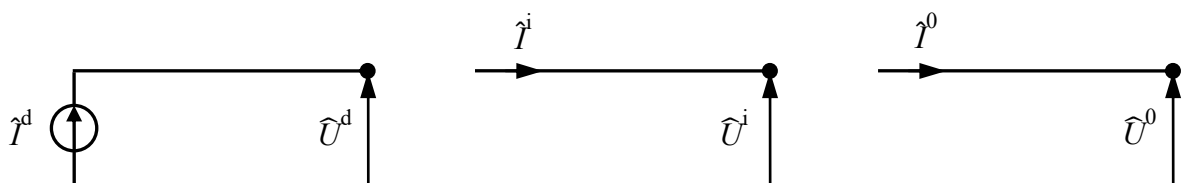
Slika 2.2.2.1 – Principialna šema dvostrano napajane asinhronne mašine



Slika 2.2.2.2 – Pogonska kola dvostrano napajane asinhronne mašine direktnog, inverznog i nultog redosleda za a) subtranzitnu i b) ustaljenu vremensku sekvencu



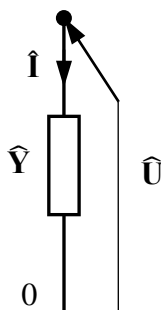
Slika 2.2.2.3 – Principialna šema DG povezanog na mrežu preko uređaja energetske elektronike



Slika 2.2.2.4 – Pogonska kola DG, povezanog na mrežu preko uređaja energetske elektronike, direktnog, inverznog i nultog redosleda za sve tri vremenske sekvence

2.3 KONDENZATORI I PRIGUŠNICE

Kondenzatori i prigušnice obično predstavljaju otočne elemente elektroenergetskih sistema. Kondenzatori, kao otočni elementi, koriste se za kompenzaciju reaktivne snage. Modeluju se zadatom kapacitivnošću C , koja može biti promenljiva i čijom promenom se može menjati injektirana reaktivna snaga u mrežu na mestu priključka kondenzatora. Na osnovu poznate kapacitivnosti može se izračunati otočna admitansa $\hat{Y} = j\omega C$, koja predstavlja model jednofaznog kondenzatora potreban za proračun kratkih spojeva. U slučaju n -faznog kondenzatora model kondenzatora predstavljen je matricom \hat{Y} dimenzije $n \times n$ koja povezuje režimske veličine, napone i struje, predstavljene vektorima \hat{U} i \hat{I} , kao na slici 2.3.1. Prigušnice, kao otočni elementi, modeluju se na sličan način kao otočni kondenzatori. Na osnovu zadate induktivnosti L može se izračunati otočna admitansa $\hat{Y} = -j1/\omega L$, koja predstavlja model jednofazne prigušnice potrebne za proračun kratkih spojeva. U slučaju n -fazne prigušnice model prigušnice predstavljen je matricom \hat{Y} dimenzije $n \times n$, na isti način kao model kondenzatora prikazan na slici 2.3.1.



Slika 2.3.1 – Pogonsko kolo kondenzatora i prigušnice

Kondenzatori i prigušnice, kao redni elementi elektroenergetskih sistema, koriste se za ograničavanje struja kratkih spojeva. U tom slučaju modeluju se zadatom kapacitivnošću C i induktivnošću L , respektivno. Na osnovu poznate kapacitivnosti i induktivnosti mogu se izračunati redne impedanse $\hat{Z} = -j1/\omega C$ i $\hat{Z} = j\omega L$, koje predstavljaju modele jednofaznih rednih kondenzatora i prigušnica, respektivno. U slučaju n -faznih rednih kondenzatora i prigušnica njihovi modeli predstavljeni su matricama rednih impedansi \hat{Z} dimenzije $n \times n$. Takvi modeli mogu da se svedu na model sekcije voda pri čemu su admitanse otočnih parametara jednake nuli [80].

2.4 SEKCIJE VODOVA

Sekcije vodova se mogu podeliti u zavisnosti od toga da li su nadzemne ili podzemne, sa izolovanim ili neizolovanim provodnicima. U distributivnoj mreži postoje kablovski vodovi (podzemni vodovi sa izolovanim provodnicima), (nadzemni) vodovi sa neizolovanim (golim) provodnicima i u malom broju slučajeva nadzemni vodovi sa izolovanim provodnicima.

Sekcija voda se za potrebe proračuna kratkih spojeva može modelovati električnim koncentrisanim parametrima u najčešće korišćenim šemama: Π , Γ , obrnuto Γ ili T šemama. U ovoj disertaciji je korišćena Π šema sekcije voda. Za proračun parametara kablovskih vodova koriste se parametri dati u domenu simetričnih komponenti [80], ili modifikovani Karsonovi obrasci i jednačine pada napona između provodnika [82]. Za proračun parametara vodova golih provodnika, koji zavise od broja provodnika, postojanja neutralnog provodnika,

materijala faznih i neutralnog provodnika, rasporeda provodnika u glavi stuba, visine stuba i tipa zemljišta, koriste se Karsonovi obrasci i koeficijenti potencijala [80, 82, 83]. U Karsonovim obrascima se usvaja pretpostavka da zemlja ima konstantnu otpornost i da je beskonačna ravna ploča. Obrasci se zasnivaju na teoriji likova, što znači da provodnik ima svoj lik na istoj udaljenosti normalno od zemlje, koji se nalazi u zemlji (fiktivno). U prilogu u delu 9.1 je prikazano detaljno izvođenje parametara vodova golih provodnika pomoću Karsonovih obrazaca.

Neka je prvi čvor sekcije voda (čvor K) čvor koji je „bliži“ korenu mreže od drugog čvora (čvor k). Matematički model n -fazne sekcije, čije je ekvivalentno kolo prikazano na slici 2.4.1, sa uvažanim rednim impedansama i otočnim admitansama, može se napisati na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{I}}'_k = \hat{\mathbf{I}}''_k, \quad \hat{\mathbf{I}}_{oK} = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{Y}}_{abc} \hat{\mathbf{U}}_K, \quad \hat{\mathbf{I}}_{ok} = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{Y}}_{abc} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad \hat{\mathbf{U}}_k = \hat{\mathbf{U}}_K - \hat{\mathbf{Z}}_{abc} \hat{\mathbf{I}}'_k. \quad (2.4.1)$$

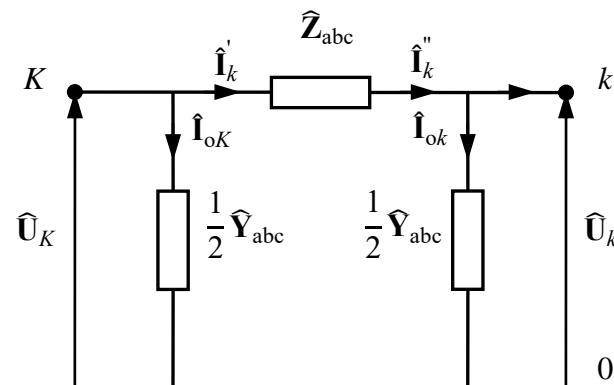
gde su:

$\hat{\mathbf{U}}_K, \hat{\mathbf{U}}_k$ – vektori faznih napona prvog i drugog čvora sekcije, dimenzije $n \times 1$,

$\hat{\mathbf{I}}'_k, \hat{\mathbf{I}}''_k$ – međusobno jednaki vektori struja na krajevima rednih parametara sekcije, dimenzije $n \times 1$,

$\hat{\mathbf{I}}_{oK}, \hat{\mathbf{I}}_{ok}$ – vektori struja otočnih parametara kod prvog i drugog čvora sekcije, dimenzije $n \times 1$,

$\hat{\mathbf{Z}}_{abc}, \hat{\mathbf{Y}}_{abc}$ – matrični reprezentanti rednih i otočnih parametara sekcije (jednaki kod oba čvora sekcije), dimenzije $n \times n$. Ako je trofazna sekcija ($n = 3$) uravnotežena, onda su te matrice cirkularne. Dodatno, ako su vektori svih napona i struja sekcije simetrični, onda je sekcija u simetričnom režimu.



Slika 2.4.1 – Ekvivalentno kolo trofazne sekcije voda

2.5 TRANSFORMATORI

Matematički modeli trofaznih uravnoteženih transformatora prikazani su u ovom delu. Modeli su iskazani u terminima napona i struja. Smatraće se da su modeli linearni, odnosno magnetna kola nisu zasićena magnetnim poljem u režimima sa kratkim spojevima pa su naponi i struje povezani linearnim relacijama [84, 85]. Trofazni neuravnoteženi transformatori [85] nisu prikazani jer su njihovi matematički modeli formalno isti sa modelima trofaznih uravnoteženih transformatora u pogledu matričnih reprezentata. Jednofazni transformatori neće biti posebno obrađeni zbog jednostavnosti svojih matematičkih modela.

Na osnovu nominalnih podataka transformatora (nominalna snaga, nominalni naponi, sprega transformatora) i podataka dobijenih ogledima kratkog spoja i praznog hoda (napon kratkog spoja, snaga gubitaka kratkog spoja, struja praznog hoda, snaga gubitaka praznog hoda) mogu se izračunati električni parametri transformatora [77, 83, 86]. Ovo se odnosi na trofazne uravnotežene i jednofazne transformatore, kao i trofazne neuravnotežene transformatore (konstituisane od tri jednofazna različita transformatora ili dva transformatora povezana u otvorenu spregu) [87, 88].

Primenom metoda nezavisnih napona trofazni transformator se može modelovati matricom rednih admitansi \hat{Y}_r [89, 90], koja se može podeliti na četiri submatrice \hat{Y}_{KK} , \hat{Y}_{kk} , \hat{Y}_{Kk} i \hat{Y}_{kK} , koje u sebi sadrže admitanse (impedanse) kratkog spoja i odnos transformacije. Čvorovi K i k se odnose na prvi i drugi čvor transformatora, respektivno. Neka je prvi čvor „bliži“ korenu mreže od drugog čvora. Za potrebe proračuna kratkih spojeva transformator se može predstaviti ekvivalentnim kolom prikazanim na slici 2.5.1. Oznake na slici su:

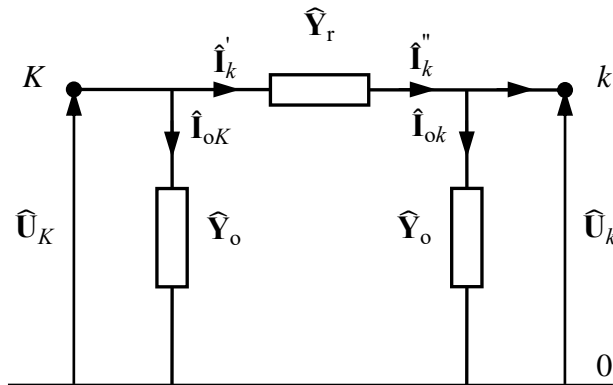
\hat{U}_K, \hat{U}_k – vektori faznih napona prvog i drugog čvora transformatora, dimenzije 3×1 ,

\hat{I}'_k, \hat{I}''_k – međusobno različiti vektori struja na krajevima rednih parametara transformatora, dimenzije 3×1 ,

$\hat{I}_{oK}, \hat{I}_{ok}$ – vektori struja otočnih parametara kod prvog i drugog čvora transformatora, dimenzije 3×1 ,

$\hat{Y}_r = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{KK} & \hat{Y}_{Kk} \\ \hat{Y}_{kK} & \hat{Y}_{kk} \end{bmatrix}$ – matrični reprezent rednih parametara transformatora, dimenzije 6×6 ,

\hat{Y}_o – matrični reprezent otočnih parametara transformatora, dimenzije 3×3 . Na slici 2.5.1 prikazan je kod oba čvora transformatora ali samo kod jednog čvora može biti različit od nule.



Slika 2.5.1 – Ekvivalentno kolo transformatora

Matematički model trofaznog transformatora u faznom domenu, napisan saglasno sa metodom nezavisnih napona, koji je suštinski isti za uravnotežene i neuravnotežene transformatore, pri čemu su idealni transformatori realnih odnosa transformacije eliminisani primenom sistema relativnih vrednosti [91], može se napisati na sledeći način [80]:

$$\hat{I}'_k = \hat{Y}_{KK} \hat{U}_K + \hat{Y}_{Kk} \hat{U}_k, \quad -\hat{I}''_k = \hat{Y}_{kK} \hat{U}_K + \hat{Y}_{kk} \hat{U}_k, \quad \hat{I}_{oK} = \hat{Y}_o \hat{U}_K, \quad \hat{I}_{ok} = \hat{Y}_o \hat{U}_k. \quad (2.5.1)$$

Matematički model trofaznih transformatora dat relacijama 2.5.1 isti je za sve transformatore sa spregama Yy , Dd , Yd i Dy . U slučaju transformatora sa spregama $Yy0$, $Dd0$, $Yd1$ i $Dy1$ u tabeli 2.5.1 dati su matrični reprezenti četiri submatrice \hat{Y}_{KK} , \hat{Y}_{kk} , \hat{Y}_{Kk} i

\hat{Y}_{kK} . U slučaju transformatora sa ostalim sprežnim brojevima matricni reprezentanti četiri submatrice dobijaju se preko matrica incidencije [90].

Oznake u tabeli 2.5.1 su (T je znak za transpoziciju matrice):

$$\hat{Y}_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{Y}_k, \hat{Y}_{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \hat{Y}_k, \hat{Y}_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{Y}_k, \hat{Y}_k = \frac{1}{Z_k}, \quad (2.5.2)$$

gde je \hat{Y}_k admitansa kratkog spoja transformatora.

Tabela 2.5.1 – Vrednosti submatrica matrice admitansi u zavisnosti od sprege transformatora

Sprega	\hat{Y}_{KK}	\hat{Y}_{kk}	\hat{Y}_{Kk}	\hat{Y}_{kK}
Y_{NYn}	\hat{Y}_I	\hat{Y}_I	$-\hat{Y}_I$	$-\hat{Y}_I$
Y_{NY}	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{II}	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$
Y_{Nd}	\hat{Y}_I	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}
Y_{yn}	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{II}	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$
Y_y	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{II}	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$
Y_d	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}
D_{yn}	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_I	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}
D_y	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}
D_d	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{II}	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$

Matrica \hat{Y}_I je regularna, a matrice \hat{Y}_{II} i \hat{Y}_{III} su singularne. Stoga, na osnovu tabele 2.5.1 matrice \hat{Y}_{KK} , \hat{Y}_{kk} , \hat{Y}_{Kk} i \hat{Y}_{kK} mogu biti i regularne i singularne.

Matematički model trofaznog transformatora predstavljen matricnim relacijama (2.5.1), sastoji se od devet skalarnih relacija (\hat{Y}_o kod jednog čvora može biti različito od nule pa se relacije sa strujama otočnih parametara kod drugog čvora mogu zanemariti) i petnaest promenljivih (\hat{U}_K , \hat{U}_k , \hat{I}'_k , \hat{I}''_k i jedan od dva vektora struja otočnih parametara \hat{I}_{oK} ili \hat{I}_{ok}). Za određivanje režima transformatora potrebno je specificirati šest od petnaest promenljivih, koje predstavljaju ekscitaciju transformatora. Sa zadatom ekscitacijom transformatora preostalih devet nepoznatih promenljivih se može izračunati iz devet jednačina matematičkog modela.

Matematički model jednofaznih transformatora ima istu formu kao forma data relacijama (2.5.1). Razlika u odnosu na matematički model trofaznih transformatora je u tome što su sve matrice i vektori matematičkih modela jednofaznih transformatora dimenzije 1×1 .

3 INTERVALNA ARITMETIKA

Intervalna aritmetika predstavlja aritmetiku u kojoj se za matematičke objekte koriste skupovi brojeva. Realna intervalna aritmetika predstavlja aritmetiku sa skupovima realnih brojeva. Realni interval, kao podskup skupa realnih brojeva, pogodan je za opis svojstava čija tačna (deterministička) vrednost nije poznata, ali se zna da se ona nalazi unutar intervala. Realan interval se definiše kao zatvoren, neprekidan skup realnih brojeva [92]. Prve upotrebe intervalne aritmetike bile su u računarima koji su se pojavili početkom šezdesetih godina dvadesetog veka. Diskretna priroda računara zahtevala je da se greške u zaokruživanju minimizuju i da se unapredi računarska nepreciznost. Računarska preciznost nekog broja se može opisati intervalom kome pripada taj broj. Kako bi se greške u zaokruživanju zbog računarske nepreciznosti kontrolisale, američki matematičar Ramon Mur je uveo prve intervalne metode [93] koje su se kasnije razvijale u novoj oblasti primenjene matematike i računarstva – intervalnoj aritmetici.

Pristup u kome korišćenje intervalne aritmetike podrazumeva zamenu brojeva intervalima dovodi do pesimističkih rezultata u kojima su širine intervala neprihvatljivo velike. Ovakav konzervativan pristup daje rezultate u kojima su sadržane sve moguće vrednosti – tačne vrednosti sa svojim greškama kao i greške tih grešaka. S obzirom na to da je naveden pristup nepraktičan, u korišćenju intervalne aritmetike treba težiti što je moguće užim intervalima koji zadovoljavaju očekivanu preciznost [94]. Intervali se mogu koristiti za rešavanje problema sa netačnim i tačnim brojevima. Ukoliko se polazi od netačnih brojeva, predstava intervalima je pogodna jer se neizvesnosti mogu jednostavno predstaviti varijacijom unutar intervala. Cilj rešavanja problema su što uži intervali u kojima je sadržano tačno rešenje. U slučaju rešavanja problema sa tačnim brojevima upotreba intervala se ogleda u razvoju metoda koje generišu konvergentne nizove intervala koji u toku iterativnog postupka treba da postanu dovoljno mali ili da sadrže tačna rešenja [93]. Ovakvo korišćenje može da da granične vrednosti greške rezultata.

Osobina inkluzivnosti, koja je implicitno opisana u načinu upotrebe intervalne aritmetike, učinila je intervalnu aritmetiku popularnom u analizama greške prilikom rešavanja nelinearnih problema, problema optimizacije i diferencijalno-integralnog računa [94]. U praksi joj je najčešća primena u numeričkim analizama, simulacijama sa promenljivim parametrima, analizama stabilnosti sistema, finansijama, geodeziji, modelima haotičnih fenomena, proračunima svemirskih letova, dokazivanje teorema pomoću računara itd.

Brzina proračuna sa intervalima bio je nedostatak upotrebe intervalne aritmetike sve do razvoja savremenih računara. Značajno povećanje računarske moći je uticalo na to da povećan broj operacija nad intervalima u odnosu na broj operacija nad brojevima ne utiče značajno na brzinu metoda koje koriste intervale.

U ovoj glavi disertacije prikazane su osnovne teoreme skupova koje su potrebne za definisanje osnovnih koncepata realne intervalne aritmetike. Pored osnovnih definicija i koncepata prikazane su osnovne operacije nad realnim intervalima i kompleksnim brojevima predstavljenim intervalima. Prikazana su dva različita pristupa i dve različite definicije intervala: sa Murovom i RDM intervalnom aritmetikom. Za potrebe korišćenja intervalne aritmetike u proračunima kratkih spojeva, predstavljene su osnovne teoreme funkcija sa intervalima. Rešavanje sistema linearnih jednačina sa intervalima predstavlja osnovu proračuna kratkih spojeva u disertaciji. Stoga, sistemi intervalnih linearnih jednačina i njihovo rešavanje, kao i problemi i ograničenja koja se javljaju prilikom rešavanja sistema, opisani su u ovoj glavi.

3.1 OSNOVNE TEOREME I OPERACIJE

Definicija 3.1.1 [95, 96]: Dekartov (Kartezijanski) proizvod dva skupa A i B , u oznaci $A \times B$, predstavlja skup svih uređenih parova (a, b) gde je prva komponenta element skupa A , a druga element skupa B u oznaci:

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A \wedge b \in B\}.$$

Definicija 3.1.2 [96]: Binarna relacija ρ skupa A i skupa B predstavlja podskup njihovog dekartovog proizvoda $A \times B$. Uopšteno, binarna relacija je uređena trojka (A, B, ρ) gde je $\rho \subseteq A \times B$, i za elemente $a \in A$ i $b \in B$ koji su u relaciji ρ piše se $(a, b) \in \rho$ ili $a \rho b$.

Osobine koje se definišu za relaciju ρ u skupu A su [95]:

1. refleksivnost: $(\forall a \in A) a \rho a$,
2. simetričnost: $(\forall a, b \in A) a \rho b \Rightarrow b \rho a$,
3. antisimetričnost: $(\forall a, b \in A) a \rho b \wedge b \rho a \Rightarrow a = b$,
4. tranzitivnost: $(\forall a, b, c \in A) a \rho b \wedge b \rho c \Rightarrow a \rho c$.

Relacija ρ u skupu A koja ima osobine refleksivnosti, antisimetričnosti i tranzitivnosti predstavlja relaciju parcijalnog poretka [96].

Relacija parcijalnog poretka koja zadovoljava uslov:

$$(\forall a, b \in A) a \rho b \vee b \rho a, \tag{3.1.1}$$

predstavlja relaciju totalnog poretka ili samo relaciju poretka [97].

Definicija 3.1.3 [97]: Relacija \leq skupa A je relacija poretka, i skup $\{A, \leq\}$ je uređen skup ako:

1. $(\forall a \in A) a \leq a$,
2. $(\forall a, b \in A) a \leq b \wedge b \leq a \Rightarrow a = b$,
3. $(\forall a, b, c \in A) a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \leq c$.

Uređen skup $\{A, \leq\}$ je linearno ili totalno uređen skup ako:

$$(\forall a, b \in A) a \leq b \vee b \leq a. \tag{3.1.2}$$

Ako je $\{A, \leq\}$ linearno uređen skup i postoji skup B tako da je $B \subseteq A$, tada je $\{B, \leq\}$ takođe linearno uređen skup.

Definicija 3.1.4 [97]: Ako za svaki par $\{a, b\}$ iz uređenog skupa $\{A, \leq\}$, pri čemu $a, b \in A$, važi relacija $a \leq b$, tada se interval $[a, b]$ definiše na sledeći način:

$$[a, b] = \{x \in A \mid a \leq x \leq b\}.$$

Definicija 3.1.5 [94]: Osnovni otvoren skup realnih brojeva \mathbb{R} je skup $\{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$ pri čemu $a, b \in \mathbb{R}$.

Definicija 3.1.6 [94]: Skup $A \subset \mathbb{R}$ je otvoren ako za svaki element $x \in A$ postoji osnovni otvoren skup U_x tako da $x \in U_x \subset A$.

Definicija 3.1.7 [94]: Skup $A \subset \mathbb{R}$ je zatvoren ako je njegov komplementarni skup otvoren.

Definicija 3.1.8 [94]: Skup $A \subset \mathbb{R}$ je neprekidan ako ne postoje disjunktni, neprazni, otvoreni skupovi U_1 i U_2 tako da svaki preseca skup A i za skup A važi $A \subset U_1 \cup U_2$.

Teorema 3.1.1 [94]: Neka su a i b realni brojevi. Zatvoreni, neprekidni skupovi realnih brojeva su:

1. $\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$,
2. $\{x \in \mathbb{R} \mid x \leq b\}$,
3. $\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x\}$,
4. \mathbb{R} .

Ne postoje drugi zatvoreni, neprekidni skupovi realnih brojeva.

Na osnovu teoreme 3.1.1 prazan skup \emptyset je zatvoren, neprekidan skup [94].

Definicija 3.1.9 [94]: Realni interval je zatvoren, neprekidan skup realnih brojeva.

Definicija 3.1.10 [94]: Neka su a i b realni brojevi takvi da je $a \leq b$. Tada se mogu definisati prošireni realni intervali:

1. $[a, b] = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$,
2. $[-\infty, b] = \{x \in \mathbb{R} \mid x \leq b\}$,
3. $[a, +\infty] = \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x\}$,
4. $[-\infty, +\infty] = \mathbb{R}$.

Oznaka za prazan interval neće se u disertaciji koristiti pa će se jednostavno prazan interval označiti kao prazan skup \emptyset .

Navedene definicije realnih intervala 3.1.9 i 3.1.10 u skladu su sa fundamentalnim teoremama intervalne analize [92] zasnovane na teoriji skupova. Drugi, fundamentalno drugačiji pristup je pristup definisanju realnih intervala i teorema intervalne analize na osnovu topološke teorije [98] koji nije u širokoj upotrebi kada je potrebno rešiti numeričke probleme. Pristup zasnovan na teoriji skupova i definicije izvedene iz njega potpuno su u skladu sa konvencionalnim Murovim definicijama [93].

Konvencionalna Murova aritmetika realnih intervala ima ograničene mogućnosti koje se najviše ogledaju u praktičnim primenama realne intervalne aritmetike, kao što je na primer rešavanje jednačina. U cilju prevazilaženja tih problema realni intervali se mogu definisati pomoću koncepta varijable i relativne udaljenosti od varijable RDM (Relative Distance Measure) [99].

Definicija 3.1.11 [99]: RDM varijabla x predstavljena realnim intervalom $x \in [\underline{x}, \bar{x}]$ definiše se pomoću realnih varijabli x_m , α_x i ΔL_x na sledeći način:

$$x \in [x_m + \alpha_x \Delta L_x],$$

gde su:

centralna vrednosti intervala: $x_m = \frac{\bar{x} + \underline{x}}{2}$

realan broj između -1 i 1 : $\alpha_x \in [-1, 1]$,

polovina širine intervala: $\Delta L_x = \bar{x} - x_m = x_m - \underline{x}$.

Intervalna aritmetika sa RDM varijablama naziva se RDM intervalna aritmetika [99]. U disertaciji će se za oba slučaja, RDM i Murove intervalne aritmetike, koristiti termin intervalna aritmetika. Za prošireni realni interval koristiće se samo termin interval.

3.1.1 Osnovni koncepti

U ovom delu prikazani su osnovni koncepti intervala koji se odnose na intervale posmatrane uopšteno definisane definicijom 3.1.4, a ne samo na realne intervale.

Definicija 3.1.1.1 [97]: Dva intervala $[a_1, a_2]$ i $[b_1, b_2]$ su jednaka ako su $a_1 = b_1$ i $a_2 = b_2$. Važi i obrnuta implikacija.

Definicija 3.1.1.2 [95]: Interval $[a, b]$ je degenerativan ukoliko je $a = b$ i može se zapisati na sledeći način: $[a, a]$.

Definicija 3.1.1.3 [95]: Presek dva intervala $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ je interval $C = [c_1, c_2]$, u oznaci:

$$A \cap B = C = \{c \mid c \in A \wedge c \in B\} = [\max\{a_1, b_1\}, \min\{a_2, b_2\}].$$

U posebnom slučaju kada je $b_2 < a_1$ ili $a_2 < b_1$ presek intervala A i B je prazan skup. U intervalnoj analizi presek intervala je od izuzetne važnosti jer rezultujući interval, koji je uži ili jednake širine sa širim intervalom, može da sadrži elemente koji su od interesa i veliki broj elemenata koji nisu od interesa.

Definicija 3.1.1.4 [95]: Unija dva intervala $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ je interval $C = [c_1, c_2]$, u oznaci:

$$A \cup B = C = \{c \mid c \in A \vee c \in B\} = [\min\{a_1, b_1\}, \max\{a_2, b_2\}].$$

U opštem slučaju unija dva intervala nije interval jer može da se desi da je $b_2 < a_1$ ili $a_2 < b_1$ i tada unija dva intervala nije neprekidan skup.

Definicija 3.1.1.5 [95]: Relacija $<$ nad intervalima $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$, u oznaci $A < B$, znači da je $a_2 < b_1$.

Za relaciju $<$ nad intervalima važi tranzitivnost, odnosno ako za intervale A , B i C važi $A < B$ i $B < C$ onda sledi da je $A < C$.

Definicija 3.1.1.6 [95]: Interval $A = [a_1, a_2]$ je pozitivan ako su $a_1 > 0 \wedge a_2 > 0$. Interval $A = [a_1, a_2]$ je negativan ako su $a_1 < 0 \wedge a_2 < 0$.

Definicija 3.1.1.7 [95]: Relacija inkluzivnosti nad intervalima $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ definiše se na sledeći način:

$$A \subseteq B \text{ ako i samo ako } b_1 \leq a_1 \wedge a_2 \leq b_2.$$

3.1.2 Aritmetičke operacije nad intervalima

Definicija 3.1.2.1 [93, 95]: Osnovne aritmetičke operacije nad intervalima $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ su:

sabiranje $A + B = \{a + b \mid a \in A \wedge b \in B\} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2]$,

oduzimanje $A - B = \{a - b \mid a \in A \wedge b \in B\} = [a_1 - b_2, a_2 - b_1]$,

množenje $A \times B = \{a \times b \mid a \in A \wedge b \in B\} =$
 $= [\min\{a_1 \times b_1, a_1 \times b_2, a_2 \times b_1, a_2 \times b_2\}, \max\{a_1 \times b_1, a_1 \times b_2, a_2 \times b_1, a_2 \times b_2\}]$,

deljenje $A / B = \{a / b \mid a \in A \wedge b \in B\} = [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1]$, pri čemu $0 \notin B$.

Za aritmetičke operacije sabiranja i množenja, kao posledica definicije 3.1.2.1, važe zakoni komutativnosti i asocijativnosti [93, 95]:

komutativnost $A + B = B + A, A \times B = B \times A$,

asocijativnost $(A + B) + C = A + (B + C)$.

Zakon distributivnosti za aritmetičke operacije sabiranja i množenja ne važi [93, 95]:

$$C(A + B) \neq CA + CB. \quad (3.1.2.1)$$

Za intervale se može definisati zakon subdistributivnosti [93, 95]:

$$C(A + B) \subset CA + CB. \quad (3.1.2.2)$$

U specijalnom slučaju kada je C degenerativni interval važi zakon distributivnosti.

Na osnovu navedenog mogu se napisati teoreme aritmetičkih operacija nad intervalima.

Teorema 3.1.2.1 [94]: Ako su A i B neprazni intervali, onda su $A + B$, $A - B$ i $A \times B$ intervali. Ako $0 \notin B$ onda je A / B interval. Generalno, funkcija nad A i B ima za rezultat interval ako je neprekidna nad domenom $A \times B$.

Teorema 3.1.2.2 [94]: Ako su A i B neprazni intervali, onda je A / B prazan interval ako i samo ako je $B = [0, 0]$.

U tabelama 3.1.2.1 i 3.1.2.2 prikazani su rezultati $C = [c_1, c_2]$ operacija množenja i deljenja intervala $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ u zavisnosti od graničnih vrednosti intervala [94]. Navedeni rezultati operacija su u skladu sa IEEE 1788 standardom za intervalnu aritmetiku.

Tabela 3.1.2.1 – Množenje intervala

A		B		C = A × B	
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1 b_1$	$c_2 = a_2 b_2$
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_2 b_1$	$c_2 = a_2 b_2$
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2 b_1$	$c_2 = a_1 b_2$
$a_1 < 0$	$a_2 > 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1 b_2$	$c_2 = a_2 b_2$
$a_1 < 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = \min\{a_1 b_2, a_2 b_1\}$	$c_2 = \max\{a_1 b_1, a_2 b_2\}$
$a_1 < 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2 b_1$	$c_2 = a_1 b_1$
$a_1 < 0$	$a_2 < 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1 b_2$	$c_2 = a_2 b_1$
$a_1 < 0$	$a_2 < 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1 b_2$	$c_2 = a_1 b_1$
$a_1 < 0$	$a_2 < 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2 b_2$	$c_2 = a_1 b_1$
$a_1 = 0$	$a_2 = 0$	$b_1 \neq 0$	$b_2 \neq 0$	$c_1 = 0$	$c_2 = 0$
$a_1 \neq 0$	$a_2 \neq 0$	$b_1 = 0$	$b_2 = 0$	$c_1 = 0$	$c_2 = 0$

Tabela 3.1.2.2 – Deljenje intervala

A		B		C = A / B		C = A / B	
						$b_1 = 0 \vee b_2 = 0$	
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1/b_2$	$c_2 = a_2/b_1$	$b_1 = 0$	$c_1 = a_1/b_2$ $c_2 = +\infty$
$a_1 = 0$	$a_2 > 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = 0$	$c_2 = a_2/b_1$	$b_1 = 0$	$c_1 = 0$ $c_2 = +\infty$
$a_1 < 0$	$a_2 > 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1/b_1$	$c_2 = a_2/b_1$	$b_1 = 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = +\infty$
$a_1 < 0$	$a_2 = 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1/b_1$	$c_2 = 0$	$b_1 = 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = 0$
$a_1 < 0$	$a_2 < 0$	$b_1 > 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = a_1/b_1$	$c_2 = a_2/b_2$	$b_1 = 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = a_2/b_2$
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	nije interval $[-\infty, a_1/b_1] \cup [a_1/b_2, +\infty]$		-	
$a_1 = 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = +\infty$		-	
$a_1 < 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = +\infty$		-	
$a_1 < 0$	$a_2 = 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = +\infty$		-	
$a_1 < 0$	$a_2 < 0$	$b_1 < 0$	$b_2 > 0$	nije interval $[-\infty, a_2/b_2] \cup [a_2/b_1, +\infty]$		-	
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2/b_2$	$c_2 = a_1/b_1$	$b_2 = 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = a_1/b_1$
$a_1 = 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2/b_2$	$c_2 = 0$	$b_2 = 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = 0$
$a_1 < 0$	$a_2 > 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2/b_2$	$c_2 = a_1/b_2$	$b_2 = 0$	$c_1 = -\infty$ $c_2 = +\infty$
$a_1 < 0$	$a_2 = 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = 0$	$c_2 = a_1/b_2$	$b_2 = 0$	$c_1 = 0$ $c_2 = +\infty$
$a_1 < 0$	$a_2 < 0$	$b_1 < 0$	$b_2 < 0$	$c_1 = a_2/b_1$	$c_2 = a_1/b_2$	$b_2 = 0$	$c_1 = a_2/b_1$ $c_2 = +\infty$

Predstavljene aritmetičke operacije u skladu su sa Murovom aritmetikom. U slučaju RDM aritmetike, čija je definicija intervala predstavljena u definiciji 3.1.11, osnovne aritmetičke operacije date su u narednoj definiciji.

Definicija 3.1.2.2 [99, 100]: Osnovne aritmetičke operacije nad intervalima $A = [a_m + \alpha_a \Delta L_a]$, $\alpha_a = [-1, 1]$ i $B = [b_m + \alpha_b \Delta L_b]$, $\alpha_b = [-1, 1]$ su:

sabiranje $A + B = a_m + b_m + \alpha_a \Delta L_a + \alpha_b \Delta L_b,$

oduzimanje $A - B = a_m - b_m + \alpha_a \Delta L_a - \alpha_b \Delta L_b,$

množenje $A \times B = (a_m + \alpha_a \Delta L_a) \times (b_m + \alpha_b \Delta L_b),$

deljenje $A / B = (a_m + \alpha_a \Delta L_a) / (b_m + \alpha_b \Delta L_b).$

Operacije definisane na ovakav način omogućuju višedimenzioni prikaz intervala u kome se može uvažiti verovatnoća raspodele vrednosti rezultujućeg intervala. Pored toga omogućeno je da se kod operacije oduzimanja $A - B = C$ može na osnovu poznatog rezultata oduzimanja C i jednog intervala A izračunati drugi interval B kada je širina rezultujućeg intervala C manja (ili u graničnom slučaju kada je nula) od širine intervala A . Ovo je primer kada Murova aritmetika ne može da da za rezultat interval. U navedenom primeru intervali A i

B su korelisani što se jednostavno uvažava RDM aritmetikom i o čemu će biti više reči u glavi 4. U slučaju oduzimanja dva degenerativna intervala Murova aritmetika daje za rezultat dvostruko širi interval dok se RDM aritmetikom dobija nula. To je još jedna prednost RDM aritmetike u odnosu na Murovu aritmetiku.

Predstavljene operacije nad intervalima mogu se proširiti na kompleksne intervale. S obzirom na to da se kompleksni broj može predstaviti kao uređen par realnih brojeva, intervalna aritmetika sa kompleksnim intervalima može se interpretirati kao intervalna aritmetika sa skupovima uređenih parova intervala.

Definicija 3.1.2.3 [101]: Kompleksni interval A je uređen par (A_1, A_2) realnih intervala $A_1 = [a_{11}, a_{12}]$ i $A_2 = [a_{21}, a_{22}]$, u oznaci:

$$A = A_1 + jA_2 = [a_{11}, a_{12}] + j[a_{21}, a_{22}] = \{a_1 + ja_2 \mid a_1 \in A_1 \wedge a_2 \in A_2\}, \text{ gde je } j = \sqrt{-1}.$$

Prema definiciji 3.1.2.3 kompleksni interval predstavlja pravougaonu oblast u kompleksnoj ravni, odnosno skup svih vektora čiji se završeci nalaze u pravougaonoj oblasti.

Definicija 3.1.2.4 [101]: Konjugovani kompleksni interval A , predstavljen u kompleksnoj ravni pravougaonom oblašću, jeste kompleksni interval B čija je pravougaona oblast simetrična sa oblašću kompleksnog intervala A u odnosu na realnu osu.

Definicija 3.1.2.5 [101]: Osnovne aritmetičke operacije nad kompleksnim intervalima $A = A_1 + jA_2$ i $B = B_1 + jB_2$ su:

sabiranje $A + B = A_1 + B_1 + j(A_2 + B_2),$

oduzimanje $A - B = A_1 - B_1 + j(A_2 - B_2),$

množenje $A \times B = A_1B_1 - A_2B_2 + j(A_1B_2 + A_2B_1),$

deljenje $A / B = \frac{A_1B_1 + A_2B_2}{B_1^2 + B_2^2} + j \frac{A_2B_1 - A_1B_2}{B_1^2 + B_2^2}, 0 \notin B_1^2 + B_2^2.$

Da bi se definisala operacija deljenja, pored uslova $0 \notin B_1^2 + B_2^2$, potrebno je da $0 \notin B_1 + jB_2$ [102], jer može da se desi da kompleksni interval B obuhvata nulu koja bi se kvadriranjem realnih intervala B_1 i B_2 izgubila.

Na osnovu definicije 3.1.2.5 zbir kompleksnog intervala i njegovog konjugovanog kompleksnog intervala, zbir kompleksnog intervala i njegovog negativnog kompleksnog intervala kao i proizvod kompleksnog intervala i njegovog konjugovanog kompleksnog intervala nisu realni intervali. U ovim slučajevima može se napraviti izuzetak pa će biti data definicija tog izuzetka u nastavku.

Definicija 3.1.2.6 [101]: Zbir kompleksnog intervala $A = A_1 + jA_2$ i njegovog konjugovanog kompleksnog intervala $A^* = A_1 - jA_2$ je realni interval $A + A^* = 2A_1$. Zbir kompleksnog intervala $A = A_1 + jA_2$ i njegovog negativnog kompleksnog intervala $-A = -A_1 - jA_2$ je jednak nuli $A - A = 0$. Proizvod kompleksnog intervala $A = A_1 + jA_2$ i njegovog konjugovanog kompleksnog intervala $A^* = A_1 - jA_2$ je realni interval $A \times A^* = A_1^2 + A_2^2$.

3.2 FUNKCIJE SA INTERVALIMA

Teorema 3.2.1 [93]: Ako je $F(A_1, A_2, \dots, A_n)$ izraz čije su promenljive intervali A_1, A_2, \dots, A_n , tada ukoliko za skup intervala A'_1, A'_2, \dots, A'_n važi:

$$A'_1 \subset A_1, A'_2 \subset A_2, \dots, A'_n \subset A_n,$$

onda je

$$F(A'_1, A'_2, \dots, A'_n) \subset F(A_1, A_2, \dots, A_n).$$

Na osnovu subdistributivnosti i teoreme 3.2.1 za ugnježdjeni polinom sa intervalnim koeficijentima A_0, A_1, \dots, A_n i promenljivom X važi:

$$A_0 + X(A_1 + X(A_2 + \dots + X(A_n))) \subset A_0 + A_1X + \dots + A_nX^n. \quad (3.2.1)$$

Definicija 3.2.1 [93]: Neka je $L_{A_k} = \{A'_k \mid A'_k \subset A_k\}$, $k = 1, \dots, n$, n skupova intervala A'_k koji pripadaju skupovima A_k . Regularan domen D predstavlja Dekartov proizvod skupova $L^n = L_{A_1} \times L_{A_2} \times \dots \times L_{A_n}$, odnosno skup n -torki intervala $(A'_1, A'_2, \dots, A'_n)$.

Definicija 3.2.2 [93]: Intervalna funkcija F sa n intervalnih promenljivih X_1, X_2, \dots, X_n je preslikavanje $f: D \rightarrow L$, gde je regularan domen $D \subset L^n$ takav da postoji izraz sa intervalnim promenljivama X_1, X_2, \dots, X_n koji predstavlja funkciju F .

Definicija 3.2.3 [103]: Neka je $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ realna funkcija. Intervalna funkcija $F: L^n \rightarrow L^m$, gde su L^n i L^m regularni domeni, je inkluzivna funkcija od f ako $\forall \mathbf{X} \in L^n$ n -torki degenerativnih realnih intervala, i $\forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}$ n -torki realnih brojeva koje uzimaju vrednosti iz intervala \mathbf{X} , važi $f(\mathbf{x}) \subset F(\mathbf{X})$.

Na osnovu definicije 3.2.2 i teoreme 3.2.1 može se zaključiti da za funkciju f sa degenerativnim intervalnim promenljivama x_1, x_2, \dots, x_n , pri čemu je funkcija f ista kao funkcija F sa intervalnim promenljivama X_1, X_2, \dots, X_n takvim da su $x_1 \subset X_1, x_2 \subset X_2, \dots, x_n \subset X_n$, važi sledeće: $U f(x_1, x_2, \dots, x_n) \subset F(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Ovaj zaključak značajan je za razumevanje rezultata intervalne funkcije koji je predstavljen takvim intervalom da sadrži veći skup vrednosti od skupa svih vrednosti ekvivalentne (sa istim izrazom) realne funkcije sa realnim promenljivama uzetih iz skupa parametara intervalne funkcije.

Intervalne funkcije mogu da imaju *problem zavisnosti* koji utiče da rezultat funkcije bude interval koji sadrži neželjenu dodatnu širinu [104]. Problem zavisnosti je problem pojavljivanja jedne promenljive više puta u intervalnoj funkciji. Najjednostavniji primer zavisnosti je funkcija u kojoj je izraz oduzimanje dve iste intervalne nedegenerativne promenljive. Da bi se prevazišao problem zavisnosti uvode se pravila u aritmetičkim operacijama čime se dobijaju proširene aritmetičke operacije (na primer *zavisno odizimanje*) [104].

Poznavanje monotonosti funkcije značajno može da ubrza izračunavanje intervalne funkcije. Monotonost funkcije se može jednostavno odrediti proverom znaka prvog izvoda funkcije. U koliko je neka funkcija monotono neopadajuća na zadatom intervalu onda se rezultat funkcije izračunava na osnovu vrednosti granica intervalnih parametara: $F(X = [x_1, x_2]) = [F(x_1), F(x_2)]$.

Definicija 3.2.4 [103]: $F(X)$ je inkluzivna monotona funkcija ako za intervale A i B važi $A \subset B \Rightarrow F(A) \subset F(B)$.

Primer intervalne funkcije na kojoj se može pokazati uticaj zavisnosti i korisnost poznavanja monotonosti je $F(X) = X - X^2$ gde je $X = [2,3]$:

$$F(X) = X - X^2 = [2,3] - [2,3]^2 = [2,3] - [4,9] = [-7, -1],$$

$$F(X) = X - X^2 = \frac{1}{4} - \left(X - \frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} - \left([2,3] - \frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} - \left[\frac{3}{2}, \frac{5}{2}\right]^2 = \frac{1}{4} - \left[\frac{9}{4}, \frac{25}{4}\right] = [-6, -2],$$

$$F'(X) = 1 - 2X < 0 \implies \text{monotono opadajuća } F(X) = [F(3), F(2)] = [-6, -2].$$

Teorema 3.2.1 može da se primeni na kompleksne intervale ukoliko se realni intervali zamene kompleksnim [101]. U definiciji 3.2.2 ukoliko se realni intervali zamene kompleksnim, navedenom definicijom se može definisati kompleksna intervalna funkcija. Inkluzivnost i monotonost realnih intervalnih funkcija važi i za kompleksne intervalne funkcije. Na osnovu navedenog proširenje funkcija sa realnim intervalima na funkcije sa kompleksnim intervalima predstavlja jednostavnu generalizaciju pogodnu za korišćenje intervalne aritmetike na modelima sa kompleksnim brojevima, kakav je i model za proračun kratkih spojeva.

3.3 SISTEMI INTERVALNIH LINEARNIH JEDNAČINA

Sistem linearnih jednačina može se napisati u matricnom obliku $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, gde je \mathbf{x} vektor nepoznatih veličina dimenzije n , a \mathbf{A} i \mathbf{b} matrica koeficijenata nepoznatih veličina dimenzije $m \times n$ i vektor slobodnih članova dimenzije m , respektivno. U ovom delu biće date osnovne definicije intervalnog vektora i matrice i mogućnost dobijanja rešenja sistema intervalnih linearnih jednačina.

Definicija 3.3.1 [103]: Intervalni vektor \mathbf{x}^I dimenzije n predstavlja Dekartov proizvod n intervala $\mathbf{x}^I = x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n$, $x_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$, $i = 1, \dots, n$, odnosno podskup skupa \mathbb{R}^n . Donja granica intervalnog vektora \mathbf{x}^I je vektor $\underline{\mathbf{x}} = [\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_n]^T$, a gornja granica je vektor $\bar{\mathbf{x}} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n]^T$.

Definicija 3.3.2 [103]: Intervalna matrica \mathbf{A}^I dimenzije $m \times n$ predstavlja Dekartov proizvod $m \times n$ intervala $\mathbf{A}^I = a_{11} \times a_{12} \times \dots \times a_{mn}$, $a_{ij} = [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$, $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$, odnosno podskup skupa $\mathbb{R}^{m \times n}$. Donja granica intervalne matrice \mathbf{A}^I je matrica

$$\underline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \underline{a}_{11} & \dots & \underline{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{a}_{m1} & \dots & \underline{a}_{mn} \end{bmatrix},$$

a gornja granica je matrica

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \dots & \bar{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_{m1} & \dots & \bar{a}_{mn} \end{bmatrix}.$$

Definicija 3.3.3 [103]: Osnovne aritmetičke operacije sa intervalnim matricama $\mathbf{A}_{n \times n}^I$ i $\mathbf{B}_{n \times n}^I$ su:

sabiranje
$$\mathbf{A}^I + \mathbf{B}^I = \begin{bmatrix} a_{11} + b_{11} & \dots & a_{1n} + b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} + b_{n1} & \dots & a_{nn} + b_{nn} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \text{oduzimanje} \quad \mathbf{A}^I - \mathbf{B}^I &= \begin{bmatrix} a_{11} - b_{11} & \cdots & a_{1n} - b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} - b_{n1} & \cdots & a_{nn} - b_{nn} \end{bmatrix}, \\ \text{množenje} \quad \mathbf{A}^I \times \mathbf{B}^I &= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n a_{1k} \times b_{k1} & \cdots & \sum_{k=1}^n a_{1k} \times b_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^n a_{nk} \times b_{k1} & \cdots & \sum_{k=1}^n a_{nk} \times b_{kn} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Na osnovu definicije 3.3.3 može se zaključiti da za operacije sabiranja i oduzimanja važi komutativnost i asocijativnost, dok za množenje intervalnih matrica ne važi ni komutativnost ni asocijativnost [103]. Ako su $\mathbf{A}^I, \mathbf{B}^I$ i \mathbf{C}^I intervalne matrice i ako je α skalar, tada za komutativnost množenja može da se napiše $\alpha \cdot (\mathbf{A}^I \cdot \mathbf{B}^I) \neq \mathbf{A}^I \cdot (\alpha \cdot \mathbf{B}^I)$, a za asocijativnost $(\mathbf{A}^I \cdot \mathbf{B}^I) \cdot \mathbf{C}^I \neq \mathbf{A}^I \cdot (\mathbf{B}^I \cdot \mathbf{C}^I)$. Generalno, za množenje realne matrice \mathbf{A} i intervalne matrice \mathbf{B}^I može da se napiše: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}^I \supset \{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \mid \mathbf{B} \in \mathbf{B}^I\}$. Distributivnost sabiranja i množenja ne važi, ali se može definisati subdistributivnost za intervalne matrice $\mathbf{A}^I, \mathbf{B}^I$ i \mathbf{C}^I [102]: $\mathbf{A}^I(\mathbf{B}^I + \mathbf{C}^I) \subseteq \mathbf{A}^I\mathbf{B}^I + \mathbf{A}^I\mathbf{C}^I$.

Inkluzivna monotonost za intervalne matrice važi kada su u pitanju operacije sabiranja, oduzimanja i množenja.

Teorema 3.3.1 [102]: Ako su $\mathbf{A}^{II}, \mathbf{A}^{2I}, \mathbf{B}^{II}$ i \mathbf{B}^{2I} intervalne matrice i ako su X i Y intervali, pri čemu $\mathbf{A}^{II} \subseteq \mathbf{B}^{II}, \mathbf{A}^{2I} \subseteq \mathbf{B}^{2I}, X \subseteq Y$, tada važi:

$$\mathbf{A}^{II} + \mathbf{A}^{2I} \subseteq \mathbf{B}^{II} + \mathbf{B}^{2I}, \quad \mathbf{A}^{II} - \mathbf{A}^{2I} \subseteq \mathbf{B}^{II} - \mathbf{B}^{2I}, \quad \mathbf{A}^{II} \cdot \mathbf{A}^{2I} \subseteq \mathbf{B}^{II} \cdot \mathbf{B}^{2I}, \quad X \cdot \mathbf{A}^{II} \subseteq Y \cdot \mathbf{B}^{II}.$$

Sada kada su definisane intervalne matrice i predstavljene osnovne operacije i njihove osobine mogu se pokazati uslovi kada je sistem intervalnih linearnih jednačina rešiv. U nastavku su date osnovne definicije i teoreme u vezi sa rešivošću sistema intervalnih linearnih jednačina.

Definicija 3.3.4 [96]: Realan ili kompleksan broj λ je sopstvena vrednost matrice \mathbf{A} ako postoji nenulti vektor \mathbf{x} takav da je $\mathbf{A}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$.

Definicija 3.3.5 [105]: Skup svih sopstvenih vrednosti matrice \mathbf{A} , u oznaci $\sigma(\mathbf{A}) = \{\lambda \mid \lambda \text{ je sopstvena vrednost matrice } \mathbf{A}\}$, naziva se spektr matrice \mathbf{A} .

Definicija 3.3.6 [105]: Nenegativan broj $\rho(\mathbf{A}) = \max\{|\lambda| : \lambda \in \sigma(\mathbf{A})\}$ naziva se spektralni radijus matrice \mathbf{A} .

Definicija 3.3.7 [102]: Rastojanje dva intervala $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ je:
 $q(A, B) = \max\{|a_1 - b_1|, |a_2 - b_2|\}$.

Definicija 3.3.8 [102]: Ako su \mathbf{A}^I i \mathbf{B}^I intervalne matrice, tada je matrica rastojanja između intervalnih matrica nenegativna realna matrica sa oznakom $q(\mathbf{A}^I, \mathbf{B}^I)$ koja sadrži korespondentne elemente intervalnih matrica $q(a_{ij}, b_{ij})$.

Definicija 3.3.9 [102]: Neka je $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ intervalna vektorska funkcija koja sadrži n funkcija $f_i(\mathbf{X}^I), f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i=1, \dots, n$, čiji su parametri intervalni vektori \mathbf{X}^I dimenzije n . F se naziva \mathbf{P} skraćenje ako postoji nenegativna matrica \mathbf{P} takva da:

$$\forall \mathbf{X}^I, \mathbf{Y}^I \in \mathbb{R}^n \text{ važi } q(F(\mathbf{X}^I), F(\mathbf{Y}^I)) \leq \mathbf{P}q(\mathbf{X}^I, \mathbf{Y}^I) \text{ pri čemu je } \rho(\mathbf{P}) < 1.$$

Teorema 3.3.2 [102]: Ako se sistem intervalnih linearnih jednačina predstavi u obliku pogodnom za iterativno nalaženje rešenja:

$$\mathbf{x}^{I(k+1)} = F(\mathbf{x}^{I(k)}) = \mathbf{A}^I \mathbf{x}^{I(k)} + \mathbf{b}^I, \quad k \geq 0,$$

gde je \mathbf{x}^I vektor nepoznatih varijabli dimenzije n , tada rešenje sistema konvergira jedinstvenom vektoru \mathbf{x} za svako $\mathbf{x}^{I(0)} \in \mathbb{R}^n$ ako i samo ako je $\rho(|\mathbf{A}^I|) < 1$, pri čemu je $|\mathbf{A}^I|$ apsolutna vrednost intervalne matrice koja je jednaka matrici sa apsolutnim vrednostima njenih elemenata $|a_{ij}| = q(a_{ij}, [0,0]) = \max\{|\underline{a}_{ij}|, |\bar{a}_{ij}|\}$.

Teoremom 3.3.2 pokazano je da je sistem linearnih jednačina rešiv. Pored navedene teoreme postoje i drugi načini koji potvrđuju da je sistem intervalnih linearnih jednačina rešiv [106-108] i koje daju detaljniji uvid u moguću prirodu rešenja, kao što je na primer postojanje nenultog rešenja. Rešavanje sistema intervalnih linearnih jednačina može se vršiti primenom različitih algoritama. Jedan od najpoznatijih je Gausova eliminacija [104] koji može da ima problem sa zavisnošću i greškama u zaokruživanju. Postoje postupci dati u [104] kojima se ti problemi prevazilaze. Da bi se rešio sistem linearnih jednačina potrebno je da matrica \mathbf{A} sistema bude regularna. Ukoliko se radi o sistemu intervalnih linearnih jednačina, potrebno je da je svaka realna matrica koja pripada intervalnoj matrici regularna da bi sama intervalna matrica bila regularna.

4 KORELACIJA SNAGA PROIZVODNJE I POTROŠNJE

Bitnu ulogu u elektroenergetskim sistemima imaju i imaće DG čija je proizvodnja električne energije neizvesna. Neizvesnost proizvodnje električne energije DG posledica je neizvesnosti primarnog izvora energije. Tradicionalni primarni izvori energije (ugalj, nafta i ostala fosilna goriva, nuklearna goriva, snaga vodenog toka itd.) nalaze se na geografskim lokacijama koje ne moraju biti i lokacije na kojima se energija transformiše u električnu energiju. Tradicionalni primarni izvori energije mogu se akumulirati na mestima gde se njihova energija transformiše u električnu. Na taj način se postiže pogodnost jednostavne kontrole proizvodnje (transformacije iz primarnog oblika energije) električne energije. Pored tradicionalnih primarnih izvora energije, u savremenim elektroenergetskim sistemima kao primarni izvor energije koristi se energija vetra i sunca. Transformacija energije iz takvih primarnih izvora u električnu energiju vrši se na geografskim lokacijama gde se nalaze primarni izvori. Transformacija energije vetra i sunca u električnu energiju vrši se na velikim geografskim površinama u trenutku kada je energija dostupna. Dostupnost energije tih izvora stohastične je prirode. Na velikim geografskim površinama, sa kojih se konzumira ta energija, u jednom vremenskom trenutku je različita raspodela količine energije navedenih izvora koja je u tom trenutku prisutna po jedinici geografske površine. Sve navedene karakteristike primarnih izvora energije utiču na to da proizvodnja električne energije iz njih bude izrazito neizvesna. Ta neizvesnost utiče na nemogućnost kontrole proizvodnje električne energije. U primarne izvore energije stohastične prirode, koja se transformiše u električnu energiju takođe stohastične prirode, pored energije vetra i sunca spada i energija malih reka i energija talasa.

Osim neizvesnosti proizvodnje u elektroenergetskim sistemima, neizvesnost je zastupljena i kod potrošnje električne energije. Neizvesnost potrošnje električne energije posledica je same neizvesnosti ponašanja potrošača. Neizvesnost potrošnje može se smanjiti praćenjem potrošnje u vremenu i čuvanjem istorijskih podataka o potrošnji, na osnovu kojih se može izvršiti klasifikacija tipova potrošača, a u okviru svakog tipa izvršiti klasifikacija u vremenu po vremenskim sezonama, mesecima i danima. Rezultat takve klasifikacije su dnevne krive potrošnje električne energije po tipu potrošača i karakterističnog vremenskog perioda. Iako se ovakav način posmatranja potrošača može koristiti u analizama stacionarnih stanja elektroenergetskih sistema, u praksi uvek postoje odstupanja zbog neizvesnosti potrošnje. Te neizvesnosti su uglavnom male ali ako se posmatra kumulativna neizvesnost velikog broja potrošača ona se ne može zanemariti.

Na malom geografskom području DG koji transformišu energiju vetra i sunca, kao i ostalih savremenih primarnih izvora energije u električnu energiju, imaju slične proizvodnje zbog zavisnosti od istog ili vrlo sličnog primarnog izvora energije. Fluktuacije energije primarnog izvora na malom geografskom području odražavaju se na sve DG u tom području na isti način. Osim uticaja na proizvodnju, vremenske promene na malom geografskom području utiču na isti ili sličan način na sve potrošače u tom području. Takvo ponašanje potrošnje potrošača i proizvodnje DG na malom geografskom području pruža mogućnost modelovanja agregiranog uticaja navedenih elemenata na elektroenergetski sistem u proračunima stacionarnih režima [109]. Navedeno ponašanje proizvodnje DG i potrošnje potrošača na malim geografskim područjima ukazuje na povezanost proizvodnje i potrošnje odnosno njihovu korelaciju u vremenu i prostoru.

Deterministički proračuni stacionarnih stanja elektroenergetskih sistema imaju ulazne podatke proizvodnje DG i potrošnje potrošača bez neizvesnosti. Neizvesnost proizvodnje i potrošnje navedenih elemenata, koja je opisana u prethodnom delu, potrebno je da se uvaži u

proračunima stacionarnih stanja elektroenergetskih sistema. U slučaju postojanja k DG i potrošača, od kojih svaki može imati n različitih vrednosti proizvodnje ili potrošnje, da bi se analizirale sve varijacije proizvodnje i potrošnje potrebno je n^k proračuna stacionarnih stanja elektroenergetskih sistema. Ovakav pristup je nepraktičan kada su u pitanju elektroenergetski sistemi velikih dimenzija [109, 110]. Zbog toga su razvijeni posebni načini uvažavanja neizvesnosti u proračunima elektroenergetskih sistema. Tri glavna pristupa uvažavanja neizvesnosti su: pristup zasnovan na verovatnoći [111], pristup zasnovan na fazi aritmetici [112, 113] i pristup zasnovan na intervalnoj aritmetici [114]. U ovoj disertaciji neizvesnosti su modelovane pristupom zasnovanim na intervalnoj aritmetici. Stoga, korelacije proizvodnje DG i potrošnje potrošača potrebno je modelovati u intervalnoj aritmetici. Korelacija proizvodnje DG može se posmatrati kao korelacija primarnih izvora energije na bliskim geografskim lokacijama [109], gde se primarni izvori mogu modelovati funkcijom gustine verovatnoće. U takvom pristupu proizvodnje DG, kao i potrošnje potrošača, mogu se posmatrati kao slučajne promenljive sa pridruženom funkcijom gustine verovatnoće.

Korelacija proizvodnje DG i potrošnje potrošača može se odrediti na osnovu istorijskih podataka o proizvodnji i potrošnji, istorijskih vremenskih podataka, na osnovu prognoze vremenskih podataka kao i trenutnih vremenskih podataka [32]. Vremenski podaci koji se mogu koristiti su: sunčevo zračenje, solarna visina, temperatura vazduha, brzina vetra, pravac vetra, atmosferski pritisak itd.

U ovoj glavi predstavljeni su osnovni matematički pojmovi u vezi sa korelacijom, kao i sama definicija korelacije slučajnih promenljivih. Nakon toga su ukratko opisani vremenski podaci koji se koriste za određivanje korelacija. S obzirom na dimenzionalnost vremenskih podataka potrebno je izvršiti klasterovanje podataka u cilju njihovog praktičnog korišćenja. Stoga, opisan je jedan od načina klasterovanja podataka koji je zasnovan na nenadgledanom mašinskom učenju – samoorganizovane mape veštačke neuronske mreže (self-organized map artificial neural network, SOM ANN). SOM ANN predstavlja koncept klasterovanja na osnovu samoorganizovanih karakteristika koji može efikasno da grupiše različite ulazne podatke. Nakon toga je opisana prognoza proizvodnje DG i potrošnje potrošača čije su proizvodnje i potrošnje poznate na osnovu istorijskih podataka i trenutnog merenja. Na osnovu tih podataka mogu se aproksimirati proizvodnje i potrošnje elemenata koji se nalaze na istim geografskim područjima a čiji podaci o proizvodnji i potrošnji nisu poznati (nenadgledani elementi). Za određivanje navedene prognoze opisan je algoritam nadgledanog mašinskog učenja – algoritam pohranjivanja unapred veštačke neuronske mreže sa propagacijom unazad (feedforward artificial neural network with backpropagation, FF ANN). Nakon toga je predstavljen proračun korelacionih koeficijenata proizvodnje DG i potrošnje potrošača, kao i njihovo modelovanje i korišćenje u intervalnoj aritmetici.

4.1 ŠTA JE KORELACIJA

Krajem 19. veka u matematičkoj teoriji definisana je korelacija [115]. Korelacioni koeficijent, koji se i danas koristi, definisao je Karl Pirson 1895. godine kao meru povezanosti promenljivih. Nakon toga je korelacioni koeficijent posmatran kao odnos između karakteristika objekata u vremenu, što je dalje uticalo na to da se definiše i razvije regresija koja se bavi pronalaženjem statističkih veza između objekata. Danas se koeficijent korelacije i regresiona analiza koriste u mnogim disciplinama kao glavne statističke metode za analizu rezultata dobijenih eksperimentalnim putem.

Pirson je 1895. godine definisao korelacioni koeficijent kao bezdimenzioni indeks na sledeći način:

$$r = \frac{\sum(X_i - X_m)(Y_i - Y_m)}{\sqrt{\sum(X_i - X_m)^2 \sum(Y_i - Y_m)^2}}, \quad (4.1.1)$$

gde su X_i i Y_i uzorci slučajnih promenljivih X i Y , a X_m i Y_m srednje vrednosti tih slučajnih promenljivih. Ovako definisan koeficijent predstavlja stepen linearne povezanosti dve slučajne promenljive, i pogodan je za predstavljanje linearne povezanosti neprekidnih promenljivih. On može biti pozitivan ili negativan. Pozitivan koeficijent ukazuje na to da obe slučajne promenljive zajedno rastu (ili opadaju), a negativan da jedna promenljiva opada kada druga raste (ili obrnuto). Apsolutna vrednost koeficijenta se kreće od 0 do 1, što predstavlja jačinu povezanosti slučajnih promenljivih. Ukoliko koeficijent ima vrednost 0 slučajne promenljive nisu korelisane. Ukoliko je apsolutna vrednost koeficijenta 1 slučajne promenljive su potpuno korelisane. Ograničenost apsolutne vrednosti koeficijenta r dokazuje se pomoću Kauči-Švarc nejednakosti [116].

Teorema 4.1.1 [116]: Ako su $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ i $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ dva niza realnih brojeva, pri čemu je n konačan broj, tada važi Kauči-Švarc nejednakost:

$$\left(\sum_{j=1}^n a_j b_j \right) \leq \left(\sum_{j=1}^n a_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{j=1}^n b_j^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

pri čemu jednakost važi samo ako je $a_j = \lambda b_j$ gde je λ nenulti realni broj.

Najčešća definicija korelacije, odnosno mere linearne zavisnosti promenljivih, je pomoću kovarijanse, koja takođe predstavlja meru linearne zavisnosti promenljivih. Takva definicija prethodno zahteva objašnjenje pojedinih statističkih pojmova koji su dati u nastavku.

Definicija 4.1.1 [117]: Neka je Ω skup svih ishoda nekog eksperimenta i neka se događaj definiše kao podskup skupa Ω . Neka je F familija događaja iz Ω . F je polje ako i samo ako važe sledeća tri stava:

1. $\Omega \in F$,
2. ako neki događaj $A \in F$ onda njegov komplementarni događaj $\bar{A} \in F$,
3. ako događaji $A_1, A_2, \dots, A_n \in F$ tada $\bigcup_{i=1}^n A_i \in F$.

Ako je navedeni niz događaja A_1, A_2, \dots, A_n konačan i prebrojiv tada je F σ -polje.

Definicija 4.1.2 [117]: Neka je μ nenegativna, proširena realna funkcija na σ -polju F , tako da za konačan ili beskonačan prebrojiv skup disjunktnih događaja A_1, A_2, \dots u F važi

$$\mu \left(\bigcup_n A_n \right) = \sum_n \mu(A_n).$$

Ako je $\mu(\Omega) = 1$ onda je μ funkcija verovatnoće. Triplet (Ω, F, μ) je prostor verovatnoće ako je Ω skup, F σ -polje podskupova od Ω i μ funkcija verovatnoće.

Definicija 4.1.3 [117]: Ako je Ω skup realnih brojeva \mathbb{R} , tada se sa $B(\mathbb{R})$ definiše Borelovo polje kao minimalno σ -polje podskupva u \mathbb{R} koje sadrži sve intervale $(a, b]$, pri čemu su a i b realni brojevi. Borelovi skupovi su elementi Borelovog polja.

Definicija 4.1.4 [117]: Slučajna promenljiva X u prostoru verovatnoće (Ω, F, μ) je Borelova funkcija iz Ω u \mathbb{R} , odnosno $X: (\Omega, F) \rightarrow (\mathbb{R}, B(\mathbb{R}))$.

Definicija 4.1.5 [117]: Ako je X slučajna promenljiva na (Ω, F, P) , matematičko očekivanje od X je definisano kao

$$E(X) = \int_{\Omega} X dP.$$

gde je $E(X)$ integral Borelove funkcije X funkcije verovatnoće P .

S obzirom na to da je u disertaciji navedena definicija matematičkog očekivanja od značaja za razumevanje samog matematičkog očekivanja, u nastavku će biti date definicije koje su od praktičnog značaja za sam proračun matematičkog očekivanja i same korelacije. Osim toga u disertaciji su od interesa diskretne slučajne promenljive jer se na osnovu odabranog uzorka mogu izračunati statistike, što predstavlja i najčešći način upotrebe navedenih statistika.

Definicija 4.1.6 [118]: Funkcija gustine verovatnoće diskretne slučajne promenljive X koja ima moguće vrednosti x_1, x_2, \dots, x_n je funkcija koja zadovoljava uslove:

1. $f(x_i) \geq 0$,
2. $\sum_{i=1}^n f(x_i) = 1$,
3. $f(x_i) = P(X = x_i)$,

gde je P funkcija verovatnoće.

Definicija 4.1.7 [118]: Kumulativna funkcija raspodele diskretne slučajne promenljive X u oznaci $F(x)$ je:

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i),$$

gde $F(x)$ zadovoljava sledeće uslove:

1. $0 \leq F(x) \leq 1$,
2. ako je $x \leq y$ onda $F(x) \leq F(y)$.

Definicija 4.1.8 [118]: Matematičko očekivanje diskretne slučajne promenljive X u oznaci $E(X)$ je:

$$E(X) = \sum_x xf(x).$$

Definicija 4.1.9 [118]: Varijansa diskretne slučajne promenljive X u oznaci $V(X)$ ili σ^2 definisana je:

$$\sigma^2 = V(X) = E(X - E(X))^2 = \sum_x (X - E(X))^2 f(x) = \sum_x x^2 f(x) - E(X)^2.$$

Definicija 4.1.10 [118]: Standardna devijacija diskretne slučajne promenljive X je $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$.

Definicija 4.1.11 [118]: Kovarijansa između dve slučajne promenljive X i Y u oznaci σ_{XY} ili $\text{Cov}(X, Y)$ je:

$$\sigma_{XY} = E\left[\left(X - E(X)(Y - E(Y))\right)\right] = E(XY) - E(X)E(Y).$$

Definicija 4.1.12 [118]: Korelacija između dve slučajne promenljive X i Y u oznaci ρ_{XY} je:

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\sqrt{V(X)V(Y)}} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X\sigma_Y}.$$

U disertaciji je navedeno da se za proračun korelacionog koeficijenta mogu koristiti skupovi podataka o proizvodnji i potrošnji. Ako se dva skupa ulaznih podataka označe sa a i b , korelacija se može definisati na sledeći način [119]:

$$k_{ab} = \frac{\text{Cov}(a,b)}{\sigma_a\sigma_b}, \quad (4.1.2)$$

gde se kovarijansa između a -tog i b -tog ulaza (slučajnih promenljivih Z_a i Z_b , respektivno) može izračunati iz skupa ulaznih uzoraka kao u [115]:

$$\text{Cov}(a,b) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Z_{an} - Z_{am})(Z_{bn} - Z_{bm}), \quad (4.1.3)$$

gde je N broj uzoraka za a (b)-ti ulaz, dok je matematičko očekivanje (srednja vrednost) za skupove a (b)-tih ulaznih uzoraka:

$$Z_{a(b)m} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{a(b)n}. \quad (4.1.4)$$

Standardna devijacija za a (b)-ti ulaz je:

$$\sigma_{a(b)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Z_{a(b)n} - Z_{a(b)m})^2}. \quad (4.1.5)$$

Nekada je potrebno pronaći korelaciju između više od dve slučajne promenljive, kao što je to slučaj u primeru [115] gde se za određivanje gustine raspodele jedne promenljive koristi više međusobno korelisanih promenljivih. U tom slučaju može se definisati matrica kovarijansi ili korelacija u kojoj se na odgovarajućim pozicijama nalaze kovarijanse ili korelacije između elemenata kojima odgovaraju te pozicije u matrici. Na osnovu matrice kovarijansi lako se izračunava matrica korelacija. Matrica kovarijansi između n slučajnih promenljivih jednostavno se izvodi iz naredne teoreme.

Teorema 4.1.2 [117]: Varijansa n slučajnih promenljivih X_1, X_2, \dots, X_n sa konačnim matematičkim očekivanjima, kao i sa konačnim međusobnim očekivanjima $E(X_i, X_j)$ za svako i i j , pri čemu je $i \neq j$, definiše se na sledeći način:

$$V(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \sum_{i=1}^n V(X_i) + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \text{Cov}(X_i, X_j).$$

4.2 PRORAČUN KORELACIONIH KOEFICIJENATA

Postojanje korelacija između proizvodnje DG i potrošnje potrošača evidentno je na osnovu analize merenih vrednosti proizvodnje i potrošnje u vremenskom intervalu [120, 121]. Statističkim pristupom mogu se odrediti korelacije između proizvodnje i potrošnje, koje omogućuju kvalitetniju procenu stanja sistema. Takav pristup pogodan je i za statističke procene stanja u kojima se kao rezultat dobija raspodela verovatnoće (Gausova [120, 121], Beta raspodela [122] itd.) koja je mnogo kvalitetnija i manje konzervativna kada se uvažavaju korelacije. Podaci na osnovu kojih se mogu izračunati korelacije postaju sve više dostupni u distributivnim mrežama sa povećanjem broja merenja u srednjenaponskoj mreži kao i sa povećanjem pametnih brojila u niskonaponskoj. Osim korelacija, izračunatih na osnovu merenja proizvodnje i potrošnje, mogu se izračunati i korelacije tokova snaga po sekcijama na osnovu merenja na njima [122] koristeći dodatno i istorijske podatke. Unapređenje proračuna stanja sistema postiže se i korišćenjem korelacija između pseudomerenja [32, 122] koja se uvode u cilju lakše analize opservabilnosti mreža.

Korelacije između proizvodnje solarnih i vetrogeneratora i potrošnje potrošača postoje zbog električne povezanosti navedenih elemenata i zbog njihove bliske lokacije u prostoru, odnosno povezanosti vremenskih elemenata [123, 124]. Korelacija zbog električne povezanosti uglavnom se u analizama elektroenergetskih sistema modeluje egzaktnim nelinearnim modelima, dok se aproksimativni modeli [124] retko koriste za tu svrhu. Korelacija zbog lokacije u prostoru određuje se statističkim modelima, kao što su modeli estimacije tačaka, zasnovani na linearnoj regresiji [123], modifikovani Markovljevi modeli sa metodom najmanjih kvadrata [124] itd. Svi statistički modeli za proračun korelacija zbog lokacije u prostoru zahtevaju dobru vremensku prognozu, odnosno prognozu vremenskih elemenata koji su u vezi sa energijom vetra i sunca, na osnovu kojih se može izračunati primarna energija DG, odnosno energija izvora. Pored prognoze vremenskih elemenata za proračun korelacija između proizvodnje i potrošnje potrebni su i dobri modeli električnih elemenata, solarnih i vetrogeneratora, kao i potrošača, i postojanje kvalitetnih merenja na tim elementima.

Aktivna snaga DG (fotonaponskih i vetro) i potrošača može da se analizira na osnovu promenljivih vremenskih podataka (dobijenih iz istorijske baze podataka i/ili na osnovu prognoze) kao i merenih podataka u realnom vremenu [119]. Prognoza vremenskih podataka u direktnoj je vezi sa prognozom proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora sunčevog zračenja i vetra. Sledeći vremenski zavisni ulazi za proračun korelacionih koeficijenata mogu se koristiti u simulaciji: radijacija Sunca, solarna visina Sunca, temperatura vazduha, brzina vetra, pravac vetra i atmosferski pritisak. Radijacija Sunca, izražena u W/m^2 , sastoji se od direktne i difuzne komponente. Meteorološka merenja uglavnom daju podatak o direktnoj radijaciji, dok je difuzna komponenta izostavljena iako može značajno da utiče na proizvodnju električne energije. Empirijskim formulama, na osnovu globalne radijacije i solarne visine, može se izračunati difuzna komponenta radijacije. Solarne visine γ je ugao kojim se opisuje položaj Sunca u odnosu na površinu koja je od interesa. Proračun solarne visine, koji značajno utiče na proizvodnju solarnih generatora [65], može se vršiti na osnovu vremena i geografskih podataka o lokaciji DG [125]. Za potrebe proračuna energije vetra potrebna je brzina vetra koja je izrazito stohastične prirode. Stoga, brzina vetra se često predstavlja kao slučajna promenljiva sa Vejbulovom ili Relejevom raspodelom. Različit vazdušni pritisak na različitim površinama Zemlje posledica je različite temperature vazdušnih masa, odnosno različite energije sunčevog zračenja na tim površinama. Na osnovu navedenih podataka izračunava se aktivna snaga primarnog izvora energije, koja zajedno sa ugaonom brzinom asinhronih vetrogeneratora, dobijenom na osnovu modela

asinhronih mašina, predstavlja vremenski zavisne podatke potrebne za simulaciju [65]. Za proračun snage primarnog izvora energije fotonaponskih DG koristi se radijacija Sunca, solarna visina Sunca i temperatura vazduha, dok se u slučaju vetrogeneratora koristi brzina vetra, pravac vetra i atmosferski pritisak. Istorijski podaci o potrošnji su podaci klasterovani u dve grupe: podaci karakteristični za radni dan (od ponedeljka do petka) i podaci karakteristični za vikend (subota i nedelja).

Za kvalitetnu prognozu vremenskih podataka potrebna je velika količina istorijskih podataka. Tako veliku količinu podataka teško je iskoristiti u proračunima jer njihova obrada značajno degradira performanse proračuna. Stoga, potrebno je podatke grupisati tako da budu pogodni za korišćenje. Neupotrebljivost velike količine podataka rešena je njihovim klasterovanjem. Jedan od efikasnih načina klasterovanja podataka je klasifikacija samoorganizovanim mapama veštačkih neuronskih mreža [126] (SOM ANN). SOM konvertuje nelinearne statističke veze između ulaznih podataka u jednostavne geometrijske veze, gde veliku dimenziju ulaznih podataka redukuje na malu dimenziju izlaznih, najčešće dvodimenzionalnih podataka, pri čemu zadržava topološke i metričke odnose ulaznih podataka. Ovakvo apstrahovanje podataka samoorganizovanim mapama prvi put je definisano 1982. godine kada je Teuvo Kohonen definisao SOM kao nelinearno, uređeno, glatko mapiranje manifolda ulaznih podataka velike dimenzije na elemente niza male dimenzije, što je slično kvantizaciji vektora. SOM ANN spada u nenadgledano mašinsko učenje na osnovu podataka koje čine samo ulazni podaci, ali ne i izlazni. Kod ovog načina učenja nepoznato je to šta treba naučiti, ali se zna za šta je metod dizajniran pa je učenje na to i orijentisano. Uglavnom se tim metodima pronalaze strukture u podacima ili se smanjuje dimenzionalnost podataka na osnovu ulaznih podataka velike dimenzije, pomoću kojih se uče reprezentacije podataka. Primena SOM ANN na vremenske podatke vrši se u dve faze: faza treniranja i retreniranja [65]. Korelacioni koeficijenti između zavisnih ulaza izračunavaju se na osnovu klasterovanih vremenskih podataka i odgovarajućih snaga DG i potrošača, pri čemu je potrebno aproksimirati izlaze aktivnih snaga nenadgledanih elemenata [32, 65, 119].

Na osnovu istorijskih vremenskih podataka i podataka vremenske prognoze, kao i istorijskih podataka potrošnje potrošača i proizvodnje DG koji su telemetrisani, može se prognozirati proizvodnja netelemetrisanih DG kao i potrošnja potrošača. Za tu svrhu mogu se koristiti statistički modeli kao što su krive potrošnje i proizvodnje dobijene primenom regresione analize [120]. Takav pristup ne daje dovoljno precizne rezultate kada su u pitanju vrednosti proizvodnje u zavisnosti od vremenskih prilika netelemetrisanih DG na osnovu podataka o telemetrisanim. Metod koji se pokazao kao efikasan je metod zasnovan na veštačkim neuronskim mrežama pohranjivanje unapred (feed forward, FF) sa propagacijom unazad [32, 65, 119] koji predstavlja metod nadgledanog mašinskog učenja. Nadgledano učenje [127, 128] je učenje na osnovu podataka koje čine parovi {ulazni podatak, poznat izlazni podatak}. Na osnovu ulaznih podataka u model vrši se proces učenja koji daje izlazne podatke. Izlazni podaci se dalje porede sa poznatim izlaznim podacima i na osnovu njihovih razlika koriguje se model tako da razlika između poznatih izlaznih podataka i izlaznih podataka dobijenih na osnovu ulaznih podataka bude minimalna. Još jedan razlog za korišćenje ovakvog pristupa je taj što su matematički modeli solarnih i vetrogeneratora komplikovani i nelinearni, a neizvesnosti, kao što su temperature fotonaponskih panela, teško je modelovati. FF ANN se jednostavno adaptira ulaznom skupu podataka i na jednostavan način aproksimira nelinearne funkcije proizvodnje. Ulazni podaci u FF ANN su vremenski podaci i podaci o klizanju s asinhronih vetrogeneratora. Izlazni podaci su podaci o snazi vetra i radijacije sunca, koji odgovaraju internoj snazi solarnog i vetrogeneratora, respektivno [65], kao i podaci o potrošnji potrošača. Inicijalni podaci o internoj aktivnoj snazi proizvodnje mogu se dimiti na osnovu matematičkih modela solarnih i vetrogeneratora. Treniranje FF

ANN vrši se metodom propagacije unazad u kojoj se na osnovu izlazne greške koriguju parametri neurona po slojevima mreže krećući se od poslednjeg ka prvom sloju. FF ANN istrenirana na opisan način predstavlja dovoljno dobru aproksimaciju funkcije koja za različite ulaze može dati isti izlaz [129]. Stoga, potrebno je da skup na osnovu koga se trenira mreža bude što veći, ali i da zadovolji očekivano vreme treniranja.

Korelacioni koeficijenti se mogu izračunati na osnovu vremenskih podataka (dobijenih iz istorijske baze i/ili na osnovu prognoze), klasifikovanih u vodeći neuron SOM ANN, i odgovarajućih aktivnih snaga DG i izlaznih aktivnih snaga potrošača, dobijenih na osnovu FF ANN sa propagacijom unazad. Ti podaci predstavljaju ulaz u statistički proračun korelacionih koeficijenata zasnovan na linearnoj regresiji. Korelacioni koeficijent između a -tog Z_a i b -tog Z_b ulaza, klasifikovanih u vodeći neuron, dobija se koristeći relaciju (4.1.2). Kovarijansa između a -tog i b -tog ulaza (Z_a i Z_b , respektivno) može se izračunati iz skupa ulaznih uzoraka koristeći relaciju (4.1.3). Srednja (očekivana) vrednost za skupove a (b)-tih ulaznih uzoraka može se izračunati koristeći relaciju (4.1.4). Standardna devijacija za a (b)-ti ulaz može se izračunati koristeći relaciju (4.1.5).

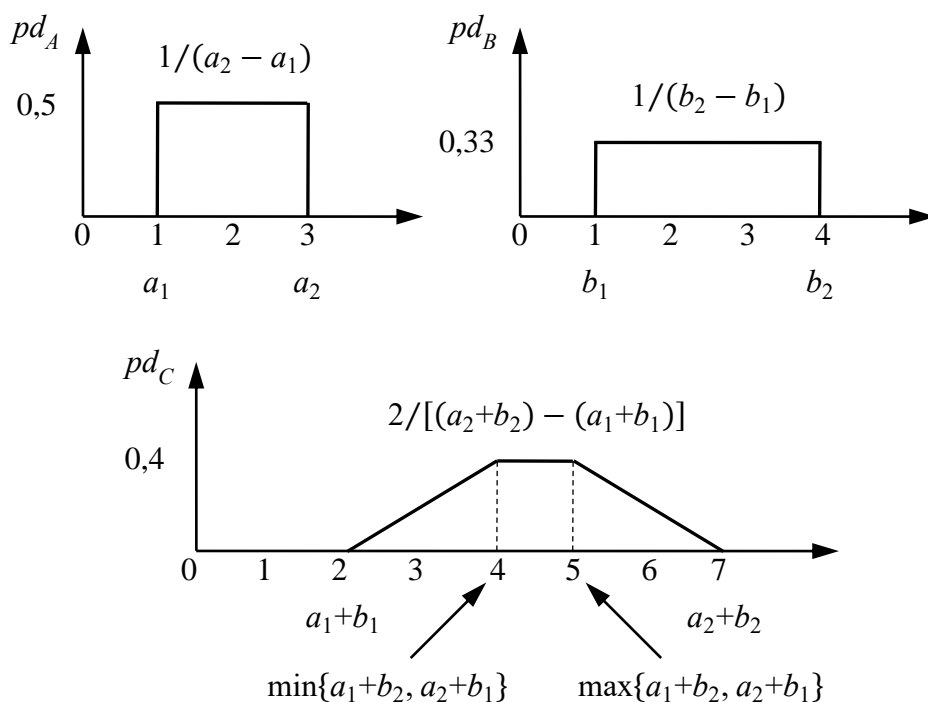
Izračunati korelacioni koeficijenti mogu se koristiti u proračunima u cilju postizanja kvalitetnijih rezultata. Uglavnom se mogu koristiti u kombinaciji sa elementima koji se modeluju parametrima koji predstavljaju slučajne promenljive [120-124]. Neizvesnost slučajnih promenljivih može se modelovati raspodelom verovatnoće čiji tip često nije poznat nego se utvrđuje na osnovu ograničenog uzorka. Tradicionalni inženjerski pristup je modelovanje greške slučajne promenljive koja je nezavisna i ima Gausovu raspodelu sa poznatom standardnom devijacijom, što se sve potvrđuje centralnom graničnom teoremom [130]. Efikasniji i praktičniji modeli su oni kod kojih se koristi delimična informacija o raspodeli verovatnoće, odnosno skraćena raspodela (najčešće Gausova ili bimodalna) koja se zasniva na željenom intervalu poverenja. Kod takvih statističkih modela korelacija se definiše i koristi kao što je opisano u delu 4.1 disertacije.

U disertaciji su slučajne promenljive i njihove neizvesnosti modelovane intervalima. Takav model može da se posmatra u svetlu verovatnoće kao model sa uniformnom raspodelom ukoliko nije poznata raspodela verovatnoće [99]. Na slici 4.2.1 prikazana su dva intervala $A = [a_1, a_2]$ i $B = [b_1, b_2]$ sa pridruženim uniformnim funkcijama gustine verovatnoće pd_A i pd_B , kao i njihov zbir $C = [c_1, c_2] = A + B$ sa pridruženom funkcijom gustine verovatnoće trapezoidnog oblika pd_C . Na slici 4.2.2 prikazan je proizvod intervala $D = [d_1, d_2] = AB$ kao i funkcija gustine verovatnoće proizvoda trapezoidnog oblika pd_D [100].

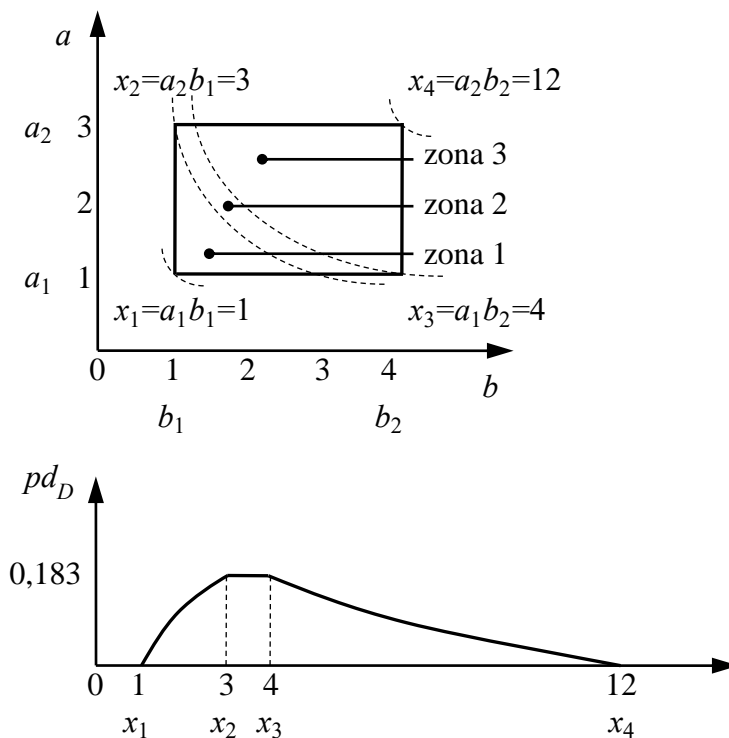
Ukoliko su nepoznate funkcije gustine verovatnoće intervala A i B , gustine verovatnoće intervala dobijenih primenom aritmetičkih operacija nad njima još više će da odstupaju od realnih. S obzirom na to da su za realna merenja nepoznate funkcije raspodele, ali su poznate gornje i donje granice na osnovu podataka proizvođača, kao i da je za proizvodnju i potrošnju netelemetrisanih elemenata nepoznata funkcija raspodele, intervali će se razmatrati bez pridruženih karakteristika verovatnoće. Ukoliko bi na većini elemenata postojalo merenje upitno bi bilo da li su i kada kalibrisani merni instrumenti, što unosi dodatnu neizvesnost i nepoznatost funkcije raspodele. Još jedna prednost korišćenja intervala umesto funkcija gustine verovatnoće je jednostavnost proračuna, što se uočava već kod osnovnih aritmetičkih operacija.

U intervalnoj aritmetici je prepoznato da na osnovu poznavanja očekivanih vrednosti gornjih i donjih granica intervala i njima pridruženih verovatnoća, rezultat aritmetičkih operacija nad intervalima daje interval čije očekivane vrednosti gornjih i donjih granica zavise od korelisanosti operanada [130]. Ta zavisnost, definisana pozitivnim i negativnim korelacionim koeficijentima u intervalnoj aritmetici, utiče značajno na rezultat aritmetičkih

operacija tako da se u opisanom slučaju intervala, interpretiranih elementima verovatnoće i statistike, aritmetičke operacije mogu podeliti na operacije sa nekorelisanim intervalima, sa jako pozitivno i sa jako negativno korelisanim intervalima.

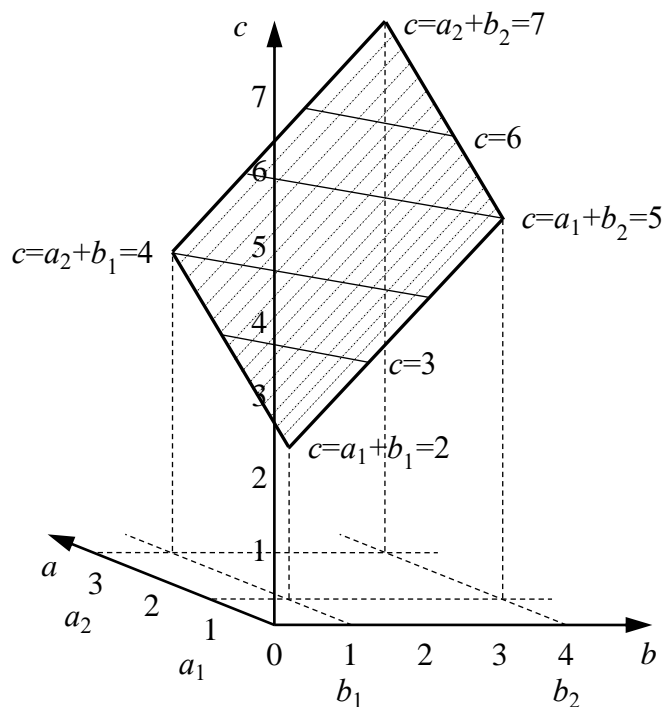


Slika 4.2.1 – Dva intervala i njihov zbir sa pridruženim funkcijama gustine verovatnoće



Slika 4.2.2 – Proizvod dva intervala sa pridruženim uniformnim funkcijama gustine verovatnoće i funkcija gustine verovatnoće proizvoda

Korelacioni koeficijenti, u kombinaciji sa intervalima, modelovanim sa više pripadajućih intervala sa nezavisnim parametrima (AE interval - affine arithmetic interval), mogu predstavljati linearne zavisnosti između intervala kojima se modeluju neizvesnosti bez pridružene gustine raspodele verovatnoće [131]. U slučaju klasičnih intervala efekat uvažavanja korelacije, kao linearne zavisnosti između dva intervala predstavljena u RDM formi $A = [a_1, a_2] = [a_m + \alpha_a \Delta L_a]$ i $B = [b_1, b_2] = [b_m + \alpha_b \Delta L_b]$, prikazan je na slici 4.2.3 [99].



Slika 4.2.3 – Trodimenzionalna ilustracija sabiranja dva RDM intervala

Na slici 4.2.3 je prikazana osenčena površina koja sadrži skup vrednosti zbira dva intervala $C = [c_1, c_2] = [c_m + \alpha_c \Delta L_c] = [a_m + b_m + \alpha_a \Delta L_a + \alpha_b \Delta L_b]$. Na osenčenoj površi linijama paralelnim sa ab ravni su označeni zbrojevi vrednosti iz intervala A i B koji su konstantni. Ukoliko bi intervali A i B bili potpuno negativno korelisani (ako vrednost jednog intervala raste za neku vrednost, vrednost drugog intervala opada za istu tu vrednost) tada bi zbir ta dva intervala bio konstantan i odgovarao bi liniji paralelnoj sa ab ravni koja se nalazi na osenčenoj površi kojoj odgovara vrednost c_m intervala C . Ukoliko bi intervali A i B bili delimično negativno korelisani tada bi njihov zbir bio interval $C1 = [c_{11}, c_{21}]$ čije bi granice odgovarale linijama paralelnim sa ab ravni koje se nalaze na osenčenoj površi, pri čemu su udaljene za istu vrednost od linije na osenčenoj površi koja odgovara vrednosti c_m intervala C . Ukoliko bi intervali A i B bili nekorelisani tada bi njihov zbir bio interval C . Ako se osenčena površ na slici 4.2.3 prikaže u dvodimenzionalnom prostoru kao na slici 4.2.4, uočava se da uvažavanje negativne korelacije između dva intervala prilikom njihovog sabiranja daje rezultat interval na čije granice korelacija značajno utiče na taj način što sužava rezultujući interval.

Korelacioni koeficijent k_{ab} , gde su a i b intervalne promenljive, definisan je na sledeći način [32, 119]:

$$k_{ab} \in \begin{cases} [-1,0) & \text{– Negativno korelisane promenljive,} \\ 0 & \text{– Nekorelisane promenljive,} \\ (0,1] & \text{– Pozitivno korelisane promenljive.} \end{cases} \quad (4.2.1)$$

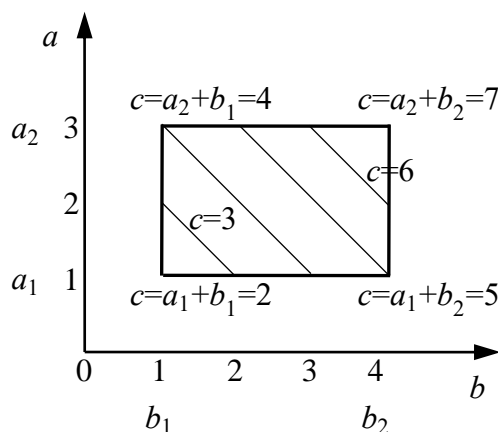
Veza međusobno korelisanih promenljivih a i b sa korelacionim koeficijentom k_{ab} može se predstaviti na sledeći način [32]:

Sabiranje dve negativno korelisane promenljive

$$c = a + b = a_m + b_m + (1 + k_{ab})(\alpha_a \Delta L_a + \alpha_b \Delta L_b), \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1], \quad (4.2.2)$$

Oduzimanje dve pozitivno korelisane promenljive

$$c = a - b = a_m - b_m + (1 - k_{ab})(\alpha_a \Delta L_a - \alpha_b \Delta L_b), \quad \alpha_a, \alpha_b \in [-1, 1]. \quad (4.2.3)$$



Slika 4.2.4 – Dvdimenzionalna ilustracija sabiranja dva RDM intervala

Sabiranje dve negativno korelisane promenljive (4.2.2) i oduzimanje dve pozitivno korelisane promenljive (4.2.3) daju za rezultat uži interval u poređenju sa intervalom predstavljenim klasičnom intervalnom aritmetikom [93]. Ukoliko bi svi korelacioni koeficijenti bili jednaki nuli, relacije (4.2.2) i (4.2.3) svele bi se na klasično sabiranje i oduzimanje dva intervala. U tom slučaju rezultati predloženog algoritma i algoritma sa klasičnim intervalima bili bi isti.

Uticaj korelacionih koeficijenata na intervalnu aritmetiku biće prikazan na tri jednostavna primera za sabiranje (4.2.2) i oduzimanje (4.2.3) promenljivih a i b , gde su:

$$a = 9 + \alpha_a 2, \quad \alpha_a \in [-1, 1], \quad b = 5 + \alpha_b 1, \quad \alpha_b \in [-1, 1].$$

U prvom primeru promenljive nisu korelisane:

$$\begin{aligned} \text{sabiranje, } k_{ab} = 0: \quad c = a + b &= 9 + 5 + (1 + 0)(\alpha_a 2 + \alpha_b 1) = 14 + (\alpha_a 2 + \alpha_b 1) = \\ &= [11, 17] = 14 + \alpha_c 3, \quad \alpha_c \in [-1, 1], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{oduzimanje, } k_{ab} = 0: \quad c = a - b &= 9 - 5 + (1 - 0)(\alpha_a 2 - \alpha_b 1) = 4 + (\alpha_a 2 - \alpha_b 1) = \\ &= [1, 7] = 4 + \alpha_c 3, \quad \alpha_c \in [-1, 1]. \end{aligned}$$

U drugom primeru promenljive su delimično korelisane:

$$\begin{aligned} \text{sabiranje, } k_{ab} = -0.6: \quad c = a + b &= 9 + 5 + (1 - 0.6)(\alpha_a 2 + \alpha_b 1) = 14 + 0.4(\alpha_a 2 + \alpha_b 1) = \\ &= [12.8, 15.2] = 14 + \alpha_c 1.2, \quad \alpha_c \in [-1, 1], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{oduzimanje, } k_{ab} = 0.6: \quad c = a - b &= 9 - 5 + (1 - 0.6)(\alpha_a 2 - \alpha_b 1) = 4 + 0.4(\alpha_a 2 - \alpha_b 1) = \\ &= [2.8, 5.2] = 4 + \alpha_c 1.2, \quad \alpha_c \in [-1, 1]. \end{aligned}$$

U trećem primeru promenljive su potpuno korelisane:

$$\text{sabiranje, } k_{ab} = -1: \quad c = a + b = 9 + 5 + (1 - 1)(\alpha_a 2 + \alpha_b 1) = 14 + 0(\alpha_a 2 + \alpha_b 1) = \\ = 14 = 14 + \alpha_c 0, \quad \alpha_c \in [-1, 1],$$

$$\text{oduzimanje, } k_{ab} = 1: \quad c = a - b = 9 - 5 + (1 - 1)(\alpha_a 2 - \alpha_b 1) = 4 + 0(\alpha_a 2 - \alpha_b 1) = \\ = 4 = 4 + \alpha_c 0, \quad \alpha_c \in [-1, 1].$$

Na osnovu prethodnih primera može se zaključiti da delimično korelisane promenljive daju užu interval ($\Delta L_c = 1,2$) od nekorelisanih ($\Delta L_c = 3$). Takođe sa većom apsolutnom vrednošću korelacionih koeficijenata intervali postaju užu. Sa druge strane ukoliko su promenljive potpuno korelisane, rezultat je deterministički broj ($\Delta L_c = 0$).

5 PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

Kratak spoj se definiše kao slučajna ili namerna provodna veza preko male ili nulte impedanse između dve ili više tačaka elektroenergetskog sistema koje se u normalnom pogonskom stanju nalaze na različitim potencijalima. Proračun kratkih spojeva predstavlja proračun režima elektroenergetskih sistema sa kratkim spojevima. Proračun režima sa kratkim spojem je jedan od osnovnih proračuna u elektroenergetskim sistemima. On podrazumeva proračun napona svih čvorova i struja svih grana elektroenergetskog sistema u kome se desio kratak spoj. Stanje elektroenergetskog sistema sa kratkim spojem predstavlja minimalan broj veličina pomoću kojih se može jednoznačno rekonstruisati celokupan režim sistema. Na osnovu stanja elektroenergetskog sistema, koga čine naponi svih čvorova, mogu se izračunati sve ostale režimske veličine koje su od interesa.

U savremenim elektroenergetskim sistemima velikih dimenzija i kompleksnosti proračune kratkih spojeva je neophodno vršiti uz pomoć računara. Rezultati tih proračuna imaju domen primene u mnogobrojnim analizama i proračunima kao što su [77, 132]:

1. Podešenje, koordinacija i provera osetljivosti relejne zaštite. Vrlo precizni proračuni, koji daju precizno izračunate struje kratkih spojeva, neophodni su za podešenje relejne zaštite, posebno u slučajevima kada su kratki spojevi udaljeni od izvora napajanja. Tada su vrednosti maksimalnih radnih struja i struja kratkih spojeva vrlo bliske i potrebno je precizno podesiti relejnu zaštitu. To su najčešće slučajevi sa dugim vodovima u distributivnim mrežama;
2. Projektovanje rasklopne opreme kojom se vrši izolacija kratkih spojeva. Za takve potrebe neophodne su unapred izračunate vrednosti struja kratkih spojeva u svim delovima elektroenergetskog sistema i u svakoj varijanti vrednosti struja na mestima gde se nalazi rasklopna oprema;
3. Proračun mehaničkih naprezanja elemenata, za koji je potrebna maksimalna trenutna vrednost struje elemenata (udarna struja kratkih spojeva). Poznavanje tih struja unapred je neophodno jer se na osnovu njih mehanički dimenzionišu elementi;
4. Proračun termičkih naprezanja elemenata, za koji je potreban toplotni impuls struje kratkih spojeva, odnosno energija Džulovih gubitaka koja se oslobodi na elementima u intervalu od uspostavljanja kratkog spoja do njegove eliminacije. Poznavanje toplotnih impulsa struja kratkih spojeva unapred je neophodno jer se na osnovu njih termički dimenzionišu elementi;
5. Utvrđivanje elektromagnetnog uticaja na elemente, koji su galvanski odvojeni od mreže, u okolini mesta kratkog spoja. Taj uticaj se ogleda kroz indukovane elektromotorne sile na okolnim elementima usled uspostavljanja struja kratkih spojeva. Posledica takvog uticaja su tehničke smetnje (uticaj na telekomunikacionu infrastrukturu) i opasnost po život ljudi koji dođu u kontakt sa tim elementima (metalne ograde i cevovodi). Najčešći primer je vod sa velikim vrednostima struja koji je paralelan sa električnim ili neelektričnim instalacijama;
6. Proračun uzemljenja odnosno dimenzionisanje uzemljivača (u transformatorskim stanicama, na stubovima vodova golih provodnika itd.). Struje zemljospoja izazivaju visoke napone na tlu i u okolini mesta zemljospoja koji mogu biti opasni po ljudski život. Zbog toga se uzemljivači dimenzionišu da zadovolje kriterijum najvećeg napona

dodira i koraka. Napon dodira je najveći napon koji se može pojaviti na čoveku koji dođe u kontakt sa elementom pogođenim kratkim spojem. Postojanje maksimalnog napona dodira se dozvoljava u određenom vremenskom intervalu (na primer na naponima visokog naponskog nivoa dozvoljava se napon dodira do 75 V u trajanju od 5 s [132]). Da bi se obezbedili navedeni kriterijumi potrebno je unapred izračunati režime sa kratkim spojevima na osnovu kojih se mogu izračunati naponi dodira i koraka odnosno dimenzionisati uzemljivači tako da ograniče struje kratkih spojeva na vrednosti pri kojima su zadovoljeni navedeni kriterijumi za napone dodira i koraka;

7. Određivanje načina uzemljenja neutralne tačke na osnovu amplituda struja zemljospojeva, kao i uticaj načina uzemljenja neutralne tačke na prethodno navedene proračune: proračun uzemljenja, zaštite i dozvoljenih naponskih opterećenja elemenata.

Postoje mnogobrojni postupci za proračun režima sa kratkim spojevima u prenosnim i distributivnim mrežama. U svim postupcima kratak spoj je matematički definisan s obzirom na matematički model mreže za koju se definiše. Matematički model mreže čine matematički modeli pripadajućih elemenata koji su međusobno povezani i čine električno kolo. Jedan od elemenata je kratak spoj koji predstavlja jednostruki ili skup jednovremenih kratkih spojeva u izabranom broju čvorova i izabranom broju faza čvorova mreže. Kratki spojevi mogu biti jednofazni (kratki spojevi faza sa zemljom) i međufazni kratki spojevi (sa i bez zemlje) preko nultih ili nenultih impedansi. U disertaciji se pod proračunom kratkih spojeva podrazumeva proračun režima mreže sa jednostrukim kratkim spojem. Taj režim se dobija prethodnim proračunom stanja na osnovu koga se rekonstruiše celokupan režim mreže.

Režim prenosne i distributivne mreže sa kratkim spojem zavisi od parametara mreže, topologije i vrste kratkog spoja. U prenosnim mrežama sinhroni generatori dominantno utiču na režim, dok je u distributivnim mrežama najveći uticaj nadređene mreže sa koje se napaja distributivna mreža pa onda uticaj DG ukoliko postoje u mreži. Režim sa kratkim spojem je dinamički i u opštem slučaju nesimetričan. Dinamika je posledica delovanja teorije o zaleđenom fluksu u namotajima tradicionalnih naizmeničnih mašina, u DFIM u distributivnim mrežama (u slučaju da izgube kontrolu nad strujama kratkih spojeva) i u nadređenoj mreži sa koje se distributivna mreža napaja. Režimske veličine menjaju se u vremenu (moduli napona i struja) do ustaljenog stanja koje se retko uspostavlja zbog izolacije kratkog spoja delovanjem relejne zaštite. Stoga, režim sa kratkim spojem se uglavnom aproksimira ustaljenim režimom u različitim vremenskim sekvencama da bi se jednostavno obrađivao utvrđenim postupcima za ustaljene režime. U prilogu primenama postupaka za ustaljene režime ide i to što se za vreme kratkih spojeva frekvencija ne menja u kratkom vremenskom periodu, odmah nakon uspostavljanja režima sa kratkim spojem (ne deluje regulacija aktivnih snaga i frekvencije i regulacija napona). Režimi sa kratkim spojevima nisu prostoperiodični ali su aproksimacije prostoperiodičnim režimima zadovoljavajuće za većinu primena. Nesimetrični režimi mogu se obrađivati u domenu simetričnih komponenti, što je najčešće slučaj u prenosnim mrežama i u uravnoteženim distributivnim mrežama. U neuravnoteženim distributivnim mrežama prisutni su jednofazni i dvofazni vodovi, kao i sprege jednofaznih transformatora koje formiraju zatvorene i otvorene sprege, pa se u takvim mrežama nesimetrični režimi uglavnom obrađuju u faznom domenu. U slučaju obrade nesimetričnih režima u domenu simetričnih komponenti, jednofazni transformatori u pogonskim kolima sadrže idealne transformatore realnih odnosa transformacije, dok trofazni transformatori sadrže idealne transformatore realnih i kompleksnih odnosa transformacije. U tom slučaju obrada režima se uglavnom vrši u domenu relativnih vrednosti i relativnih uglova u kojima nema idealnih transformatora realnih i kompleksnih odnosa transformacije. U slučaju obrade nesimetričnih režima u faznom

domenu, obrada režima se uglavnom vrši u domenu relativnih vrednosti u kojima nema idealnih transformatora realnih odnosa transformacije.

Za proračun režima mreže sa kratkim spojem režim mreže pre kratkog spoja se smatra poznatim i on se dobija proračunom tokova snaga.

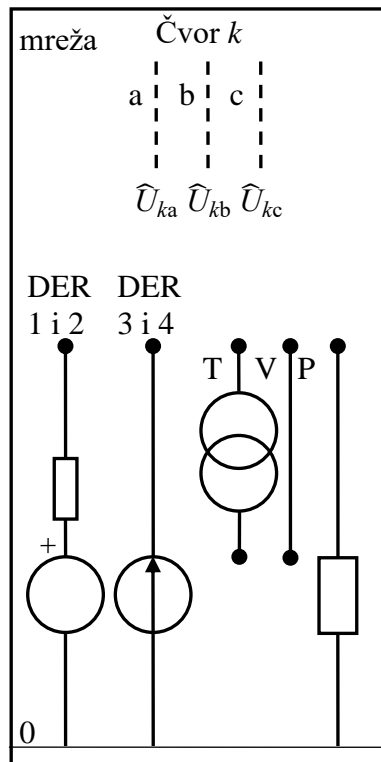
5.1 OPŠTA RAZMATRANJA O PRORAČUNU KRATKIH SPOJEVA

Opšta razmatranja o proračunu kratkih spojeva izlažu se saglasno sa literaturom [21, 77]. Na slici 5.1.1 je prikazan model mreže pre kratkog spoja sa osnovnim elementima: DER tipa 1 i 2 predstavljeni Tevenenovim ekvivalentom kojim se modeluje i koren distributivne mreže; DER tipa 3 i 4; transformatori; vodovi i otočni elementi (potrošači, baterije kondenzatora, statički VAR sistemi, prigušnice itd.) respektivno. Čvor k predstavlja jedan trofazni čvor u kome će se simulirati kratak spoj. Naponi \hat{U}_{ka} , \hat{U}_{kb} i \hat{U}_{kc} predstavljaju fazne napone čvora k . Čvor 0 predstavlja čvor referentnog potencijala. Mreža se za vreme kratkog spoja smatra linearnom. Linearnost je obezbeđena linearnim modelima elemenata za vreme kratkog spoja: potrošači se modeluju idealnim strujnim generatorima ili impedansama/admitansama, tradicionalni DER (DER tipa 1 i 2) modeluju se Tevenenovim ekvivalentima, DER zasnovani na invertoru (DER tipa 3 i 4) idealnim strujnim generatorima i nadređene mreže sa koje se napaja distributivna mreža Tevenenovim ekvivalentima. Stoga, svi elementi su linearni pa je i kolo mreže linearno. Na slici 5.1.2 prikazan je model mreže sa kratkim spojem simuliranim u čvoru k . Taj čvor može da bude već utvrđen čvor ukoliko predstavlja jedan kraj nekog elementa, ili novogenerisan čvor kojim se modeluje mesto kratkog spoja između krajeva elementa (na primer mesto na sredini voda). Neka razmatrana mreža ima n čvorova sa faznim naponima definisanim u odnosu na čvor referentnog potencijala 0. Čvor k je bezimpedantnim linijama razvučen u cilju jednostavnijeg prikaza topologije kratkog spoja (TKS) koja će biti insertovana u fazne čvorove a' , b' i c' . U modelu mreže pre kratkog spoja naponi čvorova a' , b' i c' jednaki su naponima čvorova a , b i c , a struje bezimpedantnih linija su jednake nuli. Kada se insertuje TKS, naponi čvorova a' , b' i c' i dalje su jednaki naponima čvorova a , b i c , ali su struje bezimpedantnih linija različite od nule. Na slici 5.1.2 slovom k (font Normal) u superskriptu označene su veličine koje se odnose na režim sa kratkim spojem. Struje na mestu kratkog spoja \hat{J}_{ka}^k , \hat{J}_{kb}^k i \hat{J}_{kc}^k i naponi čvora sa kratkim spojem \hat{u}_{ka}^k , \hat{u}_{kb}^k i \hat{u}_{kc}^k nisu prostoperiodične veličine.

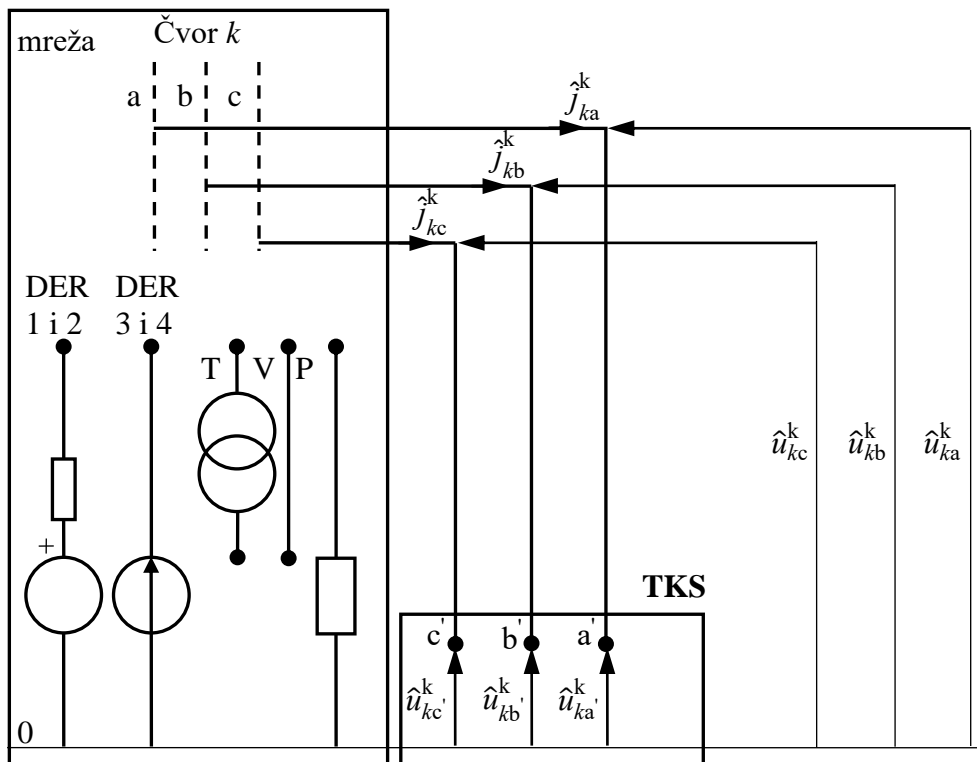
Proračun režima sa kratkim spojem mreže prikazane na slici 5.1.2 zasnovan je na četiri dekompozicije:

1. Prva dekompozicija režima sa kratkim spojem na jednosmeran i naizmeničan režim. Jednosmerni režim posledica je delovanja teorije o zaleđenom fluksu u namotajima statora naizmeničnih električnih mašina, dok je naizmeničan režim posledica delovanja teorije o zaleđenom fluksu u rotorima naizmeničnih električnih mašina;
2. Druga dekompozicija je dekompozicija naizmeničnog režima na naizmeničan, prostoperiodičan režim kola mreže pre kratkog spoja i naizmeničan režim generalizovanog Δ -kola (u nastavku samo Δ -kola) ;
3. Treća dekompozicija je dekompozicija naizmeničnog režima Δ -kola na subtranzitni, tranzitni i ustaljeni režim, koji predstavljaju u opštem slučaju nesimetrične režime u tri vremenske sekvence koji su posledica delovanja teorije o zaleđenom fluksu u pobudnim i prigušnim namotajima naizmeničnih električnih mašina. Ustaljeni režim je

prostoperiodičan, dok se subtranzitni i tranzitni uglavnom aproksimiraju prostoperiodičnim režimima sa vrednostima amplituda jednakim na početku vremenskih sekvenci;



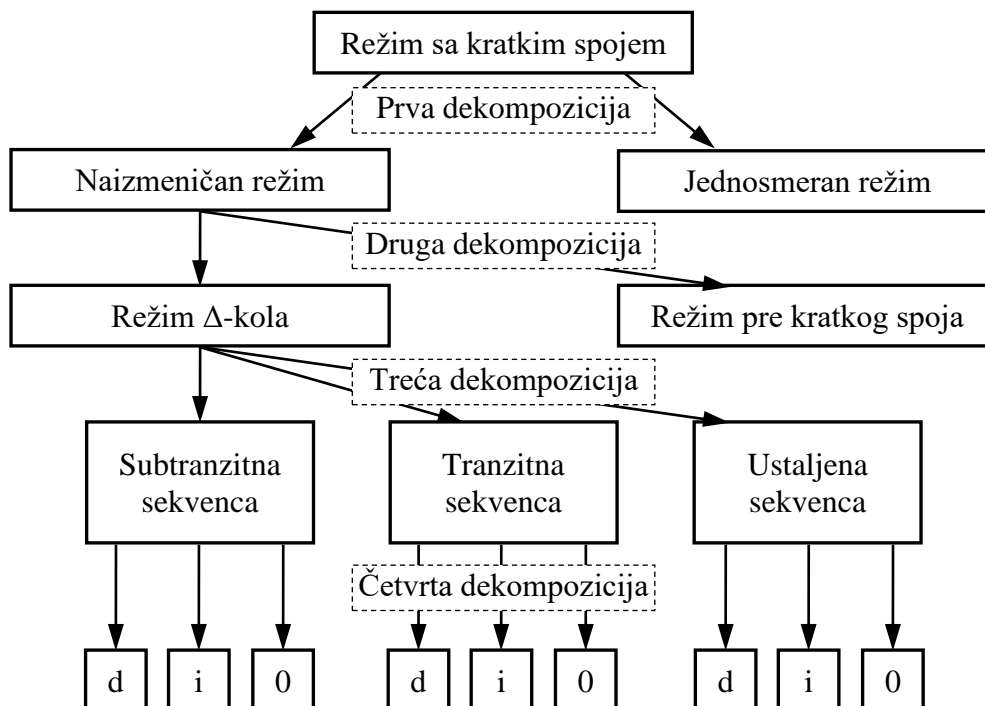
Slika 5.1.1 – Mreža u ustaljenom režimu pre kratkog spoja, sa istaknutim čvorom k u kome će se simulirati kratak spoj



Slika 5.1.2 – Mreža sa kratkim spojem u čvoru k

4. Četvrta dekompozicija je dekompozicija subtranzitnog, tranzitnog i ustaljenog režima Δ -kola iz faznog domena u domen simetričnih komponenti. U slučaju trofaznog, uravnoteženog elektroenergetskog sistema, dekompozicijom se dobijaju tri simetrična režima za sve tri vremenske sekvence direktnog, inverznog i nultog redosleda, koji su raspregnuti svuda osim na mestu kratkog spoja.

Navedene dekompozicije moguće su s obzirom na to da je kolo mreže sa kratkim spojem linearno (prva, druga i četvrta dekompozicija) i da je dinamika pesimistički aproksimirana (treća dekompozicija). Na slici 5.1.3 prikazane su navedene četiri dekompozicije mreže sa kratkim spojem.



Slika 5.1.3 – Četiri dekompozicije režima elektroenergetskog sistema sa kratkim spojem

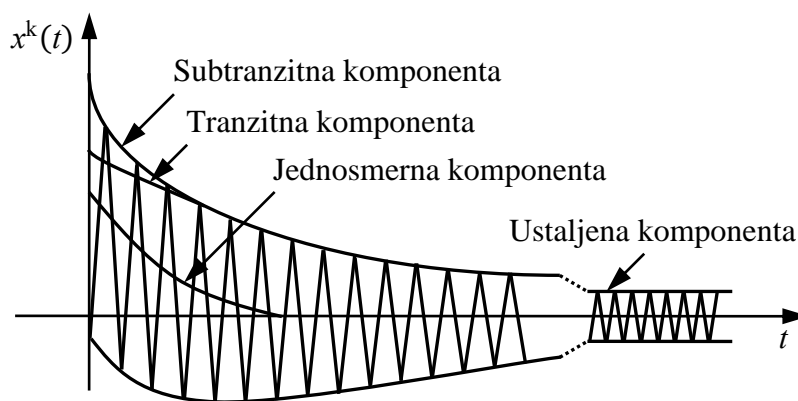
Prva dekompozicija

Primenom principa dekompozicije-superpozicije na linearni model mreže sa kratkim spojem, njegov režim se može dekomponovati na naizmeničan i jednosmeran režim. Naizmeničan režim nije prostoperiodičan jer se maksimalne vrednosti veličina menjaju u vremenu. Svi naponi i struje, kao i veličine koje su njihove linearne kombinacije, mogu se napisati u obliku:

$$x^k(t) = x_{\omega}^k(t) + x_{-}^k(t), \quad (5.1.1)$$

gde su $x_{\omega}^k(t)$ i $x_{-}^k(t)$ naizmenična i jednosmerna veličina, respektivno.

U slučaju kratkog spoja blizu generatora, komponente struje kratkog spoja, označene kao $x^k(t)$, izgledaju kao na slici 5.1.4.



Slika 5.1.4 – Komponente struje kratkog spoja kada se desi kratak spoj blizu generatora

Druga dekompozicija

Naizmeničan režim linearnog modela mreže sa kratkim spojem može se dekomponovati na režim kola mreže pre kratkog spoja i režim Δ -kola.

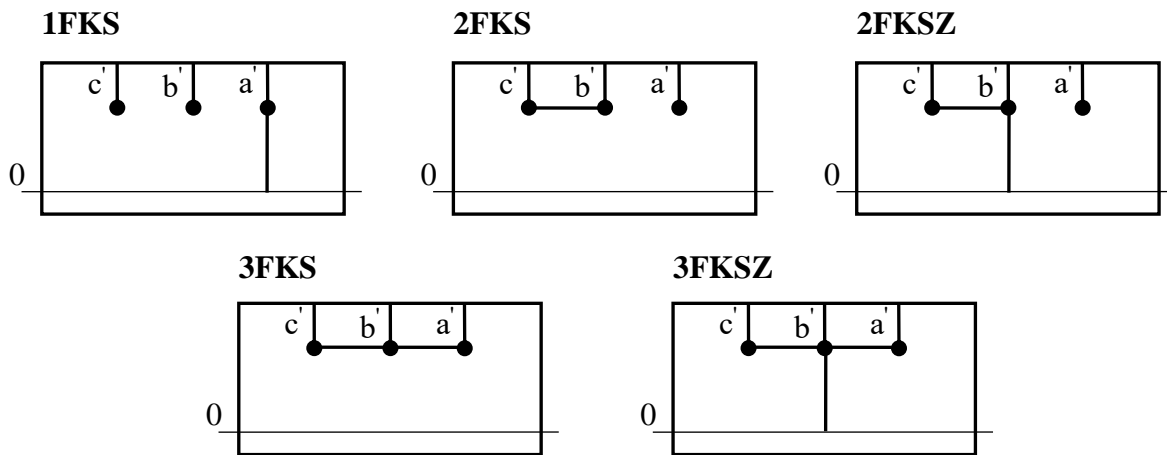
Svi naponi i struje, kao i veličine koje su njihove linearne kombinacije, mogu se napisati u obliku:

$$x_{\omega}^k(t) = x_{\omega}(t) + x_{\omega}^{\Delta}(t), \quad (5.1.2)$$

gde su $x_{\omega}(t)$ i $x_{\omega}^{\Delta}(t)$ naizmenične veličine režima kola mreže pre kratkog spoja i režima Δ -kola, respektivno.

Na osnovu naponskog Kirhofovog zakona, u bezimpedantne linije na mestu kratkog spoja mogu se insertovati idealni naponski generatori (po dva u fazi sa suprotnim referentnim smerovima napona) sa naponima jednakim naponima u režimu kola mreže pre kratkog spoja. Dekompozicijom na kolo pre kratkog spoja i Δ -kolo, u prvom se zadržavaju insertovani idealni naponski generatori sa smerom prema čvoru mreže, a u drugom sa smerom od čvora mreže. Idealni naponski generatori u kolu mreže pre kratkog spoja jednaki su naponima u kolu mreže pre kratkog spoja, pa je njihov uticaj zanemarljiv. Idealni naponski generatori u Δ -kolu predstavljaju jedne od aktivnih elemenata tog kola. Naizmenični režim kola mreže pre kratkog spoja je prostoperiodičan. Taj režim je poznat jer je prethodno dobijen proračunom tokova snaga. Režim Δ -kola nije prostoperiodičan. Δ -kolo je pasivno svuda osim na mestu kratkog spoja i mestima gde su priključeni DER zasnovani na invertoru (DER tipa 3 i 4). Svi ostali idealni generatori su u Δ -kolu pasivizirani, dok su u kolu mreže pre kratkog spoja sadržani. TKS zajedno sa insertovanim idealnim naponskim generatorima predstavlja ansambl kratkog spoja. TKS za različite tipove kratkih spojeva prikazana je na slici 5.1.5.

Proračun naizmeničnog režima mreže sa kratkim spojem svodi se na proračun režima Δ -kola jer je režim kola mreže pre kratkog spoja poznat. Jednostavnost Δ -kola i pretežna pasivnost čine ovu dekompoziciju veoma bitnom za proračun režima sa kratkim spojem.



Slika 5.1.5 – Topologija kratkog spoja za različite vrste kratkih spojeva

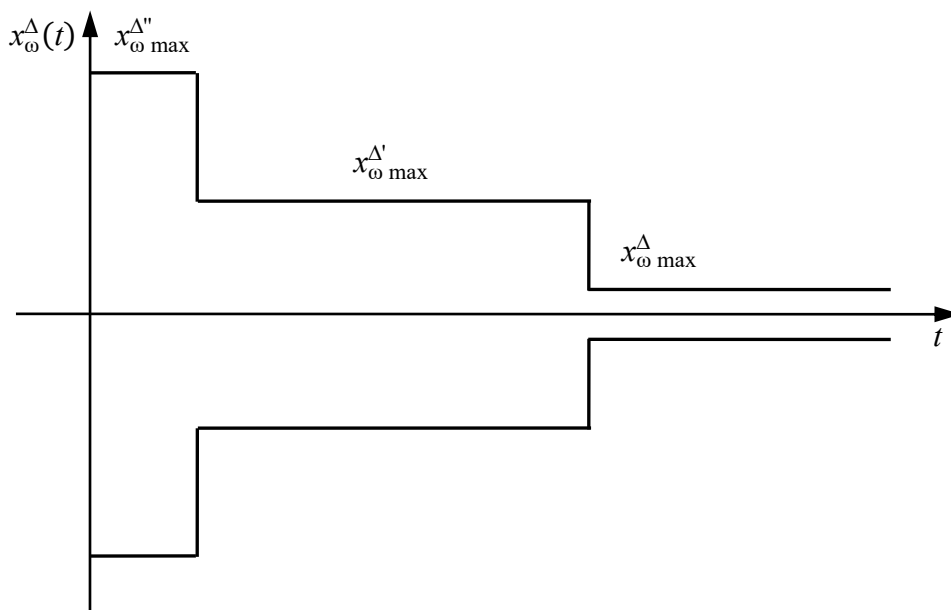
Treća dekompozicija

Treća dekompozicija predstavlja dekompoziciju naizmeničnog režima Δ -kola u vremenskim sekvencama u kojima se parametri ekvivalentnih kola DER razlikuju. Zbog promene parametara ekvivalentnih kola DER, apsolutne vrednosti ekstremnih vrednosti struja Δ -kola menjaju se (opadaju) u vremenu u subtranzitnoj i tranzitnoj sekvenci, dok se u ustaljenoj sekvenci ustaljuju na vrednostima određenim parametrima DER. Ustaljena vremenska sekvenca se skoro nikada ne uspostavlja jer se kratak spoj najkasnije u tranzitnoj sekvenci izoluje delovanjem relejne zaštite. Režim u ustaljenoj vremenskoj sekvenci može se uspostaviti u slučaju dugih vodova kada se na njihovim krajevima desi kratak spoj čije su struje bliske maksimalnim radnim strujama.

Ustaljen režim je prostoperiodičan, dok se struje u subtranzitnoj i tranzitnoj vremenskoj sekvenci (odnosno anvelope struja) uglavnom pesimistički aproksimiraju obvojnica čije su vrednosti jednake maksimalnim vrednostima struja na početku svake sekvence, kao što je prikazano na slici 5.1.6. Time se postiže efekat da se tri naizmenična, prostoperiodična režima mogu obrađivati primenom postupaka za prostoperiodične režime koji koriste kompleksne vrednosti. Izgubljena dinamika subtranzitnog i tranzitnog režima ide na stranu sigurnosti s obzirom na to da će negativni efekti struja u realnosti biti manji od izračunatih. Svaka veličina $x_{\omega}^{\Delta}(t)$ aproksimiranog naizmeničnog režima Δ -kola postaje prostoperiodična i može se predstaviti na sledeći način:

$$x_{\omega}^{\Delta}(t) = \begin{cases} x_{\omega}^{\Delta''}(t) - \text{subtranzitna komponenta} \\ x_{\omega}^{\Delta'}(t) - \text{tranzitna komponenta} \\ x_{\omega}^{\Delta}(t) - \text{ustaljena komponenta} \end{cases} .$$

U zavisnosti od vrednosti i oblika struja, kratki spojevi se mogu podeliti na one bliže i dalje od generatora. Kratki spojevi bliže generatorima imaju vrednost struje u subtranzitnom periodu više od dva puta veću od nominalnih struja električnih mašina, dok kratki spojevi dalje od generatora imaju vrednost struje manju od dva puta nominalne struje električnih mašina.



Slika 5.1.6 – Oblik aproksimiranih anvelopa struja naizmeničnog režima Δ -kola

Parametri ekvivalentnih kola tradicionalnih DER menjaju se u sve tri vremenske sekvence, kao što je prikazano u paragrafu 2.2.1, gde su prikazani njihovi matematički modeli. Subtranzitna sekvenca, koja je posledica prelaznog procesa u prigušnim namotajima tradicionalnih DER, traje nekoliko desetina milisekundi. Tranzitna sekvenca, koja je posledica prelaznog procesa u pobudnim namotajima tradicionalnih DER, traje do jedne sekunde. DER zasnovani na invertoru imaju ekvivalentna kola koja se razlikuju u navedenim sekvencama i biraju se u skladu sa vremenskom sekvencom. Na ovaj način dobijaju se tri kola Δ -kola sa prostoperiodičnim režimima, u kojima se potrošači, modelovani impedansama/admitansama, zamenjuju svojim parametrima, potrošači modelovani idealnim strujnim generatorima zamenjuju prekidima, dok se u slučaju zanemarenja potrošača oni zanemaruju u Δ -kolu kao i u kolu pre kratkog spoja. Kondenzatori i prigušnice modeluju se impedansama/admitansama. Parametri sekcija vodova i transformatora ne menjaju se u vremenu. Koren distributivne mreže, predstavljen Tevenenovim ekvivalentom nadređene mreže koja sadrži DER, ima parametre koji se menjaju u vremenskim sekvencama. Ansambl kratkog spoja ne menja se u vremenskim sekvencama.

Prostoperiodični režimi linearnih Δ -kola u opštem slučaju su nesimetrični zbog neuravnoteženosti elemenata i topologije kratkog spoja.

Četvrta dekompozicija

Prostoperiodični režimi Δ -kola u subtranzitnoj, tranzitnoj i ustaljenoj sekvenci mogu se tretirati u domenu simetričnih komponenti, što predstavlja četvrtu dekompoziciju. Transformacija u domen simetričnih komponenti podrazumeva transformaciju svih prostoperiodičnih veličina i zamenu matematičkih modela trofaznih kola pogonskim kolima direktnog, inverznog i nultog redosleda. Ta kola su raspregnuta kod trofaznih, uravnoteženih elemenata.

Transformacija trofazne, prostoperiodične veličine $\hat{\mathbf{X}}_{abc}$ u simetričnu veličinu $\hat{\mathbf{X}}^{di0}$ vrši se primenom kompleksne matrice transformacije $\hat{\mathbf{A}}$, koja za izbor simetričnih komponenti iz faze a transformiše $\hat{\mathbf{X}}_{abc}$ na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{X}}^{di0} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{X}}_{abc}, \quad \hat{\mathbf{A}} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad \hat{\mathbf{X}}^{di0} = \begin{bmatrix} \hat{X}^d \\ \hat{X}^j \\ \hat{X}^0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{X}}_{abc} = \begin{bmatrix} \hat{X}_a \\ \hat{X}_b \\ \hat{X}_c \end{bmatrix}. \quad (5.1.3)$$

Relacije između prostoperiodičnih veličina u domenu simetričnih komponenti za sve tri vremenske sekvence određene su pogonskim kolima za sve tri vremenske sekvence.

Tradicionalni DER i koren mreže imaju različita pogonska kola u različitim simetričnim redosledima. U direktnom redosledu parametri pogonskih kola za sve tri vremenske sekvence se razlikuju. Pogonska kola u direktnom redosledu su aktivna (sadrže idealne naponske generatore). U inverznom redosledu parametri pogonskih kola za sve tri vremenske sekvence su isti ali se razlikuju od parametara u direktnom redosledu. U nultom redosledu parametri pogonskih kola za sve tri vremenske sekvence su isti ali se razlikuju u odnosu na parametre druga dva redosleda. Pogonska kola u inverznom i nultom redosledu su pasivna.

DER zasnovani na invertoru imaju različita pogonska kola u različitim simetričnim redosledima. Pogonska kola u direktnom redosledu su aktivna, dok su u inverznom i nultom pasivna. U direktnom redosledu pogonska kola DER sadrže idealne strujne generatore čija se struja računa na osnovu režima kola mreže pre kratkog spoja i strategije upravljanja tim DER. Razmatranja u vezi sa parametrima za sve tri vremenske sekvence ista su kao kod tradicionalnih DER.

Potrošači modelovani impedansama/admitansama u sve tri vremenske sekvence modeluju se pogonskim parametrima, pri čemu su pogonski parametri direktnog i inverznog redosleda isti i razlikuju se od pogonskih parametara nultog redosleda. Potrošači modelovani idealnim strujnim generatorima modeluju se prekidom, odnosno potrošački čvorovi u kojima su priključeni su u praznom hodu. Parametri pogonskih kola potrošača se ne menjaju u vremenskim sekvencama.

Vodovi imaju topološki ista pogonska kola, pri čemu se vrednosti parametra pogonskih kola razlikuju. U simetričnom režimu direktnog i inverznog redosleda parametri pogonskih kola vodova su isti i razlikuju se od parametara pogonskih kola nultog redosleda. Parametri pogonskih kola se ne menjaju u vremenskim sekvencama.

Transformatori imaju pogonska kola koja se topološki i po parametrima razlikuju za sva tri simetrična redosleda. Pogonska kola direktnog i inverznog redosleda su topološki ista, ali se u slučaju trofaznih transformatora razlikuju u kompleksnom odnosu transformacije (izuzetak je trofazni transformator čiji je satni broj 0). Pogonska kola nultog redosleda se razlikuju od pogonskih kola druga dva simetrična redosleda (izuzetak je trofazni transformator čiji je satni broj 0 i čiji su namotaji povezani u zvezde koje su direktno uzemljene). Parametri pogonskih kola transformatora se ne menjaju u vremenskim sekvencama.

Generalno, parametri pogonskih kola direktnog redosleda menjaju se u sve tri vremenske sekvence ali je topologija pogonskih kola ista. Parametri pogonskih kola inverznog i nultog redosleda i topologija ne menjaju se u sve tri vremenske sekvence.

Nakon proračuna simetričnih režima, inverznom matricom transformacije $\hat{\mathbf{A}}^{-1}$ prelazi se u fazni domen. Simetrične veličine $\hat{\mathbf{X}}^{di0}$ transformišu se u fazne $\hat{\mathbf{X}}_{abc}$ na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{X}}_{abc} = \hat{\mathbf{A}}^{-1} \hat{\mathbf{X}}^{di0}, \quad \hat{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.1.4)$$

Na osnovu prethodnih razmatranja o proračunu kratkih spojeva, proračun se svodi na proračun jednosmernog režima i tri režima Δ -kola za sve tri vremenske sekvence u faznom ili u domenu simetričnih komponenti. Pri tome se smatra da je režim kola mreže pre kratkog spoja poznat. Za proračun režima Δ -kola potrebno je prvo formulisati matematički model Δ -kola za sve vremenske sekvence u kojima će da figurišu parametri elemenata za odgovarajuću sekvencu. Matematički model Δ -kola koji je izveden u disertaciji, izveden je za trofazne, uravnotežene mreže zbog jednostavnosti modela, ali se jednostavno može generalizovati na miksovane i neuravnotežene mreže tako što bi se uzele u razmatranje odgovarajuće faze elemenata u faznom domenu. U nastavku je prikazan matematički model Δ -kola i proračun režima Δ -kola.

Matematički model Δ -kola

Neka se razmatra trofazan elektroenergetski sistem sa brojem čvorova $n+1$, gde je jedan čvor referentni sa oznakom 0. Primenom metoda nezavisnih napona na Δ -kolo razmatranog sistema sa $3n+1$ faznih čvorova u izabranoj vremenskoj sekvenci, može se napisati opšti model Δ -kola:

$$-\hat{\mathbf{J}}^\Delta = \hat{\mathbf{Y}}\hat{\mathbf{U}}^\Delta, \quad (5.1.5)$$

gde su:

$-\hat{\mathbf{J}}^\Delta$ – vektor faznih injektiranih struja čvorova dimenzije $3n$,

$\hat{\mathbf{Y}}$ – matrica admitansi Δ -kola u faznom domenu dimenzije $3n \times 3n$, koja se razlikuje za različite vremenske sekvence i koju karakteriše retkost (nisu svi čvorovi međusobno povezani granama),

$\hat{\mathbf{U}}^\Delta$ – vektor faznih napona čvorova dimenzije $3n$.

Neka se simulira kratak spoj u čvoru k . Struje na mestu kratkog spoja u Δ -kolu $\hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta$, $\hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta$ i $\hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta$ usmerene su prema čvoru referentnog potencijala, pa su injektirane struje u čvoru k jednake negativnim vrednostima struja na mestu kratkog spoja. Ukoliko bi se poznavale injektirane struje Δ -kola i parametri i topologija elektroenergetskog sistema, na osnovu kojih bi se izračunala matrica admitansi, naponi čvorova Δ -kola bi se mogli izračunati rešavanjem sistema kompleksnih, linearnih, algebarskih jednačina. Sa izračunatim naponima čvorova Δ -kola može se rekonstruisati režim kola.

Δ -kolo je pasivno svuda osim na mestu kratkog spoja i na mestima gde su priključeni DER tipa 3 i 4. U slučaju postojanja DER tipa 3 i 4 u Δ -kolu, ono se naziva generalizovano Δ -kolo čiji se matematički model razlikuje od opšteg modela Δ -kola u tome što kolo nije više aktivno samo na mestu kratkog spoja nego i na mestima priključenja DER tipa 3 i 4. U nastavku će generalizovano Δ -kolo biti imenovano kao „ Δ -kolo“. Injektirane struje Δ -kola su jednake nuli u svim čvorovima osim u čvoru k na mestu kratkog spoja i u čvorovima gde su priključeni DER tipa 3 i 4 (skup indeksa čvorova gde su priključeni DER tipa 3 i 4 je $\alpha_{\text{DER}3-4}$), što se u matematičkoj notaciji može napisati na sledeći način:

$$\{\mathcal{J}_{ia}^\Delta, \mathcal{J}_{ib}^\Delta, \mathcal{J}_{ic}^\Delta\} \begin{cases} = \{0,0,0\}, i \notin \{k, \alpha_{\text{DER3-4}}\} \\ \neq \{0,0,0\}, i \in \{k, \alpha_{\text{DER3-4}}\} \end{cases} \quad (5.1.6)$$

Injektirane struje u čvorovima gde su priključeni DER tipa 3 i 4 predstavljaju ekscesne struje, koje se mogu izračunati na osnovu upravljačkih strategija invertora preko kojih su priključeni na mrežu u čvorovima čiji su indeksi sadržani u skupu $\alpha_{\text{DER3-4}}$. Stoga, smatra se da su injektirane struje u čvorovima gde su priključeni DER tipa 3 i 4 poznate. Kada bi se pored tih struja poznavale injektirane struje u čvoru k na mestu kratkog spoja, mogao bi se rešiti sistem jednačina opšteg modela Δ -kola. Opisom kratkog spoja u čvoru k , odnosno poznavanjem struja na mestu kratkog spoja, sistem sa $3n$ linearnih jednačina i $3n+3$ nepoznate veličine bio bi potpun.

Kratak spoj može se opisati linearnim relacijama koje zavise od topologije kratkog spoja. Linearne relacije predstavljaju uslove kratkog spoja Δ -kola koji zavise od napona i struja topologije kratkog spoja:

$$\begin{aligned} F_1 (\hat{U}_{ka}^\Delta, \hat{U}_{kb}^\Delta, \hat{U}_{kc}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta) &= 0, \\ F_2 (\hat{U}_{ka}^\Delta, \hat{U}_{kb}^\Delta, \hat{U}_{kc}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta) &= 0, \\ F_3 (\hat{U}_{ka}^\Delta, \hat{U}_{kb}^\Delta, \hat{U}_{kc}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta, \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta) &= 0. \end{aligned} \quad (5.1.7)$$

Uslovi kratkog spoja za različite, u opštem slučaju neuravnotežene, topologije kratkog spoja sa slike 5.1.5 dati su u tabeli 5.1.1. Uslove kratkog spoja jednofaznih i dvofaznih kratkih spojeva, čije topologije nisu date u tabeli 5.1.1, jednostavno je odrediti generalizacijom na osnovu njihovih topologija kratkih spojeva i uslova kratkih spojeva datih za jednofazan kratak spoj u fazi a i dvofazan kratak spoj sa i bez zemlje u fazama b i c.

Tabela 5.1.1 – Uslovi kratkog spoja za različite topologije kratkog spoja

	Jednofazan kratak spoj u fazi a 1FKSa	Dvofazan kratak spoj u fazama b i c 2FKSbc	Dvofazan kratak spoj sa zemljom u fazama b i c 2FKSZbc	Trofazan kratak spoj 3FKS	Trofazan kratak spoj sa zemljom 3FKSZ
F ₁	$\hat{U}_{ka}^\Delta = 0$	$\hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta = 0$	$\hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta = 0$	$\hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta + \hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta + \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{ka}^\Delta = 0$
F ₂	$\hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta = 0$	$\hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta + \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kb}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kb}^\Delta - \hat{U}_{ka}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kb}^\Delta = 0$
F ₃	$\hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kb}^\Delta - \hat{U}_{kc}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kc}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kc}^\Delta - \hat{U}_{ka}^\Delta = 0$	$\hat{U}_{kc}^\Delta = 0$

Sada, sa opisom uslova kratkog spoja Δ -kola, sistem sa $3n$ linearnih jednačina proširen je na $3n+3$ linearne jednačine, a broj nepoznatih veličina $3n+3$ proširen je na $3n+6$ nepoznatih veličina. U nepotpunom matematičkom modelu potrebno je uvažiti insertovane idealne naponske generatore koji predstavljaju jednu od ekscitacija Δ -kola. Insertovani idealni naponski generatori se mogu uvažiti u sledećim relacijama:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{ka}^\Delta &= \hat{U}_{ka}^\Delta - \hat{U}_{ka}, \\ \hat{U}_{kb}^\Delta &= \hat{U}_{kb}^\Delta - \hat{U}_{kb}, \\ \hat{U}_{kc}^\Delta &= \hat{U}_{kc}^\Delta - \hat{U}_{kc}. \end{aligned} \quad (5.1.8)$$

Potpun matematički model Δ -kola u faznom domenu, za proračun aproksimacije naizmenične komponente režima Δ -kola za izabranu vremensku sekvencu, čini $3n+6$ relacija sa $3n+6$ nepoznatih veličina, i to:

1. $3n$ relacija kojima se opisuje Δ -kolo u faznom domenu:

$$-\mathbf{J}^{\Delta} = \mathbf{Y}\mathbf{U}^{\Delta}, \quad (5.1.9)$$

2. 3 relacije kojima se opisuju uslovi kratkog spoja:

$$\begin{aligned} F_1 \left(\widehat{U}_{ka}^{\Delta}, \widehat{U}_{kb}^{\Delta}, \widehat{U}_{kc}^{\Delta}, \mathcal{J}_{ka}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kb}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kc}^{\Delta} \right) &= 0, \\ F_2 \left(\widehat{U}_{ka}^{\Delta}, \widehat{U}_{kb}^{\Delta}, \widehat{U}_{kc}^{\Delta}, \mathcal{J}_{ka}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kb}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kc}^{\Delta} \right) &= 0, \\ F_3 \left(\widehat{U}_{ka}^{\Delta}, \widehat{U}_{kb}^{\Delta}, \widehat{U}_{kc}^{\Delta}, \mathcal{J}_{ka}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kb}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kc}^{\Delta} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

3. 3 relacije insertovanih idealnih naponskih generatora:

$$\begin{aligned} \widehat{U}_{ka}^{\Delta} &= \widehat{U}_{ka}^{\Delta'} - \widehat{U}_{ka}, \\ \widehat{U}_{kb}^{\Delta} &= \widehat{U}_{kb}^{\Delta'} - \widehat{U}_{kb}, \\ \widehat{U}_{kc}^{\Delta} &= \widehat{U}_{kc}^{\Delta'} - \widehat{U}_{kc}, \end{aligned} \quad (5.1.11)$$

4. $3n$ faznih napona čvorova:

$$\widehat{U}_{1a}^{\Delta}, \widehat{U}_{1b}^{\Delta}, \widehat{U}_{1c}^{\Delta}, \dots, \widehat{U}_{ka}^{\Delta}, \widehat{U}_{kb}^{\Delta}, \widehat{U}_{kc}^{\Delta}, \dots, \widehat{U}_{na}^{\Delta}, \widehat{U}_{nb}^{\Delta}, \widehat{U}_{nc}^{\Delta},$$

5. 3 fazne struje k -tog čvora:

$$\mathcal{J}_{ka}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kb}^{\Delta}, \mathcal{J}_{kc}^{\Delta},$$

6. 3 fazna napona ansambla kratkog spoja:

$$\widehat{U}_{ka}^{\Delta}, \widehat{U}_{kb}^{\Delta}, \widehat{U}_{kc}^{\Delta}.$$

Naveden matematički model može se napisati u domenu simetričnih komponenti kada se uvažavaju sledeće modifikacije modela:

1. $3n$ relacija kojima se opisuje Δ -kolo transformisati iz faznog u domen simetričnih komponenti:

$$-\mathbf{J}^{\Delta s} = \widehat{\mathbf{Y}}^s \widehat{\mathbf{U}}^{\Delta s}, \quad s = d, i, o, \quad (5.1.12)$$

2. uvođenje 3 jednačine transformacije faznih napona čvora k u domen simetričnih komponenti:

$$\begin{bmatrix} \widehat{U}_k^{\Delta d} \\ \widehat{U}_k^{\Delta i} \\ \widehat{U}_k^{\Delta o} \end{bmatrix} = \widehat{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \widehat{U}_{ka}^{\Delta} \\ \widehat{U}_{kb}^{\Delta} \\ \widehat{U}_{kc}^{\Delta} \end{bmatrix}, \quad (5.1.13)$$

3. uvođenje 3 jednačine transformacije faznih struja k -tog čvora u domen simetričnih komponenti:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{J}_k^{\Delta d} \\ \mathcal{J}_k^{\Delta i} \\ \mathcal{J}_k^{\Delta o} \end{bmatrix} = \widehat{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathcal{J}_{ka}^{\Delta} \\ \mathcal{J}_{kb}^{\Delta} \\ \mathcal{J}_{kc}^{\Delta} \end{bmatrix}, \quad (5.1.14)$$

4. $3n$ faznih napona čvorova transformisati iz faznog u domen simetričnih komponenti:

$$\widehat{U}_1^{\Delta s}, \dots, \widehat{U}_k^{\Delta s}, \dots, \widehat{U}_n^{\Delta s}, s = d, i, o,$$

5. uvođenje 3 simetrične komponente struje k -tog čvora:

$$\mathcal{J}_k^{\Delta d}, \mathcal{J}_k^{\Delta i}, \mathcal{J}_k^{\Delta o},$$

6. uvođenje 3 fazna napona čvora k Δ -kola:

$$\widehat{U}_{ka}^{\Delta}, \widehat{U}_{kb}^{\Delta}, \widehat{U}_{kc}^{\Delta}.$$

Potpun matematički model Δ -kola u domenu simetričnih komponenti čini $3n+12$ relacija sa $3n+12$ nepoznatih veličina.

Proračun režima Δ -kola

Proračun režima Δ -kola predstavlja rešavanje sistema kompleksnih, spregnutih, linearnih, algebarskih jednačina u faznom domenu, gde ih ima $3n+6$, ili u domenu simetričnih komponenti, gde ih ima $3n+12$. U zavisnosti od načina rešavanja navedenog sistema linearnih jednačina razvijeni su različiti algoritmi u kojima se navedeni sistemi rešavaju u navedenoj formi ili se transformišu u drugačiju formu u cilju pojednostavljenja rešavanja. Ovde će se pokazati dva najjednostavnija postupka za proračun režima Δ -kola, a u delu 5.2 biće predstavljeni reprezentativni postupci za proračun režima Δ -kola odnosno proračun kratkih spojeva.

U primerima elektroenergetskih sistema malih dimenzija, ili delova sistema malih dimenzija, primenjuje se postupak koji može da se obradi „ručno“. Takav postupak je efikasan i obrađuje se izračunavanjem 3 ključne nepoznate veličine: za model Δ -kola u faznom domenu to su 3 fazne struje k -tog čvora, a za model Δ -kola u domenu simetričnih komponenti to su simetrične komponente struje k -tog čvora. Sa izračunatim ključnim nepoznatim veličinama jednostavno se može rešiti sistem $3n$ relacija kojima se opisuje Δ -kolo u faznom ili u domenu simetričnih komponenti.

Za proračun ključnih nepoznatih veličina mogu se koristiti 3 relacije kojima se opisuju uslovi kratkog spoja i 3 relacije insertovanih idealnih naponskih generatora. U tim relacijama ima 9 nepoznatih veličina: 3 fazne struje k -tog čvora, 3 fazna napona ansambla kratkog spoja i 3 napona čvora k Δ -kola. Ovakav sistem jednačina u faznom domenu nije potpun. U domenu simetričnih komponenti ovom sistemu se mogu pridružiti 3 relacije transformacije faznih napona čvora k u domen simetričnih komponenti i 3 relacije transformacije faznih struja k -tog čvora u domen simetričnih komponenti, kao i 3 simetrične komponente struje k -tog čvora i 3 simetrične komponente napona k -tog čvora, što čini sistem od ukupno 12 relacija i 15 nepoznatih veličina. Za proračun ključnih nepoznatih veličina potrebne su relacije uticaja ostatka Δ -kola na režim čvora k . S obzirom na to da je Δ -kolo linearno, uticaj ostatka Δ -kola

na režim čvora k može se uvažiti Thevenenovim ekvivalentom Δ -kola viđenim iz čvora k . U slučaju pasivnog Δ -kola Thevenenov ekvivalent predstavlja Thevenenova impedansa $\hat{\mathbf{Z}}_T$, dok u slučaju aktivnog Δ -kola Thevenenov ekvivalent predstavlja Thevenenova impedansa $\hat{\mathbf{Z}}_T$ i elektromotorna sila $\hat{\mathbf{E}}_T$. Određivanje Thevenenovog ekvivalenta dela kola male dimenzije može se „ručno“ izvršiti. Nakon određivanja Thevenenovog ekvivalenta u faznom domenu može se napisati relacija:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{ka}^\Delta \\ \hat{U}_{kb}^\Delta \\ \hat{U}_{kc}^\Delta \end{bmatrix} = -\hat{\mathbf{Z}}_T \begin{bmatrix} \hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta \\ \hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta \\ \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta \end{bmatrix} \text{ za pasivno } \Delta\text{-kolo,} \quad (5.1.15)$$

$$\hat{\mathbf{E}}_T = \begin{bmatrix} \hat{U}_{ka}^\Delta \\ \hat{U}_{kb}^\Delta \\ \hat{U}_{kc}^\Delta \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{Z}}_T \begin{bmatrix} \hat{\mathcal{J}}_{ka}^\Delta \\ \hat{\mathcal{J}}_{kb}^\Delta \\ \hat{\mathcal{J}}_{kc}^\Delta \end{bmatrix} \text{ za aktivno } \Delta\text{-kolo.} \quad (5.1.16)$$

Relacije u domenu simetričnih komponenti, sa Thevenenovim ekvivalentom koga u domenu simetričnih komponenti čine $\hat{\mathbf{E}}_T^{\text{dio}}$ i $\hat{\mathbf{Z}}_T^{\text{dio}}$, mogu se napisati na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_k^{\Delta d} \\ \hat{U}_k^{\Delta i} \\ \hat{U}_k^{\Delta o} \end{bmatrix} = -\hat{\mathbf{Z}}_T^{\text{dio}} \begin{bmatrix} \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta d} \\ \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta i} \\ \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta o} \end{bmatrix} \text{ za pasivno } \Delta\text{-kolo,} \quad (5.1.17)$$

$$\hat{\mathbf{E}}_T^{\text{dio}} = \begin{bmatrix} \hat{U}_k^{\Delta d} \\ \hat{U}_k^{\Delta i} \\ \hat{U}_k^{\Delta o} \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{Z}}_T^{\text{dio}} \begin{bmatrix} \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta d} \\ \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta i} \\ \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta o} \end{bmatrix} \text{ za aktivno } \Delta\text{-kolo.} \quad (5.1.18)$$

Sada je sistem sa 9 linearnih jednačina u faznom domenu, odnosno 15 linearnih jednačina u domenu simetričnih komponenti potpun, i mogu se izračunati ključne nepoznate veličine – struje k -tog čvora u faznom ili u domenu simetričnih komponenti.

U primeru elektroenergetskog sistema velike dimenzije, postupak za određivanje Thevenenovog ekvivalenta mora se vršiti pomoću računara. U slučaju trofaznih, uravnoteženih prenosnih mreža, pasivno Δ -kolo sa $3n$ relacija, kojima se opisuje Δ -kolo u domenu simetričnih komponenti, može se napisati u impedantnoj formi:

$$\hat{\mathbf{U}}^{\Delta s} = -\hat{\mathbf{Y}}^{s-1} \hat{\mathbf{J}}^{\Delta s} = -\hat{\mathbf{Z}}^s \hat{\mathbf{J}}^{\Delta s}, \quad s = d, i, o. \quad (5.1.19)$$

Tri relacije koje odgovaraju k -tom čvoru upotpunjuju matematički model za proračun ključnih nepoznatih veličina:

$$\hat{U}_k^{\Delta s} = -\hat{\mathbf{Z}}_{kk}^s \hat{\mathcal{J}}_k^{\Delta s}, \quad s = d, i, o. \quad (5.1.20)$$

U tim relacijama $\hat{\mathbf{Z}}_{kk}^s$, $s = d, i, o$, predstavlja pogonsku Thevenenovu impedansu.

U slučaju miksovanih, neuravnoteženih distributivnih mreža, proračun Thevenenovog ekvivalenta se sastoji iz proračuna Thevenenove elektromotorne sile i impedanse. Thevenenova elektromotorna sila, u slučaju aktivnog Δ -kola, izračunava se na osnovu proračuna režima Δ -

kola u kome je uklonjena topologija kratkog spoja a zadržane su ekscerne struje svih DER tipa 3 i 4. Nakon proračuna režima takvog kola naponi čvora k na mestu kratkog spoja predstavljaju Tevenenove elektromotorne sile. Tevenenova matrica impedansi računa se na sličan način. Prvo se pasivizira Δ -kolo i iz njega ukloni topologija kratkog spoja. Nakon toga se u čvor k u jednu fazu injektira jedinična struja i izvrši se proračun režima takvog kola. Nakon proračuna režima takvog Δ -kola, naponi čvora k predstavljaju kolonu Tevenenove matrice impedansi koja odgovara fazi u koju je injektirana jedinična struja. Zatim se postupak ponovi za preostale faze sa injektiranom jediničnom strujom u ostalim fazama, nakon čega se popune kolone Tevenenove matrice impedansi koje odgovaraju fazama u koje je injektirana jedinična struja. Sa određenim Tevenenovim ekvivalentom i njegovim uvažavanjem u Δ -kolu, mogu se napisati relacije drugog Kirhofovog zakona za takvo Δ -kolo, koje upotpunjuju sistem linearnih jednačina za proračun ključnih nepoznatih veličina – struja k -tog čvora u faznom ili u domenu simetričnih komponenti. Sa tim strujama se može izračunati režim Δ -kola korišćenjem relacija kojima se opisuje Δ -kolo u faznom ili u domenu simetričnih komponenti.

5.2 PREGLED POSTUPAKA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

Proračun kratkih spojeva nakon četiri dekompozicije svodi se na proračun linearnog Δ -kola za sve tri vremenske sekvence u domenu simetričnih komponenti, ili u faznom domenu ukoliko se ne primeni četvrta dekompozicija. Stoga, postupci za proračun kratkih spojeva zasnovani su na formiranju matematičkih modela linearnih kola i primeni metoda i teorema koje su pogodne za proračun modela linearnih kola (metod nezavisnih napona, Tevenen/Nortonova teorema, metod konturnih struja itd.). Postupci za proračun kratkih spojeva razvijali su se vremenom u skladu sa razvojem elektroenergetskih mreža i upotrebom novih elemenata u mrežama. U skladu s tim definisale su se odgovarajuće procedure i standardi za proračun kratkih spojeva u kojima je preciznost bila zadovoljavajuća s obzirom na svrhu upotrebe proračuna. Tri najpopularnija standarda za proračun kratkih spojeva koji se i danas koriste su [133]: internacionalni IEC 60909-0 (International Electro-technical Commission), američki IEEE C37.010 (Institute for Electrical and Electronics Engineers) i standard Velike Britanije ER G7/4 (Engineering Recommendation). Proračuni kratkih spojeva u navedenim standardima svode se na “ručne” proračune, odnosno proračune koji mogu relativno jednostavno da se vrše bez upotrebe računara. U standardima su date preporuke za proračun maksimalnih i minimalnih struja kratkih spojeva. Za potrebe preciznih analiza neophodni su proračuni sa preciznim modelima elemenata mreže i uvažanim uticajem svih elemenata u mreži, što se može praktično vršiti upotrebom računara. Postupci koji se koriste u takvim proračunima mogu se podeliti na postupke zasnovane na čvorovima, postupke zasnovane na granama i postupke zasnovane na metodu konturnih struja. Postupci za proračun jednosmerne komponente struja kratkih spojeva uglavnom se odvojeno razmatraju od postupaka za proračun naizmjenične komponente, pa se postupci za proračun jednosmerne komponente mogu klasifikovati u zaseban skup. Izbor postupka koji će se koristiti zavisi od karakteristika mreža za koje će se koristiti. Podela mreža na prenosne i distributivne najčešće utiče na izbor postupka koji će se koristiti. Prenosne mreže su trofazne, uravnotežene, malih dimenzija i upetljane. Distributivne mreže karakteriše radijalna ili slaboupetljana topologija, veliki broj grana i neuravnoteženost elemenata koji nisu samo trofazni nego postoje i dvofazni i jednofazni.

Postupci zasnovani na čvorovima [75] zahtevaju matematički model mreže formiran primenom metoda nezavisnih napona. U takvim postupcima primenjuje se Gausova redukcija ili LU faktorizacija matrice admitansi za rešavanje sistema linearnih jednačina.

Reprezentativan postupak je kanonični model [7, 134] za proračun kratkih spojeva trofaznih, uravnoteženih prenosnih mreža.

Postupci zasnovani na granama [75] primenjuju se u radijalnim ili slaboupetljanim distributivnim mrežama u kojima su se pokazali kao najefikasniji. Model mreže u takvim postupcima zasnovan je na numeraciji grana i čvorova saglasno sa principom slojeva [13, 135]. Reprezentativan postupak je čišćenje unapred-unazad (backward-forward sweep, BFS) [12, 75] i hibridni kompenzacioni metod [136] koji uvažava petlje i koristi Tevenen/Nortonovu teoremu.

Postupak zasnovan na metodu konturnih struja [137] primenjuje se u radijalnim i slaboupetljanim distributivnim mrežama. Postupak je zasnovan na formiranju matrica kojima se povezuju injektirane struje čvorova i struje grana, kao i struje grana i naponi čvorova.

Postupak za proračun jednosmerne komponente struja kratkih spojeva zasnovan je na primeni Tevenenove teoreme [133].

5.2.1 IEC 60909

Postupak za proračun kratkih spojeva u ovom standardu izlaže se saglasno sa literaturom [20, 133]. IEC 60909 standard [133] nastao je 1988. godine na osnovu nemačkog standarda VDE 0102, koji je 2001. i 2016. godine dopunjen, i sa dopunama iz 2016. godine [20] koristi se i danas. Cilj je bio kreiranje standarda u kome će se preporučiti praktičan i koncizan postupak za „ručni“ proračun kratkih spojeva koji će imati konzervativne rezultate dovoljne i prihvatljive tačnosti. Najnovija dopuna standarda 2016. godine sadrži uticaj vetrogeneratora i konvertera na struje kratkih spojeva. Standard sadrži predloge za proračun maksimalnih i minimalnih struja kratkih spojeva, gde se mogu razlikovati struje za kratak spoj blizu i daleko od generatora, odnosno različite opadajuće envelope naizmenične komponente struje u ta dva slučaja. Postupak koji se predlaže u ovom standardu naziva se i EVS (equivalent voltage source) jer se zasniva na doprinosu svakog idealnog generatora, što se realizuje primenom principa dekompozicije-superpozicije. U matematičkom modelu mreže zanemaren je uticaj svih otočnih elemenata (potrošača, otočnih kondenzatora i prigušnica, otočnih parametara vodova i transformatora) osim DER. U proračunu režima nultog redosleda izolovanih mreža otočni elementi se ne zanemaruju. Principom dekompozicije-superpozicije kolo mreže se dekomponuje na onoliko kola koliko ima idealnih generatora. U svakom kolu se izračunava uticaj pojedinačnih idealnih generatora. Nakon proračuna vrši se superpozicija svih kola čime se dobija struja na mestu kratkog spoja. Postupak se koristi samo za proračun struja na mestu kratkog spoja, i to metalnih kratkih spojeva: jednofaznih, dvofaznih bez zemlje, dvofaznih sa zemljom, trofaznih bez zemlje i trofaznih sa zemljom.

Proračun se vrši u domenu simetričnih komponenti gde se napon idealnog naponskog generatora na mestu kratkog spoja množi koeficijentom c , čije su vrednosti prikazane u tabeli 5.3.1.1 za različite naponske nivoe. Idealni naponski generator je generator insertovan na mestu kratkog spoja u Δ -kolu, pri čemu se u standardu eksplicitno ne naglašava zasnovanost na Δ -kolu i insertovanom idealnom naponskom generatoru. Koeficijent c modeluje granične vrednosti struja na koje utiču: režim pre kratkog spoja, nenominalni odnosi transformacije idealnih transformatora i naponski generatori DER u subtranzitnoj vremenskoj sekvenci.

Pored koeficijenta c koriste se i drugi korekcionni koeficijenti kojima se postiže uvažavanje graničnih vrednosti parametara, odnosno proračun za najkritičnije stanje sistema. Za vodove golih provodnika i kablove potrebno je uvažiti promenu otpornosti sa promenom temperature (za nominalnu otpornost koristi se otpornost na temperaturi 20°C). Za transformatore koristi se korekcionni faktor K_T redne impedanse. Za sinhronne generatore

koriste se korekcionni faktori za slučaj bez (K_G) i sa blok-transformatorom (K_S, K_O). Asinhroni motori mogu se u većini slučajeva zanemariti. DER tipa 3 (DFIM) i DER tipa 4 modeluju se odgovarajućom impedansom i strujnim generatorom, respektivno.

Tabela 5.2.1.1 – Naponski faktor c prema standardu IEC 60909-0

Nominalni međufazni napon		Naponski faktor c	
		Maksimalne struje kratkih spojeva, c_{\max}	Minimalne struje kratkih spojeva, c_{\min}
Niski napon od 100 V do 1000 V	Gornja naponska granica +6%	1,05	0,95
	Gornja naponska granica +10%	1,1	0,95
Srednji i visoki napon od 1 kV do 550 kV		1,1	1

Korekcionni faktor za transformatore primenjuje se na dvonamotajne i tronamotajne trofazne transformatore. Ako se sa $\hat{Z}_T = R_T + jX_T$ označi redna impedansa (impedansa kratkog spoja) dvonamotajnog transformatora, izračunata koristeći nominalne podatke, korigovana impedansa za pozitivan, negativan i nulti redosled je:

$$\hat{Z}_{TK} = K_T \hat{Z}_T, \quad (5.2.1.1)$$

$$K_T = 0,95 \times \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T}, \quad (5.2.1.2)$$

gde je x_T nominalna reaktansa transformatora u relativnim jedinicama.

U slučaju tronamotajnih transformatora sve nominalne impedanse se množe korekcionnim faktorom, na primer za impedansu između namotaja 1 i 2 \hat{Z}_{TK12} korekcionni faktor je:

$$K_{T12} = 0,95 \times \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T12}}. \quad (5.2.1.3)$$

Korekcionni faktor za sinhronne generatore direktno priključene na mrežu primenjuje se na impedansu u subtranzitnoj sekvenci direktnog, inverznog i nultog redosleda. Ako se sa $\hat{Z}_G = R_G + jX_{dG}''$ označi subtranzitna impedansa generatora u direktnom redosledu, korigovana impedansa za direktan redosled je:

$$\hat{Z}_{GK} = K_G \hat{Z}_G, \quad (5.2.1.4)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \times \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}, \quad (5.2.1.5)$$

gde su:

U_n – nominalni napon sistema gde je priključen generator,

U_{rG} – nominalni fazni napon generatora,

x_d'' – subtranzitna reaktansa direktnog redosleda u relativnim jedinicama,

φ_{rG} – ugao između nominalnog faznog napona i nominalne struje generatora.

Korekcionni faktor za sinhronne generatore priključene na mrežu preko blok-transformatora primenjuje se u dva slučaja: kada blok-transformator ima i nema mogućnost regulacije napona pod opterećenjem.

U slučaju kada blok-transformator ima mogućnost regulacije napona pod opterećenjem, impedansa generatora \hat{Z}_G i blok-transformatora \hat{Z}_{THV} (izračunata na višenaponskoj strani) nakon korekcije faktorom K_S u direktnom, inverznom i nultom redosledu je:

$$\hat{Z}_S = K_S \left[\frac{U_{rTHV}^2}{U_{rTLV}^2} \hat{Z}_G + \hat{Z}_{THV} \right], \quad (5.2.1.6)$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{\max}}{1 + (x_d'' - x_T) \sin \varphi_{rG}}, \quad (5.2.1.7)$$

gde su:

U_{nQ} – nominalni napon sistema gde su priključeni generator i blok-transformator,

U_{rG} – nominalni fazni napon generatora,

U_{rTLV} i U_{rTHV} – nominalni naponi niženaponske i višenaponske strane blok-transformatora,

x_d'' – subtranzitna reaktansa generatora direktnog redosleda u relativnim jedinicama,

x_T – nominalna reaktansa blok-transformatora u relativnim jedinicama sa nominalnom pozicijom regulacionog menjača,

φ_{rG} – ugao između nominalnog faznog napona i nominalne struje generatora.

U slučaju kada blok-transformator nema mogućnost regulacije napona pod opterećenjem, impedansa generatora \hat{Z}_G i blok-transformatora \hat{Z}_{THV} (izračunata na višenaponskoj strani) nakon korekcije faktorom K_{SO} u direktnom, inverznom i nultom redosledu je:

$$\hat{Z}_{SO} = K_{SO} [t_r^2 \hat{Z}_G + \hat{Z}_{THV}], \quad (5.2.1.8)$$

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \times \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \times (1 \pm p_T) \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}, \quad (5.2.1.9)$$

gde su:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \text{ – odnos transformacije blok-transformatora,}$$

p_G – faktor korekcije nominalnog napona generatora ukoliko se napon na priključku generatora razlikuje od nominalnog napona generatora,

p_T – korekcionni faktor odnosa transformacije blok-transformatora kada pozicija regulacionog menjača nije na nominalnoj poziciji (na nominalnoj poziciji $p_T = 0$).

Asinhroni motori na niskom naponu mogu se uvažiti kao jedan ekvivalentan motor čija je struja jednaka sumi struja svih asinhronih motora u subtranzitnoj sekvenci. Ukoliko je suma struja niskonaponskih asinhronih motora, direktno povezanih na mrežu, manja od 1% struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja, uticaj asinhronih motora se može zanemariti. Motori većih snaga priključeni na mrežu srednjeg napona (u retkim slučajevima na mrežu niskog napona) modeluju se impedansom:

$$\hat{Z}_M = R_M + jX_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}, \quad (5.2.1.10)$$

gde su:

I_{LR} – struja sa zakočenim rotorom, odnosno struja kratkog spoja motora,

I_{rM} – nominalna struja motora,

U_{rM} – nominalni napon motora,

S_{rM} – nominalna snaga motora.

DER tipa 3, odnosno DFIM, može se modelovati idealnim strujnim generatorom kontrolisane struje, prvenstveno reaktivne komponente struje. U tom slučaju nema dodatne korekcije struje. DER tipa 3 može se modelovati i impedansom kao klasičan asinhroni motor. Korekcionni faktor impedanse DER tipa 3 primenjuje se na impedansu u svim sekvencama direktnog redosleda. U tom slučaju DER tipa 3 se posmatra zajedno sa blok-transformatorom, pa je njihova zajednička impedansa jednaka:

$$\hat{Z}_{WD} = \frac{U_{rTHV}}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{2}K_{WD}}{i_{WDmax}}, \quad (5.2.1.11)$$

gde su:

U_{rTHV} – nominalni napon višenaponske strane blok-transformatora,

K_{WD} – faktor maksimalne struje kratkog spoja višenaponske strane koji daje proizvođač,

i_{WDmax} – najveća vrednost struje kratkog spoja za trofazni kratak spoj na višenaponskoj strani.

Faktor K_{WD} zavisi od zaštite DER, tako da može sadržati otpornosti kroubara ili čopera. Ukoliko je nepoznata vrednost faktora K_{WD} , može se koristiti vrednost 1,7. Impedansa inverznog redosleda može biti data od proizvođača ili može biti određena na osnovu kontrolne strategije koja se primenjuje. Impedansa nultog redosleda zavisi od povezanosti namotaja blok-transformatora.

DER tipa 4, odnosno DER povezan na mrežu preko uređaja energetske elektronike, modeluje se u režimu sa kratkim spojem idealnim strujnim generatorom u direktnom redosledu čija je struja određena uputstvima proizvođača. U inverznom redosledu modeluje se impedansom čija je vrednost određena na osnovu kontrolne strategije upravljanja. U nultom redosledu postoji prekid nulte komponente struje.

Proračun struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja I_k'' svodi se na proračun dve komponente struje $I_{k(1)}''$ i $I_{k(2)}''$. Komponenta $I_{k(1)}''$ sadrži uticaj sinhronih i asinhronih mašina, a komponenta $I_{k(2)}''$ uticaj strujnih generatora DER tipa 3 i 4.

5.2.2 ER G7/4

Postupak za proračun kratkih spojeva u ovom standardu izlaže se saglasno sa literaturom [133]. ER G7/4 standard postavljen je u Velikoj Britaniji 1992. godine na osnovu IEC 60909 standarda. ER G7/4 standard sadrži postupke za proračun kratkih spojeva koji su pogodni za primenu u industriji. Posebna pažnja je posvećena primeni postupaka za proračun struja kratkih spojeva koje bi se koristile za procenu kapaciteta prekidača na nominalnim naponima od 0,38 kV do 400 kV. Standard se primenjuje i za proračune struja koje se koriste za podešenje relejne zaštite, kao i za proračun mehaničkih opterećenja sabirnica i provodnika.

Sinhronne mašine modeluju se idealnim naponskim generatorom i reaktansom kratkog spoja za sve tri vremenske sekvence (subtranzitnu, tranzitnu i ustaljenu). Reaktansa direktnog redosleda $X_G(t)$ menja se u vremenu i može se predstaviti na sledeći način:

$$\frac{1}{X_G(t)} = \frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''}, \quad (5.2.2.1)$$

gde su:

X_d'' , X_d' i X_d – reaktanse subtranzitne, tranzitne i ustaljene vremenske sekvence za direktan redosled,

T_d'' i T_d' – vremenske konstante subtranzitne i tranzitne vremenske sekvence.

Reaktanse generatora povezanih preko transformatora na mrežu smatraju se da nisu ušle u saturaciju, dok kod generatora povezanih direktno na mrežu smatra se da su reaktanse ušle u saturaciju i koriste se vrednosti takvih reaktansi.

Asinhroni motori modeluju se idealnim naponskim generatorom i reaktansom u subtranzitnoj sekvenci. Reaktansa direktnog redosleda $X_M(t)$ menja se u vremenu i može se predstaviti na sledeći način:

$$\frac{1}{X_M(t)} = \frac{1}{X'} e^{-t/T'}, \quad (5.2.2.2)$$

gde su:

X' – subtranzitna reaktansa, izračunata na osnovu podataka o asinhronom motoru,

T' – subtranzitna vremenska konstanta, izračunata na osnovu podataka o asinhronom motoru.

Ukoliko u mreži postoje motori malih snaga, oni se mogu predstaviti u režimu sa kratkim spojem kao jedan ekvivalentni motor sa podacima dobijenim merenjem zajedničkog odziva svih malih motora.

Pasivni potrošači predstavljaju se impedansama jer njihov uticaj na pozicije regulacionih menjača i napona ne može da se zanemari.

Proračun kratkih spojeva primenom ER G7/4 standarda vrši se pomoću računara i rezultati su precizniji od rezultata koje daje IEC 60909 standard. Proračun primenom ER G7/4 standarda zasniva se na principu dekompozicije-superpozicije. Režim pre kratkog spoja (naponski profil, naponi generatora i motora i pozicije regulacionih menjača) izračunava se proračunom tokova snaga. Režim pre kratkog spoja superponira se sa režimom promene struje zbog kvara, što predstavlja superpoziciju sa režimom Δ -kola iako to nije eksplicitno naglašeno. U slučajevima kada je potrebno izračunati maksimalne vrednosti struja kratkih

spojeva ne vrši se proračun tokova snaga nego se za napon pre kratkog spoja uzima izabran napon koji daje maksimalne struje. Postupak za proračun naizmjenične i jednosmerne komponente struje kratkog spoja nije specificiran. Mogu se koristiti postupci po želji koji su zasnovani na proračunima po diskretnim vremenskim trenucima. Za jednosmernu komponentu koristi se granični slučaj kada je maksimalna vrednost struje, jer jednosmerna komponenta struje zavisi od napona u trenutku u kome se desio kratak spoj.

5.2.3 IEEE C37.010

Postupak za proračun kratkih spojeva u ovom standardu izlaže se saglasno sa literaturom [133, 138]. IEEE C37.010 standard postavljen je 1979. godine na osnovu ANSI (American National Standard Institute) standarda 1964. godine. Revizija IEEE C37.010 standarda je izvršena 1999. i 2016. godine, i današnja verzija se primenjuje za visoke napone (iznad 1kV). Metodologija za proračun struja kratkih spojeva prvenstveno je namenjena za dimenzionisanje i izbor prekidača. Za vrednost jednosmerne komponente struje uzima se maksimalna vrednost. Standard generalno predlaže proračun maksimalnih struja kratkih spojeva koje zavise od udaljenosti generatora od mesta kratkog spoja.

Uticao generatora na struje kratkih spojeva zavisi od toga da li se generator nalazi blizu (lokalno) ili daleko (udaljen) od mesta kratkog spoja. Granica između generatora koji imaju lokalni i udaljeni uticaj određuje se na osnovu reaktanse između priključaka generatora i mesta kratkog spoja X_{External} i reaktanse generatora u subtranzitnoj sekvenci X_d'' . Ukoliko je $X_{\text{External}} > 1,5X_d''$ smatra se da generator ima udaljeni uticaj, u suprotnom ima lokalni uticaj na struje kratkih spojeva. Impedanse inverznog redosleda tretiraju se kao impedanse direktnog. Korekcionni faktori impedansi sinhronih i asinhronih mašina preporučeni su u standardu i prikazani su u tabeli 5.3.3.1.

Potrošači i otočni parametri vodova se zanemaruju.

Postupak za proračun kratkih spojeva vrši se na linearnom kolu. Uticaj režima pre kratkog spoja sinhronih i asinhronih generatora se ne uzima u obzir. Za proračun maksimalnih struja kratkih spojeva koristi se moduo napona na mestu kratkog spoja čija je vrednost najveća moguća. Maksimalnom vrednošću modula napona uvažava se granični uticaj režima pre kratkog spoja, odnosno režim pre kratkog spoja u kome je maksimalan napon na mestu kratkog spoja pre kratkog spoja. U standardu se preporučuje i odvojen tretman rezistanse i reaktanse, koji unosi prihvatljivu grešku koja daje konzervativnije vrednosti struja kratkih spojeva.

Metod za proračun kratkih spojeva naziva se E/X metod, koji može biti pojednostavljen ili sa korekcijom naizmjenične i jednosmerne komponente struje.

Kod pojednostavljenog E/X metoda sa E se označava napon na mestu kratkog spoja pre kratkog spoja, a sa X se označava ekvivalentna reaktansa viđena od mesta kratkog spoja, pri čemu se postavljaju na nulu reaktanse svih elemenata osim subtranzitnih reaktansi sinhronih i asinhronih generatora.

Metod E/X sa korekcijom naizmjenične i jednosmerne komponente struje je nešto precizniji od pojednostavljenog E/X metoda. Kod njega se koriste faktori korekcije subtranzitnih reaktansi sinhronih i asinhronih generatora. Izbor korekcionog faktora zavisi od toga da li generator ima lokalni ili udaljeni uticaj i koliki je odnos reaktanse i rezistanse X/R viđene od mesta kratkog spoja prema ostatku kola. Korekcionim faktorom K_{acdc} koriguju se reaktanse za naizmjeničnu i jednosmernu komponentu struje kratkog spoja, i to samo generatora koji imaju lokalni uticaj na struje jednofaznih i trofaznih kratkih spojeva. Kod

trofaznih kratkih spojeva reaktanse za naizmeničnu komponentu imaju maksimalan korekcionni faktor $K_{acdc} = 1,25$, a kod jednofaznih kratkih spojeva maksimalan korekcionni faktor ima vrednost $K_{acdc} = 1,41$. Kod jednofaznih i trofaznih kratkih spojeva reaktanse generatora, koji imaju udaljeni uticaj, za jednosmernu komponentu imaju korekcionni faktor K_{dc} .

Tabela 5.2.3.1 – Korekcionni faktor naizmenične komponente struje kratkog spoja prema standardu IEEE C37.010

Tip rotacione mašine	Reaktansa direktnog redosleda	
	Mreže sa prekidačima koji se privremeno zatvaraju	Mreže sa prekidačima koji se trajno zatvaraju
Svi turbogeneratori i hidrogeneratori sa prigušnim namotajem i svim kondenzatorima	$1X_d''$	$1X_d''$
Hidrogeneratori bez prigušnog namotaja	$0,75X_d'$	$0,75X_d'$
Svi sinhroni motori	$1X_d''$	$1,5X_d''$
Preko 1000 KS i do 1800 obrtaja/min	$1X_d''$	$1,5X_d''$
Asinhroni motori		
Preko 250 KS i na 3600 obrtaja/min	$1X_d''$	$1,5X_d''$
Od 50 KS do 1000 KS i do 1800 obrtaja/min	$1,2X_d''$	$3X_d''$
Od 50 KS do 250 KS i na 3600 obrtaja/min	$1,2X_d''$	$3X_d''$

U standardu se predlaže i primena preciznijeg, interpoliranog faktora $K_{Interpolated} = K_{acdc} + NACD(K_{dc} - K_{acdc})$, gde je *NACD* (no ac decrement) odnos struja udaljenih generatora i ukupne struje kratkog spoja.

5.2.4 Kanonični model

Ovaj postupak za proračun kratkih spojeva izlaže se saglasno sa literaturom [7, 134]. Kanonični model predstavlja postupak orijentisan na čvorove koji se primenjuje za proračun kratkih spojeva i prekida faza trofaznih, prenosnih mreža. U postupku je potrebno formirati matricu admitansi prenosne mreže, tako da se postupak ubraja u matrice postupke. Postupak je zasnovan na principu dekompozicije-superpozicije. U disertaciji će biti izostavljen postupak za proračun prekida faza jer nije od interesa. Režim kola sa kratkim spojem dekomponuje se na režim kola pre kratkog spoja i režim Δ -kola. Smatra se da je režim kola

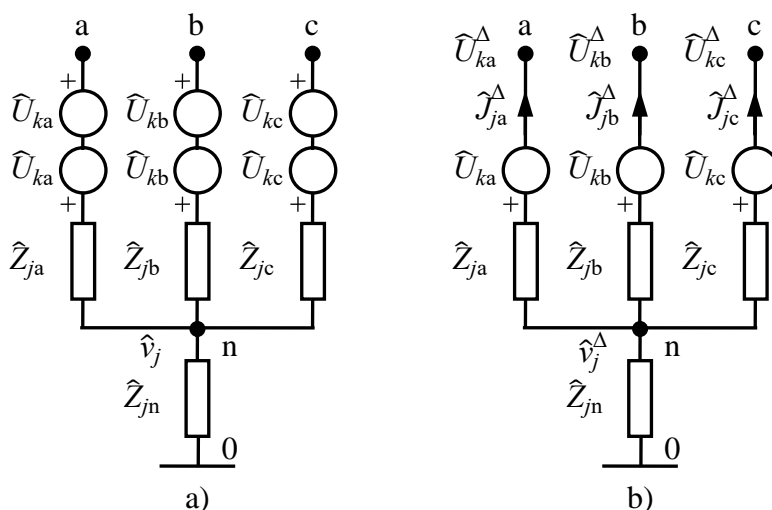
pre kratkog spoja poznat. Matematički model i proračun režima Δ -kola prikazani su u nastavku.

Topologija kratkog spoja opisana je trofaznim modulima kratkog spoja M_j , koji predstavljaju skupove sledećih elemenata:

$$M_j = \{(\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}), \hat{Z}_{jn}, (\hat{U}_{ka} - \hat{U}_{ka}), (\hat{U}_{kb} - \hat{U}_{kb}), (\hat{U}_{kc} - \hat{U}_{kc})\}. \quad (5.2.4.1)$$

Modul M_j , prikazan na slici 5.3.4.1 pod a) gde je j indeks modula, sastoji se od:

1. pet čvorova (faznih čvorova a, b, c i n i čvora referentnog potencijala 0),
2. četiri impedanse (tri impedanse u fazama $\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}$, i jedne impedanse prema čvoru referentnog potencijala \hat{Z}_{jn}),
3. tri idealna naponska generatora ($\hat{U}_{ka}, \hat{U}_{kb}, \hat{U}_{kc}$ čije su vrednosti jednake naponima čvora k pre kratkog spoja na mestu kratkog spoja).



Slika 5.2.4.1 – Trofazni modul kratkog spoja a) i njegovo Δ -kolo b)

Kratak spoj može se opisati sa $N1$ trofaznih modula $M_j, j = 1, \dots, N1$. Dekompozicijom trofaznog modula M_j dobija se osnovni trofazni modul kratkog spoja M_j^{pk} i Δ -kolo trofaznog modula M_j^Δ . Na slici 5.3.4.1 pod b) prikazano je Δ -kolo trofaznog modula. Nakon dekompozicije trofazni moduli predstavljaju sledeće skupove:

$$M_j^{\text{pk}} = \{(\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}), \hat{Z}_{jn}, (\hat{U}_{ka}), (\hat{U}_{kb}), (\hat{U}_{kc})\}, \quad (5.2.4.2)$$

$$M_j^\Delta = \{(\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}), \hat{Z}_{jn}, (-\hat{U}_{ka}), (-\hat{U}_{kb}), (-\hat{U}_{kc})\}. \quad (5.2.4.3)$$

Režim Δ -kola trofaznog modula M_j^Δ može se opisati naponima i strujama:

$$\hat{\mathbf{U}}_k^\Delta = [\hat{U}_{ka}^\Delta, \hat{U}_{kb}^\Delta, \hat{U}_{kc}^\Delta], \hat{\mathbf{v}}_j^\Delta, \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta = [\hat{J}_{ja}^\Delta, \hat{J}_{jb}^\Delta, \hat{J}_{jc}^\Delta], \quad (5.2.4.4)$$

gde su:

$\hat{\mathbf{U}}_k^\Delta, \hat{\mathbf{v}}_j^\Delta$ – naponi modula j povezanog u čvor k gde se simulira kratak spoj,

$\hat{\mathbf{J}}_j^\Delta$ – struje modula j povezanog u čvor k gde se simulira kratak spoj.

Trofazni moduli asociraju se čvorovima prenosne mreže pomoću matrice incidencije **T1**. Matrica incidencije za trofaznu prenosnu mrežu sa N trofaznih čvorova i $N1$ trofaznih modula ima dimenziju $3N \times 3N1$. Matrica incidencije sastoji se od jediničnih **I** i nultih **0** submatrica dimenzije 3×3 . Submatrice matrice incidencije popunjavaju se inspekcijom na sledeći način:

$$\mathbf{T1}_{kj} = \begin{cases} \mathbf{I} & \text{– kada je trofazni modul } M_j \text{ asociran čvoru označenom brojem } k, \\ \mathbf{0} & \text{– kada trofazni modul } M_j \text{ nije asociran čvoru označenom brojem } k, \\ & k = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, N1. \end{cases}$$

Svakom čvoru pogođenom kratkim spojem pridružen je jedan trofazni modul. U svrhu generalnog opisa uslova kvara, jednom čvoru može biti pridruženo više od jednog trofaznog modula. Na ovaj način omogućeno je modelovanje simultanih kratkih spojeva u prenosnoj mreži.

S obzirom na to da injektirane struje u Δ -kolu postoje samo u čvorovima pogođenim kratkim spojem, odnosno čvorovima kojima su asocirani trofazni moduli, koristeći matricu incidencije **T1** vektor injektiranih struja Δ -kola je:

$$\hat{\mathbf{J}}^\Delta = \mathbf{T1} \hat{\mathbf{J}}^\Delta, \quad (5.2.4.5)$$

gde je $\hat{\mathbf{J}}^\Delta$ vektor dimenzije $3N1 \times 1$ koji sadrži sve struje svih trofaznih modula.

Matematički model Δ -kola opisan primenom metoda nezavisnih napona na Δ -kolo razmatranog sistema sa N trofaznih čvorova je:

$$\hat{\mathbf{Y}} \hat{\mathbf{U}}^\Delta = \hat{\mathbf{J}}^\Delta, \quad (5.2.4.6)$$

gde su:

$\hat{\mathbf{Y}}$ – matrica admitansi dimenzije $3N \times 3N$,

$\hat{\mathbf{U}}^\Delta$ – vektor napona čvorova Δ -kola dimenzije $3N \times 1$.

Korišćenjem matrice incidencije **T1** matematički model Δ -kola može se napisati u sledećoj formi:

$$\hat{\mathbf{Y}} \hat{\mathbf{U}}^\Delta = \mathbf{T1} \hat{\mathbf{J}}^\Delta. \quad (5.2.4.7)$$

Da bi se u matematičkom modelu Δ -kola uvažili matematički modeli Δ -kola trofaznih modula, potrebno je Δ -kolo trofaznog modula M_j^Δ matematički opisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_j^U \hat{\mathbf{U}}_k^\Delta + \hat{\mathbf{A}}_j^J \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta + \mathbf{A}_j^V \hat{\mathbf{v}}_j^\Delta &= \hat{\mathbf{A}}_j^0, \\ \hat{\mathbf{C}}_j^J \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta + \mathbf{C}_j^V \hat{\mathbf{v}}_j^\Delta &= 0, \\ j &= 1, \dots, N1, \end{aligned} \quad (5.2.4.8)$$

gde se parametri određuju inspekcijom na sledeći način (CN je skup kompleksnih veličina čiji su moduli konačni brojevi):

$$[\mathbf{A}_j^U]_{3 \times 3} = \text{diag}[A_{ja}^U, A_{jb}^U, A_{jc}^U], \quad A_{ji}^U = \begin{cases} 0, & \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ 1, & \hat{Z}_{ji} \in \text{CN} \end{cases}, \quad i = a, b, c, \quad (5.2.4.9)$$

$$[\hat{\mathbf{A}}_j^J]_{3 \times 3} = \text{diag}[\hat{A}_{ja}^J, \hat{A}_{jb}^J, \hat{A}_{jc}^J], \quad \hat{A}_{ji}^J = \begin{cases} 1, & \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ \hat{Z}_{ji}, & \hat{Z}_{ji} \in \text{CN} \end{cases}, \quad i = a, b, c, \quad (5.2.4.10)$$

$$[\mathbf{A}_j^V]_{3 \times 1} = \text{diag}[A_{ja}^V, A_{jb}^V, A_{jc}^V], \quad A_{ji}^V = \begin{cases} 0, & \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ -1, & \hat{Z}_{ji} \in \text{CN} \end{cases}, \quad i = a, b, c, \quad (5.2.4.11)$$

$$[\hat{\mathbf{A}}_j^0]_{3 \times 1} = \text{diag}[\hat{A}_{ja}^0, \hat{A}_{jb}^0, \hat{A}_{jc}^0], \quad A_{ji}^0 = \begin{cases} 0, & \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ -\hat{U}_{ki}, & \hat{Z}_{ji} \in \text{CN} \end{cases}, \quad i = a, b, c, \quad (5.2.4.12)$$

$$[\hat{\mathbf{C}}_j^J]_{1 \times 3} = \text{diag}[\hat{C}_{ja}^J, \hat{C}_{jb}^J, \hat{C}_{jc}^J], \quad \hat{C}_{ji}^J = \begin{cases} 1, & \hat{Z}_{jn} \rightarrow \infty \\ \hat{Z}_{jn}, & \hat{Z}_{jn} \in \text{CN} \end{cases}, \quad i = a, b, c, \quad (5.2.4.13)$$

$$C_j^V = \begin{cases} 0, & \hat{Z}_{jn} \rightarrow \infty \\ 1, & \hat{Z}_{jn} \in \text{CN} \end{cases}, \quad i = a, b, c. \quad (5.2.4.14)$$

Sada se u matematički model Δ -kola prenosne mreže mogu uvrstiti i Δ -kola trofaznih modula, čime se dobija konačan matematički model Δ -kola prenosne mreže sa kratkim spojem, odnosno kanonični model:

$$\begin{matrix} 3N & 3N1 & N1 & 1 & & 1 \\ 3N & \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Y}} & \mathbf{T}\mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}^U & \hat{\mathbf{A}}^J & \mathbf{A}^V \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{C}}^J & \mathbf{C}^V \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{J}\mathbf{1}^\Delta \\ \hat{\mathbf{v}}^\Delta \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{A}}^0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \end{matrix} \quad (5.2.4.15)$$

koji se može napisati u kompaktnijem obliku:

$$\hat{\mathbf{F}}_{(3N+4N1) \times (3N+4N1)} \hat{\mathbf{X}}_{(3N+4N1) \times 1}^\Delta = \hat{\mathbf{F}}_{(3N+4N1) \times 1}^0 \quad (5.2.4.16)$$

Kanonični model, koji čini skup linearnih jednačina, može se rešiti primenom metoda za rešavanje linearnih jednačina kao što je Gausova redukcija ili metod sa primenom faktorizacije matrice $\hat{\mathbf{F}}$. Rešenje sistema linearnih jednačina $\hat{\mathbf{X}}^\Delta$ sadrži napone svih čvorova kojima se opisuje režim Δ -kola.

5.2.5 Hibridni kompenzacioni metod

Ovaj postupak za proračun kratkih spojeva izlaže se saglasno sa literaturom [136]. Hibridni kompenzacioni metod predstavlja postupak orijentisan na grane koji se primenjuje za proračun kratkih spojeva trofaznih, distributivnih mreža koje mogu biti radijalne ili slaboupetljane. U postupku je potrebno čvorove i grane distributivne mreže numerisati saglasno sa principom slojeva [13, 135]. Proračun režima sa kratkim spojem vrši se u faznom domenu s obzirom na to da je postupak razvijen za proračun neuravnoteženih distributivnih mreža. Smatra se da je režim pre kratkog spoja poznat. Na osnovu tog režima poznati su naponi na mestu kratkog spoja i naponi na generatorima koji održavaju moduo napona na

mestu gde su priključeni (PV generatori). Sa poznatim navedenim naponima, proračun režima sa kratkim spojem vrši se iterativno.

U ovom postupku distributivna mreža se radijalizuje uvođenjem prekida petlji. Prekid petlje modeluje se tako što se izabere čvor u petlji (napajan sa dve grane) koji se podeli na dva čvora. Jedan čvor je originalan i napajan je jednom granom petlje, a drugi čvor je novogenerisan i napajan je drugom granom petlje. Insertovanjem kompenzacionih struja između originalnog i novogenerisanog čvora dobija se model prekida petlje. Vektor kompenzacionih struja prekida petlji $\hat{\mathbf{J}}_b$ računa se na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{J}}_b = \hat{\mathbf{Z}}_b^{-1} \hat{\mathbf{V}}_b, \quad (5.2.5.1)$$

gde su:

$\hat{\mathbf{Z}}_b$ – Tevenenova matrica petlji, koja predstavlja impedanse viđene iz originalnih i novogenerisanih čvorova prekida petlji,

$\hat{\mathbf{V}}_b$ – vektor razlika napona originalnih i novogenerisanih čvorova prekida petlji.

Vektor $\hat{\mathbf{V}}_b$ nije poznat i potrebno ga je izračunati u svakoj iteraciji proračuna režima sa kratkim spojem. U svakoj pojedinačnoj iteraciji proračuna vektora $\hat{\mathbf{V}}_b$ potrebno je izvršiti još jedan „unutrašnji“ iterativni postupak za proračun režima distributivne mreže u kome se u svakoj iteraciji izračunavaju nove aproksimacije kompenzacionih struja $\hat{\mathbf{J}}_b$. Te kompenzacione struje koriste se u narednoj iteraciji proračuna režima sa kratkim spojem. Postupak proračuna režima vrši se primenom postupka sumiranja struja i korekcija napona za radijalizovane distributivne mreže.

Pored kompenzacionih struja petlji potrebno je izračunati kompenzacione struje PV generatora u distributivnoj mreži sa kratkim spojem. Vektor kompenzacionih struja PV generatora $\hat{\mathbf{J}}_g$ računa se na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{J}}_g = \hat{\mathbf{Z}}_g^{-1} \hat{\mathbf{V}}_g, \quad (5.2.5.2)$$

gde su:

$\hat{\mathbf{Z}}_g$ – Tevenenova matrica PV generatora, koja predstavlja impedanse viđene iz čvorova gde su priključeni PV generatori,

$\hat{\mathbf{V}}_g$ – poznat vektor napona PV generatora koji ima fiksnu vrednost.

S obzirom na to da vektor $\hat{\mathbf{V}}_g$ ima istu vrednost u iterativnom postupku za proračun režima sa kratkim spojem, proračun kompenzacionih struja PV generatora je neiterativan.

Vektor struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja $\hat{\mathbf{J}}_f$ računa se na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{J}}_f = \hat{\mathbf{Z}}_f^{-1} \hat{\mathbf{V}}_f, \quad (5.2.5.3)$$

gde su:

$\hat{\mathbf{Z}}_f$ – Tevenenova matrica kratkog spoja, koja predstavlja impedanse viđene iz čvora u kome se simulira kratak spoj,

$\hat{\mathbf{V}}_f$ – vektor napona čvorova sa kratkim spojem koji se izračunava na osnovu uslova kvara.

Tevenenova matrica kratkog spoja i vektor napona čvorova sa kratkim spojem mogu da uključe jedan ili više simuliranih kratkih spojeva. Uslovi kvara u [136] predstavljeni su za trofazni kratak spoj sa zemljom, jednofazni kratak spoj, dvofazni kratak spoj sa i bez zemlje.

Tri navedena postupka za proračun kompenzacionih struja petlji, PV generatora i struja na mestu kratkog spoja mogu se integrisati u jedan postupak. Pri tome potrebno je uvesti hibridnu Tevenenovu matricu $\hat{\mathbf{Z}}_t$ koja sadrži Tevenenovu matricu petlji $\hat{\mathbf{Z}}_b$, PV generatora $\hat{\mathbf{Z}}_g$ i kratkog spoja $\hat{\mathbf{Z}}_f$. Hibridna Tevenenova matrica ima sledeći oblik:

$$\hat{\mathbf{Z}}_t = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_b & \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_{bf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_g & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bf} & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} & \hat{\mathbf{Z}}_f \end{bmatrix}, \quad (5.2.5.4)$$

gde submatrice $\hat{\mathbf{Z}}_{bg}$, $\hat{\mathbf{Z}}_{bf}$ i $\hat{\mathbf{Z}}_{gf}$ sadrže impedanse zajedničkih elemenata na putanji od čvorova od interesa. Matrica $\hat{\mathbf{Z}}_{bg}$ sadrži sumu impedansi na zajedničkoj putanji od prekida petlje i od PV generatora do korena distributivne mreže. Matrica $\hat{\mathbf{Z}}_{bf}$ sadrži sumu impedansi na zajedničkoj putanji od prekida petlje i od mesta kratkog spoja. Matrica $\hat{\mathbf{Z}}_{gf}$ sadrži sumu impedansi na zajedničkoj putanji od PV generatora i od mesta kratkog spoja. Prilikom popunjavanja hibridne Tevenenove matrice, odnosno sabiranja impedansi, zanemaruju se otočni parametri elemenata (grane sa otočnim admitansama u kolu vodova i grana magnećenja u kolu transformatora).

Integracijom Tevenenovih matrica, injektiranih struja i napona, dobija se skup linearnih jednačina za proračun kompenzacionih struja:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_b & \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_{bf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_g & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bf} & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} & \hat{\mathbf{Z}}_f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{V}}_b \\ \hat{\mathbf{V}}_g \\ \hat{\mathbf{V}}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{J}}_b \\ \hat{\mathbf{J}}_g \\ \hat{\mathbf{J}}_f \end{bmatrix}, \quad (5.2.5.5)$$

ili u sažetom obliku:

$$\hat{\mathbf{Z}}_t^{-1} \hat{\mathbf{V}}_t = \hat{\mathbf{J}}_t. \quad (5.2.5.6)$$

Nakon proračuna kompenzacionih struja $\hat{\mathbf{J}}_t$, potrebno ih je injektirati u odgovarajuće čvorove i iterativnim postupkom sumiranja struja i korekcija napona izračunati režimske veličine.

5.2.6 Postupak zasnovan na metodu konturnih struja

Ovaj postupak za proračun kratkih spojeva izlaže se saglasno sa literaturom [137]. Postupak zasnovan na metodu konturnih struja predstavlja postupak orijentisan na grane koji se primenjuje za proračun kratkih spojeva trofaznih, distributivnih mreža koje mogu biti radijalne ili slaboupetljane. U postupku je potrebno čvorove i grane distributivne mreže numerisati saglasno sa principom slojeva [13, 135]. Postupak se zasniva na formiranju matrica koje povezuju struje čvorova sa strujama grana **BIBC**, i struje grana sa naponima čvorova **BCBV**. U [137] zanemareni su otočni parametri elemenata. U nastavku će biti opisan postupak za trofazne, radijalne, distributivne mreže.

Vektor struja grana $\hat{\mathbf{I}}_{br}$ može se na sledeći način povezati sa vektorom struja čvorova $\hat{\mathbf{I}}$:

$$\hat{\mathbf{I}}_{br} = \mathbf{BIBC} \times \hat{\mathbf{I}}. \quad (5.2.6.1)$$

Ukoliko distributivna mreža ima m trofaznih grana, n trofaznih čvorova i jedan čvor referentnog potencijala 0, dimenzija matrice **BIBC** je $3m \times 3m$. Elementi matrice **BIBC** su jedinice i nule i matrica ima gornju trougaonu formu. Matrica **BIBC** popunjava se na sledeći način:

1. Inicijalizovati matricu dimenzije $3m \times 3m$ nulnim vrednostima;
2. Neka se sekcija numerisana brojem k nalazi između čvorova numerisanih brojevima i i j . Nenulte elemente kolona od $3i-2$ do $3i$ matrice **BIBC** (kolone koje odgovaraju čvoru i) potrebno je prepisati u kolone od $3j-2$ do $3j$ matrice **BIBC** (kolone koje odgovaraju čvoru j), respektivno. Nakon toga submatrici dimenzije 3×3 matrice **BIBC**, čije vrste i kolone odgovaraju vrstama od $3k-2$ do $3k$ (vrste koje odgovaraju grani k) i kolonama od $3j-2$ do $3j$ matrice **BIBC**, respektivno, potrebno je uneti na dijagonalne elemente jedinične vrednosti. Ovaj postupak vršiti krećući se od korena distributivne mreže ka najudaljenijim sekcijama;
3. Ponavljati postupak pod tačkom 2 dok se ne iscrpe sve sekcije distributivne mreže.

Vektor faznih napona čvorova distributivne mreže $\hat{\mathbf{V}}$ može se na sledeći način povezati sa vektorom struja grana $\hat{\mathbf{I}}_{br}$, pri čemu je uvažen vektor faznih napona čvorova mreže u praznom hodu $\hat{\mathbf{V}}_0$:

$$\hat{\mathbf{V}}_0 - \hat{\mathbf{V}} = \Delta \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{BCBV} \times \hat{\mathbf{I}}_{br} = \mathbf{BCBV} \times \mathbf{BIBC} \times \hat{\mathbf{I}}. \quad (5.2.6.2)$$

Matrica **BCBV** je dimenzije $3m \times 3m$. Elementi matrice **BCBV** su vrednosti rednih impedansi grana i nule, i matrica ima donju trougaonu formu. Matrica **BCBV** popunjava se na sledeći način:

1. Inicijalizovati matricu dimenzije $3m \times 3m$ nulnim vrednostima;
2. Neka se sekcija numerisana brojem k nalazi između čvorova numerisanih brojevima i i j . Nenulte elemente vrsta od $3i-2$ do $3i$ matrice **BCBV** (vrste koje odgovaraju čvoru i) potrebno je prepisati u vrste od $3j-2$ do $3j$ matrice **BCBV** (vrste koje odgovaraju čvoru j), respektivno. Nakon toga submatrici dimenzije 3×3 matrice **BCBV**, čije kolone i vrste odgovaraju kolonama od $3k-2$ do $3k$ (kolone koje odgovaraju grani k) i vrstama od $3j-2$ do $3j$ matrice **BCBV**, respektivno, potrebno je uneti vrednosti matrice rednih impedansi $\hat{\mathbf{Z}}_{ij}$ sekcije k . Ovaj postupak vršiti krećući se od korena distributivne mreže ka najudaljenijim sekcijama;
3. Ponavljati postupak pod tačkom 2 dok se ne iscrpe sve sekcije distributivne mreže.

Sada se opisanom matematičkom modelu distributivne mreže, koristeći matrice **BIBC** i **BCBV**, mogu pridružiti opisi uslova kratkih spojeva u kojima su sadržane struje na mestu kratkog spoja. Neka se simulira kratak spoj u čvoru numerisanom brojem i . Struje na mestu kratkog spoja su \hat{I}_{ia}^f , \hat{I}_{ib}^f i \hat{I}_{ic}^f , a struje čvora i su \hat{I}_{ia} , \hat{I}_{ib} i \hat{I}_{ic} . Neka se sa \hat{V}_{ia}^f , \hat{V}_{ib}^f i \hat{V}_{ic}^f označe fazni naponi na mestu kratkog spoja, a sa \hat{V}_{ia}^0 , \hat{V}_{ib}^0 i \hat{V}_{ic}^0 označe fazni naponi na mestu kratkog spoja kola pre kratkog spoja. Neka se kratak spoj desio preko impedanse $\hat{\mathbf{Z}}_f$. Uslovi kratkog spoja [137] za različite vrste kratkih spojeva su:

1. jednofazni kratak spoj u fazi a:

$$\hat{I}_{ia} = \hat{I}_{ia}^f, \quad \hat{I}_{ib} = 0, \quad \hat{I}_{ic} = 0, \quad \hat{V}_{ia}^f = \hat{Z}_f \hat{I}_{ia}^f,$$

2. dvofazni kratak spoj između faza a i b:

$$\hat{I}_{ia} = \hat{I}_{ia}^f, \quad \hat{I}_{ib} = -\hat{I}_{ia}^f, \quad \hat{I}_{ic} = 0, \quad \hat{V}_{ia}^f - \hat{V}_{ib}^f = \hat{Z}_f \hat{I}_{ia}^f,$$

3. dvofazni kratak spoj između faza a i b sa zemljom:

$$\hat{I}_{ia} = \hat{I}_{ia}^f, \quad \hat{I}_{ib} = \hat{I}_{ib}^f, \quad \hat{I}_{ic} = 0, \quad \hat{V}_{ia}^f = \hat{V}_{ib}^f = \hat{Z}_f (\hat{I}_{ia}^f + \hat{I}_{ib}^f),$$

4. trofazni kratak spoj sa zemljom:

$$\hat{I}_{ia} = \hat{I}_{ia}^f, \quad \hat{I}_{ib} = \hat{I}_{ib}^f, \quad \hat{I}_{ic} = \hat{I}_{ic}^f, \quad \hat{V}_{ia}^f = \hat{V}_{ib}^f = \hat{V}_{ic}^f = \hat{Z}_f (\hat{I}_{ia}^f + \hat{I}_{ib}^f + \hat{I}_{ic}^f).$$

Zbog jednostavnosti u disertaciji će biti prikazan jednofazni kratak spoj u fazi a i integracija uslova jednofaznog kratkog spoja u fazi a u matematički model distributivne mreže. U primeru jednofaznog kratkog spoja u fazi a u čvoru i , struje po granama će biti:

$$\hat{\mathbf{I}}_{br}^f = \mathbf{BIBC} \times [0 \quad \dots \quad \hat{I}_{ia}^f \quad 0 \quad \dots]^T, \quad (5.2.6.3)$$

odnosno:

$$\hat{\mathbf{I}}_{br}^f = \mathbf{BIBC}_{ia} \hat{I}_{ia}^f, \quad (5.2.6.4)$$

gde je \mathbf{BIBC}_{ia} vektor-kolona matrice \mathbf{BIBC} koja odgovara fazi a čvora i .

$$\Delta \hat{\mathbf{V}}^f = \mathbf{BCBV} \times \hat{\mathbf{I}}_{br}^f = \mathbf{BCBV} \times \mathbf{BIBC}_{ia} \hat{I}_{ia}^f, \quad (5.2.6.5)$$

odnosno:

$$\Delta \hat{V}_{ia}^f = \mathbf{BCBV}_{ia} \times \mathbf{BIBC}_{ia} \hat{I}_{ia}^f, \quad (5.2.6.6)$$

gde je \mathbf{BCBV}_{ia} vektor-vrsta matrice \mathbf{BCBV} koja odgovara fazi a čvora i .

Razlika između napona pre i za vreme kratkog spoja može da se napiše na sledeći način:

$$\Delta \hat{V}_{ia}^f = \hat{V}_{ia}^0 - \hat{Z}_f \hat{I}_{ia}^f. \quad (5.2.6.7)$$

Sada se struja na mestu kratkog spoja može izračunati na sledeći način:

$$\hat{I}_{ia}^f = (\mathbf{BCBV}_{ia} \times \mathbf{BIBC}_{ia} + \hat{Z}_f)^{-1} \hat{V}_{ia}^0. \quad (5.2.6.8)$$

Sada se sa izračunatom strujom na mestu kratkog spoja mogu izračunati režimske veličine, odnosno fazni naponi čvorova primenom relacije $\Delta \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{BCBV} \times \mathbf{BIBC} \times \hat{\mathbf{I}}$.

5.2.7 Proračun jednosmerne komponente

Ovaj postupak za proračun jednosmerne komponente režima elektroenergetskih sistema sa kratkim spojevima izlaže se saglasno sa literaturom [77]. Režimi sa kratkim spojevima sastoje se od jednosmernih i naizmjeničnih komponenti. Jednosmerne komponente, kao i naizmjenične, nisu ustaljene. Njihove vrednosti opadaju u vremenu od trenutka kada se desi kratak spoj. Brzine opadanja zavise od njihovih vremenskih konstanti. Jednosmerne komponente struja kratkih spojeva opadaju eksponencijalno u vremenu do nulte vrednosti. Njihove vremenske konstante su takve da u tranzitnoj vremenskoj sekvenci dostižu nulte vrednosti. U ovom paragrafu će biti opisan proračun jednosmerne komponente struja kratkih spojeva koji je u saglasnosti sa metodom ekvivalentne vremenske konstante.

Jednosmerne komponente struja kratkih spojeva posledica su zatečenih flukseva pre svega u statorskim namotajima naizmjeničnih DER, kao i u induktivnim konturama svih ostalih elemenata elektroenergetskog sistema. Zatečeni fluksevi su posledica režima elektroenergetskog sistema pre kratkog spoja. Ukoliko je taj režim bio simetričan direktnog redosleda, obrada jednosmernih komponenti struja može se vršiti samo na pogonskim kolima direktnog redosleda elektroenergetskog sistema. Ukoliko nije bio simetričan, jednosmerne komponente struja su posledica zatečenih flukseva svih vrsta simetrije pa se njihova obrada mora vršiti na svim pogonskim kolima. Neka se, zbog jednostavnosti opisa proračuna jednosmerne komponente struja kratkih spojeva, razmatra trofazan, uravnotežen elektroenergetski sistem čiji je režim pre kratkog spoja simetričan direktnog redosleda. Neka se desio kratak spoj u trenutku $t = 0$. Jednosmerna komponenta struje u bilo kojoj fazi bilo koje grane bilo kog elementa može da se napiše na sledeći način:

$$i_{-}(t) = i_{-}(0)e^{-\frac{t}{T_{-}}}, \quad (5.2.7.1)$$

gde su:

t – vreme,

$i_{-}(0)$ – vrednost jednosmerne komponente struje u trenutku $t = 0$,

T_{-} – vremenska konstanta jednosmerne komponente struje koja se računa na sledeći način:

$$T_{-} = \frac{L_{-}}{R_{-}}, \quad (5.2.7.2)$$

gde su L_{-} i R_{-} induktivnost i otpornost koji se koriste za izračunavanje vremenske konstante.

Na osnovu relacije (5.2.7.1) da bi se odredile jednosmerne komponente struja kratkih spojeva potrebno je izračunati njihove početne vrednosti i vremenske konstante. U tu svrhu uvodi se pretpostavka da jednosmerne komponente struja svih elemenata elektroenergetskog sistema opadaju uniformno, odnosno saglasno sa ekvivalentnom vremenskom konstantom. Ta konstanta zavisi od parametara pogonskog kola direktnog redosleda elektroenergetskog sistema. Ova pretpostavka se uvodi da se izbegne proračun jednosmerne komponente korišćenjem diferencijalnih jednačina kojima se opisuje dinamika elektroenergetskog sistema jer je takav proračun praktično nemoguć. Sa uvaženom navedenom aproksimacijom jednosmerne komponente struja kratkih spojeva se izračunavaju na sledeći način:

1. Početna vrednost struje kratkog spoja u izabranoj fazi izabrane grane elementa jednaka je zbiru početne vrednosti jednosmerne komponente struje i početne vrednosti subtranzitne struje:

$$i^k(0) = i_-(0) + i''(0), \quad (5.2.7.3)$$

što je posledica toga da struja u konturi sa otpornošću i induktivnošću ne može naglo da se promeni ako se prethodno naglo ne izloži fluksu spoljnog nezavisnog izvora (teorija o zaleđenom fluksu). Ako elektroenergetski sistem nije bio u praznom hodu pre kratkog spoja, početna vrednost struje svake grane je jednaka vrednosti neposredno pre kratkog spoja $i(0)$. Stoga, početna vrednost jednosmerne komponente struje kratkog spoja jednaka je:

$$i_-(0) = i(0) - i''(0). \quad (5.2.7.4)$$

Za izračunavanje početne vrednosti jednosmerne komponente struje kratkog spoja potrebno je raspolagati sa vrednošću struje pre kratkog spoja i potrebno je prethodno izračunati početnu vrednost subtranzitne komponente. Stoga, potrebno je prvo izračunati naizmeničnu komponentu bar u subtranzitnoj vremenskoj sekvenci;

2. Za proračun jednosmerne vremenske konstante potrebno je izračunati njene konstituente L_- i R_- na sledeći način:

Potrebno je anulirati sve rezistanse pogonskog kola direktnog redosleda trofaznog Δ -kola i izračunati ekvivalentnu reaktansu X_- viđenu iz čvora sa kratkim spojem prema ostatku kola. Nakon toga je ekvivalentna induktivnost jednaka $L_- = X_-/\omega$, pri čemu se smatra da se frekvencija nije promenila pre i za vreme kratkog spoja;

Potrebno je anulirati sve reaktanse pogonskog kola direktnog redosleda trofaznog Δ -kola i izračunati ekvivalentnu otpornost R_- viđenu iz čvora sa kratkim spojem prema ostatku kola;

Izračunati ekvivalentnu vremensku konstantu za zadati čvor sa kratkim spojem koristeći relaciju (5.2.7.2);

3. Izračunati jednosmerne komponente struja svih elemenata elektroenergetskog sistema koji su od interesa koristeći relaciju (5.2.7.1).

Jednosmerne komponente struja kratkih spojeva značajno povećavaju trenutne vrednosti struja elemenata elektroenergetskog sistema sa kratkim spojem. Ta povećanja idu do dvostrukih početnih vrednosti subtranzitne struje. Jednosmerne komponente napona najčešće nisu od interesa jer su naponi u elektroenergetskim sistemima sa kratkim spojem uglavnom mnogo manji od radnih napona. Stoga, jednosmerne komponente napona uglavnom se ne obrađuju.

6 ALGORITAM ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA ZASNOVAN NA KORELISANIM INTERVALIMA

Predložen proračun kratkih spojeva u disertaciji, koji se izlaže saglasno sa literaturom [119], zasnovan je na poznatom principu dekompozicije-superpozicije [5, 6]. Na osnovu principa dekompozicije-superpozicije režim kola sa kratkim spojem se može dekomponovati na kolo sa jednosmernim i naizmeničnim režimom. Naizmeničan režim kola sa kratkim spojem može se dekomponovati na poznat naizmeničan režim kola pre kratkog spoja i režim Δ -kola. Kako je naizmeničan režim kola pre kratkog spoja poznat na osnovu proračuna tokova snaga, proračun naizmeničnog režima kola sa kratkim spojem je redukovan na proračun režima Δ -kola. Da bi se primenile dekompozicije potrebno je da je kolo sa kratkim spojem linearno.

Proračun tokova snaga predstavlja proračun koji je uglavnom nelinearan i u kome su DG i potrošači predstavljeni u terminima snaga (nelinearnim modelima). Proračun tokova snaga je proračun ustaljenog režima u kome je zadovoljen bilans aktivnih i reaktivnih snaga. Neka se razmatra kolo elektroenergetskog sistema u kome se nije desio kratak spoj. Na osnovu proračuna tokova snaga takvog kola dobija se režim kola koga čine naponi i struje svih elemenata. Takav režim predstavlja ustaljen režim u kome su poznate proizvodnje svih DG i potrošnje svih potrošača, odnosno poznati su njihovi naponi, struje i snage. U takvom ustaljenom režimu (radnoj tački) kola, DG i potrošači se mogu predstaviti linearnim modelima. DG se mogu modelovati Tevenenovim ekvivalentima, koji predstavljaju linearizovane modele DG u radnoj tački kola. Potrošači se mogu modelovati impedansama/admitansama ili idealnim strujnim generatorima, koji predstavljaju linearizovane modele potrošača u radnoj tački kola. Neka se nelinearni modeli DG i potrošača u kolu zamene svojim linearnim modelima. Kolo postaje linearno i režim kola se nije promenio. Na ovaj način je nelinearno kolo elektroenergetskog sistema linearizovano u radnoj tački. Neka se u elektroenergetskom sistemu desio kratak spoj, odnosno neka se u linearizovanom kolu simulira kratak spoj. S obzirom na to da je kolo sa kratkim spojem linearno, proračun režima kola sa kratkim spojem može se vršiti primenom principa dekompozicije-superpozicije. Dakle, režim kola sa kratkim spojem obrađuje se na linearnom modelu elektroenergetskog sistema, koji je izveden iz nelinearnog modela elektroenergetskog sistema pre kratkog spoja linearizacijom u radnoj tački (režimu pre kratkog spoja). Nelinearnosti koje bi se mogle uneti delovanjem regulacije aktivnih snaga i frekvencije, kao i delovanjem regulacije napona i reaktivnih snaga, mogu se zanemariti. Zanemarenja se mogu uvažiti zbog kratkog trajanja režima elektroenergetskog sistema sa kratkim spojem kada navedene regulacije ne počinju da deluju [77].

Navedena redukcija proračuna naizmeničnog režima kola sa kratkim spojem na proračun režima Δ -kola značajno pojednostavljuje proračun kratkih spojeva. Pored toga u proračunu režima Δ -kola postoji jedna bitna karakteristika koja pojednostavljuje proračun a to je činjenica da je Δ -kolo pasivno svuda osim na mestu kratkog spoja i na mestima gde su priključeni IBDG [21]. Svi aktivni elementi sinhronih i asinhronih DG anulirani su u Δ -kolu, a sadržani su u kolu sa poznatim režimom pre kratkog spoja [5, 6]. Pošto su sinhroni i asinhroni DG predstavljeni idealnim naponskim generatorima povezanim na red sa (subtranzitnim, tranzitnim i ustaljenim) impedansama, u Δ -kolu su sadržane samo njihove impedanse, dok su njihovi idealni naponski generatori anulirani. U slučaju potrošača njihovi matematički modeli u Δ -kolu predstavljaju impedanse/admitanse, što je u skladu sa [5, 6].

Stoga, za sinhronu i asinhronu DG, kao i potrošače, ključni momenat za njihovo uvažavanje u Δ -kolu je proračun njihovih impedansi/admitansi Δ -kola.

Razlog zbog koga Δ -kolo nije pasivno na mestu gde su priključeni IBDG je to što u režimu kola sa kratkim spojem IBDG injektira struje koje su 1,5 puta veće od svoje nominalne struje. Stoga, kada su njihovi modeli dekomponovani na modele pre kratkog spoja i modele Δ -kola, delovi njihove struje ostaju u Δ -kolu i treba da se injektiraju na mestu gde su priključeni. Ovaj koncept opisan je detaljno u [21], gde su IBDG modelovani kao kontrolisani strujni generatori u Δ -kolu. Pošto je glavni zadatak u disertaciji uvažavanje neizvesnosti potrošača i DG u proračunu kratkih spojeva, detaljni modeli IBDG i njihovo uvažavanje u proračunu kratkih spojeva mogu se preuzeti iz [21] pa stoga nisu ponovljeni ovde.

Na kraju kada su svi elementi adekvatno modelovani, izračunat je režim Δ -kola i superponiran sa poznatim naizmeničnim režimom kola pre kratkog spoja. Na ovaj način je izračunat kompletan naizmeničan režim kola sa kratkim spojem.

U predloženom proračunu kratkih spojeva koristi se fazni domen zbog toga što je na taj način jednostavno uvažiti jednofazne ili dvofazne otepe, neuravnotežene elemente, kao i neuravnoteženu potrošnju.

Na osnovu prethodnog izlaganja, kompletan algoritam za proračun kratkih spojeva sastoji se iz sledećih koraka:

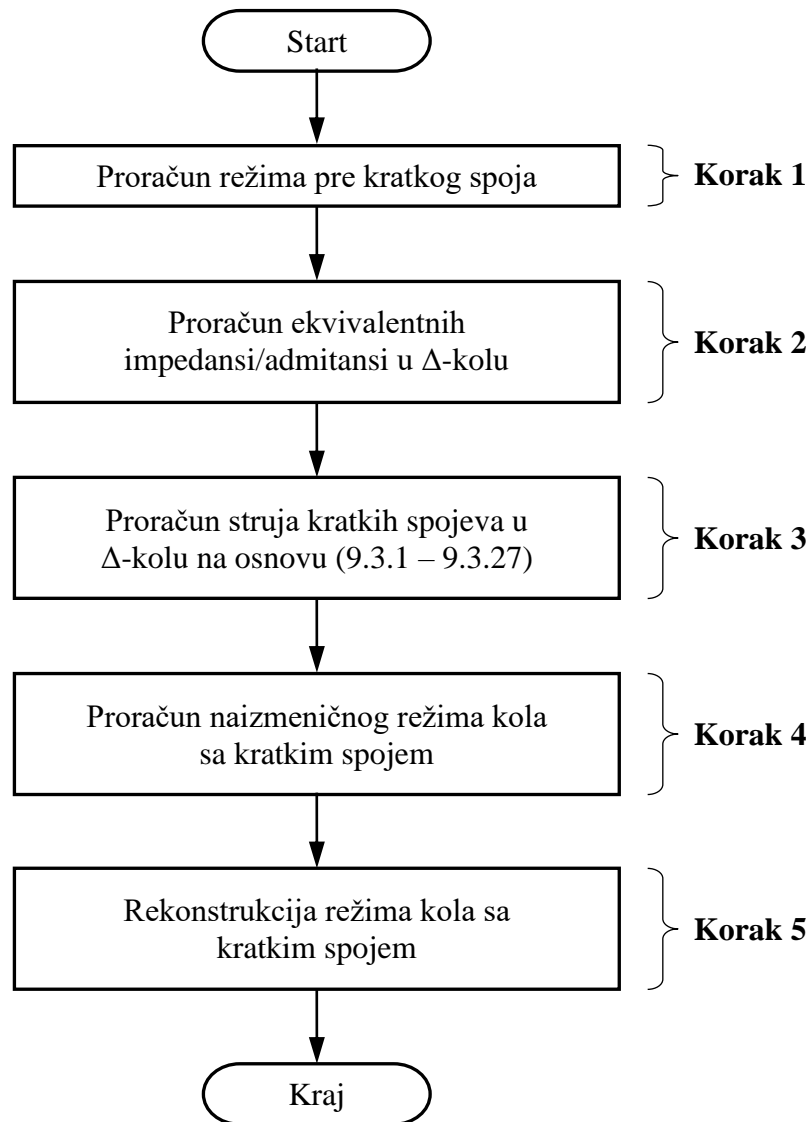
1. Proračun režima pre kratkog spoja;
2. Proračun ekvivalentnih impedansi/admitansi u Δ -kolu;
3. Proračun struja kratkih spojeva u Δ -kolu;
4. Proračun naizmeničnog režima kola sa kratkim spojem;
5. Rekonstrukcija režima kola sa kratkim spojem.

Navedeni koraci detaljno su objašnjeni u nastavku i predstavljeni su dijagramom na slici 6.1. Neka se u tim koracima razmatra radialna distributivna mreža sa n grana i $n+1$ čvorova. Balansni čvor, koji predstavlja koren distributivne mreže, označen je indeksom 0. U ostalih n čvorova, označenih indeksima od 1 do n , priključeni su DG i potrošači. Grane i njihovi čvorovi na kraju udaljenijem od korena distributivne mreže označeni su istim indeksima.

Korak 1: Proračun režima pre kratkog spoja

U predloženom algoritmu za proračun kratkih spojeva sa koreliranim intervalima režim kola pre kratkog spoja (naponi i struje) izračunat je koristeći proračun tokova snaga [32], koji je u disertaciji generalizovan na miksovane i neuravnotežene distributivne mreže uzimanjem u obzir odgovarajuće faze elemenata u faznom domenu. Na ovaj način je režim kola pre kratkog spoja predstavljen intervalima zasnovanim na neizvesnostima, što je jedan od ključnih momenata za uvažavanje neizvesnosti u disertaciji. U navedenom proračunu tokova snaga uvažene su korelacije između DG i potrošača. Taj proračun se sastoji iz četiri dela:

1. Popunjavanje korelacione matrice;
2. Proračun komponenti struja grana;
3. Proračun komponenti napona čvorova;
4. Provera kriterijuma konvergencije.



Slika 6.1 – Dijagram algoritma za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža koji je zasnovan na korelisanim intervalima

Popunjavanje korelacione matrice vrši se na osnovu poznatih koeficijenata korelacije koji se mogu izračunati na način koji je opisan u delu 4.2. Nekorelisani elementi imaju u korelacionoj matrici nulte vrednosti na pozicijama koje odgovaraju tim elementima.

Korelisani elementi imaju u korelacionoj matrici vrednosti različite od nule na pozicijama koje odgovaraju tim elementima, i to:

1. Ukoliko su dva elementa istog tipa (dva DG ili dva potrošača) i negativno su korelisani, u korelacionoj matrici na poziciji koja odgovara tim elementima biće upisan negativan korelacioni koeficijent;
2. Ukoliko su dva elementa različitog tipa (DG i potrošač) i pozitivno su korelisani, u korelacionoj matrici na poziciji koja odgovara tim elementima biće upisan pozitivan korelacioni koeficijent.

Za proračun komponenti struja grana koristi se deo direktnog postupka [139] zasnovanog na metodu konturnih struja. Direktna postupak se može primeniti u radialnim i u slaboupetljanim distributivnim mrežama [80, 139]. Postupak ne zahteva model matrice

admitansi i samim tim prevazilazi sve probleme koji dolaze sa korišćenjem matricnih modela orijentisanih na čvorove (prvenstveno inverzije matrice) koji se primenjuju na distributivne mreže velikih dimenzija. Postupak je u [140] proširen uvažavanjem modela transformatora i otopnih parametara grana. Postupak je zasnovan na formiranju matrice **BIBC**, koja povezuje struje DG i potrošača u čvorovima sa strujama grana, i matrice **BCBV**, koja povezuje struje grana sa naponima čvorova. Koristeći matricu **BIBC**, jednostavno je utvrditi koji čvorovi se napajaju sa kojih grana. Koristeći aktivne i reaktivne snage DG i potrošača, pri čemu se DG tretiraju kao negativna potrošnja [79, 141], mogu se izračunati komponente struja šantova na sledeći način:

$$I_{Lxil}^{re} = \frac{P_{Lxil}(U_{xi})U_{xi}^{re} + Q_{Lxil}(U_{xi})U_{xi}^{im}}{(U_{xi}^{re})^2 + (U_{xi}^{im})^2}, \quad (6.1)$$

$$I_{Lxil}^{im} = \frac{P_{Lxil}(U_{xi})U_{xi}^{im} - Q_{Lxil}(U_{xi})U_{xi}^{re}}{(U_{xi}^{re})^2 + (U_{xi}^{im})^2}, \quad (6.2)$$

$$I_{Gxig}^{re} = -\frac{P_{Gxig}(U_{xi})U_{xi}^{im} + Q_{Gxig}(U_{xi})U_{xi}^{re}}{(U_{xi}^{re})^2 + (U_{xi}^{im})^2}, \quad (6.3)$$

$$I_{Gxig}^{im} = -\frac{P_{Gxig}(U_{xi})U_{xi}^{im} - Q_{Gxig}(U_{xi})U_{xi}^{re}}{(U_{xi}^{re})^2 + (U_{xi}^{im})^2}, \quad (6.4)$$

$x \in \{a, b, c\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $l = 1, 2, \dots, L_i$, $g = 1, 2, \dots, G_i$,

gde su:

L_i, G_i – ukupan broj potrošača i DG priključenih u čvor sa indeksom i ,

$I_{Lxil}^{re}, I_{Lxil}^{im}$ – realna i imaginarna komponenta struje potrošnje potrošača sa indeksom l , respektivno, priključenog u čvor sa indeksom i faze x ,

$I_{Gxig}^{re}, I_{Gxig}^{im}$ – realna i imaginarna komponenta struje proizvodnje DG sa indeksom g , respektivno, priključenog u čvor sa indeksom i faze x ,

P_{Lxil}, Q_{Lxil} – aktivna i reaktivna snaga potrošnje potrošača sa indeksom l , respektivno, priključenog u čvor sa indeksom i faze x ,

P_{Gxig}, Q_{Gxig} – aktivna i reaktivna snaga proizvodnje DG sa indeksom g , respektivno, priključenog u čvor sa indeksom i faze x ,

$U_{xi}, U_{xi}^{re}, U_{xi}^{im}$ – moduo napona, realna i imaginarna komponenta napona čvora sa indeksom i faze x , respektivno.

Na osnovu korelacione matrice poznato je koji su DG i potrošači korelisani i poznat je njihov korelacioni koeficijent. Koristeći matricu **BIBC**, korelacione koeficijente i prethodno predstavljene komponente struja šantova, vektori realnih I_j^{re} i imaginarnih I_j^{im} komponenti struje grane sa indeksom j , koji sadrže komponente struja odgovarajućih faza te grane, mogu se izračunati na sledeći način:

$$\mathbf{I}_j^{\text{re}} = \sum_{i=1}^n \left[\mathbf{BIBC}(j,i) \times \left(\sum_{l=1}^{L_i} \mathbf{I}_{Lil}^{\text{re}} + \sum_{g=1}^{G_i} \mathbf{I}_{Gig}^{\text{re}} \right) \right], \quad (6.5)$$

$$\mathbf{I}_j^{\text{im}} = \sum_{i=1}^n \left[\mathbf{BIBC}(j,i) \times \left(\sum_{l=1}^{L_i} \mathbf{I}_{Lil}^{\text{im}} + \sum_{g=1}^{G_i} \mathbf{I}_{Gig}^{\text{im}} \right) \right], \quad (6.6)$$

$j = 1, 2, \dots, n$,

gde su:

$\mathbf{BIBC}(j,i)$ – submatrica matrice \mathbf{BIBC} koja povezuje struje DG i potrošača priključenih u čvor sa indeksom i sa strujama grane sa indeksom j ,

$\mathbf{I}_{Lil}^{\text{re}}, \mathbf{I}_{Lil}^{\text{im}}$ – vektori realnih i imaginarnih komponenti struje potrošnje potrošača sa indeksom l , respektivno, priključenog u čvor sa indeksom i , koji sadrže komponente struja odgovarajućih faza potrošača,

$\mathbf{I}_{Gig}^{\text{re}}, \mathbf{I}_{Gig}^{\text{im}}$ – vektori realnih i imaginarnih komponenti struje proizvodnje DG sa indeksom g , respektivno, priključenog u čvor sa indeksom i , koji sadrže komponente struja odgovarajućih faza DG.

Ukoliko su šantovi negativno korelisani prilikom sabiranja njihovih komponenti struja koristi se relacija (4.2.2). Ukoliko su šantovi pozitivno korelisani prilikom oduzimanja njihovih komponenti struja koristi se relacija (4.2.3). U svim ostalim slučajevima koriste se osnovne aritmetčke operacije sabiranja i oduzimanja date u definiciji 3.1.2.2.

Proračun komponenti napona čvorova vrši se koristeći proceduru korekcije napona koja predstavlja deo BFS algoritma za proračun tokova snaga [13]. Krećući se od korena distributivne mreže ka najudaljenijim čvorovima vrši se proračun komponenti napona čvorova. Neka grana sa indeksom j ima prvi čvor sa indeksom i i drugi sa indeksom j . Komponente napona čvora sa indeksom j računaju se na sledeći način:

$$\mathbf{U}_j^{\text{re}} = \mathbf{U}_i^{\text{re}} - \mathbf{R}_j \mathbf{I}_j^{\text{re}} + \mathbf{X}_j \mathbf{I}_j^{\text{im}}, \quad (6.7)$$

$$\mathbf{U}_j^{\text{im}} = \mathbf{U}_i^{\text{im}} - \mathbf{X}_j \mathbf{I}_j^{\text{re}} - \mathbf{R}_j \mathbf{I}_j^{\text{im}}, \quad (6.8)$$

$j = 1, 2, \dots, n$,

gde su:

$\mathbf{U}_j^{\text{re}}, \mathbf{U}_j^{\text{im}}$ – vektori realnih i imaginarnih komponenti napona čvora sa indeksom j , respektivno,

$\mathbf{U}_i^{\text{re}}, \mathbf{U}_i^{\text{im}}$ – vektori realnih i imaginarnih komponenti napona čvora sa indeksom i , respektivno,

$\mathbf{R}_j, \mathbf{X}_j$ – matrice rednih rezistansi i reaktansi grane sa indeksom j , respektivno.

Proračun komponenti struja grana i komponenti napona čvorova vrši se iterativno. U svakoj iteraciji je potrebno izračunati maksimalnu razliku napona čvorova iz aktuelne i prethodne iteracije. Nakon toga je potrebno izvršiti proveru kriterijuma konvergencije, odnosno proveru da li je maksimalna razlika napona čvorova iz aktuelne i prethodne iteracije manja od zadatog kriterijuma konvergencije. Ukoliko je manja iterativni postupak se završava, a ukoliko nije nastavlja se.

Korak 2: Proračun ekvivalentnih impedansi/admitansi u Δ -kolu

U okviru proračuna ekvivalentnih impedansi/admitansi izdvojena su dva dela: proračun linearnih modela DG i potrošača i proračun Tevenenove matrice impedansi kojom se modeluje ekvivalentna impedansa viđena od mesta kratkog spoja ka ostatku Δ -kola.

U prvom delu proračuna ekvivalentnih impedansi/admitansi tradicionalni DG i potrošači su predstavljeni impedansama/admitansama, dok su DG zasnovani na invertoru predstavljeni idealnim strujnim generatorima [21]. Impedanse/admitanse potrošača se mogu izračunati na osnovu specificiranih aktivnih i reaktivnih snaga potrošnje i poznatog napona potrošača na osnovu poznatog režima kola pre kratkog spoja. Specificirane aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača, koji su označeni slovom L, modelovane su intervalima gde su polovine širina intervala date u funkciji procenta specificirane aktivne i reaktivne snage na sledeći način:

$$P_{Lxil}^{\text{spec}} \in [P_{Lxilm}^{\text{spec}} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil}^{\text{spec}}], \quad Q_{Lxil}^{\text{spec}} = [Q_{Lxilm}^{\text{spec}} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil}^{\text{spec}}], \quad (6.9)$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, L_i,$$

gde su:

$P_{Lxilm}^{\text{spec}}, Q_{Lxilm}^{\text{spec}}$ – specificirane determinističke vrednosti aktivne i reaktivne snage potrošnje, odnosno centralne vrednosti intervala,

$\alpha_{Lxil} \in [-1, 1]$ – realan broj između -1 i 1 ,

$\Delta P_{Lxil}^{\text{spec}} = \frac{s_{Lxil}^{\text{neiz}}}{100} P_{Lxilm}^{\text{spec}}, \Delta Q_{Lxil}^{\text{spec}} = \frac{s_{Lxil}^{\text{neiz}}}{100} Q_{Lxilm}^{\text{spec}}$ – polovine širina intervala aktivne i reaktivne snage

u funkciji procenta s_{Lxil}^{neiz} specificirane aktivne i reaktivne snage,

L_i – ukupan broj potrošača priključenih u čvor sa indeksom i .

Ovako modelovane specificirane aktivne i reaktivne snage potrošnje potrošača predstavljaju nelinearan model potrošača. Koristeći napone potrošača, dobijene iz režima pre kratkog spoja, kao i relacije 2.1.1 i 2.1.2, u kojima je potrebno determinističke vrednosti zameniti intervalima, nelinearan model potrošača se može linearizovati. Nelinearan model potrošača, sa aktivnim i reaktivnim snagama potrošnje potrošača modelovanim intervalima i zavisnim od napona, može se predstaviti na sledeći način:

$$P_{Lxil}(U_{xi}) \in [P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil}], \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.10)$$

$$Q_{Lxil}(U_{xi}) \in [Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil}], \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.11)$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, L_i.$$

Linearizovan model potrošača u radnoj tački predstavljaju impedanse/admitanse potrošača. Impedanse potrošača se mogu izračunati na sledeći način:

$$\hat{Z}_{Lxil} = \frac{U_n^2}{P_{Lxil}(U_{xi}) - jQ_{Lxil}(U_{xi})} =$$

$$= \frac{P_{Lxil}(U_{xi})U_n^2}{(P_{Lxil}(U_{xi}))^2 + (Q_{Lxil}(U_{xi}))^2} + j \frac{Q_{Lxil}(U_{xi})U_n^2}{(P_{Lxil}(U_{xi}))^2 + (Q_{Lxil}(U_{xi}))^2}, \quad (6.12)$$

$$\hat{Z}_{Lxil} = Z_{Lxil}^{re} + jZ_{Lxil}^{im} = [Z_{Lxil}^{re}, \bar{Z}_{Lxil}^{re}] + j[Z_{Lxil}^{im}, \bar{Z}_{Lxil}^{im}], \quad (6.13)$$

$$Z_{Lxil}^{re} \in [Z_{Lxilm}^{re} + \alpha_{Lxil}\Delta Z_{Lxil}^{re}], \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.14)$$

$$Z_{Lxil}^{im} \in [Z_{Lxilm}^{im} + \alpha_{Lxil}\Delta Z_{Lxil}^{im}], \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.15)$$

$$\bar{Z}_{Lxil}^{re} = \max \left\{ U_n^2 \frac{P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil}}{(P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil})^2 + (Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil})^2} \right\}, \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.16)$$

$$Z_{Lxil}^{re} = \min \left\{ U_n^2 \frac{P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil}}{(P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil})^2 + (Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil})^2} \right\}, \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.17)$$

$$\bar{Z}_{Lxil}^{im} = \max \left\{ U_n^2 \frac{Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil}}{(P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil})^2 + (Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil})^2} \right\}, \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.18)$$

$$Z_{Lxil}^{im} = \min \left\{ U_n^2 \frac{Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil}}{(P_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta P_{Lxil})^2 + (Q_{Lxilm} + \alpha_{Lxil}\Delta Q_{Lxil})^2} \right\}, \quad \alpha_{Lxil} \in [-1, 1], \quad (6.19)$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, L_i.$$

Relacije date u definiciji 3.1.11 koriste se za računanje centralne vrednosti intervala i polovinu širine intervala u relacijama (6.14) i (6.15) na osnovu relacija (6.16–6.19). Ukoliko bi se potrošači predstavili admitansama, admitanse bi se mogle izračunati na dva načina: kao recipročna vrednost impedanse, predstavljene relacijom (6.13), ili na osnovu specificiranih aktivnih i reaktivnih snaga potrošnje i poznatog napona potrošača, dobijenog iz režima pre kratkog spoja. Admitantnom predstavom potrošača na ta dva načina dobile bi se različite vrednosti intervala zbog intervalnog problema zavisnosti koji je opisan u delu 3.2. Stoga, potrebno je koristiti način koji daje uže intervale.

Tradicionalni sinhroni i asinhroni DG predstavljeni su determinističkom subtranzitnom, tranzitnom ili ustaljenom impedansom:

$$\hat{Z}_{Gxig} = Z_{Gxig}^{re} + jZ_{Gxig}^{im}, \quad (6.20)$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad g = 1, 2, \dots, G_i,$$

gde su:

G_i – ukupan broj DG priključenih u čvor sa indeksom i .

Kada su izračunate ekvivalentne impedanse/admitanse DG i potrošača, Tevenenova matrica odnosno ekvivalentna matrica impedansi za čvor k Δ -kola može se izračunati koristeći proračun tokova snaga [32] sa pojedinim modifikacijama. Prvo se u proračunu tokova snaga vrednost napona korena postavlja na nulu. Zatim se DG i potrošači modeluju prethodno izračunatim impedansama/admitansama koje se povezuju u odgovarajuće čvorove Δ -kola, gde su i sami elementi povezani. Njihove komponente struja u proračunu tokova snaga određene su na sledeći način:

$$I_{Lxil}^{re} = \frac{U_{xi}^{re} Z_{Lxil}^{re} + U_{xi}^{im} Z_{Lxil}^{im}}{(Z_{Lxil}^{re})^2 + (Z_{Lxil}^{im})^2}, \quad (6.21)$$

$$I_{Lxil}^{im} = \frac{U_{xi}^{im} Z_{Lxil}^{re} - U_{xi}^{re} Z_{Lxil}^{im}}{(Z_{Lxil}^{re})^2 + (Z_{Lxil}^{im})^2}, \quad (6.22)$$

$$I_{Gxig}^{re} = \frac{U_{xi}^{re} Z_{Gxig}^{re} + U_{xi}^{im} Z_{Gxig}^{im}}{(Z_{Gxig}^{re})^2 + (Z_{Gxig}^{im})^2}, \quad (6.23)$$

$$I_{Gxig}^{im} = \frac{U_{xi}^{im} Z_{Gxig}^{re} - U_{xi}^{re} Z_{Gxig}^{im}}{(Z_{Gxig}^{re})^2 + (Z_{Gxig}^{im})^2}, \quad (6.24)$$

$x \in \{a, b, c\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $l = 1, 2, \dots, L_i$, $g = 1, 2, \dots, G_i$,

gde su U_{xi}^{re} i U_{xi}^{im} realna i imaginarna komponenta napona čvora sa indeksom i faze x .

Nakon toga jedinična struja se injektira u čvor k u fazu x , dok su vrednosti struja svih ostalih faza čvora k postavljene na nulu. Kada se izvrši proračun tokova snaga tako modifikovanog kola dobijaju se naponi u svim čvorovima. Vrednosti napona čvora k :

$$\hat{U}_k = \begin{bmatrix} \hat{U}_{ak} \\ \hat{U}_{bk} \\ \hat{U}_{ck} \end{bmatrix}, \quad (6.25)$$

pošto je u fazu x injektirana jedinična struja, ovi naponi predstavljaju x -tu kolonu u ekvivalentnoj matrici impedansi:

$$\hat{Z}_{xk} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{xak} \\ \hat{Z}_{xbk} \\ \hat{Z}_{xck} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xak}^{re} + jZ_{xak}^{im} \\ Z_{xbk}^{re} + jZ_{xbk}^{im} \\ Z_{xck}^{re} + jZ_{xck}^{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_{ak} \\ \hat{U}_{bk} \\ \hat{U}_{ck} \end{bmatrix}. \quad (6.26)$$

Koristeći istu proceduru za ostale faze čvora k dobija se ekvivalentna matrica impedansi. Na osnovu činjenice da impedanse potrošača sadrže neizvesnosti predstavljene intervalima, elementi ekvivalentne matrice impedansi takođe su predstavljani intervalima.

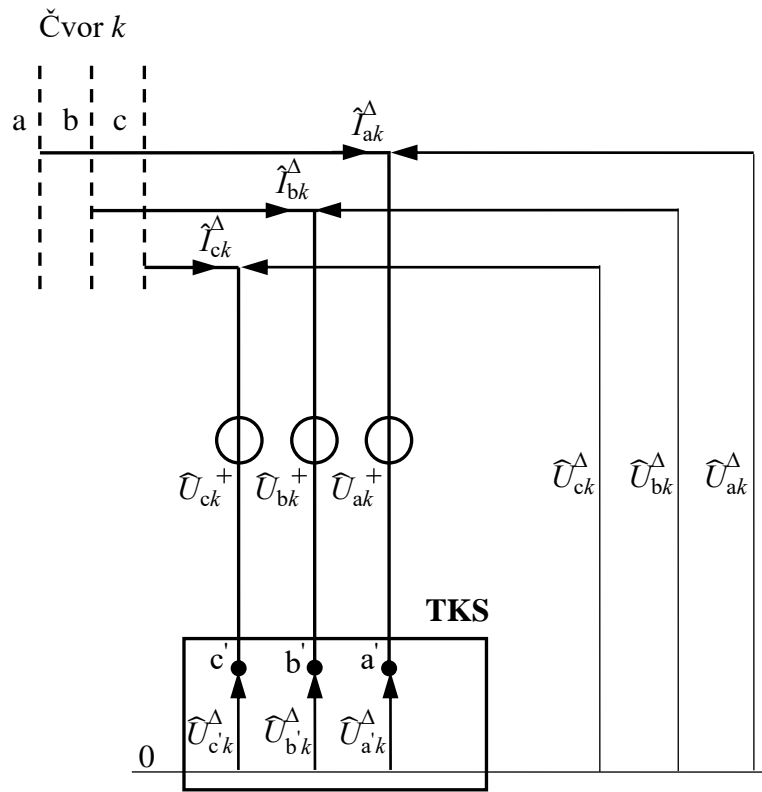
Ekvivalentna matrica impedansi za čvor k ima sledeću formu:

$$\hat{Z}_k = \begin{bmatrix} Z_{aak}^{re} + jZ_{aak}^{im} & Z_{bak}^{re} + jZ_{bak}^{im} & Z_{cak}^{re} + jZ_{cak}^{im} \\ Z_{abk}^{re} + jZ_{abk}^{im} & Z_{bbk}^{re} + jZ_{bbk}^{im} & Z_{cbk}^{re} + jZ_{cbk}^{im} \\ Z_{ack}^{re} + jZ_{ack}^{im} & Z_{bck}^{re} + jZ_{bck}^{im} & Z_{cck}^{re} + jZ_{cck}^{im} \end{bmatrix}. \quad (6.27)$$

Korak 3: Proračun struja kratkih spojeva u Δ -kolu

U ovom koraku prvo se vrši proračun struja na mestu kratkog spoja a zatim proračun struja i napona Δ -kola, odnosno režima Δ -kola. Režim Δ -kola se primenom principa dekompozicije-superpozicije može dekomponovati na subtranzitni, tranzitni i ustaljeni režim. Ustaljeni režim je prostoperiodičan, dok se subtranzitni i tranzitni aproksimiraju

prostoperiodičnim režimima sa vrednostima amplituda jednakim na početku vremenskih sekvenci. Na osnovu toga postupak opisan u ovom koraku proračuna struja kratkih spojeva primenjuje se za sve tri vremenske sekvence.



Slika 6.2 – Ansambl kratkog spoja čvora k

Proračun struja na mestu kratkog spoja vrši se pomoću relacija izvedenih na osnovu modela režima ansambla kratkog spoja Δ -kola. Ansambl kratkog spoja Δ -kola čine TKS i insertovani idealni naponski generatori. Na slici 6.2 prikazan je ansambl kratkog spoja čvora k sa označenim režimskim veličinama. Matematički model režima ansambla kratkog spoja prikazanog na slici 6.2 čine:

Relacije uslova kratkog spoja:

$$\begin{aligned}
 F_1 \left(\hat{U}_{a'k}^\Delta, \hat{U}_{b'k}^\Delta, \hat{U}_{c'k}^\Delta, \hat{I}_{ak}^\Delta, \hat{I}_{bk}^\Delta, \hat{I}_{ck}^\Delta \right) &= 0, \\
 F_2 \left(\hat{U}_{a'k}^\Delta, \hat{U}_{b'k}^\Delta, \hat{U}_{c'k}^\Delta, \hat{I}_{ak}^\Delta, \hat{I}_{bk}^\Delta, \hat{I}_{ck}^\Delta \right) &= 0, \\
 F_3 \left(\hat{U}_{a'k}^\Delta, \hat{U}_{b'k}^\Delta, \hat{U}_{c'k}^\Delta, \hat{I}_{ak}^\Delta, \hat{I}_{bk}^\Delta, \hat{I}_{ck}^\Delta \right) &= 0,
 \end{aligned} \tag{6.28}$$

Relacije insertovanih idealnih naponskih generatora:

$$\begin{aligned}
 \hat{U}_{ak}^\Delta &= \hat{U}_{a'k}^\Delta - \hat{U}_{ak}, \\
 \hat{U}_{bk}^\Delta &= \hat{U}_{b'k}^\Delta - \hat{U}_{bk}, \\
 \hat{U}_{ck}^\Delta &= \hat{U}_{c'k}^\Delta - \hat{U}_{ck},
 \end{aligned} \tag{6.29}$$

Relacije uticaja ostatka Δ -kola na režim čvora k :

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{ak}^{\Delta} \\ \hat{U}_{bk}^{\Delta} \\ \hat{U}_{ck}^{\Delta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aak} & \hat{Z}_{bak} & \hat{Z}_{cak} \\ \hat{Z}_{abk} & \hat{Z}_{bbk} & \hat{Z}_{cbk} \\ \hat{Z}_{ack} & \hat{Z}_{bck} & \hat{Z}_{cck} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{ak}^{\Delta} \\ \hat{I}_{bk}^{\Delta} \\ \hat{I}_{ck}^{\Delta} \end{bmatrix}. \quad (6.30)$$

Matematički modeli režima ansambla kratkih spojeva, opisani relacijama (6.28–6.30), za različite vrste kratkih spojeva prikazani su u prilogu u delu 9.2. Pred toga relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u režimu Δ -kola, u kompleksnoj formi, prikazane su u delu 9.3 u prilogu. Za potrebe predloženog algoritma u disertaciji, ove struje se mogu predstaviti realnim i imaginarnim komponentama kompleksnih struja. U narednom primeru prikazane su realne i imaginarne komponente struje jednofaznog kratkog spoja (ista procedura može se iskoristiti za ostale struje iz priloga), pri čemu su prikazane nenulte komponente struje u fazi x dok su u druge dve faze jednake nuli:

$$\hat{I}_{xk}^{\Delta} = I_{xk}^{\Delta \text{ re}} + j I_{xk}^{\Delta \text{ im}} = \frac{U_{xk}^{\text{re}} + j U_{xk}^{\text{im}}}{Z_{xxk}^{\text{re}} + j Z_{xxk}^{\text{im}}} = \frac{U_{xk}^{\text{re}} Z_{xxk}^{\text{re}} + U_{xk}^{\text{im}} Z_{xxk}^{\text{im}}}{(Z_{xxk}^{\text{re}})^2 + (Z_{xxk}^{\text{im}})^2} + j \frac{U_{xk}^{\text{im}} Z_{xxk}^{\text{re}} - U_{xk}^{\text{re}} Z_{xxk}^{\text{im}}}{(Z_{xxk}^{\text{re}})^2 + (Z_{xxk}^{\text{im}})^2}, \quad (6.31)$$

$$I_{xk}^{\Delta \text{ re}} = \frac{U_{xk}^{\text{re}} Z_{xxk}^{\text{re}} + U_{xk}^{\text{im}} Z_{xxk}^{\text{im}}}{(Z_{xxk}^{\text{re}})^2 + (Z_{xxk}^{\text{im}})^2}, \quad (6.32)$$

$$I_{xk}^{\Delta \text{ im}} = \frac{U_{xk}^{\text{im}} Z_{xxk}^{\text{re}} - U_{xk}^{\text{re}} Z_{xxk}^{\text{im}}}{(Z_{xxk}^{\text{re}})^2 + (Z_{xxk}^{\text{im}})^2}, \quad (6.33)$$

$$x \in \{a, b, c\},$$

gde su:

$U_{xk}^{\text{re}} = [U_{xk}^{\text{re}}, \bar{U}_{xk}^{\text{re}}]$, $U_{xk}^{\text{im}} = [U_{xk}^{\text{im}}, \bar{U}_{xk}^{\text{im}}]$ – realna i imaginarna komponenta napona na mestu kratkog spoja, respektivno, za čvor sa indeksom k faze x ,

$I_{xk}^{\Delta \text{ re}} = [I_{xk}^{\Delta \text{ re}}, \bar{I}_{xk}^{\Delta \text{ re}}]$, $I_{xk}^{\Delta \text{ im}} = [I_{xk}^{\Delta \text{ im}}, \bar{I}_{xk}^{\Delta \text{ im}}]$ – realna i imaginarna komponenta struje kratkog spoja u Δ -kolu, respektivno, za čvor sa indeksom k faze x ,

$Z_{xxk}^{\text{re}} = [Z_{xxk}^{\text{re}}, \bar{Z}_{xxk}^{\text{re}}]$, $Z_{xxk}^{\text{im}} = [Z_{xxk}^{\text{im}}, \bar{Z}_{xxk}^{\text{im}}]$ – realna i imaginarna komponenta ekvivalentne impedanse, respektivno, za čvor sa indeksom k faze x .

Proračun struja i napona Δ -kola, odnosno režima Δ -kola, vrši se koristeći proračun tokova snaga. U proračunu tokova snaga naponi korena se postavljaju na nulu, a struje izračunate relacijama (6.32) i (6.33) se injektiraju u čvor sa indeksom k . Struje kratkog spoja predstavljene su intervalima zato što naponi na mestu kratkog spoja i ekvivalentne impedanse imaju predstavu preko intervala. Neizvesnosti u režimu Δ -kola, predstavljene intervalima, posledica su neizvesnosti struja na mestu kratkog spoja i impedansi/admitansi potrošača. Neizvesnosti IBDG uvažene su u režimu pre kratkog spoja (svojom varijabilnom snagom), dok su u Δ -kolu modelovane kao konstantne ekscesne struje [21].

Korak 4: Proračun naizmeničnog režima kola sa kratkim spojem

Režim kola pre kratkog spoja poznat je na osnovu proračuna tokova snaga opisanog u Koraku 1, a režim Δ -kola izračunat je kao što je opisano u Koraku 3. Naizmeničan režim sa kratkim spojem dobija se superpozicijom poznatog režima kola pre kratkog spoja i izračunatog režima Δ -kola. Režim Δ -kola se izračunava za sve tri vremenske sekvence (subtranzitnu, tranzitnu i ustaljenu). Stoga, superpozicija poznatog režima kola pre kratkog spoja i izračunatog režima Δ -kola vrši se za sve tri vremenske sekvence. Naponi čvorova i struje grana naizmeničnog režima sa kratkim spojem mogu se izračunati na sledeći način:

$$U_{xi}^{ks\ re} = [\underline{U}_{xi}^{ks\ re}, \overline{U}_{xi}^{ks\ re}] = U_{xi}^{\Delta\ re} + U_{xi}^{re},$$

$$U_{xi}^{ks\ im} = [\underline{U}_{xi}^{ks\ im}, \overline{U}_{xi}^{ks\ im}] = U_{xi}^{\Delta\ im} + U_{xi}^{im},$$

$$I_{xj}^{ks\ re} = [\underline{I}_{xj}^{ks\ re}, \overline{I}_{xj}^{ks\ re}] = I_{xj}^{\Delta\ re} + I_{xj}^{re},$$

$$I_{xj}^{ks\ im} = [\underline{I}_{xj}^{ks\ im}, \overline{I}_{xj}^{ks\ im}] = I_{xj}^{\Delta\ im} + I_{xj}^{im},$$

$$x \in \{a, b, c\}, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Simboli ks i Δ u superskriptu ukazuju na vrednosti režimskih veličina kola sa kratkim spojem i vrednosti režimskih veličina Δ -kola, respektivno. Režimske veličine koje nemaju ks i Δ u superskriptu predstavljaju poznate režimske veličine kola pre kratkog spoja.

Korelacije između DG i potrošača uvažene su u proračunu režima pre kratkog spoja, u proračunu ekvivalentne matrice impedansi koristeći proračun tokova snaga, kao i u proračunu režima Δ -kola. Relacija (4.2.2) može se iskoristiti prilikom sabiranja struja negativno korelisanih DG ili potrošača. Relacija (4.2.3) može se iskoristiti prilikom oduzimanja pozitivno korelisanih DG i potrošača. Uvažavanjem korelacija u proračunu dobijaju se uži intervali a time i realističnije vrednosti režimskih veličina.

Korak 5 Rekonstrukcija režima kola sa kratkim spojem

Režim kola sa kratkim spojem se sastoji od naizmeničnog i jednosmernog režima. Naizmeničan režim se izračunava na način opisan u prethodnim koracima. Jednosmeran režim može se izračunati kao što je opisano u paragrafu 5.2.7. Taj proračun je načelno prikazan pošto nije predmet ove disertacije. Superpozicijom naizmeničnog i jednosmernog režima dobija se režim kola sa kratkim spojem.

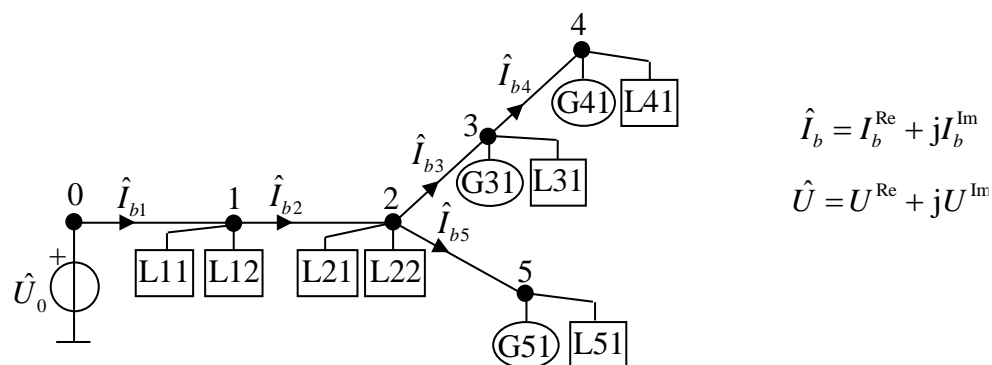
Izračunat režim kola sa kratkim spojem na prethodno opisan način predstavlja pesimističku aproksimaciju režima zbog toga što je naizmeničan režim Δ -kola u subtranzitnoj i tranzitnoj vremenskoj sekvenci pesimistički aproksimiran prostoperiodičnim režimom.

7 NUMERIČKA VERIFIKACIJA ALGORITMA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA ZASNOVANOG NA KORELISANIM INTERVALIMA

Predloženi algoritam za proračun kratkih spojeva zasnovan na korelisanim intervalima verifikovan je na dva primera distributivnih mreža: mreža male dimenzije sa 6 čvorova i mreža velike dimenzije sa 1003 čvora. U oba primera mreža prikazani su uporedni rezultati proračuna kratkih spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i pristupom sa korelisanim intervalima. U oba primera mreža prikazani su rezultati proračuna kratkih spojeva za različite vrste kratkih spojeva (jednofazni, dvofazni sa i bez zemlje i trofazni kratak spoj). Prikazani rezultati proračuna kratkih spojeva u oba primera mreža verifikovani su u literaturi [119]. Pored toga na standardnoj IEEE mreži sa 13 čvorova [142] dat je primer koordinacije prekostrujne zaštite. U tom primeru je za proračun struja kratkih spojeva korišten predloženi algoritam. Na taj način je pokazana primena predloženog algoritma u drugom proračunu.

7.1 PRIMER NA DISTRIBUTIVNOJ MREŽI SA 6 ČVOROVA

Na slici 7.1.1 prikazana je trofazna, radijalna, distributivna mreža sa 6 čvorova gde je balansni čvor, koji predstavlja koren distributivne mreže, označen indeksom 0. Ostalih 5 čvorova su tipa PQ jer su u njima poznate specificirane aktivne i reaktivne snage proizvodnje DG i potrošnje potrošača. Numeracija grana i čvorova izvršena je u skladu sa principom slojeva [13, 135]. Grane i njihovi pripadajući čvorovi na kraju udaljenijem od korena distributivne mreže označeni su istim indeksima. Potrošači su označeni slovom „L“ u kvadratima a DG slovom „G“ u krugovima. Prvi broj u kvadratima i krugovima predstavlja oznaku čvora. Drugi broj u kvadratima i krugovima predstavlja oznaku tipa potrošača ili DG. Bazna vrednost snage iznosi $S^b = 300$ kVA a napona $V^b = 12,47$ kV. Dužine svih grana su iste i iznose 0,3787 milja. Sve grane su uravnotežene sa vrednostima podužnih impedansi $r + jx = (0,306 + j0,627) \Omega/\text{milja}$, dok su u ovom primeru otočne admitanse zanemarene¹.



Slika 7.1.1 – Test distributivna mreža sa 6 čvorova

U tabeli 7.1.1 prikazane su specificirane aktivne i reaktivne snage i faktori snaga potrošača i DG, kao i korelacije između njih. Sve snage su specificirane za nominalni napon. Svi potrošači i DG (njihove aktivne i reaktivne snage) imaju neizvesnost $s^{\text{neiz}} = 5\%$. Snage

¹ U primeru na distributivnoj mreži sa 6 čvorova otočne admitanse vodova su zanemarene zbog jednostavnosti primera. Predloženi algoritam uvažava otočne admitanse vodova što je urađeno u primeru distributivne mreže sa 1003 čvora.

potrošnje potrošača zavise od napona u skladu sa relacijama (2.1.1) i (2.1.2). Koeficijenti učešća delova aktivnih i reaktivnih snaga potrošnje potrošača pri nominalnom naponu, koji su korišćeni za snage svih potrošača, iznose:

$$k_{sp} = k_{sq} = 0,9,$$

$$k_{ip} = k_{iq} = 0,1,$$

$$k_{yp} = k_{yq} = 0.$$

Tabela 7.1.1 – Ulazni podaci za potrošače i DG test primera distributivne mreže sa 6 čvorova

Čvor	1		2		3		4		5	
Potrošači i DG	L11	L12	L21	L22	L31	G31	L41	G41	L51	G51
Aktivna snaga[r.j.]	4,00	2,00	4,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1,00	4,00	1,00
Faktor snage	0,90 ind	0,90 ind	0,90 ind	0,90 ind	0,90 ind	1,00	0,90 ind	1,00	0,90 ind	1,00
Korelacija sa Korelacioni koeficijent	L51	–	L41	–	G31	L31	L21	G51	L11	G41
	–0,58	–	–0,57	–	1,00	1,00	–0,57	–0,85	–0,58	–0,85

Proračuni kratkih spojeva sa svim vrstama kratkih spojeva (jednofazni, dvofazni sa i bez zemlje i trofazni kratak spoj²) primenom determinističkog pristupa, pristupa sa klasičnim intervalima i korelisanim intervalima simulirani su u svim čvorovima distributivne mreže. Rezultati proračuna su prikazani u tabelama 7.1.2 do 7.1.5 i na slikama 7.1.2 do 7.1.5. Na slikama x-osa predstavlja indeks čvora, dok y-osa predstavlja vrednosti struja u procentima, pri čemu se za bazne vrednosti uzimaju struje dobijene primenom determinističkog proračuna za sve čvorove. Na osnovu toga struje determinističkog proračuna (plava linija na slikama) iznose 100 % za sve čvorove. Vrednosti struja za sve čvorove, dobijene proračunima kratkih spojeva koji koriste pristup sa klasičnim (crvena linija na slikama) i korelisanim intervalima (zeleno linija na slikama), izračunate su u procentima u odnosu na vrednosti struja svih čvorova dobijenih determinističkim pristupom. Na slikama su prikazane samo struje faza sa kratkim spojem koje su različite od nule.

U tabeli 7.1.2 prikazani su rezultati struja na mestu kratkog spoja. Rezultati su dobijeni proračunom kratkih spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i pristupom sa korelisanim intervalima. Rezultati su prikazani u slučaju jednofaznog kratkog spoja u fazi L1 u različitim čvorovima sa indeksima od 1 do 5. Na slici 7.1.2 prikazane su struje u slučaju jednofaznog kratkog spoja u fazi L1 u čvorovima sa indeksima od 1 do 5.

U tabeli 7.1.3 prikazani su rezultati struja na mestu kratkog spoja. Rezultati su dobijeni proračunom kratkih spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i pristupom sa korelisanim intervalima. Rezultati su prikazani u slučaju dvofaznog kratkog spoja u fazama L2 i L3 u različitim čvorovima sa indeksima od 1 do 5. Na slici 7.1.3

² Vrednosti struja trofaznih kratkih spojeva sa i bez zemlje u ovom primeru su jako bliske i zbog toga nisu prikazani rezultati proračuna kratkih spojeva za obe vrste trofaznih kratkih spojeva nego samo za trofazne kratke spojeve bez zemlje.

prikazane su struje u slučaju dvofaznog kratkog spoja u fazama L2 i L3 u čvorovima sa indeksima od 1 do 5.

U tabeli 7.1.4 prikazani su rezultati struja na mestu kratkog spoja. Rezultati su dobijeni proračunom kratkih spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i pristupom sa korelisanim intervalima. Rezultati su prikazani u slučaju dvofaznog kratkog spoja u fazama L2 i L3 sa zemljom u različitim čvorovima sa indeksima od 1 do 5. Na slici 7.1.4 prikazane su struje u slučaju dvofaznog kratkog spoja u fazama L2 i L3 sa zemljom u čvorovima sa indeksima od 1 do 5.

U tabeli 7.1.5 prikazani su rezultati struja na mestu kratkog spoja. Rezultati su dobijeni proračunom kratkih spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i pristupom sa korelisanim intervalima. Rezultati su prikazani u slučaju trofaznog kratkog spoja u različitim čvorovima sa indeksima od 1 do 5. Na slici 7.1.5 prikazane su struje u slučaju trofaznog kratkog spoja u čvorovima sa indeksima od 1 do 5.

Na osnovu rezultata u tabelama 7.1.2 do 7.1.5 i na slikama 7.1.2 do 7.1.5 može se zaključiti da proračun kratkih spojeva koji koristi pristup sa korelisanim intervalima daje mnogo uže intervale struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja od pristupa sa klasičnim intervalima. Širina intervala je smanjena zbog uvažених korelacionih koeficijenata u predloženom proračunu.

Krećući se od čvorova u poslednjem sloju ka referentnom čvoru, označenom indeksom 0, može se uočiti da se širine intervala struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja sužavaju. Najveći doprinos vrednostima struja kratkih spojeva imaju koren distributivne mreže i DG. S obzirom na to da DG imaju modelovane neizvesnosti, njihov doprinos strujama kratkih spojeva povećava neizvesnosti struja kratkih spojeva. DG su priključeni u čvorovima sa indeksima 3, 4, i 5. Njihov doprinos strujama kratkih spojeva se smanjuje kada se simuliraju kratki spojevi dalje od DG u čvorovima sa indeksima 1 i 2. Pri tome se smanjuju i neizvesnosti struja kratkih spojeva. Kao posledica toga širine intervala struja kratkih spojeva se sužavaju kada se simuliraju kratki spojevi bliže referentnom čvoru.

Ako se pogleda zavisnost širine intervala struja kratkih spojeva od tipa kratkog spoja može se uočiti je ona značajna. U slučaju proračuna jednofaznog kratkog spoja, jedna vrednost impedanse iz ekvivalentne matrice impedansi i jedna vrednost napona na mestu kratkog spoja je potrebna da se izračunaju struje na mestu kratkog spoja. Sa druge strane u slučaju proračuna trofaznog kratkog spoja, sve vrednosti impedansi iz ekvivalentne matrice impedansi i svi naponi na mestu kratkog spoja potrebni su da se izračunaju struje na mestu kratkog spoja. Kako vrednosti impedansi iz ekvivalentne matrice impedansi i naponi na mestu kratkog spoja sadrže neizvesnosti, što je više tih vrednosti uvaženo u proračunu neizvesnost struje kratkog spoja je veća. Na osnovu toga može se zaključiti da će jednofazni kratak spoj imati najmanju neizvesnost, dok će trofazni kratak spoj imati najveću, što je i potvrđeno rezultatima.

Tabela 7.1.2 – Struje jednofaznih (L1) kratkih spojeva na mestu kratkog spoja

		Kompleksne struje kratkih spojeva [kA]		
Čvor	Faze	Deterministički pristup	Pristup sa klasičnim intervalima	Pristup sa korelisanim intervalima
1	L1	11,751 – j24,362	[11,720, 11,781] + j[-24,389, -24,334]	[11,740, 11,761] + j[-24,371, -24,352]
	L2	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L3	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
2	L1	5,805 – j12,124	[5,778, 5,832] + j[-12,148, -12,099]	[5,795, 5,815] + j[-12,133, -12,115]
	L2	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L3	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
3	L1	3,851 – j8,064	[3,829, 3,874] + j[-8,084, -8,044]	[3,843, 3,860] + j[-8,072, -8,057]
	L2	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L3	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
4	L1	3,004 – j6,382	[2,966, 3,043] + j[-6,429, -6,335]	[2,986, 3,022] + j[-6,404, -6,360]
	L2	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L3	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
5	L1	3,866 – j8,073	[3,845, 3,886] + j[-8,092, -8,055]	[3,857, 3,874] + j[-8,081, -8,066]
	L2	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L3	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]

Tabela 7.1.3 – Struje dvofaznih (L2L3) kratkih spojeva na mestu kratkog spoja

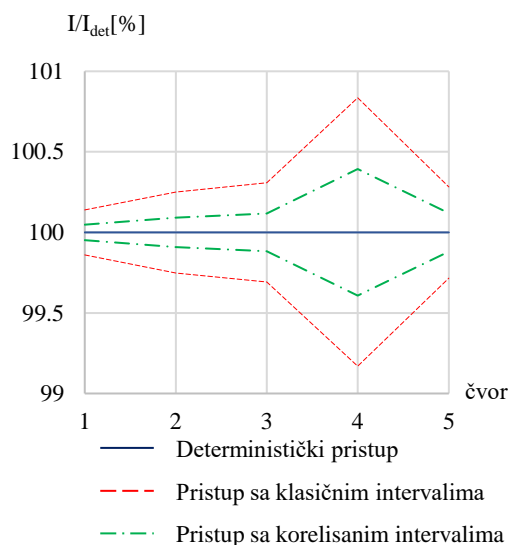
		Kompleksne struje kratkih spojeva [kA]		
Čvor	Faze	Deterministički pristup	Pristup sa klasičnim intervalima	Pristup sa korelisanim intervalima
1	L1	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L2	-21,098 – j10,176	[-21,137, -21,058] + j[-10,217, -10,135]	[-21,111, -21,084] + j[-10,190, -10,163]
	L3	21,098 + j10,176	[21,058, 21,137] + j[10,135, 10,217]	[21,084, 21,111] + j[10,163, 10,190]
2	L1	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L2	-10,500 – j5,027	[-10,535, -10,464] + j[-5,064, -4,991]	[-10,512, -10,487] + j[-5,040, -5,015]
	L3	10,500 + j5,027	[10,464, 10,535] + j[4,991, 5,064]	[10,487, 10,512] + j[5,015, 5,040]
3	L1	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L2	-6,984 – j3,335	[-7,013, -6,955] + j[-3,365, -3,305]	[-6,995, -6,973] + j[-3,347, -3,324]
	L3	6,984 + j3,335	[6,955, 7,013] + j[3,305, 3,365]	[6,973, 6,995] + j[3,324, 3,347]
4	L1	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L2	-5,485 – j2,602	[-5,535, -5,435] + j[-2,645, -2,560]	[-5,508, -5,462] + j[-2,621, -2,583]
	L3	5,485 + j2,602	[5,435, 5,535] + j[2,560, 2,645]	[5,462, 5,508] + j[2,583, 2,621]
5	L1	0 + j0	[0, 0] + j[0, 0]	[0, 0] + j[0, 0]
	L2	-6,992 – j3,348	[-7,018, -6,965] + j[-3,375, -3,320]	[-7,003, -6,981] + j[-3,359, -3,336]
	L3	6,992 + j3,348	[6,965, 7,018] + j[3,320, 3,375]	[6,981, 7,003] + j[3,336, 3,359]

Tabela 7.1.4 – Struje dvofaznih (L2L3G) kratkih spojeva sa zemljom na mestu kratkog spoja

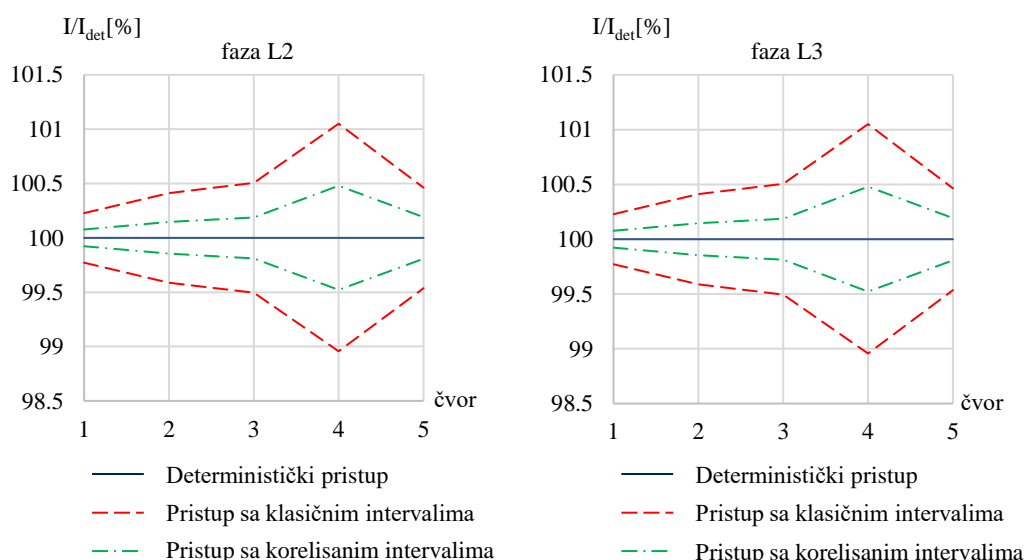
		Kompleksne struje kratkih spojeva [kA]		
Čvor	Faze	Deterministički pristup	Pristup sa klasičnim intervalima	Pristup sa korelisanim intervalima
1	L1	$0 + j0$	$[0, 0] + j[0, 0]$	$[0, 0] + j[0, 0]$
	L2	$-26,973 + j2,004$	$[-27,030, -26,916] + j[1,948, 2,062]$	$[-26,992, -26,954] + j[1,985, 2,024]$
	L3	$15,223 + j22,357$	$[15,167, 15,279] + j[22,301, 22,413]$	$[15,204, 15,242] + j[22,338, 22,376]$
2	L1	$0 + j0$	$[0, 0] + j[0, 0]$	$[0, 0] + j[0, 0]$
	L2	$-13,402 + j1,034$	$[-13,453, -13,351] + j[0,983, 1,086]$	$[-13,420, -13,384] + j[1,017, 1,052]$
	L3	$7,597 + j11,089$	$[7,547, 7,647] + j[11,039, 11,139]$	$[7,579, 7,615] + j[11,072, 11,107]$
3	L1	$0 + j0$	$[0, 0] + j[0, 0]$	$[0, 0] + j[0, 0]$
	L2	$-8,909 + j0,697$	$[-8,951, -8,868] + j[0,655, 0,738]$	$[-8,925, -8,894] + j[0,681, 0,712]$
	L3	$5,058 + j7,368$	$[5,017, 5,099] + j[7,327, 7,408]$	$[5,043, 5,073] + j[7,352, 7,383]$
4	L1	$0 + j0$	$[0, 0] + j[0, 0]$	$[0, 0] + j[0, 0]$
	L2	$-7,000 + j0,638$	$[-7,154, -6,849] + j[0,547, 0,731]$	$[-7,074, -6,927] + j[0,595, 0,681]$
	L3	$3,998 + j5,842$	$[3,884, 4,115] + j[5,710, 5,977]$	$[3,943, 4,054] + j[5,778, 5,907]$
5	L1	$0 + j0$	$[0, 0] + j[0, 0]$	$[0, 0] + j[0, 0]$
	L2	$-8,925 + j0,689$	$[-8,963, -8,886] + j[0,651, 0,727]$	$[-8,940, -8,909] + j[0,673, 0,705]$
	L3	$5,059 + j7,384$	$[5,021, 5,097] + j[7,347, 7,422]$	$[5,043, 5,075] + j[7,369, 7,400]$

Tabela 7.1.5 – Struje trofaznih kratkih spojeva na mestu kratkog spoja

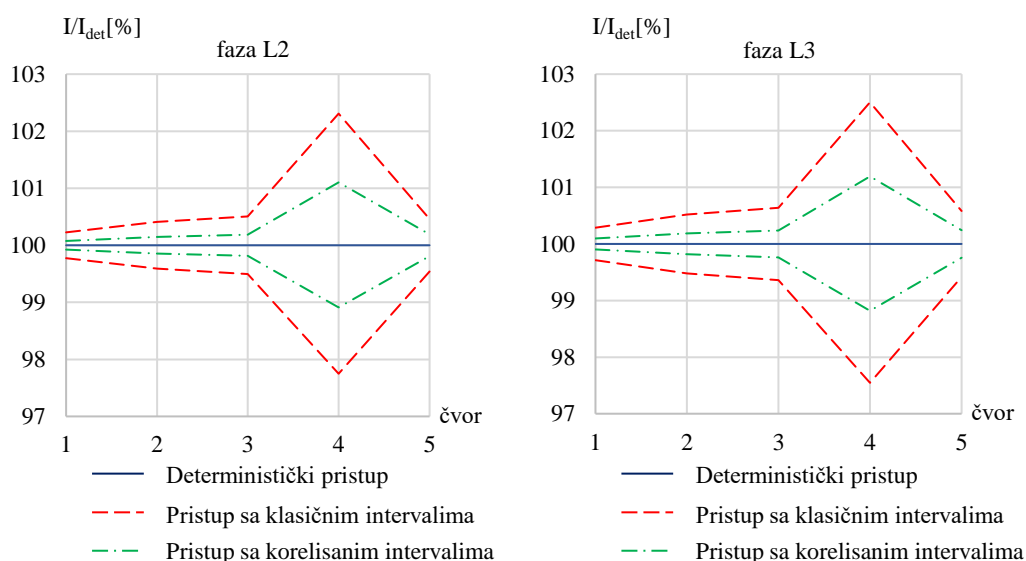
		Kompleksne struje kratkih spojeva [kA]		
Čvor	Faze	Deterministički pristup	Pristup sa klasičnim intervalima	Pristup sa korelisanim intervalima
1	L1	$11,751 - j24,362$	$[11,686, 11,815] + j[-24,426, -24,297]$	$[11,729, 11,773] + j[-24,384, -24,340]$
	L2	$-26,973 + j2,004$	$[-27,070, -26,876] + j[1,907, 2,102]$	$[-27,006, -26,940] + j[1,971, 2,038]$
	L3	$15,223 + j22,357$	$[15,126, 15,319] + j[22,260, 22,454]$	$[15,190, 15,255] + j[22,324, 22,390]$
2	L1	$5,805 - j12,124$	$[5,747, 5,863] + j[-12,182, -12,066]$	$[5,785, 5,826] + j[-12,145, -12,103]$
	L2	$-13,402 + j1,034$	$[-13,489, -13,315] + j[0,947, 1,122]$	$[-13,433, -13,371] + j[1,003, 1,066]$
	L3	$7,597 + j11,089$	$[7,510, 7,684] + j[11,002, 11,176]$	$[7,566, 7,628] + j[11,058, 11,120]$
3	L1	$3,851 - j8,064$	$[3,804, 3,899] + j[-8,111, -8,017]$	$[3,834, 3,869] + j[-8,082, -8,046]$
	L2	$-8,909 + j0,697$	$[-8,980, -8,838] + j[0,625, 0,768]$	$[-8,936, -8,883] + j[0,670, 0,723]$
	L3	$5,058 + j7,368$	$[4,987, 5,129] + j[7,297, 7,438]$	$[5,032, 5,085] + j[7,341, 7,394]$
4	L1	$3,005 - j6,286$	$[2,810, 3,206] + j[-6,539, -6,041]$	$[2,910, 3,102] + j[-6,409, -6,165]$
	L2	$-6,946 + j0,540$	$[-7,203, -6,698] + j[0,390, 0,695]$	$[-7,069, -6,825] + j[0,469, 0,612]$
	L3	$3,941 + j5,746$	$[3,751, 4,136] + j[5,528, 5,971]$	$[3,850, 4,033] + j[5,640, 5,853]$
5	L1	$3,866 - j8,073$	$[3,822, 3,909] + j[-8,117, -8,030]$	$[3,847, 3,884] + j[-8,092, -8,055]$
	L2	$-8,925 + j0,689$	$[-8,990, -8,859] + j[0,624, 0,755]$	$[-8,952, -8,897] + j[0,662, 0,716]$
	L3	$5,059 + j7,384$	$[4,994, 5,124] + j[7,319, 7,449]$	$[5,032, 5,086] + j[7,357, 7,412]$



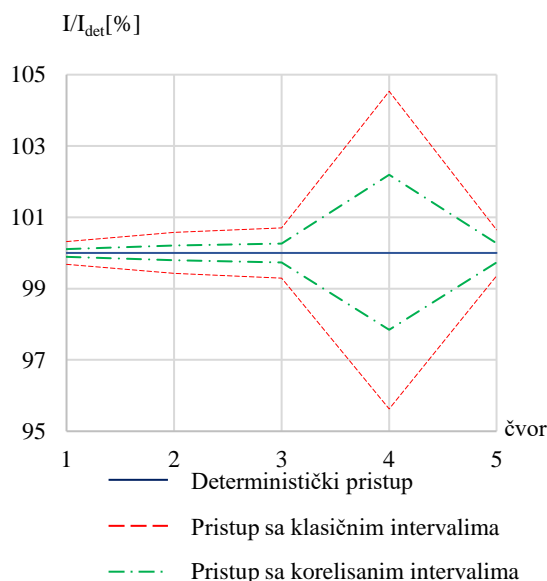
Slika 7.1.2 – Struje jednofaznih (L1) kratkih spojeva na mestu kratkog spoja



Slika 7.1.3 – Struje dvofaznih (L2L3) kratkih spojeva na mestu kratkog spoja



Slika 7.1.4 – Struje dvofaznih (L2L3G) kratkih spojeva sa zemljom na mestu kratkog spoja



Slika 7.1.5 – Struje trofaznih kratkih spojeva na mestu kratkog spoja

Rezultati na slikama 7.1.6 do 7.1.9 predstavljaju struje grana, dobijene proračunom kratkih spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i sa korelisanim intervalima. Izvršene su simulacije u slučajevima jednofaznog kratkog spoja u fazi L1, dvofaznog kratkog spoja u fazama L2 i L3, dvofaznog kratkog spoja u fazama L2 i L3 sa zemljom i trofaznog kratkog spoja u čvoru sa indeksom 4. Na slikama x-osa predstavlja indeks grane a y-osa predstavlja vrednost struje grane.

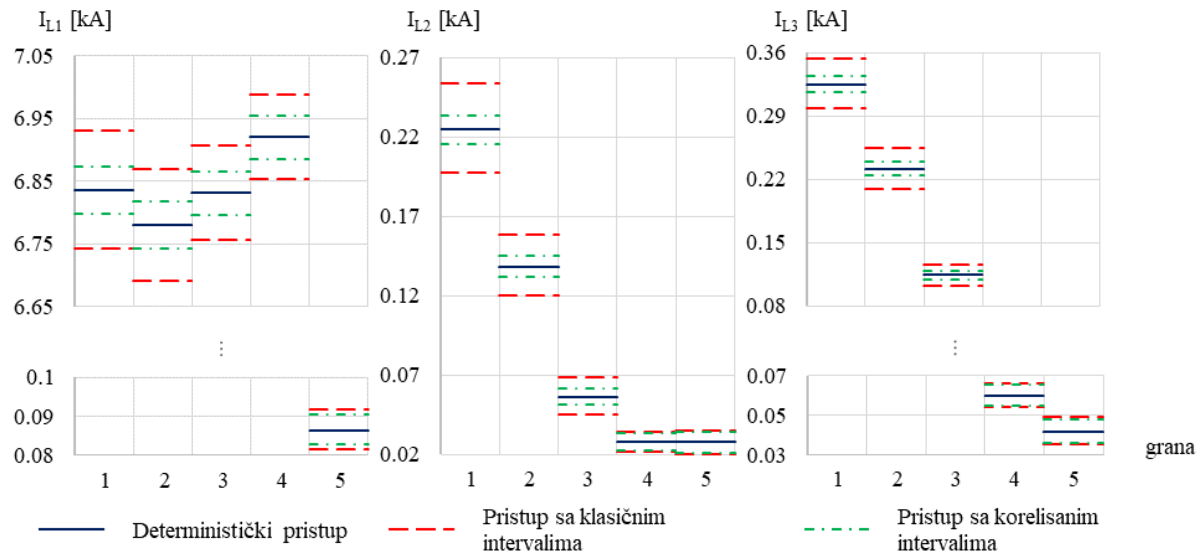
Na osnovu rezultata na slikama 7.1.6 do 7.1.9 može se zaključiti da proračun kratkih spojeva koji koristi pristup sa korelisanim intervalima daje značajno uže intervale struja kratkih spojeva po granama (putanji kratkog spoja) od pristupa sa klasičnim intervalima.

Pristup sa klasičnim intervalima daje intervale struja kratkih spojeva po granama koji se sužavaju krećući se od grane sa indeksom 1 do mesta kratkog spoja. To sužavanje intervala nije mnogo izraženo u fazama pogođenim kratkim spojem. Struje kratkih spojeva po granama predstavljaju zbir struja iz režima pre kratkog spoja i režima Δ -kola. U režimu pre kratkog spoja neizvesnosti struja po granama dominantno potiču od neizvesnosti potrošača, čiji je veći deo potrošnje napojen iz korena distributivne mreže (potrošnja aktivne snage potrošača je 23 r.j. a proizvodnja DG je 3 r.j.). Stoga, što su grane bliže korenu mreže to znači da imaju veću neizvesnost struja u režimu pre kratkog spoja. U Δ -kolu neizvesnost struje na mestu kratkog spoja potiče od neizvesnosti napona na mestu kratkog spoja i ekvivalentne matrice impedansi. Najveći deo struje na mestu kratkog spoja potiče od korena distributivne mreže. Na putanji od mesta kratkog spoja do korena mreže u Δ -kolu nalaze se impedanse/admitanse potrošača koje dodatno unose neizvesnost u struje po granama. Zbog toga struje po granama u Δ -kolu koje su bliže korenu mreže sadrže veće neizvesnosti. Superpozicijom režima pre kratkog spoja i režima Δ -kola dobijaju se struje po granama koje se sužavaju krećući se od korena mreže do mesta kratkog spoja.

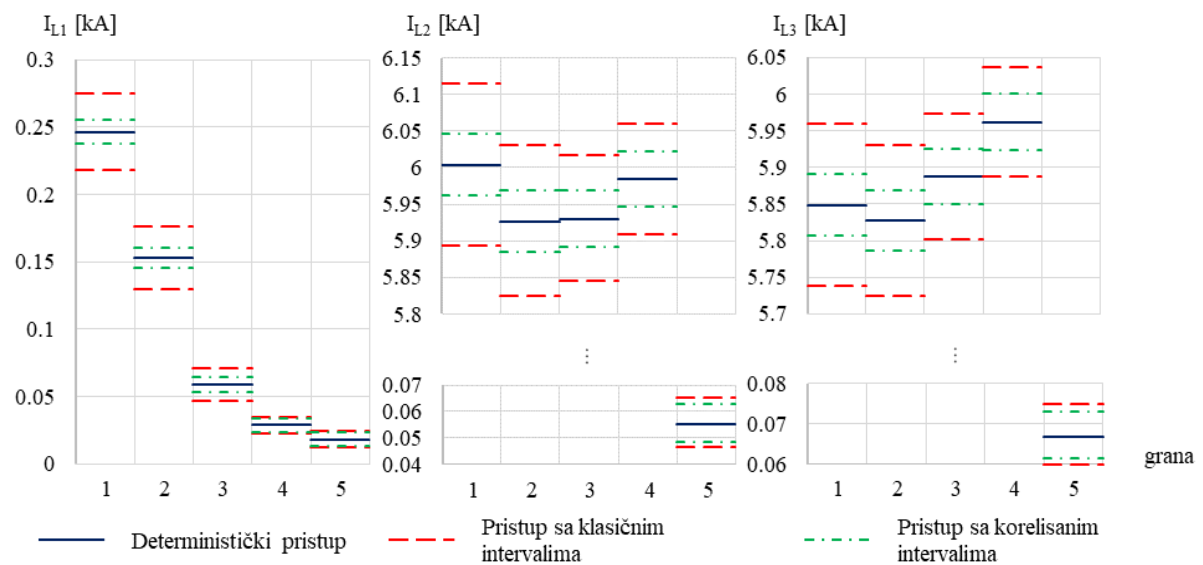
Pristup sa korelisanim intervalima daje intervale struja kratkih spojeva po granama čije se širine ne razlikuju značajno jedne od drugih, ali se značajno razlikuju od širina intervala struja dobijenih pristupom sa klasičnim intervalima. U slučaju intervala struja trofaznog kratkog spoja, struja po grani sa indeksom 2 ($2\Delta L = 330,95$ A) sadrži manju neizvesnost od struje po grani sa indeksom 3 ($2\Delta L = 332,71$ A), za razliku od struja dobijenih pristupom sa klasičnim intervalima. Na vrednosti struja kratkih spojeva potrošači mnogo manje utiču nego DG. Kada se razmatra uticaj neizvesnosti potrošača na neizvesnosti struja

kratkim spojeva, u pristupu sa klasičnim intervalima se vidi da se taj uticaj ne može zanemariti. U pristupu sa uvažanim korelacijama značajno su smanjene neizvesnosti koje unose potrošači u struje kratkih spojeva. U tom slučaju DG dominantno unose neizvesnost u struje kratkih spojeva. Stoga, struja po grani sa indeksom 2, koja potiče od korena distributivne mreže, ima manju neizvesnost od struje po grani sa indeksom 3, koja potiče od DG G51. Ovi rezultati pokazuju da pristup sa koreliranim intervalima daje realističniji režim od pristupa sa klasičnim intervalima.

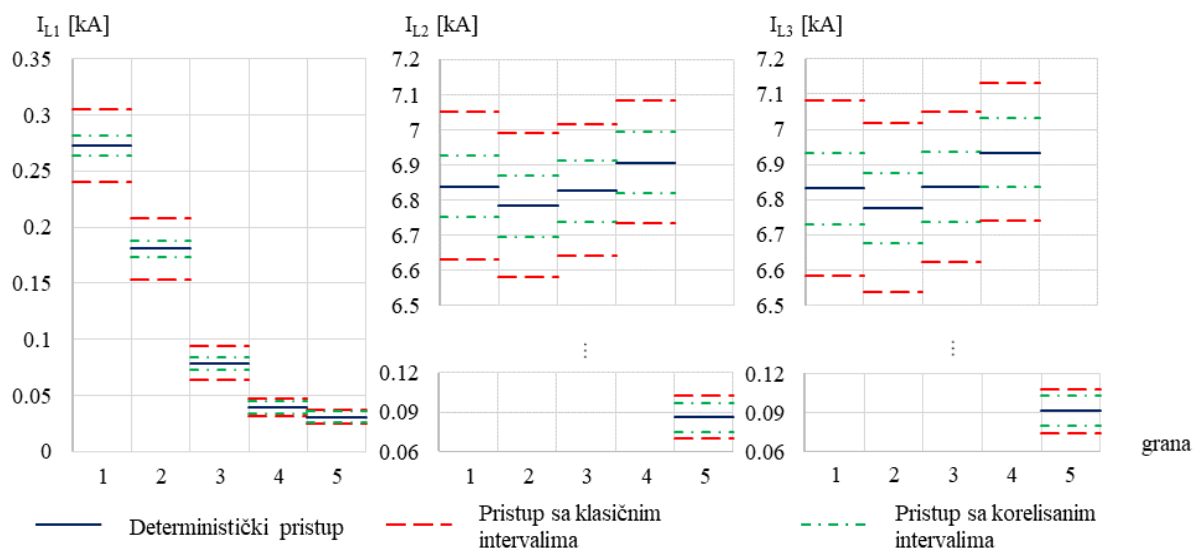
Širine intervala struja u fazama koje nisu obuhvaćene kratkim spojem zanemarljive su u odnosu na struje faza obuhvaćenih kratkim spojem.



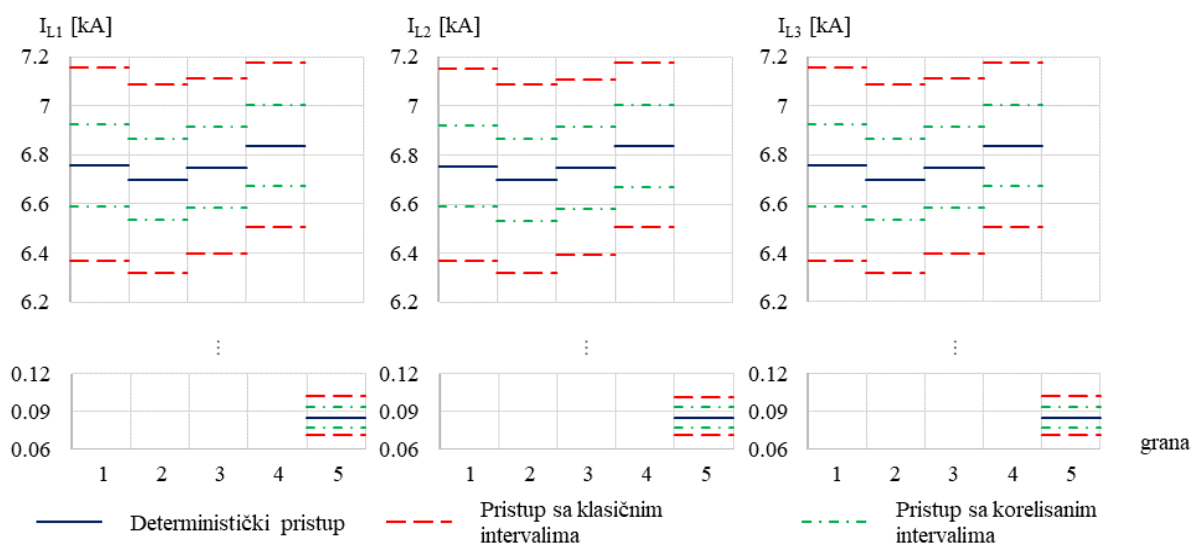
Slika 7.1.6 – Struje grana u slučaju jednofaznog (L1) kratkog spoja u čvoru 4



Slika 7.1.7 – Struje grana u slučaju dvofaznog (L2L3) kratkog spoja u čvoru 4



Slika 7.1.8 – Struje grana u slučaju dvofaznog (L2L3G) kratkog spoja sa zemljom u čvoru 4



Slika 7.1.9 – Struje grana u slučaju trofaznog kratkog spoja u čvoru 4

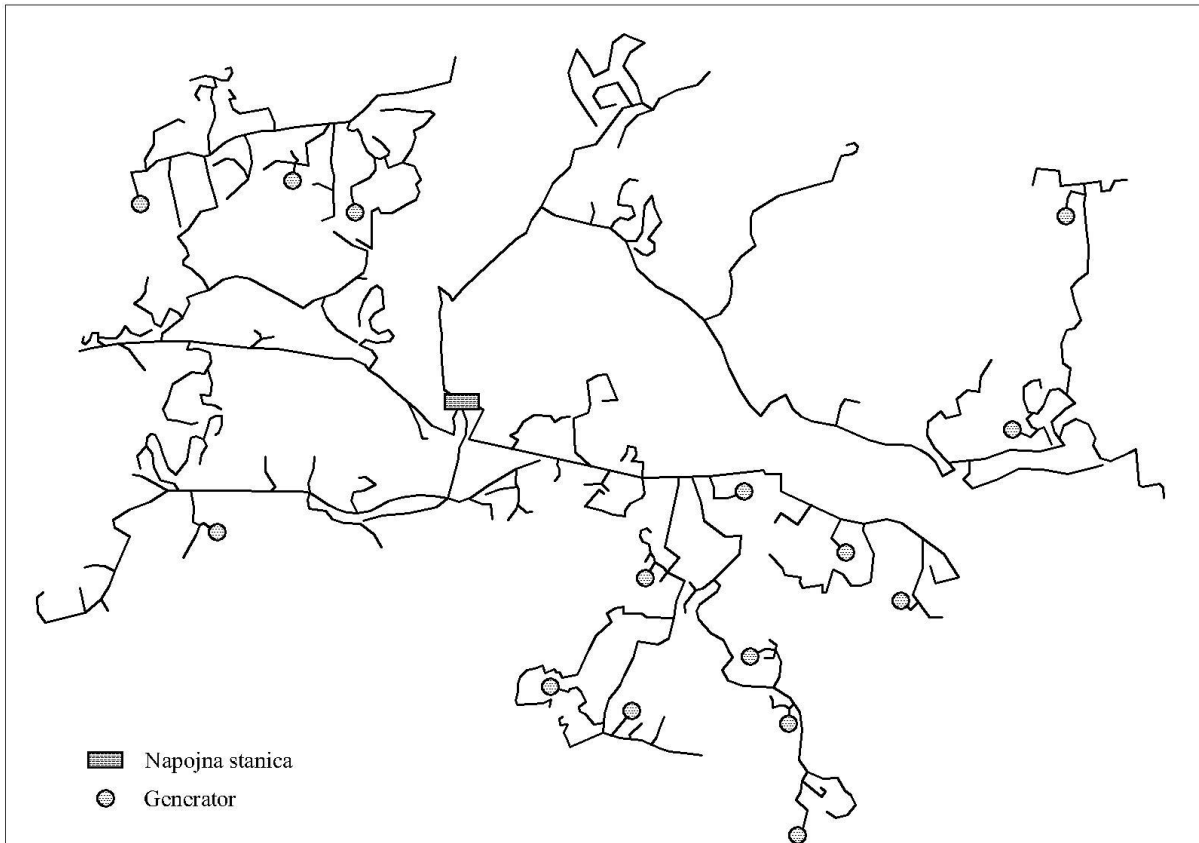
7.2 PRIMER NA DISTRIBUTIVNOJ MREŽI SA 1003 ČVORA

Distributivna mreža, koja predstavlja primer realne mreže, ima karakteristike prikazane u tabeli 7.2.1. Na slici 7.2.1 prikazana je distributivna mreža sa napojnom stanicom (označenom pravougaonikom), izvodima i DG (označenim krugovima). Potrošači su raspoređeni celom dužinom izvoda.

Tabela 7.2.1 – Podaci o distributivnoj mreži sa 1003 čvora

Broj izvoda	4
Broj grana	1002
Broj potrošača	496
Broj DGs	15
Ukupna dužina mreže [km]	94.81

Bazna vrednost snage iznosi $S^b = 300$ kVA a napona $V^b = 110$ kV i $V^b = 20$ kV. Proračunom korelacija na osnovu ulaznog skupa istorijskih podataka i podataka prognoze dobijeni su korelacioni koeficijenti koji su ovde iskorišteni. U ovoj distributivnoj mreži postoji pet parova korelisanih potrošača koji su svrstani u grupu 1, tri para korelisanih DG koji su svrstani u grupu 2 i jedan par gde su korelisani potrošač i DG koji su svrstani u grupu 3. Svi potrošači i DG koji su korelisani imaju neizvesnost $s^{neiz} = 5\%$.



Slika 7.2.1 – Distributivna mreža sa 1003 čvora

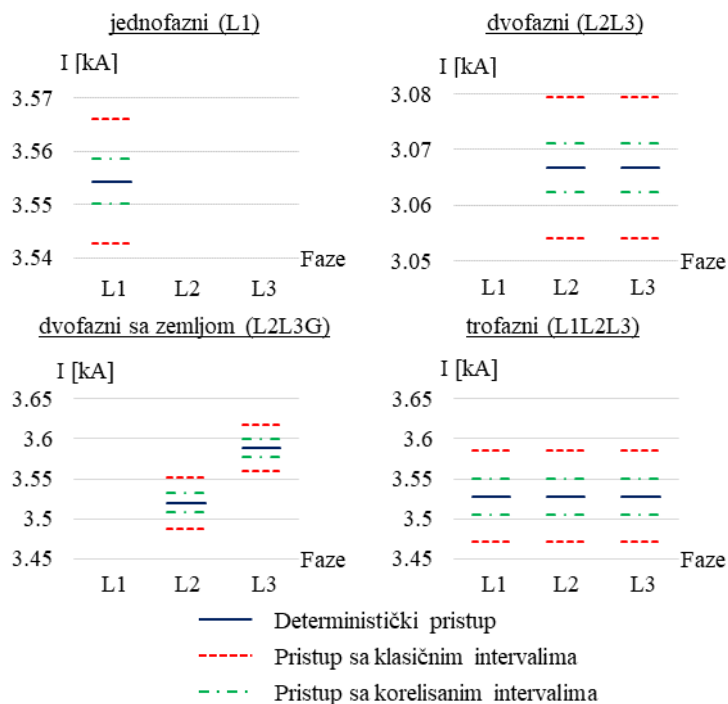
Na slici 7.2.2 prikazani su rezultati proračuna kratkih spojeva koje čine struje kratkih spojeva na mestu kratkog spoja. Rezultati su dobijeni determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i sa korelisanim intervalima za različite tipove kratkih spojeva: jednofazni, dvofazni, dvofazni sa zemljom i trofazni, koji su simulirani na kraju jednog izvoda.

Slično kao u primeru distributivne mreže sa 6 čvorova može se zaključiti da pristup sa korelisanim intervalima daje uže intervale struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja u odnosu na pristup sa klasičnim intervalima, kao što se i vidi na slici 7.2.2.

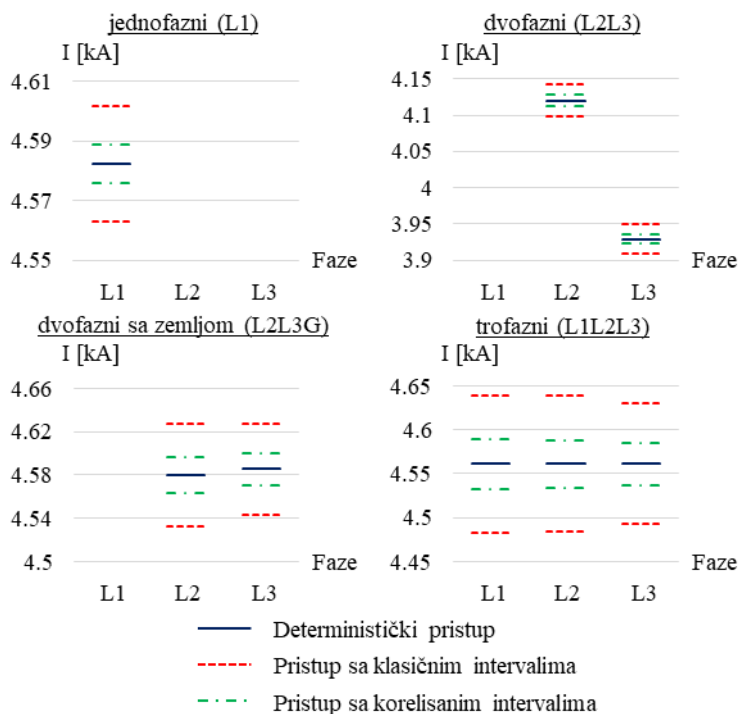
Može se uočiti da tip kratkog spoja utiče na širinu intervala struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja, ali manje nego u primeru distributivne mreže sa 6 čvorova. To je posledica broja potrošača i DG sa neizvesnostima relativno u odnosu na ukupan broj potrošača i DG koji je manji u ovom primeru u odnosu na primer distributivne mreže sa 6 čvorova.

Širine intervala struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja, koje su izračunate pristupom sa korelisanim intervalima, više od dva puta su uže od onih izračunatih pristupom sa klasičnim intervalima. To je posledica činjenice da su u ovom primeru svi potrošači i DG

sa neizvesnostima korelisani (neizvesnosti su modelovane kod 11 potrošača i 7 DG), što nije slučaj u primeru distributivne mreže sa 6 čvorova gde su samo pojedini potrošači i DG sa neizvesnostima korelisani a pri tome su neizvesnosti modelovane za sve potrošače i DG.



Slika 7.2.2 – Struje kratkih spojeva na mestu kratkog spoja za različite tipove kratkih spojeva simulirane na kraju izvoda



Slika 7.2.3 – Struje na prvoj grani izvoda u fazama pogođenim kratkim spojem za različite tipove kratkih spojeva simulirane na kraju izvoda

Na slici 7.2.3 prikazani su rezultati proračuna kratkih spojeva koje čine struje na prvoj grani izvoda u fazama pogođenim kratkim spojem. Te struje su dobijene proračunom kratkih

spojeva sa determinističkim pristupom, pristupom sa klasičnim intervalima i sa korelisanim intervalima, pri čemu su simulirani različiti tipovi kratkih spojeva na kraju izvoda: jednofazni, dvofazni, dvofazni sa zemljom i trofazni.

Na osnovu rezultata na slici 7.2.3 može se zaključiti da pristup sa korelisanim intervalima daje približno tri puta uže intervale struja kratkih spojeva po grani (putanji kratkog spoja) od pristupa sa klasičnim intervalima, što je posledica toga što su svi DG i potrošači sa neizvesnostima korelisani.

Na slici 7.2.4 predstavljene su širine intervala modula struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja za simuliran trofazni kratak spoj, pri čemu korelacioni koeficijenti grupe 1 i grupe 2 imaju vrednosti od -1 do 0 , a korelacioni koeficijenti grupe 3 imaju vrednost 0 ili 1 .

Može se uočiti da je mali uticaj varijacije korelacionog koeficijenta grupe 2 (korelacija između DG) na neizvesnost modula struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja. U proračunu ekvivalentne matrice impedansi, DG su modelovani konstantnom impedansom dok su potrošači modelovani impedansom/admitansom koja sadrži neizvesnosti. To je razlog zbog koga varijacije korelacionih koeficijenta grupe 2 imaju mali uticaj na neizvesnost modula struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja, za razliku od varijacija korelacionog koeficijenta grupe 1 (korelacija između potrošača). Uticaj varijacija korelacionog koeficijenta grupe 3 (korelacija između potrošača i DG) na neizvesnost modula struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja sličan je kao uticaj varijacija korelacionog koeficijenta grupe 2.

Na slici 7.2.5 predstavljene su širine intervala modula struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja za trofazni kratak spoj na kraju izvoda. Neizvesnost potrošnje ima vrednosti od 5% do 30% , dok neizvesnost DG varira od 5% do 10% .

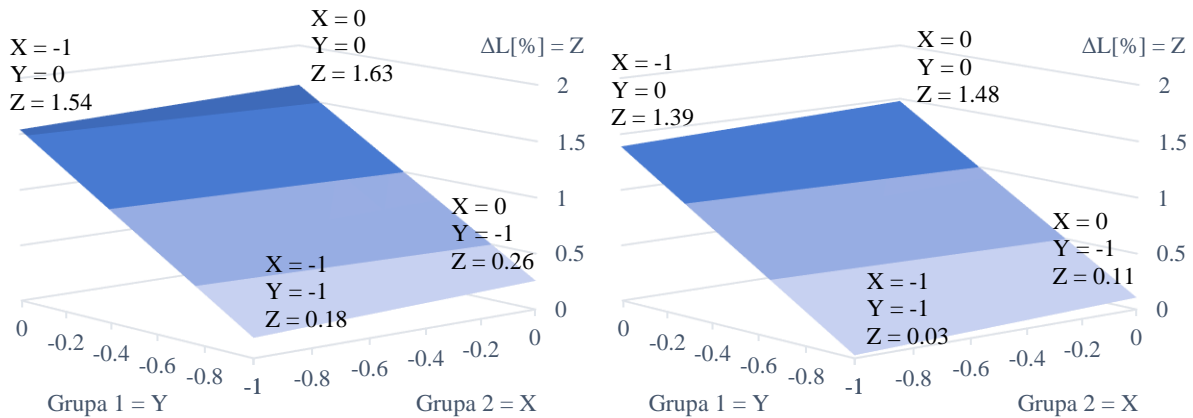
Varijacije neizvesnosti DG ne utiču značajno na neizvesnost modula struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja, za razliku od varijacija neizvesnosti potrošača. Neizvesnost DG utiče na neizvesnost napona na mestu kratkog spoja, ali ne i na neizvesnost ekvivalentne matrice impedansi. Neizvesnost potrošača utiče i na neizvesnost napona na mestu kratkog spoja i na neizvesnost ekvivalentne matrice impedansi. Ovo je razlog većeg uticaja varijacija neizvesnosti potrošača u poređenju sa neizvesnošću DG na moduo struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja.

Na slici 7.2.6 predstavljene su širine intervala modula struja na prvoj grani izvoda za trofazni kratak spoj na kraju izvoda, pri čemu korelacioni koeficijenti grupe 1 i grupe 2 imaju vrednosti od -1 do 0 , a korelacioni koeficijenti grupe 3 imaju vrednost 0 ili 1 .

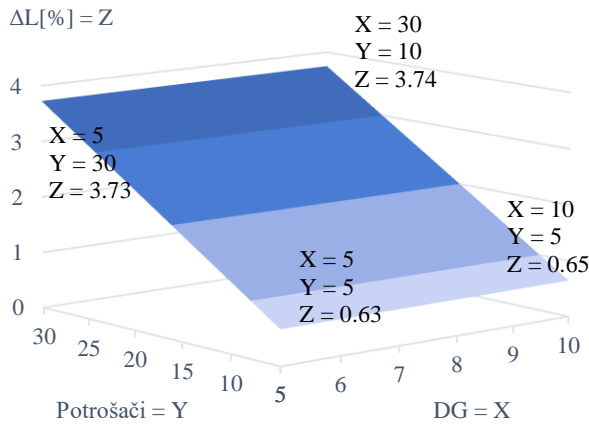
Neizvesnost modula struja na prvoj grani izvoda, koja zavisi od korelacionih koeficijenata, slična je neizvesnostima modula struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja na slici 7.2.4. Mala razlika je posledica postojanja potrošača bez neizvesnosti koji redukuju relativnu širinu intervala modula struje na prvoj grani izvoda. Uticaj varijacija korelacionih koeficijenata svih koreliranih grupa na neizvesnost modula struje na prvoj grani izvoda je slična onoj opisanoj za neizvesnosti modula struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja.

Na slici 7.2.7 predstavljene su širine intervala modula struja na prvoj grani izvoda za trofazni kratak spoj na kraju izvoda. Neizvesnost potrošnje ima vrednosti od 5% do 30% , dok neizvesnost DG varira od 5% do 10% .

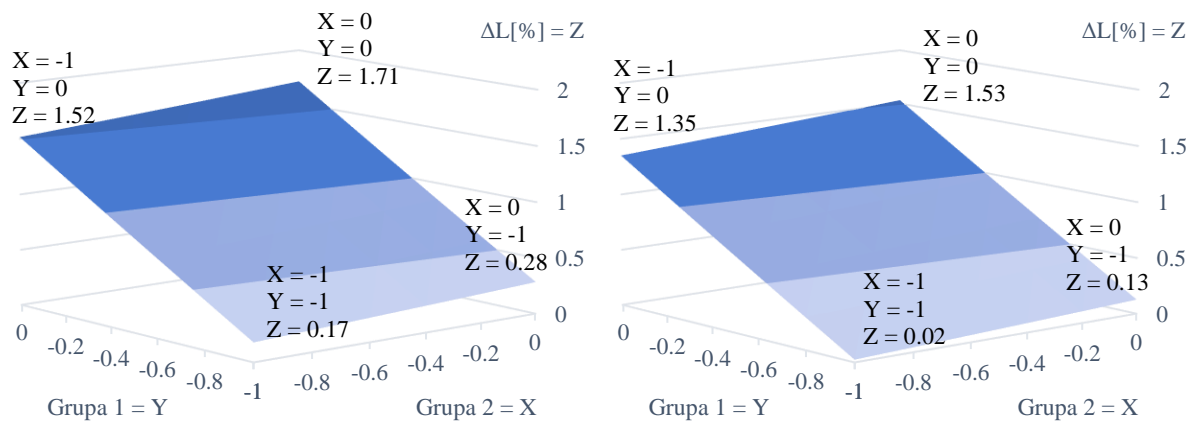
Neizvesnost modula struje na prvoj grani izvoda, koja zavisi od neizvesnosti potrošača i DG, slična je kao neizvesnost modula struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja na slici 7.2.5. Mala razlika je posledica postojanja potrošača bez neizvesnosti duž izvoda koji redukuju relativnu širinu intervala modula struje na prvoj grani izvoda.



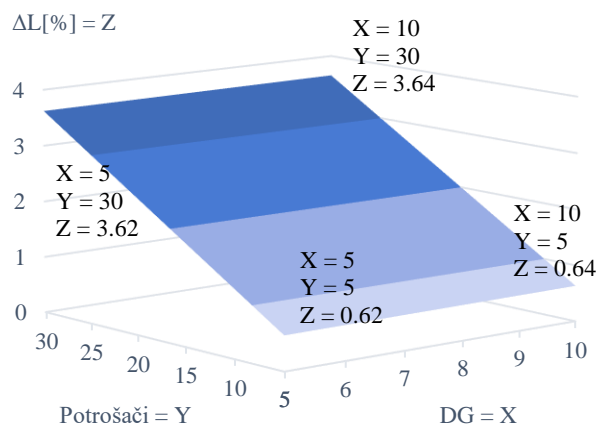
Korelacioni koeficijent za grupu 3 je 0
 Slika 7.2.4 – Širina intervala modula struja kratkih spojeva na mestu kratkog spoja za trofazan kratak spoj na kraju izvoda u funkciji korelacionih koeficijenata



Slika 7.2.5 – Širina interval modula struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja za trofazni kratak spoj na kraju izvoda u funkciji neizvesnosti potrošača i DG



Korelacioni koeficijent za Grupu 3 je 0
 Slika 7.2.6 – Širina intervala modula struje na prvoj grani izvoda za trofazan kratak spoj na kraju izvoda u funkciji korelacionih koeficijenata



Slika 7.2.7 – Širina interval modula struje na prvoj grani izvoda za trofazni kratak spoj na kraju izvoda u funkciji nezvesnosti potrošača i DG

U predstavljenim primerima na distributivnoj mreži sa 1003 čvora mala je razlika u rezultatima dobijenim predloženim algoritmom i pristupom sa klasičnim intervalima. Razlika je mala zbog malog broja korelisanih elemenata u distributivnoj mreži. Sa većim brojem solarnih i vetrogeneratora u distributivnim mrežama (u budućnosti će ih biti više) biće moguće izračunati korelacije između više elemenata. Praktično velik broj njih će se nalaziti na istoj lokaciji ili vrlo blizu jedni drugima. U tom slučaju uvažavanje korelacija će imati mnogo veći doprinos.

7.3 PRIMER KOORDINACIJE PREKOSTRUJNE ZAŠTITE NA IEEE MREŽI SA 13 ČVOROVA

U ovom primeru je prikazana koordinacija prekostrujne zaštite koja koristi predložen algoritam za proračun kratkih spojeva zasnovan na korelisanim intervalima. Primer je prikazan na IEEE mreži sa 13 čvorova [142] koja je za potrebe ovog primera modifikovana. Originalna IEEE mreža je radijalna, miksovana mreža sa 13 čvorova, 12 grana i 9 potrošača. Modifikovana IEEE mreža sa 13 čvorova koja je korištena u ovom primeru prikazana je na slici 7.3.1. Numeracija grana i čvorova izvršena je u skladu sa principom slojeva [13, 135], pri čemu su indeksi čvorova preuzeti iz originalne mreže. Modifikacije originalne IEEE mreže sa 13 čvorova su sledeće:

1. Rastavni uređaj između čvorova sa indeksima 671 i 692 modelovan je kao bezimpedantna trofazna grana;
2. Dodat je napojni transformator označen indeksom 1, koji je povezan između novododatog čvora sa indeksom 0 i čvora sa indeksom 650, čiji su podaci preuzeti iz [142] od transformatorske stanice koja napaja IEEE mrežu sa 13 čvorova;
3. Uvedeni su novi čvorovi sa indeksima 700 i 701 kojima su kreirane nove bezimpedantne grane sa indeksima 15 i 16, respektivno;
4. Dodat je DG u čvor sa indeksom 633, čiji su parametri:

Nominalna snaga 2 MVA;

Nominalni napon 4,16 kV;

Subtranzitna reaktansa direktnog i inverznog redosleda 30% i nultog 15 %;

Statorski namotaji su povezani u zvezdu koja je uzemljena;

Snaga proizvodnje 1,5 MVA;

Neizvesnost 5 %;

5. Svim potrošačima je pridružena neizvesnost 5 %;
6. Potrošači priključeni u čvorovima sa indeksima 645 i 646 su korelisani, pri čemu je koeficijent korelacije $-0,58$.

Bezimpedantne grane sa indeksima 15 i 16 sadrže po jedan prekostrujni relej sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom. Neka relej na grani sa indeksom 15 ima oznaku R15, a na grani sa indeksom 16 oznaku R16. Strujno zavisne vremenske karakteristike prekostrujnih releja uzete su prema IEC standardu [143, 144]:

$$t = \frac{TMS \times \alpha}{\left(\frac{I}{CTR \times PS}\right)^\beta - 1}, \quad (7.3.1)$$

gde su:

t – vreme delovanja relejom,

I – struja kratkog spoja,

α, β – koeficijenti osnovnog podešenja releja,

CTR – (current transformer ratio) odnos transformacije strujnog mernog transformatora,

PS – (plug setting) strujno podešenje releja,

TMS – (time multiplier setting) koeficijent finog podešenja releja.

Oba releja R15 i R16 imaju normalno zavisne vremenske karakteristike ($\alpha = 0,14, \beta = 0,02$) i odnos transformacije strujnih mernih transformatora $CTR = 240$. Koeficijenti finog podešenja oba releja mogu imati vrednost od 0,1 do 1,1. Strujno podešenje releja R15 je $PS_{R15} = 1$ A, a releja R16 je $PS_{R16} = 2,5$ A. Struja podešenja zaštite sa relejom R15 je $I_{pR15} = PS_{R15} \times CTR = 240$ A, a sa relejom R16 je $I_{pR16} = PS_{R16} \times CTR = 600$ A. Stepen vremenske selektivnosti između releja CTI (coordination time interval) iznosi 0,3 s.

U ovom primeru su simulirani trofazni kratki spojevi u čvorovima sa indeksima 680 i 700. Za napon balansnog čvora, čiji je indeks 0 i koji predstavlja koren mreže, uzet je nominalni napon višenaponske strane transformatora između čvorova sa indeksima 0 i 650 koji iznosi 115 kV. Proračunom kratkih spojeva determinističkim pristupom i pristupom sa korelisanim intervalima dobijene su vrednosti struja kroz grane sa indeksima 15 i 16 na kojima se nalaze releji. Na osnovu vrednosti tih struja izvršena je koordinacija prekostrujnih releja. Moduli struja dobijeni proračunom kratkih spojeva prikazani su u tabeli 7.3.1.

Koristeći zadate podatke o relejima i rezultate proračuna kratkih spojeva izvršen je proračun koordinacije prekostrujnih releja. Problem koordinacije prekostrujnih releja predstavljaju sekvence operacija u cilju izolacije kvara za bilo koji kvar u šticejnoj zoni, pri čemu je potrebno da operativno vreme releja bude dovoljno malo [145]. Koordinacija prekostrujnih releja sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom postiže se izborom

Formulisani linearni optimizacioni problem sa intervalima rešava se linearnim programiranjem sa intervalima. Linearni program sa intervalima se može rešiti nalaženjem jakog rešenja (strong solution) transformisanog intervalnog linearnog programa [147], što predstavlja način na koji je u ovom primeru izvršena koordinacija koristeći intervale. Rezultat proračuna koordinacije prekostrujne zaštite su koeficijenti finog podešenja releja, koji su prikazani u tabeli 7.3.2.

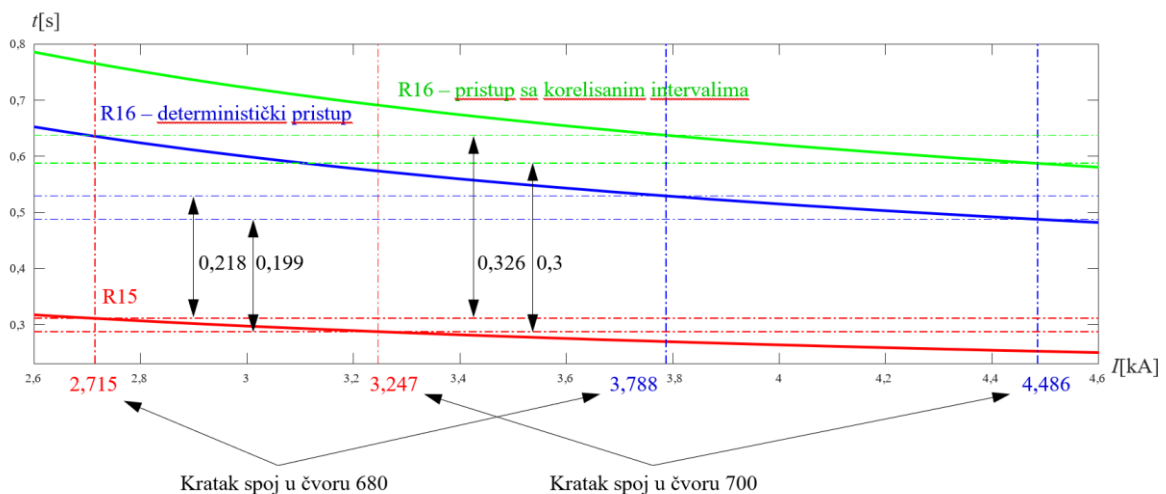
Tabela 7.3.2 – Vrednosti koeficijenata finog podešenja releja dobijenih na osnovu proračuna kratkih spojeva sa determinističkim pristupom i pristupom sa korelisanim intervalima

TMS		
Releji	Deterministički pristup	Pristup sa korelisanim intervalima
R15	0,1	0,1
R16	0,156026	0,188076

Na slici 7.3.2 su prikazane karakteristike prekostrujnih releja R15 i R16. Za koordinaciju su od interesa minimalne struje kratkih spojeva na grani sa indeksom 15 i maksimalne struje kratkih spojeva na grani sa indeksom 16.

U slučaju trofaznog kratkog spoja u čvoru sa indeksom 680, koristeći struje proračuna kratkih spojeva sa determinističkim pristupom za proračun koordinacije, stepen vremenske selektivnosti između releja iznosi 0,218 s. Ako bi se u slučaju trofaznog kratkog spoja u čvoru sa indeksom 680 koristile struje proračuna kratkih spojeva sa korelisanim intervalima za proračun koordinacije, stepen vremenske selektivnosti između releja bi iznosio 0,326 s.

U slučaju trofaznog kratkog spoja u čvoru sa indeksom 700, koristeći struje proračuna kratkih spojeva sa determinističkim pristupom za proračun koordinacije, stepen vremenske selektivnosti između releja iznosi 0,199 s. Ako bi se u slučaju trofaznog kratkog spoja u čvoru sa indeksom 700 koristile struje proračuna kratkih spojeva sa korelisanim intervalima za proračun koordinacije, stepen vremenske selektivnosti između releja bi iznosio 0,3 s.



Slika 7.3.2 – Karakteristike prekostrujnih releja dobijene proračunom koordinacije koristeći struje proračuna kratkih spojeva sa determinističkim pristupom i pristupom sa korelisanim intervalima

Vrednosti stepena vremenske selektivnosti koje iznose 0,199 s i 0,218 s, dobijene proračunom koordinacije prekostrujne zaštite sa strujama kratkih spojeva izračunatim determinističkim pristupom, ne zadovoljavaju stepen vremenske selektivnosti od 0,3 s koji je zadat u ovom primeru. U slučaju korišćenja struja kratkih spojeva izračunatih pristupom sa korelisanim intervalima, vrednosti stepena vremenske selektivnosti koje iznose 0,3 s i 0,326 s zadovoljavaju zadat stepen vremenske selektivnosti od 0,3 s. Osim toga, maksimalna greška koja se pravi koristeći proračun sa determinističkim pristupom u odnosu na proračun sa korelisanim intervalima iznosi $0,326 \text{ s} - 0,218 \text{ s} = 0,108 \text{ s}$, što je 49,5 % greška u odnosu na vrednosti dobijenu determinističkim pristupom zbog toga što nisu uvažene neizvesnosti proizvodnje i potrošnje.

8 ZAKLJUČAK

Zbog nedostatka postupaka za proračuna kratkih spojeva koji uvažavaju neizvesnosti proizvodnje DER i potrošnje potrošača u savremenim distributivnim mrežama, u ovoj disertaciji je razvijen postupak za proračun kratkih spojeva koji uvažava pomenute neizvesnosti. U uvodu su razmotreni postojeći postupci za proračun kratkih spojeva sa uvažanim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje i izdvojeni su njihovi glavni nedostaci zbog kojih su neprimenjivi u savremenim distributivnim mrežama:

1. Nemogućnost primene na realnim mrežama velikih dimenzija. Niz proračuna sa različitim simulacijama ulaznih parametara predstavlja najefikasniji pristup do sada za uvažavanje neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva. Potreba za velikom računarskom moći i vreme potrebno za proračun glavni su nedostaci zbog kojih je ovakav pristup nemoguće primeniti na mreže velikih dimenzija;
2. Nemogućnost direktnog uvažavanja neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva čak kada su u pitanju mreže malih dimenzija sa nekoliko stotina čvorova. Korišćenje analitičkih funkcija teorije verovatnoće predstavlja dosadašnji pristup direktnog uvažavanja neizvesnosti proizvodnje i potrošnje u proračunu kratkih spojeva. Takvim pristupom izuzetno je komplikovano modelovati neizvesnosti koje bi se uvažile u proračunu kratkih spojeva. Osim toga takav pristup je neefikasan i neprimenjiv čak kada su u pitanju mreže malih dimenzija;
3. S obzirom na to da proračun kratkih spojeva predstavlja jedan od osnovnih proračuna elektroenergetskih sistema čije rezultate koristi veliki broj drugih proračuna, kvalitet rezultata drugih proračuna direktno zavisi od kvaliteta rezultata proračuna kratkih spojeva. Stoga, postojeći postupci za proračun kratkih spojeva nisu u mogućnosti da odgovore na zahtev drugih proračuna da uvažavaju neizvesnosti proizvodnje i potrošnje i na taj način daju realističnije rezultate.

Da bi se prevazišli navedeni nedostaci, u disertaciji su razmotreni teorijski i praktični aspekti uvažavanja neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva. Pri tome su postignuti sledeći ciljevi koji su u uvodu postavljeni:

1. Neizvesnosti proizvodnje DER i potrošnje potrošača direktno su uvažene u proračunu kratkih spojeva. Neizvesnosti su modelovane intervalima. Na taj način je postignuto to da se sve pogodnosti intervalne aritmetike mogu koristiti u proračunu kratkih spojeva i time jednostavno uvažavaju neizvesnosti u proračunu;
2. Predloženi algoritam daje izračunat režim sistema sa kratkim spojem koji je dosta realističniji od režima sistema sa kratkim spojem izračunatim determinističkim pristupima;
3. Korelacije između proizvodnje DER i potrošnje potrošača direktno su uvažene u proračunu kratkih spojeva. S obzirom na to da distributivne mreže imaju veliki broj DER i potrošača, uvažavanje neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva toliko velikog broja elemenata uticao bi na ogromne neizvesnosti režimskih veličina i doveo bi do neupotrebljivih rezultata. Zbog toga su primenom korelacija smanjene neizvesnosti režimskih veličina;

4. Predloženi algoritam se efikasno primenjuje na realnim mrežama velike dimenzije sa velikim brojem DER i potrošača;
5. Relejna zaštita se može mnogo preciznije podesiti i koordinisati koristeći maksimalne i minimalne vrednosti intervala režimskih veličina, koji su rezultat predloženog postupka za proračun kratkih spojeva koji uvažava neizvesnosti proizvodnje i potrošnje, umesto rezultata determinističkih algoritama. Osim za relejnu zaštitu, rezultati predloženog algoritma mogu se koristiti i za druge proračune koji koriste proračun kratkih spojeva. Na taj način će drugi proračuni moći da daju kvalitetnije rezultate na osnovu realističnijeg režima mreže sa kratkim spojem.

Rezultati proračuna kratkih spojeva, dobijeni numeričkom verifikacijom razvijenog postupka koji je zasnovan na klasičnim i na korelisanim intervalima, upoređeni su sa rezultatima kratkih spojeva dobijenih determinističkim pristupom. Centralne vrednosti intervala struja za oba tipa proračuna zasnovanih na pristupu sa intervalima imaju skoro iste vrednosti (ili tačno iste) kao struje dobijene proračunom kratkih spojeva sa determinističkim pristupom. Time je pokazano da se proširenjem aritmetike sa realnim brojevima u proračunu kratkih spojeva intervalnom aritmetikom dobijaju dosledni rezultati.

Iz prikazanih rezultata numeričke verifikacije može se zaključiti da upotreba korelacionih koeficijenata dovodi do značajnog sužavanja intervala na isti način za malu mrežu sa 6 čvorova i veliku distributivnu mrežu sa 1003 čvora. Štaviše, kako bi se oponašali uslovi velikih realnih distributivnih mreža, različite neizvesnosti potrošača (od 5 % do 30 %) i DG (od 5 % do 10 %) su simulirane i uzeto je da korelacioni koeficijenti variraju od 0 do 1. Dobijeni rezultati dokazuju da je predloženi algoritam robustan i da se može efikasno koristiti za rešavanje problema kratkih spojeva mreža velikih dimenzija sa uvaženim neizvesnostima potrošača i DG.

Na osnovu razmatranja teorijskih i praktičnih aspekata uvažavanja neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva, buduća istraživanja potrebno je da se usmere u sledećim pravcima:

1. Detaljnije modelovanje neizvesnosti u proračunu kratkih spojeva uvažavanjem verovatnoće u intervalima, pri čemu je potrebno da se ne naruši efikasnost proračuna;
2. Modelovanje neizvesnosti koristeći AE intervale (affine arithmetic intervals) u cilju smanjenja neizvesnosti zbog intervalnog problema zavisnosti;
3. Smanjenje neizvesnosti zbog intervalnog problema zavisnosti prilikom rešavanja sistema linearnih jednačina korišćenjem nekih drugih tehnika za njihovo rešavanje;
4. Primena proračuna kratkih spojeva sa uvaženim neizvesnostima proizvodnje i potrošnje u određivanju lokacije kvara, kao i u drugim proračunima koji koriste proračun kratkih spojeva da dobiju režim kola sa kratkim spojem;
5. Modelovanje neizvesnosti parametara svih ostalih elemenata elektroenergetskog sistema i njihovo uvažavanje u proračunu kratkih spojeva;
6. Modelovanje i uvažavanje neizvesnosti u dinamičkim proračunima kratkih spojeva, posebno u mikromrežama koje se nalaze u autonomnom pogonu.

9 PRILOZI

U ovoj glavi dati su prilozi koji su važni za obrađenu materiju u disertaciji, ali su izdvojeni da ne opterećuju osnovni deo disertacije. U delu 9.1 prikazan je proračun rednih i otočnih parametara vodova golih provodnika. U delu 9.2 prikazani su matematički modeli režima ansambla kratkih spojeva za različite vrste kratkih spojeva koji su simulirani u čvoru. U delu 9.3 prikazano je izvođenje relacija za proračun struja na mestu kratkog spoja u Δ -kolu za različite vrste kratkih spojeva koji su simulirani u čvoru.

9.1 PRORAČUN PARAMETARA VODOVA GOLIH PROVODNIKA

U ovom delu prikazan je proračun parametara vodova golih provodnika u faznom domenu. Proračun rednih parametara na osnovu Karsonovih obrazaca prikazan je u paragrafu 9.1.1. Proračun otočnih parametara na osnovu koeficijenata potencijala prikazan je u paragrafu 9.1.2. Proračuni parametara izloženi su u skladu sa literaturom [82].

9.1.1 Redni parametri

Redni parametri voda su rezistansa i reaktansa. Rezistansa nadzemnog voda golih provodnika određuje se na osnovu relacije:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9.1.1.1)$$

gde su:

ρ – specifična otpornost provodnika,

l – dužina provodnika,

S – poprečni presek provodnika.

Izvođenje reaktanse nadzemnog voda golih provodnika prikazano je u nastavku. Neka se razmatraju dva provodnika i i j koji se nalaze u blizini. Sopstvena induktivnost L_{ii} provodnika i i međusobna induktivnost L_{ij} provodnika i i j se definišu na sledeći način:

$$L_{ii} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{GMR_i} \quad [\text{H/m}], \quad (9.1.1.2)$$

$$L_{ij} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D_{ij}} \quad [\text{H/m}], \quad (9.1.1.3)$$

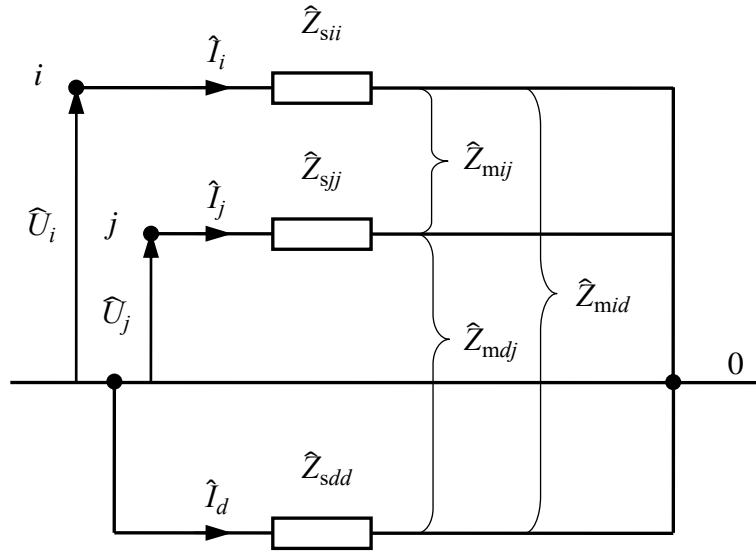
gde su:

GMR_i – srednji geometrijski poluprečnik provodnika i ,

D_{ij} – rastojanje između provodnika i i j .

Množenjem navedenih induktivnosti kružnom frekvencijom dobija se odgovarajuća sopstvena i međusobna reaktansa. U slučaju kada je režim mreže nesimetričan, tada postoji povratna struja kroz zemlju. U tom slučaju potrebno je uvažiti zemlju kao povratni put za povratnu struju u proračunu sopstvenih i međusobnih impedansi. Neka se razmatraju dva provodnika i i j i zemlja kao povratni put, kao što je prikazano na slici 9.1.1.1. Provodnici su

uzemljeni na jednom kraju. Sopstvene i međusobne impedanse provodnika, koje su prikazane na slici 9.1.1.1, mogu se izračunati koristeći relacije (9.1.1.2) i (9.1.1.3).



Slika 9.1.1.1 – Dvofazni vod

Kada se za čvor 0 napiše prvi Kirhofov zakon, a za konturu koju čine provodnik i i zemlja napiše drugi Kirhofov zakon, dobija se:

$$\hat{I}_i + \hat{I}_j + \hat{I}_d = 0, \quad (9.1.1.4)$$

$$\hat{U}_i = \hat{Z}_{sii}\hat{I}_i + \hat{Z}_{mij}\hat{I}_j + \hat{Z}_{mid}\hat{I}_d - (\hat{Z}_{mdi}\hat{I}_i + \hat{Z}_{mdj}\hat{I}_j + \hat{Z}_{sdd}\hat{I}_d). \quad (9.1.1.5)$$

Kada se iz relacije (9.1.1.4) izrazi struja \hat{I}_d i uvrsti u relaciju (9.1.1.5) i nakon toga grupišu impedanse uz struje \hat{I}_i i \hat{I}_j dobija se:

$$\hat{U}_i = (\hat{Z}_{sii} + \hat{Z}_{sdd} - \hat{Z}_{mid} - \hat{Z}_{mdi})\hat{I}_i + (\hat{Z}_{mij} + \hat{Z}_{sdd} - \hat{Z}_{mdj} - \hat{Z}_{mid})\hat{I}_j. \quad (9.1.1.6)$$

Sada se na osnovu relacije (9.1.1.6) mogu definisati sopstvena \hat{Z}_{ii} i međusobna impedansa \hat{Z}_{ij} sa uvažnim uticajem zemlje kao povratnog provodnika:

$$\hat{Z}_{ii} = \hat{Z}_{sii} + \hat{Z}_{sdd} - \hat{Z}_{mid} - \hat{Z}_{mdi}, \quad (9.1.1.7)$$

$$\hat{Z}_{ij} = \hat{Z}_{mij} + \hat{Z}_{sdd} - \hat{Z}_{mdj} - \hat{Z}_{mid}. \quad (9.1.1.8)$$

Impedanse \hat{Z}_{ii} i \hat{Z}_{ij} mogu se odrediti na sledeći način:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{ii} &= r_i + jx_{ii} + r_d + jx_{dd} - jx_{id} - jx_{di} = r_i + r_d + \\ j2\omega &(\ln \frac{1}{GMR_i} + \ln \frac{1}{GMR_d} - \ln \frac{1}{D_{id}} - \ln \frac{1}{D_{di}}) \times 10^{-4} = \\ r_i + r_d &+ j2\omega(\ln \frac{1}{GMR_i} + \ln \frac{D_{id}D_{di}}{GMR_d}) \times 10^{-4} [\Omega/\text{km}], \end{aligned} \quad (9.1.1.9)$$

$$\begin{aligned}\hat{Z}_{ij} &= jx_{ij} + r_d + jx_{dd} - jx_{dj} - jx_{id} = r_d + \\ & j2\omega\left(\ln\frac{1}{D_{ij}} + \ln\frac{1}{GMR_d} - \ln\frac{1}{D_{dj}} - \ln\frac{1}{D_{id}}\right) \times 10^{-4} = \\ & r_d + j2\omega\left(\ln\frac{1}{D_{ij}} + \ln\frac{D_{dj}D_{id}}{GMR_d}\right) \times 10^{-4} \text{ [}\Omega\text{/km]}.\end{aligned}\quad (9.1.1.10)$$

gde je ω kružna frekvencija.

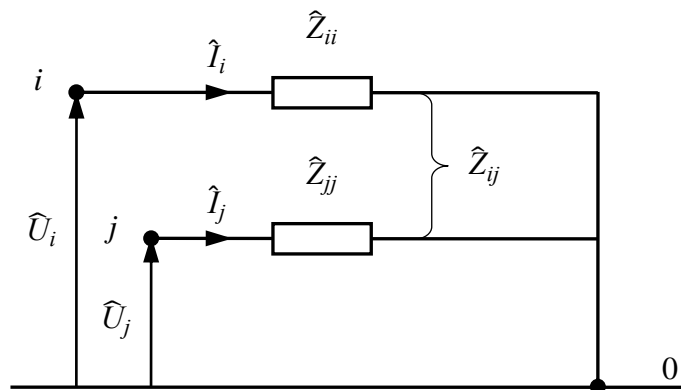
Relacije (9.1.1.9) i (9.1.1.10) za proračun sopstvene i međusobne impedanse praktično se ne mogu koristiti zbog nepoznavanja rezistanse zemlje r_d , srednjeg geometrijskog rastojanja zemlje GMR_d , kao i rastojanja D_{id} , D_{di} i D_{dj} . Zbog toga su uvedene pretpostavke koje su opisane u literaturi [82] gde su izvedeni Karsonovi obrasci za proračun sopstvenih i međusobnih impedansi:

$$\hat{Z}_{ii} = r_i + \left[\pi^2 f + j4\pi\left(\ln\frac{1}{GMR_i} + 7,6786 + \frac{1}{2}\ln\frac{\rho}{f}\right)\right] \times 10^{-4} \text{ [}\Omega\text{/km]}, \quad (9.1.1.11)$$

$$\hat{Z}_{ij} = \left[\pi^2 f + j4\pi\left(\ln\frac{1}{D_{ij}} + 7,6786 + \frac{1}{2}\ln\frac{\rho}{f}\right)\right] \times 10^{-4} \text{ [}\Omega\text{/km]}, \quad (9.1.1.12)$$

gde je f frekvencija sistema.

Sada se slika 9.1.1.1 može prikazati kao slika 9.1.1.2.

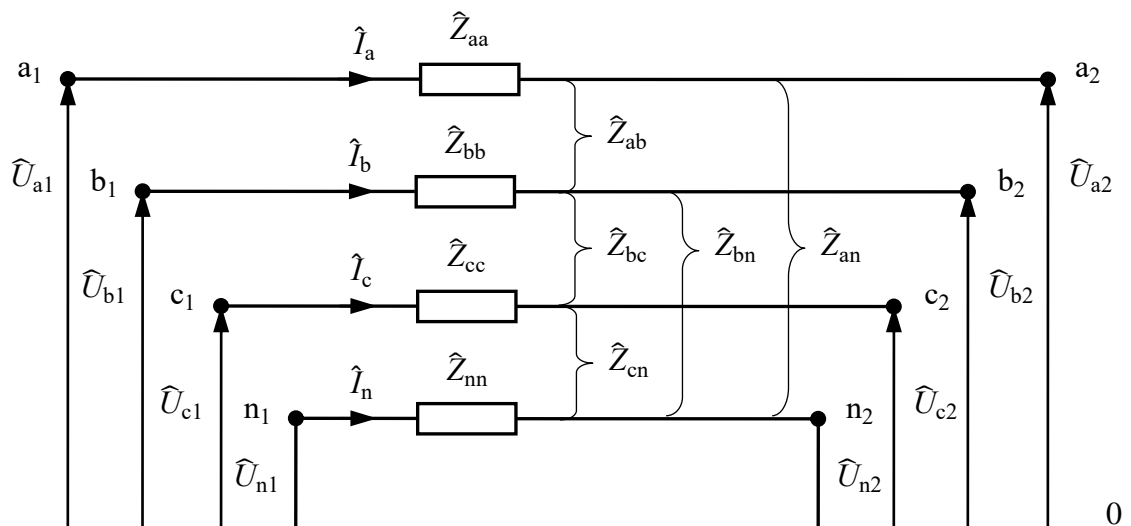


Slika 9.1.1.2 – Dvofazni vod sa sopstvenim impedansama i međusobnom impedansom u kojima je uvažena zemlja

Neka se razmatra trofazni vod sa neutralnim provodnikom kao što je prikazano na slici 9.1.1.3.

Primenom Karsonovih obrazaca i drugog Kirhofovog zakona može se napisati matricna relacija:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{a1} \\ \hat{U}_{b1} \\ \hat{U}_{c1} \\ \hat{U}_{n1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_{a2} \\ \hat{U}_{b2} \\ \hat{U}_{c2} \\ \hat{U}_{n2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{na} \\ \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{nb} \\ \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{nc} \\ \hat{Z}_{an} & \hat{Z}_{bn} & \hat{Z}_{cn} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \\ \hat{I}_n \end{bmatrix}. \quad (9.1.1.13)$$



Slika 9.1.1.3 – Trofazni vod sa neutralnim provodnikom

Matričnu relaciju (9.1.1.13) potrebno je redukovati na dimenziju 3×3 , što se postiže primenom Kronove redukcije [82, 148]. Neutralni provodnik je uzemljen na oba kraja pa su naponi na njegovim krajevima jednaki nuli. Na osnovu toga može da se napiše relacija:

$$0 = 0 + \hat{Z}_{an}\hat{I}_a + \hat{Z}_{bn}\hat{I}_b + \hat{Z}_{cn}\hat{I}_c + \hat{Z}_{nn}\hat{I}_n. \quad (9.1.1.14)$$

Kada se iz relacije (9.1.1.14) izrazi struja \hat{I}_n i uvrsti u relaciju (9.1.1.13) dobija se:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{a1} \\ \hat{U}_{b1} \\ \hat{U}_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_{a2} \\ \hat{U}_{b2} \\ \hat{U}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} - \frac{\hat{Z}_{na}\hat{Z}_{an}}{\hat{Z}_{nn}} & \hat{Z}_{ba} - \frac{\hat{Z}_{na}\hat{Z}_{bn}}{\hat{Z}_{nn}} & \hat{Z}_{ca} - \frac{\hat{Z}_{na}\hat{Z}_{cn}}{\hat{Z}_{nn}} \\ \hat{Z}_{ab} - \frac{\hat{Z}_{nb}\hat{Z}_{an}}{\hat{Z}_{nn}} & \hat{Z}_{bb} - \frac{\hat{Z}_{nb}\hat{Z}_{bn}}{\hat{Z}_{nn}} & \hat{Z}_{cb} - \frac{\hat{Z}_{nb}\hat{Z}_{cn}}{\hat{Z}_{nn}} \\ \hat{Z}_{ac} - \frac{\hat{Z}_{nc}\hat{Z}_{an}}{\hat{Z}_{nn}} & \hat{Z}_{bc} - \frac{\hat{Z}_{nc}\hat{Z}_{bn}}{\hat{Z}_{nn}} & \hat{Z}_{cc} - \frac{\hat{Z}_{nc}\hat{Z}_{cn}}{\hat{Z}_{nn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix}, \quad (9.1.1.15)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{a1} \\ \hat{U}_{b1} \\ \hat{U}_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_{a2} \\ \hat{U}_{b2} \\ \hat{U}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Z}'_{aa} & \hat{Z}'_{ba} & \hat{Z}'_{ca} \\ \hat{Z}'_{ab} & \hat{Z}'_{bb} & \hat{Z}'_{cb} \\ \hat{Z}'_{ac} & \hat{Z}'_{bc} & \hat{Z}'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix}. \quad (9.1.1.16)$$

Na ovaj način izvedeni su redni parametri trofaznog voda golih provodnika. U slučaju jednofaznog ili dvofaznog voda redni parametri se dobijaju iz relacije (9.1.1.16) potiskivanjem vrsta i kolona nedostajućih faza.

9.1.2 Otočni parametri

Otočni parametri voda su konduktansa i susceptansa. Konduktansa vodova golih provodnika se u proračunima distributivnih mreža praktično uvek zanemaruje. Susceptansa voda izvedena je u nastavku primenom koeficijenata potencijala.

Neka se razmatraju dva provodnika i i j koji se nalaze iznad zemlje. Na slici 9.1.2.1 prikazani su provodnici i i j sa svojim slikama i' i j' . Napon između provodnika i i zemlje je:

$$\widehat{U}_i = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + q_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right), \quad (9.1.2.1)$$

gde su:

ϵ – permitivnost sredine u kojoj se nalaze provodnici,

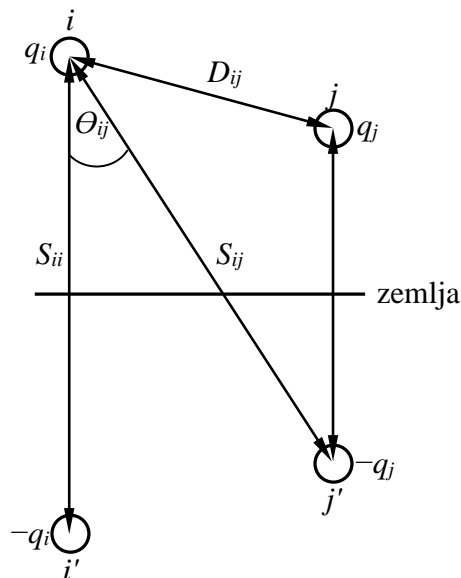
q_i, q_j – naelektrisanja provodnika i i j ,

RD_i – poluprečnik provodnika i ,

D_{ij} – rastojanje između provodnika i i j ,

S_{ii} – rastojanje između provodnika i i njegove „slike“ i' ,

S_{ij} – rastojanje između provodnika i i slike provodnika $j - j'$.



Slika 9.1.2.1 – Provodnici i i j sa svojim „slikama“ i' i j'

Kada se relacija (9.1.2.1) napiše na sledeći način:

$$\widehat{U}_i = P_{ii}q_i + P_{ij}q_j, \quad (9.1.2.2)$$

moгу se definisati koeficijenti potencijala:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{S_{ii}}{RD_i}, \quad (9.1.2.3)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}}. \quad (9.1.2.4)$$

Neka se razmatra trofazni vod sa neutralnim provodnikom kao što je prikazano na slici 9.1.1.3 u prethodnom paragrafu. Matrica koeficijenata potencijala voda sa te slike je:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ba} & P_{ca} & P_{na} \\ P_{ab} & P_{bb} & P_{cb} & P_{nb} \\ P_{ac} & P_{bc} & P_{cc} & P_{nc} \\ P_{an} & P_{bn} & P_{cn} & P_{nn} \end{bmatrix}. \quad (9.1.2.5)$$

Nakon primene Kronove redukcije [82, 148] matrica koeficijenata potencijala dimenzije 4×4 može se redukovati na matricu dimenzije 3×3 :

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} P'_{aa} & P'_{ba} & P'_{ca} \\ P'_{ab} & P'_{bb} & P'_{cb} \\ P'_{ac} & P'_{bc} & P'_{cc} \end{bmatrix}. \quad (9.1.2.6)$$

Sada se inverzijom tako dobijene matrice potencijala dobija matrica kapacitivnosti:

$$\mathbf{C} = \mathbf{P}'^{-1} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ba} & C_{ca} \\ C_{ab} & C_{bb} & C_{cb} \\ C_{ac} & C_{bc} & C_{cc} \end{bmatrix}. \quad (9.1.2.7)$$

Koristeći matricu kapacitivnosti (9.1.2.7) matrica otočnih parametara, koja sadrži samo susceptanse, može se napisati na sledeći način:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + j2\pi f \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ba} & C_{ca} \\ C_{ab} & C_{bb} & C_{cb} \\ C_{ac} & C_{bc} & C_{cc} \end{bmatrix}. \quad (9.1.2.8)$$

Na ovaj način izvedeni su otočni parametri trofaznog voda golih provodnika. U slučaju jednofaznog ili dvofaznog voda otočni parametri se dobijaju iz relacije (9.1.2.8) potiskivanjem vrsta i kolona nedostajućih faza.

9.2 MATEMATIČKI MODELI REŽIMA ANSAMBLA KRATKIH SPOJEVA

U ovom delu su predstavljeni matematički modeli režima ansambla kratkih spojeva za različite vrste kratkih spojeva simuliranih u čvoru. Na slici 6.2 prikazan je ansambl kratkog spoja za kratak spoj simuliran u čvoru sa indeksom k . Matematički model režima ansambla kratkog spoja prikazanog na slici 6.2 može se opisati uz pomoć tri skupa relacija: relacije uslova kratkog spoja (6.28), relacije insertovanih idealnih naponskih generatora (6.29) i relacije uticaja ostatka Δ -kola na režim čvora sa kratkim spojem (6.30). Za različite vrste kratkih spojeva biće prikazane različite TKS i relacije kojima se opisuju matematički modeli režima ansambla kratkih spojeva.

Relacije matematičkog modela režima ansambla kratkog spoja koje su iste za sve vrste kratkih spojeva simuliranih u trofaznom čvoru su:

Relacije insertovanih idealnih naponskih generatora:

$$\hat{U}_{ak}^A = \hat{U}_{a'k}^A - \hat{U}_{ak}, \quad (9.2.1a)$$

$$\hat{U}_{bk}^A = \hat{U}_{b'k}^A - \hat{U}_{bk}, \quad (9.2.1b)$$

$$\hat{U}_{ck}^A = \hat{U}_{c'k}^A - \hat{U}_{ck}, \quad (9.2.1c)$$

Relacije uticaja ostatka Δ -kola na režim čvora k :

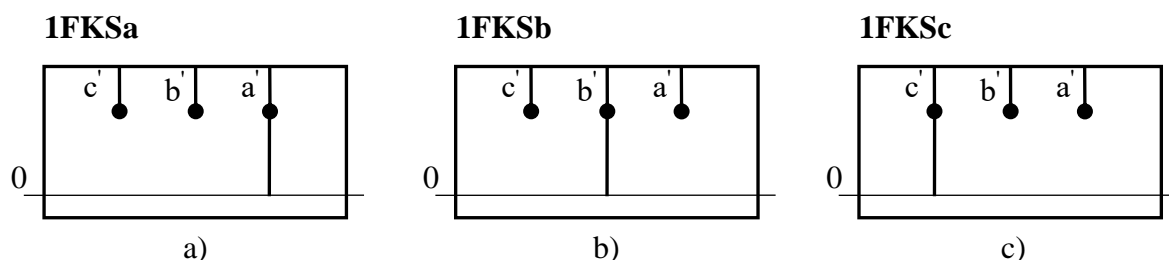
$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{ak}^{\Delta} \\ \hat{U}_{bk}^{\Delta} \\ \hat{U}_{ck}^{\Delta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aak} & \hat{Z}_{bak} & \hat{Z}_{cak} \\ \hat{Z}_{abk} & \hat{Z}_{bbk} & \hat{Z}_{cbk} \\ \hat{Z}_{ack} & \hat{Z}_{bck} & \hat{Z}_{cck} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{ak}^{\Delta} \\ \hat{I}_{bk}^{\Delta} \\ \hat{I}_{ck}^{\Delta} \end{bmatrix}. \quad (9.2.2)$$

TKS i relacije uslova kratkog spoja razlikuju se za sve vrste kratkih spojeva prikazanih u ovom delu.

U slučaju jednofaznog kratkog spoja simuliranog u jednofaznom ili dvofaznom čvoru, ili dvofaznog kratkog spoja bez i sa zemljom simuliranog u dvofaznom čvoru, kratak spoj je moguće simulirati u fazi ili fazama koje postoje. U tim slučajevima je potrebno modifikovati relacije (9.2.1) i (9.2.2). Modifikacija podrazumeva izbacivanje relacija koje se odnose na nepostojeće faze čvora. Stoga, ako je jednofazan kratak spoj simuliran u jednofaznom čvoru potrebno je iz (9.2.1) izbaciti dve relacije sa naponima nepostojećih faza i iz (9.2.2) potisnuti dve vrste i dve kolone nepostojećih faza. Ako je jednofazan kratak spoj ili dvofazan kratak spoj bez ili sa zemljom simuliran u dvofaznom čvoru potrebno je iz (9.2.1) izbaciti jednu relaciju sa naponima nepostojeće faze i iz (9.2.2) potisnuti jednu vrstu i jednu kolonu nepostojeće faze.

Jednofazni kratak spoj

U slučaju jednofaznog kratkog spoja simuliranog u trofaznom čvoru k , potrebno je TKS na slici 6.2 zameniti jednom od TKS koje su prikazane na slici 9.2.1.



Slika 9.2.1 – Topologija kratkog spoja za različite vrste jednofaznih kratkih spojeva

Ukoliko se kratak spoj simulira u fazi a koristi se TKS na slici 9.2.1a. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.3a)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.3b)$$

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.3c)$$

Ukoliko se kratak spoj simulira u fazi b koristi se TKS na slici 9.2.1b. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.4a)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.4b)$$

$$\hat{U}_{b'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.4c)$$

Ukoliko se kratak spoj simulira u fazi c koristi se TKS na slici 9.2.1c. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.5a)$$

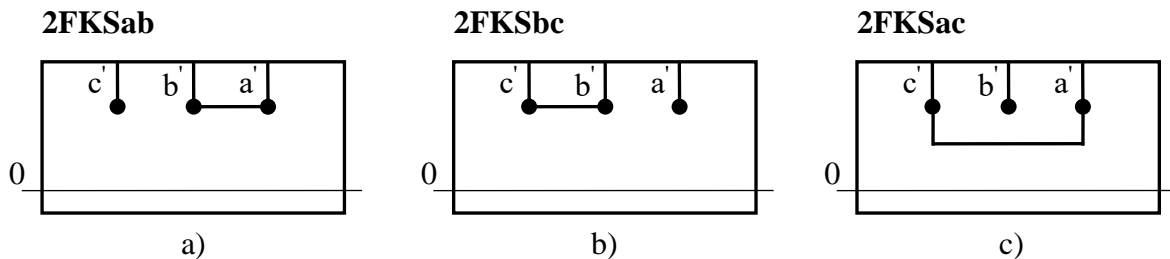
$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.5b)$$

$$\hat{U}_{c'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.5c)$$

U slučaju jednofaznog kratkog spoja simuliranog u jednofaznom ili dvofaznom čvoru, matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i jedan od tri skupa relacija uslova kratkog spoja (9.2.3), (9.2.4) ili (9.2.5) koje je potrebno modifikovati. Modifikacija relacija (9.2.1) i (9.2.2) opisana je na početku ovog dela. Modifikacija relacija uslova kratkog spoja podrazumeva izbacivanje relacija koje se odnose na nepostojeće faze čvora. Stoga, ako je jednofazan čvor potrebno je izbaciti dve relacije sa strujama nepostojećih faza, a ako je dvofazan čvor potrebno je izbaciti jednu relaciju sa strujom nepostojeće faze.

Dvofazni kratak spoj bez zemlje

U slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemlje simuliranog u trofaznom čvoru k , potrebno je TKS na slici 6.2 zameniti jednom od TKS koje su prikazane na slici 9.2.2.



Slika 9.2.2 – Topologija kratkog spoja za različite vrste dvofaznih kratkih spojeva bez zemlje

Ukoliko se kratak spoj bez zemlje simulira u fazama a i b koristi se TKS na slici 9.2.1a. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.6a)$$

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} + \hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.6b)$$

$$\hat{U}_{a'k}^{\Delta} - \hat{U}_{b'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.6c)$$

Ukoliko se kratak spoj bez zemlje simulira u fazama b i c koristi se TKS na slici 9.2.1b. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.7a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} + \hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.7b)$$

$$\hat{U}_{b'k}^{\Delta} - \hat{U}_{c'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.7c)$$

Ukoliko se kratak spoj bez zemlje simulira u fazama a i c koristi se TKS na slici 9.2.1c. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.8a)$$

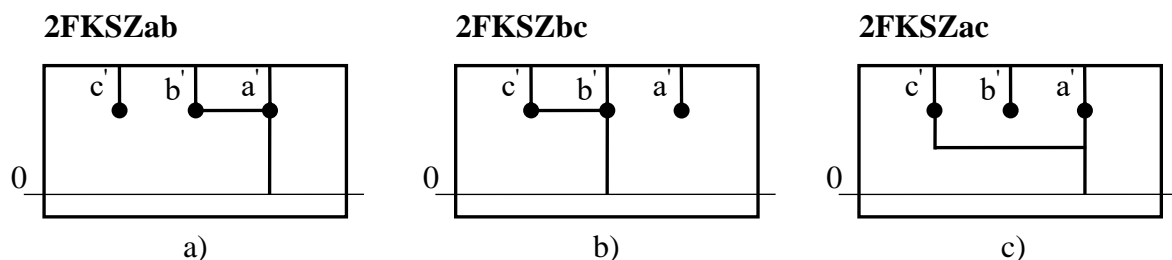
$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} + \hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.8b)$$

$$\hat{U}_{a'k}^{\Delta} - \hat{U}_{c'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.8c)$$

U slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemlje simuliranog u dvofaznom čvoru, matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i jedan od tri skupa relacija uslova kratkog spoja (9.2.6), (9.2.7) ili (9.2.8) koje je potrebno modifikovati. Modifikacija relacija (9.2.1) i (9.2.2) opisana je na početku ovog dela. Modifikacija relacija uslova kratkog spoja podrazumeva izbacivanje jedne relacije sa strujom nepostojeće faze.

Dvofazni kratak spoj sa zemljom

U slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom simuliranog u trofaznom čvoru k , potrebno je TKS na slici 6.2 zameniti jednom od TKS koje su prikazane na slici 9.2.3.



Slika 9.2.3 – Topologija kratkog spoja za različite vrste dvofaznih kratkih spojeva sa zemljom

Ukoliko se kratak spoj sa zemljom simulira u fazama a i b koristi se TKS na slici 9.2.1a. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.9a)$$

$$\hat{U}_{a'k}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.9b)$$

$$\hat{U}_{b'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.9c)$$

Ukoliko se kratak spoj sa zemljom simulira u fazama b i c koristi se TKS na slici 9.2.1b. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.10a)$$

$$\hat{U}_{b'k}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.10b)$$

$$\hat{U}_{c'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.10c)$$

Ukoliko se kratak spoj sa zemljom simulira u fazama a i c koristi se TKS na slici 9.2.1c. Tada matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.11a)$$

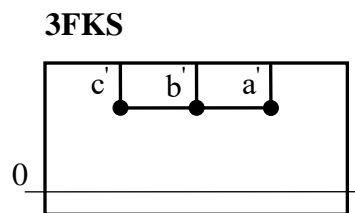
$$\hat{U}_{a'k}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.11b)$$

$$\hat{U}_{c'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.11c)$$

U slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom simuliranog u dvofaznom čvoru, matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i jedan od tri skupa relacija uslova kratkog spoja (9.2.9), (9.2.10) ili (9.2.11) koje je potrebno modifikovati. Modifikacija relacija (9.2.1) i (9.2.2) opisana je na početku ovog dela. Modifikacija relacija uslova kratkog spoja podrazumeva izbacivanje jedne relacije sa strujom nepostojeće faze.

Trofazni kratak spoj bez zemlje

U slučaju trofaznog kratkog spoja bez zemlje simuliranog u trofaznom čvoru k , potrebno je TKS na slici 6.2 zameniti sa TKS prikazanom na slici 9.2.4.



Slika 9.2.4 – Topologija kratkog spoja za trofazni kratak spoj bez zemlje

U ovom slučaju matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

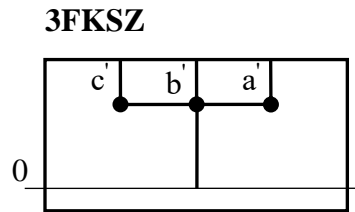
$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} + \hat{I}_{bk}^{\Delta} + \hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.12a)$$

$$\hat{U}_{b'k}^{\Delta} - \hat{U}_{a'k}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.12b)$$

$$\hat{U}_{c'k}^{\Delta} - \hat{U}_{a'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.12c)$$

Trofazni kratak spoj sa zemljom

U slučaju trofaznog kratkog spoja sa zemljom simuliranog u trofaznom čvoru k , potrebno je TKS na slici 6.2 zameniti sa TKS prikazanom na slici 9.2.5.



Slika 9.2.5 – Topologija kratkog spoja za trofazni kratak spoj sa zemljom

U ovom slučaju matematički model režima ansambla kratkog spoja čine relacije (9.2.1), (9.2.2) i relacije uslova kratkog spoja:

$$\hat{U}_{a'k}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.13a)$$

$$\hat{U}_{b'k}^{\Delta} = 0, \quad (9.2.13b)$$

$$\hat{U}_{c'k}^{\Delta} = 0. \quad (9.2.13c)$$

9.3 PRORAČUN STRUJA NA MESTU KRATKOG SPOJA

U ovom delu su izvedene relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u Δ -kolu za različite vrste kratkih spojeva. Na slici 6.2 prikazan je ansambl kratkog spoja za kratak spoj simuliran u čvoru sa indeksom k . Matematički model režima ansambla kratkog spoja prikazanog na slici 6.2 opisan je relacijama (6.28–6.30). Te relacije su za različite vrste kratkih spojeva predstavljene u delu 9.2. Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u Δ -kolu se izводе iz relacija matematičkih modela režima ansambla kratkih spojeva predstavljenih u delu 9.2.

Jednofazni kratak spoj

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju jednofaznog kratkog spoja u fazi a u trofaznom čvoru sa indeksom k izvide se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.3). Kada se relacije (9.2.3a) i (9.2.3b) uvrste u (9.2.2), i kada se (9.2.3c) uvrsti u (9.2.1a) i tako dobijena relacija uvrsti u (9.2.2), dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{ak}}{\hat{Z}_{aak}}, \quad (9.3.1a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.1b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0. \quad (9.3.1c)$$

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju jednofaznog kratkog spoja u fazi b u trofaznom čvoru sa indeksom k izvide se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.4).

Kada se relacije (9.2.4a) i (9.2.4b) uvrste u (9.2.2), i kada se (9.2.4c) uvrsti u (9.2.1b) i tako dobijena relacija uvrsti u (9.2.2), dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.2a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{bk}}{\hat{Z}_{bbk}}, \quad (9.3.2b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0. \quad (9.3.2c)$$

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju jednofaznog kratkog spoja u fazi c u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.5). Kada se relacije (9.2.5a) i (9.2.5b) uvrste u (9.2.2), i kada se (9.2.5c) uvrsti u (9.2.1c) i tako dobijena relacija uvrsti u (9.2.2), dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.3a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.3b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{ck}}{\hat{Z}_{cck}}. \quad (9.3.3c)$$

U slučaju jednofaznog kratkog spoja simuliranog u jednofaznom ili dvofaznom čvoru, za proračun struja na mestu kratkog spoja koristi se jedan od tri skupa relacija (9.3.1), (9.3.2) ili (9.3.3) koji je potrebno modifikovati. Modifikacija podrazumeva izbacivanje relacija koje se odnose na nepostojeće faze čvora. Stoga, ako je jednofazan čvor potrebno je izbaciti dve relacije sa strujama nepostojećih faza, a ako je dvofazan čvor potrebno je izbaciti jednu relaciju sa strujom nepostojeće faze.

Dvofazni kratak spoj bez zemlje

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemlje u fazama a i b u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.6). Kada se relacije (9.2.6a) i (9.2.6b) uvrste u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = (\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{bak})\hat{I}_{bk}^{\Delta}, \quad (9.3.4a)$$

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} = (\hat{Z}_{abk} - \hat{Z}_{bbk})\hat{I}_{bk}^{\Delta}, \quad (9.3.4b)$$

$$\hat{U}_{ck}^{\Delta} = (\hat{Z}_{ack} - \hat{Z}_{bck})\hat{I}_{bk}^{\Delta}. \quad (9.3.4c)$$

Kada se od relacije (9.2.1a) oduzme relacija (9.2.1b) i u tako dobijenu relaciju uvrsti relacija (9.2.6c) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} - \hat{U}_{bk}^{\Delta} = \hat{U}_{bk} - \hat{U}_{ak}. \quad (9.3.5)$$

Kada se od relacije (9.3.4a) oduzme relacija (9.3.4b) i u tako dobijenu relaciju uvrsti relacija (9.3.5) dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{bk}}{\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{bak} - \hat{Z}_{abk} + \hat{Z}_{bbk}}, \quad (9.3.6a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{bk} - \hat{U}_{ak}}{\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{bak} - \hat{Z}_{abk} + \hat{Z}_{bbk}}, \quad (9.3.6b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0. \quad (9.3.6c)$$

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemlje u fazama b i c u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.7). Kada se relacije (9.2.7a) i (9.2.7b) uvrste u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = (\hat{Z}_{bak} - \hat{Z}_{cak})\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.7a)$$

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} = (\hat{Z}_{bbk} - \hat{Z}_{cbk})\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.7b)$$

$$\hat{U}_{ck}^{\Delta} = (\hat{Z}_{bck} - \hat{Z}_{cck})\hat{I}_{ck}^{\Delta}. \quad (9.3.7c)$$

Kada se od relacije (9.2.1b) oduzme relacija (9.2.1c) i u tako dobijenu relaciju uvrsti relacija (9.2.7c) dobije se:

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} - \hat{U}_{ck}^{\Delta} = \hat{U}_{ck} - \hat{U}_{bk}. \quad (9.3.8)$$

Kada se od relacije (9.3.7b) oduzme relacija (9.3.7c) i u tako dobijenu relaciju uvrsti relacija (9.3.8) dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.9a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{bk} - \hat{U}_{ck}}{\hat{Z}_{bbk} - \hat{Z}_{cbk} - \hat{Z}_{bck} + \hat{Z}_{cck}}, \quad (9.3.9b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{ck} - \hat{U}_{bk}}{\hat{Z}_{bbk} - \hat{Z}_{cbk} - \hat{Z}_{bck} + \hat{Z}_{cck}}. \quad (9.3.9c)$$

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemlje u fazama a i c u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.8). Kada se relacije (9.2.8a) i (9.2.8b) uvrste u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = (\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{cak})\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.10a)$$

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} = (\hat{Z}_{abk} - \hat{Z}_{cbk})\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.10b)$$

$$\hat{U}_{ck}^{\Delta} = (\hat{Z}_{ack} - \hat{Z}_{cck})\hat{I}_{ck}^{\Delta}. \quad (9.3.10c)$$

Kada se od relacije (9.2.1a) oduzme relacija (9.2.1c) i u tako dobijenu relaciju uvrsti relacija (9.2.8c) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} - \hat{U}_{ck}^{\Delta} = \hat{U}_{ck} - \hat{U}_{ak}. \quad (9.3.11)$$

Kada se od relacije (9.3.10a) oduzme relacija (9.3.10c) i u tako dobijenu relaciju uvrsti relacija (9.3.11) dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{ck}}{\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{cak} - \hat{Z}_{ack} + \hat{Z}_{cck}}, \quad (9.3.12a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.12b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = \frac{\hat{U}_{ck} - \hat{U}_{ak}}{\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{cak} - \hat{Z}_{ack} + \hat{Z}_{cck}}. \quad (9.3.12c)$$

U slučaju dvofaznog kratkog spoja bez zemlje simuliranog u dvofaznom čvoru, za proračun struja na mestu kratkog spoja koristi se jedan od tri skupa relacija (9.3.6), (9.3.9) ili (9.3.12) koji je potrebno modifikovati. Modifikacija podrazumeva izbacivanje jedne relacije sa strujom nepostojeće faze.

Dvofazni kratak spoj sa zemljom

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom u fazama a i b u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.9). Kada se relacija (9.2.9a) uvrsti u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = -\hat{Z}_{aak}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \hat{Z}_{bak}\hat{I}_{bk}^{\Delta}, \quad (9.3.13a)$$

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} = -\hat{Z}_{abk}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \hat{Z}_{bbk}\hat{I}_{bk}^{\Delta}, \quad (9.3.13b)$$

$$\hat{U}_{ck}^{\Delta} = -\hat{Z}_{ack}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \hat{Z}_{bck}\hat{I}_{bk}^{\Delta}. \quad (9.3.13c)$$

Kada se iz relacije (9.3.13b) izrazi struja \hat{I}_{bk}^{Δ} pa uvrsti u relaciju (9.3.13a), uz zapažanje relacija (9.2.9b i c) i (9.2.1a i b), dobije se:

$$-\hat{U}_{ak} = -\hat{Z}_{aak}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \frac{\hat{Z}_{bak}}{\hat{Z}_{bbk}}\hat{U}_{bk} + \hat{Z}_{bak}\frac{\hat{Z}_{abk}}{\hat{Z}_{bbk}}\hat{I}_{ak}^{\Delta}. \quad (9.3.14)$$

Iz relacije (9.3.14) može da se odredi struja \hat{I}_{ak}^{Δ} , a kada se ona uvrsti u relaciju (9.3.13b) dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = \frac{\hat{Z}_{bbk}\hat{U}_{ak} - \hat{Z}_{bak}\hat{U}_{bk}}{\hat{Z}_{aak}\hat{Z}_{bbk} - \hat{Z}_{abk}\hat{Z}_{bak}}, \quad (9.3.15a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = \frac{\hat{Z}_{aak}\hat{U}_{bk} - \hat{Z}_{abk}\hat{U}_{ak}}{\hat{Z}_{aak}\hat{Z}_{bbk} - \hat{Z}_{abk}\hat{Z}_{bak}}, \quad (9.3.15b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = 0. \quad (9.3.15c)$$

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom u fazama b i c u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.10). Kada se relacija (9.2.10a) uvrsti u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = -\hat{Z}_{bak}\hat{I}_{bk}^{\Delta} - \hat{Z}_{cak}\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.16a)$$

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} = -\hat{Z}_{bbk}\hat{I}_{bk}^{\Delta} - \hat{Z}_{cbk}\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.16b)$$

$$\hat{U}_{ck}^{\Delta} = -\hat{Z}_{bck}\hat{I}_{bk}^{\Delta} - \hat{Z}_{cck}\hat{I}_{ck}^{\Delta}. \quad (9.3.16c)$$

Kada se iz relacije (9.3.16c) izrazi struja \hat{I}_{ck}^{Δ} pa uvrsti u relaciju (9.3.16b), uz zapažanje relacija (9.2.10b i c) i (9.2.1b i c), dobije se:

$$-\hat{U}_{bk} = -\hat{Z}_{bbk}\hat{I}_{bk}^{\Delta} - \frac{\hat{Z}_{cbk}}{\hat{Z}_{cck}}\hat{U}_{bk} + \hat{Z}_{cbk}\frac{\hat{Z}_{bck}}{\hat{Z}_{cck}}\hat{I}_{bk}^{\Delta}. \quad (9.3.17)$$

Iz relacije (9.3.17) može da se odredi struja \hat{I}_{bk}^{Δ} , a kada se ona uvrsti u relaciju (9.3.16c) dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.18a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = \frac{\hat{Z}_{cck}\hat{U}_{bk} - \hat{Z}_{cbk}\hat{U}_{ck}}{\hat{Z}_{bbk}\hat{Z}_{cck} - \hat{Z}_{bck}\hat{Z}_{cbk}}, \quad (9.3.18b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = \frac{\hat{Z}_{bbk}\hat{U}_{ck} - \hat{Z}_{bck}\hat{U}_{bk}}{\hat{Z}_{bbk}\hat{Z}_{cck} - \hat{Z}_{bck}\hat{Z}_{cbk}}. \quad (9.3.18c)$$

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom u fazama a i c u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.11). Kada se relacija (9.2.11a) uvrsti u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^{\Delta} = -\hat{Z}_{aak}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \hat{Z}_{cak}\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.19a)$$

$$\hat{U}_{bk}^{\Delta} = -\hat{Z}_{abk}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \hat{Z}_{cbk}\hat{I}_{ck}^{\Delta}, \quad (9.3.19b)$$

$$\hat{U}_{ck}^{\Delta} = -\hat{Z}_{ack}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \hat{Z}_{cck}\hat{I}_{ck}^{\Delta}. \quad (9.3.19c)$$

Kada se iz relacije (9.3.19c) izrazi struja \hat{I}_{ck}^{Δ} pa uvrsti u relaciju (9.3.19a), uz zapažanje relacija (9.2.11b i c) i (9.2.1a i c), dobije se:

$$-\hat{U}_{ak} = -\hat{Z}_{aak}\hat{I}_{ak}^{\Delta} - \frac{\hat{Z}_{cak}}{\hat{Z}_{cck}}\hat{U}_{ck} + \hat{Z}_{cak}\frac{\hat{Z}_{ack}}{\hat{Z}_{cck}}\hat{I}_{ak}^{\Delta}. \quad (9.3.20)$$

Iz relacije (9.3.20) može da se odredi struja \hat{I}_{ak}^{Δ} , a kada se ona uvrsti u relaciju (9.3.19c) dobije se:

$$\hat{I}_{ak}^{\Delta} = \frac{\hat{Z}_{cck}\hat{U}_{ak} - \hat{Z}_{cak}\hat{U}_{ck}}{\hat{Z}_{aak}\hat{Z}_{cck} - \hat{Z}_{ack}\hat{Z}_{cak}}, \quad (9.3.21a)$$

$$\hat{I}_{bk}^{\Delta} = 0, \quad (9.3.21b)$$

$$\hat{I}_{ck}^{\Delta} = \frac{\hat{Z}_{aak}\hat{U}_{ck} - \hat{Z}_{ack}\hat{U}_{ak}}{\hat{Z}_{aak}\hat{Z}_{cck} - \hat{Z}_{ack}\hat{Z}_{cak}}. \quad (9.3.21c)$$

U slučaju dvofaznog kratkog spoja sa zemljom simuliranog u dvofaznom čvoru, za proračun struja na mestu kratkog spoja koristi se jedan od tri skupa relacija (9.3.15), (9.3.18), ili (9.3.21) koji je potrebno modifikovati. Modifikacija podrazumeva izbacivanje jedne relacije sa strujom nepostojeće faze.

Trofazni kratak spoj bez zemlje

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju trofaznog kratkog spoja bez zemlje u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.12). Kada se iz relacije (9.2.12a) izrazi struja \hat{I}_{ak}^Δ i uvrsti u (9.2.2) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^\Delta = (\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{bak})\hat{I}_{bk}^\Delta + (\hat{Z}_{aak} - \hat{Z}_{cak})\hat{I}_{ck}^\Delta, \quad (9.3.22a)$$

$$\hat{U}_{bk}^\Delta = (\hat{Z}_{abk} - \hat{Z}_{bbk})\hat{I}_{bk}^\Delta + (\hat{Z}_{abk} - \hat{Z}_{cbk})\hat{I}_{ck}^\Delta, \quad (9.3.22b)$$

$$\hat{U}_{ck}^\Delta = (\hat{Z}_{ack} - \hat{Z}_{bck})\hat{I}_{bk}^\Delta + (\hat{Z}_{ack} - \hat{Z}_{cck})\hat{I}_{ck}^\Delta. \quad (9.3.22c)$$

Kada se od relacije (9.2.1a) oduzme relacija (9.2.1b) i od relacije (9.2.1a) oduzme relacija (9.2.1c), pa u tako dobijenim relacijama uvrste relacije (9.2.12b i c) dobije se:

$$\hat{U}_{ak}^\Delta - \hat{U}_{bk}^\Delta = \hat{U}_{bk} - \hat{U}_{ak}, \quad (9.3.23a)$$

$$\hat{U}_{ak}^\Delta - \hat{U}_{ck}^\Delta = \hat{U}_{ck} - \hat{U}_{ak}. \quad (9.3.23b)$$

Kada se od relacije (9.3.22a) oduzme relacija (9.3.22b) i od relacije (9.3.22a) oduzme relacija (9.3.22c), pa u tako dobijenim relacijama uvrste relacije (9.3.23a i b) dobije se:

$$\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{bk} = \hat{Z}_1\hat{I}_{bk}^\Delta + \hat{Z}_2\hat{I}_{ck}^\Delta, \quad (9.3.24a)$$

$$\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{ck} = \hat{Z}_3\hat{I}_{bk}^\Delta + \hat{Z}_4\hat{I}_{ck}^\Delta, \quad (9.3.24b)$$

pri čemu su:

$$\hat{Z}_1 = -\hat{Z}_{aak} + \hat{Z}_{abk} + \hat{Z}_{bak} - \hat{Z}_{bbk}, \quad (9.3.25a)$$

$$\hat{Z}_2 = -\hat{Z}_{aak} + \hat{Z}_{abk} + \hat{Z}_{cak} - \hat{Z}_{cbk}, \quad (9.3.25b)$$

$$\hat{Z}_3 = -\hat{Z}_{aak} + \hat{Z}_{ack} + \hat{Z}_{bak} - \hat{Z}_{bck}, \quad (9.3.25c)$$

$$\hat{Z}_4 = -\hat{Z}_{aak} + \hat{Z}_{ack} + \hat{Z}_{cak} - \hat{Z}_{cck}. \quad (9.3.25d)$$

Kada se iz relacija (9.3.24a i b) odrede struje \hat{I}_{bk}^Δ i \hat{I}_{ck}^Δ i uvrste u relaciju (9.2.12a) dobija se:

$$\hat{I}_{ak}^\Delta = \frac{(\hat{Z}_3 - \hat{Z}_4)(\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{bk}) + (\hat{Z}_1 - \hat{Z}_2)(\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{ck})}{\hat{Z}_1\hat{Z}_4 - \hat{Z}_2\hat{Z}_3}, \quad (9.3.26a)$$

$$\hat{I}_{bk}^\Delta = \frac{\hat{Z}_4(\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{bk}) - \hat{Z}_2(\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{ck})}{\hat{Z}_1\hat{Z}_4 - \hat{Z}_2\hat{Z}_3}, \quad (9.3.26b)$$

$$\hat{I}_{ck}^\Delta = \frac{-\hat{Z}_3(\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{bk}) + \hat{Z}_1(\hat{U}_{ak} - \hat{U}_{ck})}{\hat{Z}_1\hat{Z}_4 - \hat{Z}_2\hat{Z}_3}. \quad (9.3.26c)$$

Trofazni kratak spoj sa zemljom

Relacije za proračun struja na mestu kratkog spoja u slučaju trofaznog kratkog spoja sa zemljom u trofaznom čvoru sa indeksom k izvode se iz relacija (9.2.1), (9.2.2) i (9.2.13). Kada se relacije (9.2.13) uvrste u relacije (9.2.1), pa tako dobijene relacije uvrste u (9.2.2) dobija se:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{ak}^{\Delta} \\ \hat{I}_{bk}^{\Delta} \\ \hat{I}_{ck}^{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aak} & \hat{Z}_{bak} & \hat{Z}_{cak} \\ \hat{Z}_{abk} & \hat{Z}_{bbk} & \hat{Z}_{cbk} \\ \hat{Z}_{ack} & \hat{Z}_{bck} & \hat{Z}_{cck} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{U}_{ak} \\ \hat{U}_{bk} \\ \hat{U}_{ck} \end{bmatrix}. \quad (9.3.27)$$

10 LITERATURA

- [1] Ge M, Lebling K, Levin K, Friedrich J (2019) Executive summary: tracking progress of the 2020 climate turning point. World Resources Institute.
- [2] Harmsen R, Graus W (2013) How much CO₂ emissions do we reduce by saving electricity? A focus on methods. *Energy Policy* 60: 803-812. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.059>
- [3] Razon A, Thomas T, Banunarayanan V (2019) Advanced Distribution Management Systems: Connectivity Through Standardized Interoperability Protocols. *IEEE Power and Energy* 18(1): 26 - 33. <https://doi.org/10.1109/MPE.2019.2947816>
- [4] Boardman E (2019) Advanced Applications in an Advanced Distribution Management System: Essentials for Implementation and Integration. *IEEE Power and Energy* 18(1): 43 - 54. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8946524>
- [5] Anderson PM (1995) *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE Press, New York, NY, USA.
- [6] Bergen AR, Vittal V (2000) *Power System Analysis (2nd Edition)*. Prentice Hall, New Jersey.
- [7] Strezoski VC, Bekut DD (1991) A Canonical Model for the Study of Faults in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 1493–1499. <https://www.doi.org/10.1109/59.116995>
- [8] Jabr RA, Džafić I (2015) A Fortescue Approach for Real-Time Short Circuit Computation in Multiphase Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 6: 3276–3285. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2376198>
- [9] Lacroix JS, Kocar I, Belletête M (2013) Accelerated computation of multiphase short circuit summary for unbalanced distribution systems using the concept of selected inversion. *IEEE Transactions on Power Systems* 2: 1515–1522. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2209462>
- [10] Tu DV, Chaitusaney S, Yokoyama A (2014) Maximum-Allowable Distributed Generation Considering Fault Ride-Through Requirement and Reach Reduction of Utility Relay. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2: 534–541. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2279803>
- [11] Strezoski LV, Prica MD (2016) Real-Time Short-Circuit Analysis of Active Distribution Systems. *IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Champagne, IL*. <https://www.doi.org/10.1109/PECI.2016.7459252>
- [12] Strezoski VC, Vidović PM (2015) Power Flow for General Mixed Distribution Networks. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 10: 2455-2471. <https://www.doi.org/10.1002/etep.1974>
- [13] Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A, Luo GX (1988) A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 2: 753–762. <https://www.doi.org/10.1109/59.192932>
- [14] Zhang X, Soudi F, Shirmohammadi D, Cheng CS (1995) A Distribution Short Circuit Analysis Approach Using Hybrid Compensation Method. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 2053–2059. <https://www.doi.org/10.1109/59.476075>

- [15] Lin WM, Ou TC (2011) Unbalanced Distribution Network Fault Analysis with Hybrid Compensation. *IET Generation, Transmission & Distribution* 1: 92–100. <https://www.doi.org/10.1049/iet-gtd.2008.0627>
- [16] Sulla F, Svensson J, Samuelsson O (2011) Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators. *Electric Power Systems Research* 7: 1610–1618. <https://www.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.03.016>
- [17] Howard DF, Smith TM, Starke M, Harley RG (2012) Short Circuit Analysis of Induction Machines – Wind Power Application. *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, FL*. <https://www.doi.org/10.1109/TDC.2012.6281643>
- [18] Joint Working Group (2015) Fault current contribution from wind plants. *IEEE Power and Energy Society*. <https://www.doi.org/10.1109/CPRE.2015.7102165>
- [19] Gao F, Iravani MR (2008) A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2: 850–859. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRD.2007.915950>
- [20] IEC 60909-0:2016 (2016) Short-Circuit Currents in Three-Phase A. C. Systems–Part 0: Calculation of Currents.
- [21] Strezoski LV, Prica MD, Loparo KA (2017) Generalized Δ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generators in Online Short-Circuit Calculations. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 3237-3245. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2617158>
- [22] Zhang N, Kang C, Duan C, Tang X, Huang J, Lu Z, Wang W, Qi J (2010) Simulation methodology of multiple wind farms operation considering wind speed correlation. *International Journal of Power & Energy Systems* 4: 264-273. <https://www.doi.org/10.2316/Journal.203.2010.4.203-4843>
- [23] Zhang N, Kang C, Xu Q, Jiang C, Chen Z, Liu J (2013) Modelling and Simulating the Spatio-Temporal Correlations of Clustered Wind Power Using Copula. *Journal of Electrical Engineering and Technology* 6: 1615-1625. <https://www.doi.org/10.5370/JEET.2013.8.6.1615>
- [24] Maya KN, Jasmin EA (2016) Optimal integration of distributed generation (DG) resources in unbalanced distribution system considering uncertainty modelling. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 1: e2248. <https://www.doi.org/10.1002/etep.2248>
- [25] Ruiz-Rodriguez FJ, Hernández JC, Jurado F (2017) Voltage behaviour in radial distribution systems under the uncertainties of photovoltaic systems and electric vehicle charging loads. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2: e2490. <https://www.doi.org/10.1002/etep.2490>
- [26] Carmona MC, Behnke RP, Estevez GJ (2010) Fuzzy arithmetic for the DC load flow. *IEEE Transactions on Power Systems* 1: 206–14. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030350>
- [27] Weng Z, Shi L, Xu Z, Lu Q, Yao L, Ni Y (2014) Fuzzy power flow solution considering wind power variability and uncertainty. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 3: 547 - 572. <https://www.doi.org/10.1002/etep.1871>

- [28] Bijwe PR, Raju GKV (2006) Fuzzy distribution power flow for weakly meshed systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 1645–1652. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2006.881138>
- [29] Yu H, Rosehart WD (2012) An optimal power flow algorithm to achieve robust operation considering load and renewable generation uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems* 4: 1808–1817. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2194517>
- [30] Bagheri A, Monsef H, Lesan H (2015) Evaluating the effects of renewable and nonrenewable DGs on DNEP from the reliability, uncertainty, and operational points of view by employing hybrid GA and OPF. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 12: 3304–3328. <https://www.doi.org/10.1002/etep.2037>
- [31] Wang Y, Zhang N, Chen Q, Yang J, Kang C, Huang J (2016) Dependent Discrete Convolution Based Probabilistic Load Flow for the Active Distribution System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 3: 1000 - 1009. <https://www.doi.org/10.1109/TSTE.2016.2640340>
- [32] Vidović PM, Sarić AT (2017) A novel correlated intervals-based algorithm for distribution power flow calculation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 90: 245-255. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.12.019>
- [33] Begović MM (2013) *Electrical Transmission Systems and Smart Grids*. Springer Science + Business Media, USA, New York.
- [34] Leite da Silva AM, Sales WS, Manso LAF, Billinton R (2010) Long-Term probabilistic evaluation of operating reserve requirements with renewable sources. *IEEE Trans. on Power Systems* 25(1): 106-116. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036706>
- [35] Sun Z, Wu J, Li GJ, He J (2009) Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming. *Proceedings of CSEE* 29(4): 41-47. <https://doi.org/10.3390/en8010233>
- [36] Wang HC, Lu ZX, Zhou SX (2005) Research on the capacity credit of wind energy resources. *Proceedings of CSEE* 25(10): 103-206. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(92\)90087-H](https://doi.org/10.1016/0378-7796(92)90087-H)
- [37] Voorspools KR, D'haeseleer W.D (2007) Critical evaluation of methods for wind-power appraisal. *Renewable and sustainable energy reviews* 11(1): 78-97. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.12.006>
- [38] Martin B, Carlin J (1983) Wind-load correlation and estimates of capacity credit of wind power: An empirical investigation. *Wind Engineering* 7(2): 79-84. www.jstor.org/stable/43749035
- [39] Karki R, Hu P, Billinton R (2010) Reliability evaluation considering wind and hydro power coordination. *IEEE Trans. on power systems* 25(2): 685-693. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2032758>
- [40] Wu Y, Ding M, Li S (2004) Reliability assessment of wind farms in generation. *Transactions of China Electrotechnical society* 19(11): 72-76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.742>
- [41] Dobakhshari AS, Fotuhi-Firuzabad M (2009) A reliability model of large wind farms for power system adequacy studies. *IEEE Trans. on energy conversion* 24(3): 792-801. <https://doi.org/10.1109/TEC.2009.2025332>

- [42] Bibby BM, Skovgaard TM, Sorensen M (2005) Diffusion-type models with given marginal distribution and autocorrelation function. *Bernoulli Journal* 11(2): 191-220. <https://doi.org/10.3150/bj/1116340291>
- [43] Reikard G (2009) Predicting solar radiation at high resolutions: a comparison of time series forecasts. *Solar Energy* 83(3): 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.007>
- [44] Yang D, Jirutitijaroen P, Walsh WM (2012) Hourly solar irradiance time series forecasting using cloud cover index. *Solar Energy* 86(12): 3531-3543. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.029>
- [45] Hadian A, Haghifam M-R, Zohrevand J, Akhavan-Rezai E (2009) Probabilistic approach for renewable DG placement in distribution systems with uncertain and time varying loads. *Power & Energy Society General Meeting, PES'09, IEEE: Calgary, AB* 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275458>
- [46] Jabr R, Pal B (2009) Ordinal optimisation approach for locating and sizing of distributed generation. *IET generation, transmission & distribution* 3(8): 713-723. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0019>
- [47] Hadian A, Haghifam M (2010) Placement of DG with stochastic generation. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, IEEE: New Orleans, LA* 1-7. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484285>
- [48] Boata RS, Gravila P (2012) Functional fuzzy approach for forecasting daily global solar irradiation. *Atmospheric Research* 112: 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.011>
- [49] Knight K, Klein S, Duffie J (1991) A methodology for the synthesis of hourly weather data. *Solar Energy* 46(2): 109-120. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90023-P](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90023-P)
- [50] Atwa Y, El-Saadany E, Salama M, Seethapathy R (2010) Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization. *Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems* 25(1): 360-370. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030276>
- [51] Kabir MN, Mishra Y, Bansal RC (2016) Probabilistic load flow for distribution systems with uncertain PV generation. *Appl Energ.* 163:343-351. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.003>
- [52] Hocaoglu FO (2011) Stochastic approach for daily solar radiation modeling. *Solar Energy* 85(2): 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.003>
- [53] Hocaoglu FO, Gerek ÖN, Kurban M (2008) Hourly solar radiation forecasting using optimal coefficient 2-D linear filters and feed-forward neural networks. *Solar Energy* 82(8): 714-726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.003>
- [54] Wan Y, Milligan M, Parsons B (2003) Output power correlation between adjacent wind power plants. *Journal of Solar Energy Engineering* 125(4): 551-555. <https://doi.org/10.1115/1.1626127>
- [55] Holttinen H (2004) The impact of large-scale wind farm integration in Nordic countries. Ph.D. dissertation, Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University, Espoo, Finland.

- [56] Villumsen J, Brønmo G, Philpott A (2013) Line capacity expansion and transmission switching in power systems with large-scale wind power. *IEEE Transactions on Power Systems* 28(2): 731-739. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2224143>
- [57] Villanueva D, Feijóo A, Pazos JL (2012) Simulation of correlated wind speed data for economic dispatch evaluation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 3(1): 142-149. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2165861>
- [58] Xie K, Li Y, Li W (2012) Modeling wind speed dependence in system reliability assessment using copulas. *IET Renewable Power Generation* 6(6): 392-399. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2011.0156>
- [59] Fu Q, Yu D, Ghorai J (2011) Probabilistic load flow analysis for power systems with multi-correlated wind sources. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2011* 1-6. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6038992>
- [60] Papaefthymiou G, Klockl B (2008) MCMC for wind power simulation. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 23(1): 234-240. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914174>
- [61] Leite da Silva AM, Arienti VL (1990) Probabilistic load flow by a multilinear simulation algorithm. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution* 137(4): 276-282. <https://doi.org/10.1049/ip-c.1990.0037>
- [62] Wu W, Wang K, Li G, Jiang X, Wang Z (2016) Probabilistic load flow calculation using cumulants and multiple integrals. *IET Generation, Transmission & Distribution* 10(7): 1703-1709. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1129>
- [63] Usaola J (2009) Probabilistic load flow in systems with wind generation. *IET Generation Transmission & Distribution* 3(12): 1031-1041. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0039>
- [64] Yu H, Chung CY, Wong KP, Lee HW, Zhang JH (2009) Probabilistic Load Flow Evaluation with Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition. *IEEE Trans. Power Systems* 24(2): 661-667. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016589>
- [65] Ranković A, Maksimović BM, Sarić AT, Lukić U (2014) ANN-based correlation of measurements in micro-grid state estimation. *Electrical Engineering Systems* 25(10): 2181-2202 <https://doi.org/10.1002/etep.1956>
- [66] Ford GL, Srivastava KD (1981) The Probabilistic Approach to Substation Bus Short-Circuit Design. *Electric Power Systems Research* 4(3): 191-200. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(81\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0378-7796(81)90023-7)
- [67] Bracale A, Caramia P, Di Fazio AR, Proto D (2012) Probabilistic Short Circuit Analysis in Electric Power Distribution Systems including Distributed Generation. *8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012)*, Cagliari 1-6. <https://doi.org/10.1049/cp.2012.2025>
- [68] Nakamura H, Mizuno Y (2013) Probabilistic Diagnosis of Short-Circuit Faults and Insulation Deterioration of Stator Winding of Motor. *Electrical Engineering in Japan* 184(1): 30-41. <https://doi.org/10.1002/ej.22399>
- [69] Meneses CAP, Echeverri MG, Mantovani JRS (2013) Probabilistic Algorithms for Power Load Flow and Short-Circuit Analysis in Distribution Networks with Dispersed Generation. *Control Autom Electr Syst* 24: 324-338. <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0017-2>

- [70] Li S, Qian Z, Zhang X (2016) Probabilistic short-circuit analysis of wind power system based on sampling with optimal density function. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Beijing 1-7. <https://doi.org/10.1109/PMAPS.2016.7764117>
- [71] Garcia PAN, Pereira JLR, Carneiro S Jr, da Costa VM, Martins N (2000) Three-phase power flow calculations using the current injection method. IEEE Trans Power Syst 2:508–514. <https://doi.org/10.1109/59.867133>
- [72] Tan A, Edwin Liu WH, Shirmohannadi D (1997) Transformer and Load Modeling in Short Circuit Analysis for Distribution Systems. IEEE Trans. Power Syst. 12(3): 1315-1321. <https://doi.org/10.1109/59.630476>
- [73] Williams JR, Karlson B (2012) Wind Power Plant Short-Circuit Modeling Guide. Sandia Nat. Lab., Albuquerque, NM. <https://doi.org/10.2172/1051716>
- [74] Howard DF (2013) Short-Circuit Currents in Wind-Turbine Generator Networks. Ph.D dissertation, Dept. Elec. Eng., Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA.
- [75] Strezoski L (2017) Proračun kompleksnih kratkih spojeva neuravnoteženih distributivnih mreža sa distribuiranim energetska resursima. Doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- [76] Neumann T, Erlich I (2012) Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant. IFAC Proceedings Volumes 45(21): 343-348. DOI: <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00061>
- [77] Strezoski V (2017) Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema (Tom I i Tom II). Srbija, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [78] Strezoski L, Prica M, Loparo KA (2017) Emerging Distribution Systems: Modeling Challenges in Faulted Conditions. Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA 1-6. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2017.7868272>
- [79] Khushalani S, Solanki JM, Schulz NN (2007) Development of Three-Phase Unbalanced Power Flow Using PV and PQ Models for Distributed Generation and Study of the Impact of DG Models. IEEE Trans. on PS 22(3): 1019-1025. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901476>
- [80] Vidovic P (2015) Proračuni tokova snaga neuravnoteženih distributivnih mreža. Doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- [81] Tsili M, Papathanassiou S (2009) A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms. IET Renew. Power Gen. 3(3): 308–332. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2008.0070>
- [82] Kersting WH (2018) Distribution System Modeling and Analysis. USA: Boca Raton, CRC Press.
- [83] Obrenić M (2014) Proračun tokova snaga u elektrodistributivnim mrežama primenom matričnog modela. Master rad, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija.
- [84] Đurović M (1996) Transformatori. ITP–UNIREKS, Podgorica.
- [85] Harlow JH (2004) Electric Power Transformer Engineering. CRC, New York.

- [86] Strezoski V, Milakovic S (1998) Ekvivalentne šeme elektroenergetskih transformatora u analizi stacionarnih režima. Srbija, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, EPS-JP „Elektrovojvodina”, Stylos.
- [87] Chen TH, Chang JD (1992) Open way-open delta and open delta-open delta transformer models for rigorous distribution system analysis. *IEE Proc. –Gener. Transm. Distrib.* 139(3): 227-234. <https://doi.org/10.1049/ip-c.1992.0035>
- [88] Chen TH, Chang JD, Chang YL (1996) Models of grounded mid-tap open wye and open delta connected transformers for rigorous analysis of a distribution system. *IEE Proc. –Gener. Transm. Distrib.* 143(1): 82-88. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19960168>
- [89] Chen TH, Chen MS, Hwang KJ, Kotas P, Chebli A (1991) Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach. *IEEE Trans. on PD* 6: 1146-1152. <https://doi.org/10.1109/61.85860>
- [90] Arillaga J, Watson NR (2013) *Computer Modeling of Electrical Power Systems*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118878286.ch3>
- [91] Strezoski VC (1996) New scaling concept in power system analysis. *IEE Gen. Trans. & Dist.* 143(5): 399–406. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19960420>
- [92] Van Emden MH, Moa B (2006) The Fundamental Theorems of Interval Analysis. 12th GAMM - IMACS International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetic and Validated Numerics (SCAN 2006), Duisburg 40-40. <https://doi.org/10.1109/SCAN.2006.43>
- [93] Moore RE (1962) Interval Arithmetic and Automatic Error Analysis in Digital Computing. PhD thesis, Department of Mathematics, Stanford University, Stanford, California. (Published as Applied Mathematics and Statistics Laboratories Technical Report No. 25)
- [94] Hickey T, Ju Q, Van Emden MH (2001) Interval arithmetic: From principles to implementation. *Journal of the ACM (JACM)* 48(5): 1038-1068. <https://doi.org/10.1145/502102.502106>
- [95] Moore RE, Kearfott RB, Cloud MJ (2009) *Introduction to interval analysis*. Society for Industrial and Applied Mathematics, University City Science Center Philadelphia, PA United States. <https://doi.org/10.1137/1.9780898717716>
- [96] Milovanović GV, Đorđević RŽ (2004) *Linearna algebra*. Elektronski fakultet, Niš.
- [97] Kulisch U (2013) *Computer Arithmetic and Validity* 2nd edition. *Studies in Mathematics* 33, Walter de Gruyter, Berlin-New York. <https://doi.org/10.1515/9783110301793>
- [98] Taylor P (2006) Interval analysis without intervals (extended abstract). *Proceedings of the 7th Conference on Real Numbers and Computers (RNC'7)* 7: 41–45. <https://hal.inria.fr/inria-00107213>
- [99] Piegat A, Landowski M (2012) Is the conventional interval arithmetic correct? *J Theor Appl Comput Sci* 2:27–44.
- [100] Piegat A, Landowski M (2013) Two interpretations of multidimensional RDM interval arithmetic-multiplication and division. *Int J Fuzzy Syst* 4:488–496.
- [101] Boche R (1966) *Complex Interval arithmetic with some applications*. Lockheed Missiles and Space Company, 4–22–66–1, Sunnyvale, California.

- [102] Alefeld G, Herzberger J (1983) *Introduction to Interval Computation*. Academic Press, New York.
- [103] Jaulin L, Kieffer M, Didrit O, Walter E (2001) *Applied interval analysis*. Springer-Verlag, London.
- [104] Hansen E, Walster GW (2004) *Global optimization using interval analysis*. Marcel Dekker, New York.
- [105] Drmač Z, Hari V, Marušić M, Rogina M, Singer S, Singer S (2003) *Numerička analiza*. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb.
- [106] Rohn J (2003) Solvability of systems of linear interval equations. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* 25(1): 237–245. <https://doi.org/10.1137/S0895479801398955>
- [107] Fiedler M, Nedoma J, Ramik J, Rohn J, Zimmermann K (2006) *Linear optimization problems with inexact data*. Springer Science + Business Media, USA, New York.
- [108] Hladík M (2015) AE solutions and AE solvability to general interval linear systems. *Linear Algebra and its Applications* 465: 221–238. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2014.09.030>
- [109] Papaefthymiou G, Schavemaker PH, Sluis van der L, Kling WL, Kurowicka DR, Cooke M (2006) Integration of stochastic generation in power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 28:655–667. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.03.004>
- [110] Papaefthymiou G, Schavemaker PH, van der Sluis L (2004) Survey on the modelling of the uncertainty in ‘distributed’ power systems. *IEEE Young Researchers Symposium*, Delft, The Netherlands.
- [111] Anders GJ (1990) *Probability Concepts in electric power systems*. Wiley Interscience, New York.
- [112] Zadeh LA (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Int J Fuzzy Sets Syst* 1(1):3–28. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90029-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90029-5)
- [113] Miranda V, Saraiva JT (1992) Fuzzy modelling of power system optimal load flow. *IEEE Trans Power Syst* 7(2):843–849. <https://doi.org/10.1109/59.141794>
- [114] Wang Z, Alvarado FL (1990) Interval arithmetic in power flow analysis. *Proceedings of the Power Industry Computer Applications on Power Systems* 5(1):182–190. <https://doi.org/10.1109/PICA.1991.160622>
- [115] Rodgers JL, Nicewander WA (1988) Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician* 42:59–66. <https://doi.org/10.1080/00031305.1988.10475524>
- [116] Steele JM (2004) *The Cauchy-Schwarz master class: An introduction to the art of mathematical inequalities*. University of Pennsylvania, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817106>
- [117] Ash RB, Doleans-Dade C (2000) *Probability and Measure Theory*. Harcourt Academic Press, San Diego, California.
- [118] Montgomery DC, Runger GC (2003) *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley, New York.

- [119] Obrenic MZ, Vidovic PM, Strezoski LV (2019) A novel intervals-based algorithm for the distribution short-circuit calculation. *Electrical Engineering* 101: 1145–1162. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00853-2>
- [120] Singh R, Pal BC, Jabr RA (2009) Distribution system state estimation through Gaussian mixture model of the load as pseudomeasurement. *IET Generation, Transmission and Distribution* 4:50–59. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0167>
- [121] Caro E, Conejo AJ, Minguez R (2009) Power system state estimation considering measurement dependencies. *IEEE Transactions on Power Systems* 24:1875–1885. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030385>
- [122] Valverde G, Sarić AT, Terzija V (2013) Stochastic monitoring of distribution networks including correlated input variables. *IEEE Transactions on Power Systems* 28:246–255. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2201178>
- [123] Morales JM, Baringo L, Conejo AJ, Minguez R (2010) Probabilistic power flow with correlated wind sources. *IET Generation, Transmission and Distribution* 4:641–651. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0639>
- [124] Hu Y, Kuh A, Tao Y, Kavcic A (2011) A Belief propagation based power distribution system state estimator. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 6:36–46. <https://doi.org/10.1109/MCI.2011.941589>
- [125] Volker Q (2005) *Understanding Renewable Energy Systems*. Earthscan: London. <https://doi.org/10.4324/9781315800493>
- [126] Changsong C, Shanxu D, Tao C, Bangyin L (2011) Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. *Solar Energy* 85:2856–2870. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.027>
- [127] Mladen N, Anđelika Z (2019) *Mašinsko učenje*. Beograd.
- [128] Kim P (2017) *MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence*. Soul-t'ukpyolsi, Seoul.
- [129] Jensen CA, Reed RD, Marks RJ, El-Sharkawi MA (1999) Inversion of feedforward neural networks: algorithms and applications. *Proceedings of the IEEE* 87:1536–1549. <https://doi.org/10.1109/5.784232>
- [130] Ferson S, Ginzburg L, Kreinovich V, Lopez J (2007) Absolute bounds on the mean of sum, product, max, and min: A probabilistic extension of interval arithmetic. *Appl Math Sci* 9:395–440.
- [131] Ma JD, Rutenbar RA (2007) Interval-Valued Reduced-Order Statistical Interconnection Modeling. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 26(9): 1602-1613. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2007.895577>
- [132] Kasikci I (2018) *Short Circuits in Power Systems, A practical guide to IEC 60909-0*. Wiley-VCH.
- [133] Tleis N (2019) *Power Systems Modelling and Fault Analysis Theory and Practice*. Academic Press.
- [134] Strezoski V, Švenda G, Bekut D (2003) Extension of the canonical model to grounding parts of power systems under fault conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 25(7): 567-575. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(02\)00162-X](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(02)00162-X)

- [135] Luo GX, Semlyen A (1990) Efficient Load Flow Method for Large Weakly Meshed Networks. *IEEE Trans. on PS* 5(4): 1309-1316. <https://doi.org/10.1109/59.99382>
- [136] Xiaofeng Z, Soudi F, Shirmohammadi D, Cheng CS (1995) A Distribution Short Circuit Analysis Method Using Hybrid Compensation Method. *IEEE Trans. Power Syst.* 10(4): 2053–2059. <https://doi.org/10.1109/59.476075>
- [137] Teng JH (2005) Systematic short-circuit-analysis method for unbalanced distribution systems. *IEE Gen. Trans. & Dist* 152(4): 549–555. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20045132>
- [138] IEEE Standard C37.010-1999 for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis
- [139] Teng JH (2003) A direct approach for distribution system load flow solutions. *IEEE Trans Power Delivery* 3:882–887. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813818>
- [140] Cano JM, Mojumdar MRR, Norniella JG, Orcajo GA (2017) Phase shifting transformer model for direct approach power flow studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 91: 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.03.007>
- [141] Popović D, Bekut D, Treskanica V (2004) Specijalizovani DMS algoritmi. Srbija, Novi Sad, DMS Group.
- [142] Kersting WH (2001) Radial distribution test feeders. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, USA 2: 908-912. <https://doi.org/10.1109/PESW.2001.916993>
- [143] Bekut D (2009) Relejna zaštita. Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu, Novi Sad.
- [144] IEC 60255-3 Electrical relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time.
- [145] Paithankar YG, Bhide SR (2003) *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, Prentice-Hall of India.
- [146] Hussaina MH, Rahima SRA, Musirinb I (2013) Optimal Overcurrent Relay Coordination: A Review. *Procedia Engineering* 53: 332-336. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.043>
- [147] Noghabi AS, Mashhadi HR, Sadeh J (2010) Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Different Network Topologies Using Interval Linear Programming. *IEEE Transactions on Power Delivery* 25(3): 1348-1354. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2041560>
- [148] Kron G (1951) Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems Part I. The Six Basic Reference Frames. *AIEE Trans.* 70: 1239-1248. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1951.5060553>

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Прорачун кратких спојева са уваженим неизвесностима производње и потрошње
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука б) Шнајдер Електрик ДМС НС
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Енергетика, електроника и телекомуникације, као и у склопу пројекта Ш-42004, Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и компаније Шнајдер Електрик ДМС НС.
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација _____
1.2 Врсте података <input checked="" type="checkbox"/> а) квантитативни <input checked="" type="checkbox"/> б) квалитативни
1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____

снимци, фотографије: навести врсту **шеме тест примера мрежа**

текст, навести врсту **литературни извори**

ж) мапа, навести врсту _____

остало: описати **подаци о елементима шема тест примера мрежа и експериментални подаци**

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

Excel фајл, датотека **.xls**

b) SPSS фајл, датотека _____

c) PDF фајл, датотека _____

Текст фајл, датотека **.txt, .doc**

e) JPG фајл, датотека _____

Остало, датотека **.xml**

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

a) број варијабли **велики број**

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **велики број**

1.3.3. Поновљена мерења

a) да

не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

a) временски размак измедју поновљених мера је _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на _____

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип _____

б) корелационо истраживање, навести тип _____

в) анализа текста, навести тип **прикупљање података анализом доступне литературе**

д) остало, навести шта **резултати прорачуна**

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан поређењем добијених резултата са резултатима из литературе као и међусобним поређењем резултата добијених новоразвијеним и постојећим поступцима за прорачун кратких спојева.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу је извршена поређењем добијених података са литературним подацима.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у _____ репозиторијум.

3.1.2. URL адреса _____

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) Да

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог

Постоји ограничење о приступу подацима од стране компаније Шнајдер Електрик ДМС НС као и ризик од злоупотребе, неовлашћеног преузимања, обраде и објављивања целине или дела прикупљених и обрађених података истраживања.

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

Као што је претходно напоменуто постоји ограничење о приступу подацима од стране компаније Шнајдер Електрик ДМС НС као и ризик од злоупотребе целине или дела прикупљених и обрађених података истраживања. Подаци неће бити у отвореном приступу. Подаци се чувају у електронској форми на десктоп рачунару одговорног лица.

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен?

Не примењује се стандард за метаподатке.

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Не примењује се стандард за метаподатке.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

Подаци ће бити доступни истраживачу/има који директно контактира/ју одговорно лице за чување података – власника података.

Додатно, резултатима истраживања може се приступити кроз објављен научни рад: Obrenić MZ, Vidović PM, Strezoski LV. A novel intervals-based algorithm for the distribution short-circuit calculation. Electrical Engineering 2019; 101(4): 1145-1162. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00853-2>

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити

података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- a) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- a) јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

в) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Марко Обренић, marko.obrenic@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Марко Обренић, marko.obrenic@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Марко Обренић, marko.obrenic@uns.ac.rs
