



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



**PRORAČUN KOMPLEKSNIH KRATKIH SPOJEVA
NEURAVNOTEŽENIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA SA
DISTRIBUIRANIM ENERGETSKIM RESURSIMA**

– doktorska disertacija –

Mentor

Prof. dr Andrija Sarić

Kandidat

Asist. master Luka Strezoski

Novi Sad, 2017

Редни број, РБР:		
Идентификациони број, ИБР:		
Тип документације, ТД:	Монографска публикација	
Тип записа, ТЗ:	Штампана грађа	
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација	
Аутор, АУ:	Лука Стрезоски	
Ментор, МН:	Професор Андрија Сарић	
Наслов рада, НР:	Прорачун комплексних кратких спојева неуравнотежених дистрибутивних мрежа са дистрибуираним енергетским ресурсима	
Језик публикације, ЈП:	Српски	
Језик извода, ЈИ:	Српски / Енглески	
Земља публикавања, ЗП:	Србија	
Уже географско подручје, УП:	Војводина	
Година, ГО:	2017.	
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт	
Место и адреса, МА:	Нови Сад	
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	12 поглавља / 107 страна / 70 цитата / 11 табела / 44 слика / 0 графика / 1 прилог	
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД:	Електроенергетика	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Неуравнотежене мреже, генерализовано Δ -коло, дистрибутивне мреже, комплексни кратки спојеви, нумерација мрежа по слојевима, прорачуни оријентисани на гране	
УДК		
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН, Нови Сад	
Важна напомена, ВН:		
Извод, ИЗ:	<p>У дисертацији је предложен метод за прорачун комплексних кратких спојева у активним, неуравнотеженим дистрибутивним мрежама великих димензија. Предложеним методом је могуће прорачунавати комплексне кратке спојеве са произвољно изабраним бројем чворова и бројем фаза захваћених кратким спојем, без претходног компликованог извођења услова кратког споја. Различити кратки спојеви се дефинишу једноставном инспекцијом. Поред тога, сви елементи дистрибутивне мреже су моделовани довољно прецизним моделима, укључујући и савремене дистрибуиране енергетске изворе. Посебна пажња је посвећена овим елементима и извођењу њихових модела погодним за прорачуне кратких спојева мрежа великих димензија, с обзиром да ти модели до сада нису били развијени, а број ових уређаја у дистрибутивним мрежама је све већи. Предложеним методом је могуће прорачунавати неуравнотежене системе у несиметричним режимима пре кратког споја, а прорачун се врши у домену симетричних компоненти. Ова чињеница чини предложени метод изузетно брзим и погодним за “on-line mode” дистрибутивног менаџмент система. Нумерички резултати на неколико репрезентативних мрежа јасно приказују предност предложеног метода у односу на постојеће методе за прорачуне кратких спојева дистрибутивних мрежа.</p>	
Датум прихватања теме, ДП:	23.02.2017.	
Датум одбране, ДО:		
Чланови комисије, КО:	Председник:	др Раде Дорословачки
	Члан:	др Драган Поповић
	Члан:	др Душко Бекут
	Члан:	др Владимир Катић
	Члан:	др Драган Тасић
	Члан:	др Марија Прица
	Члан, ментор:	др Андрија Сарић
		Потпис ментора

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:	Luka Strezoski		
Mentor, MN:	Professor Andrija Sarić		
Title, TI:	Complex Short-Circuit Calculation in Unbalanced Distribution Networks with Distributed Energy Resources		
Language of text, LT:	Serbian		
Language of abstract, LA:	Serbian / English		
Country of publication, CP:	Serbia		
Locality of publication, LP:	Vojvodina		
Publication year, PY:	2017		
Publisher, PB:	Author's reprint		
Publication place, PP:	Novi Sad		
Physical description, PD: (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	12 chapters / 107 pages / 70 references / 11 tables / 44 pictures / 0 graphs / 1 appendix		
Scientific field, SF:	Electrical and computer engineering		
Scientific discipline, SD:	Power systems		
Subject/Key words, S/KW:	Unbalanced networks, generalized Δ -circuit, distribution networks, complex short-circuits, layer-numeration of the network, branch-oriented networks		
UC			
Holding data, HD:	Library of Faculty of technical sciences, Novi Sad		
Note, N:			
Abstract, AB:	<p>In this dissertation a calculation method for quantifying the impact of complex short-circuits on active unbalanced distribution systems is proposed. Unlike previous distribution system short-circuit calculations, the proposed method is capable of solving complex short-circuits with an arbitrary number of faulted buses and phases, without predefining the boundary (fault) conditions. Different short-circuits are defined by simple inspection of these faults. Moreover, all distribution system elements are appropriately modeled and integrated in the proposed method, including electronically coupled distributed energy resources (DERs). The development of new models for these DERs, suitable for on-line calculations of large-scale systems, is specially stressed as these models have not been developed yet. Finally, the proposed calculation procedure is capable of solving unbalanced systems, including mutually coupled sections, in unsymmetrical pre-fault states, and it is performed in the sequence domain. This makes the proposed method particularly fast and suitable for online distribution system analysis. The computation results show the advantages of the proposed method relative to previous short-circuit calculation methods, regarding both the required calculation time and the accuracy.</p>		
Accepted by the Scientific Board on, ASB:	23.02.2017.		
Defended on, DE:			
Defended Board, DB:	President:	Dr. Rade Doroslovački	
	Member:	Dr. Dragan Popović	
	Member:	Dr. Duško Bekut	
	Member:	Dr. Vladimir Katić	
	Member:	Dr. Dragan Tasić	
	Member:	Dr. Marija Prica	Menthor's sign
	Member, Mentor:	Dr. Andrija Sarić	

SADRŽAJ

SRPSKE I ENGLLESKE SKRAĆENICE I TUĐICE

GLAVA 1	1
UVOD	
1.1 PREGLED STANJA U OBLASTI	3
1.2 MOTIVACIJA ZA ISTRAŽIVANJEM	6
GLAVA 2	9
AKTIVNE DISTRIBUTIVNE MREŽE	
2.1 STRUKTURA DISTRIBUTIVNIH MREŽA	9
2.2 STRUKTURA I POGON RAZLIČITIH VRSTA DER	11
2.2.1 Fotonaponske elektrane	11
2.2.2 Vetrogeneratori	12
2.2.3 Mikroturbine	16
2.2.4 Gorivne ćelije	17
2.2.5 Motori sa unutrašnjim sagorevanjem	18
2.2.6 Distribuirana skladišta energije	19
2.2.6.1 Baterije akumulatora	19
2.2.6.2 Zamajci	21
2.2.7 Podela DER prema načinu povezivanja na mrežu	22
GLAVA 3	23
MODELI ELEMENATA TRADICIONALNIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA	
3.1 POTROŠAČI	23
3.2 SEKCIJE VODOVA	23
3.3 TRANSFORMATORI	24
3.4 TRADICIONALNI UREĐAJI ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE	27
3.5 KOREN MREŽE	27
3.6 TRETMAN INDUKTIVNIH I KAPACITIVNIH SPREGA	28
GLAVA 4	29
MODELI DER ZA PRORAČUN REŽIMA DISTRIBUTIVNIH MREŽA S KRATKIM SPOJEVIMA	
4.1 DER TIP 1 – SINHRONE MAŠINE DIREKTNO PRIKLJUČENE NA MREŽU	29
4.2 DER TIP 2 – ASINHRONA MAŠINA DIREKTNO PRIKLJUČENA NA MREŽU	30
4.3 DER TIP 3 – DFIM	31
4.4 DER TIP 3-4 – IBDER I DFIM U SLUČAJU USPEŠNE KONTROLE STRUJE KRATKOG SPOJA	32
4.4.1 Zahtevi FRT	34
4.4.1.1 Nemački zahtevi FRT	34
4.4.1.2 Irski zahtevi FRT	34

4.4.1.3	Danski zahtevi FRT	35
4.4.1.4	Zahtevi za injektiranjem reaktivne struje za vreme kratkog spoja	36
4.4.1.5	Zajedničke karakteristike prikazanih zahteva FRT	37
4.4.2	Modeli DER tipa 3-4 u suptranzitnoj, tranzitnoj i ustaljenoj vremenskoj sekvenci	37
4.4.2.1	Modeli DER tipa 3-4 u suptranzitnoj vremenskoj sekvenci	39
4.4.2.2	Modeli DER tipa 3-4 u tranzitnoj vremenskoj sekvenci	39
4.4.2.3	Modeli DER tipa 3-4 u ustaljenoj vremenskoj sekvenci	40
4.5	MODEL DISTRIBUTIVNE MREŽE – Γ SEGMENTI	41

GLAVA 5 43

OPŠTA RAZMATRANJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA S KOMPLEKSNIM KRATKIM SPOJEVIMA

5.1	OSNOVNE PRETPOSTAVKE	43
5.2	OPŠTI MODEL DISTRIBUTIVNE MREŽE S KOMPLEKSNIM KRATKIM SPOJEM	44
5.2.1	Prva dekompozicija	48
5.2.2	Druga dekompozicija	49
5.2.3	Treća dekompozicija	49
5.2.4	Četvrta dekompozicija	51

GLAVA 6 55

PREGLED POSTOJEĆIH REPREZENTATIVNIH POSTUPAKA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

6.1	KANONIČNI MODEL	55
6.1.1	Matrica incidencije	57
6.1.2	Kanonični model Δ -kola mreže s kratkim spojem	58
6.2	HIBRIDNI KOMPENZACIONI METOD (HKM)	59
6.3	PRORAČUN ZASNOVAN NA METODU KONTURNIH STRUJA	61
6.4	POSTUPAK EVS	63

GLAVA 7 67

PRORAČUN GENERALIZOVANOG Δ -KOLA

7.1	GENERALIZOVANO Δ-KOLO	67
7.2	PRORAČUN REŽIMA TROFAZNOG GENERALIZOVANOG Δ-KOLA	68
7.2.1	Trofazno generalizovano Δ -kolo	69
7.2.1.1	Tevenenov ekvivalent trofaznog generalizovanog Δ -kola viđen iz čvorova s kompleksnim kratkim spojem	71
7.2.1.2	Opis topologije kompleksnog kratkog spoja	72
7.2.1.3	Matematički model trofaznog modula kratkog spoja	73
7.2.1.4	Matrica incidencije	74
7.2.2	Matematički model kompleksnog kratkog spoja generalizovanog Δ -kola	75
7.2.3	Proračun stanja ekvivalenta generalizovanog Δ -kola	76
7.2.4	Proračun stanja celokupnog Δ -kola (procedura USSKN)	76

GLAVA 8 79

TOK PRORAČUNA REŽIMA NEURAVNOTEŽENE DISTRIBUTIVNE MREŽE S KOMPLEKSNIM KRATKIM SPOJEM

GLAVA 9	81
NUMERIČKA VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG POSTUPKA ZA PRORAČUN KOMPLEKSNIH KRATKIH SPOJEVA	
GLAVA 10	89
ZAKLJUČAK I PREDLOZI ZA NOVA ISTRAŽIVANJA	
GLAVA 11	91
PRILOG	
GLAVA 12	95
LITERATURA	

SRPSKE I ENGLLESKE SKRAĆENICE I TUĐICE

SRPSKE SKRAĆENICE

EES	Elektroenergetski sistem, u svim padežima i brojevima
DER	Distribuirani energetska resurs, u svim padežima i brojevima
DG	Distribuirani generator, u svim padežima i brojevima
DS	Distribuirano skladište, u svim padežima i brojevima
DG-DS	Dvosmerni (hibridni) DER, u svim padežima i brojevima
DMS	Distributivni menadžment sistem, u svim padežima i brojevima
HKM	Hibridni kompenzacioni metod
NN	Niski napon
SN	Srednji napon
SSKN	(Postupak) sumiranja struja i korekcija napona
USSKN	Unapređeni (postupak) sumiranja struja i korekcija napona
VN	Visoki napon
VVN	Vrlo visoki napon

ENGLLESKE SKRAĆENICE

AC	Alternating Current – Naizmenična struja
BFS	Backward-Forward Sweep – „Čišćenje unapred-unazad”
CHP	Combined Heat and Power – Termoelektrana-toplana (generator toplotne i električne energije)
DC	Direct Current – Jednosmerna struja
DFIM	Doubly Fed Induction Machine – Asinhrona mašina dvostrukog napajanja
IBDER	Inverter Based Distributed Energy Resource – Na invertoru zasnovan distribuirani energetska resurs
EMS	Energy Management System – Sistem za vođenje tehničkih poslova u preduzeću za prenos električne energije
EVS	Equivalent Voltage Source – Ekvivalentan naponski generator
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FRT	Fault Ride Through – Sposobnost DER da ostane u pogonu pri sniženim naponima izazvanim kratkim spojevima u mreži
LU	Lower-Upper (Factorization) – (Faktorizacija kvadratne matrice na) donju (L) i gornju (U) trougaonu matricu
LVRT	Low Voltage Ride Through – Sposobnost DER da ostane u pogonu pri sniženim naponima u normalnom pogonu, kao i u pogonu mreže s kratkim spojem
MPPT	Maximum power point tracking – tehnika koja se primenjuje kod vetroturbina i fotonaponskih sistema da bi se maksimizovala njihova izlazna snaga u svim uslovima
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cells – ćelije s membranama kojima se obezbeđuje protok protona a sprečava protok elektrona
SCADA (system)	Supervisory, Control And Data Acquisition (system) – Sistem za daljinski nadzor, komandovanje i prikupljanje podataka

TUĐICE

Chopper	Čoper – Noviji elektronski sistem za zaštitu konvertora na strani rotora mašine dvostrukog napajanja (DFIM) od velikih struja
Converter	Konvertor – u ovoj disertaciji se pod konvertorom podrazumeva pretvarač električne energije u električnu energiju zasnovan na energetskej elektronici
Crowbar	Kroubar – Stariji elektronski sistem za zaštitu konvertora na strani rotora mašine dvostrukog napajanja (DFIM) od velikih struja
Inverter	Invertor – uređaj za pretvaranje električne energije jednosmernog napona u električnu energiju naizmjeničnog napona

GLAVA 1

UVOD

Tradicionalni elektroenergetski sistemi (EES – proizvodnja, prenos, distribucija i neposredna potrošnja) funkcionisali su tako što je električna energija proizvedena isključivo velikim elektranama, zatim prenošena vodovima vrlo visokog (VVN) i visokog napona (VN) do napojnih transformatora VN/SN (SN – srednji napon), zatim vodovima srednjeg napona distribuirana do distributivnih transformatora, i konačno, vodovima niskog napona (NN) do krajnjih potrošača. Svaki od napojnih transformatora je bio jedinstvena tačka napajanja odgovarajuće distributivne mreže. Distributivne mreže su se sastojale isključivo od pasivnih potrošača, sekcija vodova, transformatora, baterija kondenzatora, prigušnica, itd. Električna energija, tradicionalno, nije proizvedena u distributivnim mrežama. Tokovi aktivnih snaga u distributivnim mrežama su bili usmereni isključivo od napojnih transformatora prema potrošačima. Slično, struje kratkih spojeva su bile usmerene isključivo od napojnih transformatora prema mestima kratkih spojeva.

U poslednje dve decenije ovaj koncept se značajno menja usled primene distribuiranih energetske resursa (DER). DER mogu biti distribuirani generatori električne energije (DG), distribuirana skladišta (DS), kao i njihova kombinacija – dvosmerni (hibridni) DER (DG-DS). Njihova primena postaje nužna. To je pre svega posledica zaoštrenog problema bilansa električne energije proizvedene tradicionalnim elektranama velikih snaga i rastućih potreba potrošača. Na taj način tradicionalne (pasivne) distributivne mreže postaju aktivne, odnosno postaju distributivni sistemi. Štaviše, njihovi delovi (*mikromreže*) mogu da funkcionišu u autonomnom pogonu – odvojeni od ostatka sistema. Pored toga, ako se delovi distributivnih sistema sastoje od više DG s harmonizovanim pogonom prema ostatku sistema (u jedinstvenom čvoru njihovog priključenja na sistem), onda je reč o *virtuelnim elektranama*.

Upravo takve mreže – sistemi podrazumevaće se pod terminom „distributivna mreža“ u tekstu koji sledi (ako se drugačije ne naglasi). S obzirom da su DG locirani u blizini potrošača, investicije u prenosnu i distributivnu mrežu, kao i gubici električne energije u celom EES, mogu se redukovati. S druge strane, viškovi energije mogu se skladištiti u DS. Ta energija se može koristiti u periodima povećane potrošnje. Pored toga, DER se često izvode s mogućnošću proizvodnje/apsorpcije reaktivne snage, što može da pomogne u održavanju kvalitetnog naponskog profila distributivne mreže. Takođe, većina savremenih DER su zasnovani na obnovljivim izvorima energije, kao što su sunce i vetar. Tako, njihova primena može da bude od koristi u borbi protiv zagađenja okoline (emisije karbon dioksida – CO₂). Zbog koristi koje se obezbeđuju primenom DER, elektroprivredna preduzeća podstiču ne samo njihovu što veću integraciju u distributivne mreže, već i što veće iscrpljivanje raspoložive energije iz već integrisanih DER.

Međutim, opšte je poznato da je korist od DER praćena ozbiljnim izazovima. U aktivnim distributivnim mrežama tokovi snaga mogu biti dvosmerni. Takođe, u slučaju kratkih spojeva, DER imaju svoj doprinos koji ne može da se zanemari. Stoga, tokovi struja kratkih spojeva u aktivnim distributivnim mrežama znatno su složeniji u poređenju s tokovima struja tradicionalnih, pasivnih distributivnih mreža. Pored toga, veliki udeo savremenih DER koji su zasnovani na uređajima energetske elektronike, značajno utiču na smanjenje inercije EES, čime

se otvara pitanje stabilnosti tih sistema. Pored toga, većina savremenih DER ne može da se prikaže modelima klasičnih naizmjeničnih mašina, niti u normalnim režimima, niti u režimima s kratkim spojevima. Ovim DER se najčešće mogu kontrolisati njihove struje (ograničiti na predefinisane vrednosti) u režimima distributivnih mreža s kratkim spojevima.

Iz svega navedenog, jasno je da integracija DER u distributivne mreže čini njihov pogon, upravljanje, modelovanje i proračune znatno složenijim. Ta složenost je još izraženija u distributivnim mrežama zasnovanim na konceptu pametnih mreža („smart distribution grids“). Stoga, tradicionalni proračuni pasivnih distributivnih mreža, ili aktivnih mreža koje sadrže samo naizmjenične mašine, nisu primenljivi nad savremenim distributivnim mrežama sa savremenim DER.

Usled potrebe za sve složenijim modelovanjem i proračunima distributivnih mreža, distributivni menadžment sistem (DMS) postaje nezaobilazni deo vođenja ovih mreža. DMS je softverski sistem za nadzor, vođenje, kao i planiranje pogona i razvoja distributivnih mreža. On obuhvata skup najsofisticiranijih proračuna distributivnih mreža, informacione tehnologije i sisteme za daljinski nadzor, komandovanje i prikupljanje podataka (SCADA). Osnovni deo DMS sistema jesu analitičke funkcije, odnosno energetske proračuni za nadzor, analizu i optimizaciju pogona, za planiranje razvoja distributivnih mreža, itd.

Proračuni ustaljenih tokova snaga i proračuni režima s kratkim spojevima, najčešći su proračuni elektroenergetskih mreža, kako proizvodno-prenosnih tako i distributivnih. Oni se koriste za sebe, ali mnogo češće u okviru velikog broja ostalih proračuna u sistemima za vođenje prenosnih mreža (EMS – Energy Management System) i DMS. Iz tih razloga, ova dva proračuna se smatraju *osnovnim proračunima* obe vrste mreža.

U ovoj disertaciji je obrađen model i proračun režima aktivnih, neuravnoteženih distributivnih mreža s kratkim spojevima, koje sadrže DER zasnovane na savremenim tehnologijama. Proračuni režima distributivnih mreža s kratkim spojevima imaju širok domen primene. Neke od tih primena jesu [5,6]:

1. Struje kratkih spojeva uzrok su prekomernih mehaničkih naprezanja i zagrevanja elemenata mreža, pa se elementi projektuju saglasno s tim strujama.
2. Zaštitna oprema (releji, prekidači, osigurači...), kojom se mreže štite od neželjenih režima, reaguje, pre svega, na struje i napone kratkih spojeva, radi električnog odvajanja elemenata s kratkim spojevima od ostataka mreža, pa se zaštitna oprema podešava i bira s obzirom na veličine tih struja i napona.
3. Dimenzionisanje prekidačke opreme i osigurača (kojima se prekidaju struje kratkih spojeva) zasniva se upravo na vrednostima struja kratkih spojeva ne na mestima samih kratkih spojeva, već na mestima gde je ta oprema locirana (krajevi elemenata mreža).
4. Kada su kratki spojevi daleko od izvora (generatora), tada je ponekad teško napraviti razliku između vrednosti struja kratkih spojeva i radnih struja, pa je potrebno izvršiti vrlo precizne proračune da bi se te razlike ipak uočile.
5. Struje zemljospojeva izazivaju napone na tlu, na malim rastojanjima oko mesta kratkih spojeva. Ti naponi mogu biti vrlo opasni po ljude (*napon koraka* i *napon dodira*).

6. Vrlo je čest slučaj paralelnih trasa električnih vodova golih provodnika i telekomunikacionih provodnika, cevovoda, metalnih ograda i slično. U ovakvim situacijama, u slučajevima kratkih spojeva u električnim mrežama s vrlo velikim strujama (nultog redosleda), indukovane elektromotorne sile u paralelno postavljenim neelektričnim elementima, često su tako velike da su uzrok tehničkih smetnji, pa čak i opasnosti po život ljudi koji su u kontaktu s tim elementima.

S obzirom na prethodno navedenu široku primenu postupaka za proračun kratkih spojeva, jasno je da se ovim postupcima mora odgovoriti na četiri osnovna zahteva:

1. Oni moraju da budu izuzetno precizni. Da bi se zadovoljila ova osobina, svaki element mreže mora da se modeluje što preciznije.
2. Oni moraju da budu rigidni. To znači da se mogu primeniti na rigidnim modelima mreža. Pod rigidnim modelom se podrazumeva da se njime svaki element mreže može modelovati dovoljno obuhvatno (s dovoljno detalja), s ciljem da se postigne zahtevana tačnost proračuna.
3. Oni moraju da budu izuzetno robusni. To znači da se njima mogu proračunavati najjednostavnije do najsloženijih mreža s podjednakom lakoćom. Odnosno da kvalitet rezultata proračuna bude u direktnoj srazmeri s kvalitetom korišćenih podataka i modela elemenata mreža.
4. Oni moraju da budu izuzetno brzi. Da bi se zadovoljila ova osobina, neophodno je izabrati adekvatne matematičke modele i metode za proračun stanja mreža, koji će najbolje odgovarati osobinama i vrstama mreža koje se proračunavaju.

1.1 PREGLED STANJA U OBLASTI

U ovom delu se daje globalan pregled stanja u oblasti proračuna kratkih spojeva u elektroenergetskim mrežama sa akcentom na distributivne mreže. U glavi 6 su detaljnije prikazani postojeći reprezentativni postupci za proračun kratkih spojeva.

Prenosne mreže su uglavnom trofazne s velikim brojem petlji. One se u normalnim režimima najčešće mogu aproksimirati uravnoteženim mrežama u simetričnim režimima. Proračuni kratkih spojeva prenosnih mreža su definitivno utvrđeni pre nekoliko decenija [1-6]. S obzirom na strukturu tih mreža, postupci za proračun kratkih spojeva zasnovani su na modelovanju prenosnih mreža metodom nezavisnih napona. U osnovi ovog metoda leži matrica admitansi mreže, koja ima dimenzije broja njenih čvorova. Modeli mreža s kratkim spojevima su linearni, pa se njihovi proračuni zasnivaju na Gausovoj redukciji, odnosno njenoj varijanti – LU faktorizaciji matrica admitansi. Ovo je osnovni nedostatak postupaka za proračun kratkih spojeva prenosnih mreža prilikom pokušaja da se ovi postupci „prenesu“ na distributivne mreže.

Struktura distributivnih mreža značajno se razlikuje od strukture prenosnih mreža. Distributivne mreže su uglavnom radijalne i sastoje se pretežno od kratkih i neuravnoteženih sekcija, s velikim odnosima rezistansi i reaktansi (R/X) njihovih rednih impedansi. Distributivne mreže mogu biti *višefazne* („miksovane“). To znači da mogu da sadrže trofazne, dvofazne i jednofazne elemente. To se odnosi i na potrošače, koji mogu biti priključeni

trofazno, dvofazno, ili jednofazno. Na osnovu prethodno navedenog, može se zaključiti da su distributivne mreže generalno neuravnotežene, u nesimetričnim režimima. Takođe, distributivne mreže se sastoje od vrlo velikog broja čvorova, pa sledstveno tome i matrice admitansi kojima bi se one modelovale imale bi vrlo velike dimenzije. LU faktorizacija takvih matrica osnovni je nedostatak pokušaja da se matrični postupci za proračun kratkih spojeva primene na distributivne mreže [7-11]. Uz to, promene topoloških struktura distributivnih mreža znatno su češće nego u slučaju prenosnih mreža, pa bi to zahtevalo i jednako česte faktorizacije matrica admitansi.

Prethodno navedeni nedostaci matričnih postupaka za proračun kratkih spojeva (i tokova snaga) u slučaju distributivnih mreža prouzrokovali su razvoj postupaka zasnovanih na „čišćenju unapred-unazad“ („*backward-forward sweep*“ – *BFS*) [12-21]. Ovi postupci ne zahtevaju formiranje i faktorizaciju matrica admitansi. Oni imaju jednu izuzetno značajnu osobinu koja ih čini pogodnim za proračune (radijalnih i slaboupetljanih) distributivnih mreža velikih dimenzija. To je numeracija grana i čvorova saglasno s principom slojeva. Slaboupetljane distributivne mreže se svode na radijalne (radijalizovane) mreže uvođenjem čvorova prekida petlji („*break points*“). Ti prekidi se zamenjuju kompenzacionim strujama. U osnovi procedure kompenzacije nalazi se Tevenen/Nortonova teorema. Jedna od glavnih prednosti postupaka *BFS* jeste potreba za samo jednom inverzijom (LU faktorizacijom) „matrice osetljivosti“, odnosno Tevenenove matrice admitansi dimenzija jednakih zbiru broja petlji, broja naizmjeničnih mašina i broja kratkih spojeva.

U referencama [16, 17] za proračun kratkih spojeva trofaznih distributivnih mreža razvijen je „hibridni kompenzacioni metod“ („*Hybrid Compensation Method*“) – HKM. Ovaj metod je zasnovan na *kompenzacionoj proceduri*. Njime se prvo proračunaju struje kratkih spojeva, struje petlji i struje kratkog spoja naizmjeničnih mašina, koristeći se Tevenenovim ekvivalentom mreže. Zatim se procedura *BFS* u faznom domenu koristi za proračun čitavog stanja distributivne mreže.

Osnovni nedostaci ovih postupaka su sledeći: 1) Za svaki kratak spoj moraju se izvoditi odgovarajući „*uslovi kvara*“. Ovo čini navedene postupke nepraktičnim za korišćenje u industrijskim softverima kojima bi trebali da se rešavaju bilo kakvi kratki spojevi s podjednakom lakoćom i bez složenog predefinisavanja uslova kvara za svaki različit kratak spoj; 2) Ovi metodi su zasnovani na pretpostavci da su tradicionalne naizmjenične mašine jedini aktivni elementi u distributivnim mrežama, što više nije slučaj. U savremene distributivne mreže sve se više integrišu asinhrono mašine dvostrukog napajanja („*doubly fed induction machines* – *DFIMs*“) [22-29], kao i DER povezani na mrežu preko invertora („*inverter based distributed energy resources* – *IBDERs*“) [22-29]. Ovim savremenim DER mogu se kontrolisati (i ograničiti) njihove struje kratkih spojeva, pa u proračunima kratkih spojeva distributivnih mreža ne mogu da se modeluju kao tradicionalne naizmjenične mašine. Štaviše ne postoje jasno utvrđeni i standardizovani modeli za ove DER, koji su pogodni za proračune mreža velikih dimenzija. 3) Ovi metodi su zasnovani na pretpostavci da su mreže trofazne, što vrlo često nije slučaj s distributivnim mrežama.

Sličan postupak je predložen u referenci [18], s tim što se u postupku *BFS* umesto sumiranja struja i korekcija napona, sumiraju admitanse i struje, pa koriguju naponi. Ovaj postupak ima identična tri nedostatka kao i prethodni postupci.

Postupci za proračun kratkih spojeva predloženi u referencama [30, 31] razlikuju se od svih prethodno navedenih postupaka. Modelovanje i proračun mreža u tim postupcima nisu

zasnovani niti na matrici admitansi niti na postupcima BFS. Oni su zasnovani na formiranju matrice kojom se opisuje veza između injektiranih struja čvorova i struja grana mreže („*bus-current-injection to branch current matrix – BIBC*“) kao i matrice kojom se opisuje veza između struja grana i napona čvorova mreže („*branch-current to bus-voltage matrix – BCBV*“). U suštini ova dva postupka leži modelovanje mreže metodom konturnih struja. Pokazano je da su performanse ovih postupaka bolje od performansi postupaka zasnovanih na faktorizaciji matrice admitansi kada su u pitanju proračuni distributivnih mreža. U [14] je pokazano da su performanse postupaka BFS zasnovani na sumiranju struja i korekciji napona (postupci SSKN), znatno bolje od performansi prethodno navedenih postupaka. Pored toga, postupci [30, 31] imaju takođe tri nedostatka kao i postupci BFS.

Još jedna vrsta proračuna kratkih spojeva distributivnih mreža predložena je u međunarodnim standardima IEC i IEEE [32-37]. U standardu [32-35] prvi put je predložen metod „*Equivalent Voltage Source – EVS*“ za proračun kratkih spojeva. Ovaj metod je zasnovan na teoremi superpozicije. Doprinos svakog izvora struje kratkog spoja („korena mreže“, tradicionalnih naizmjeničnih mašina, itd.) računa se posebno. Sabiranjem pojedinačnih struja dobija se njihov ukupan doprinos. Međutim, ovim postupcima se ne proračunava čitav režim mreže s kratkim spojem, već samo struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja. Ovo je veliki nedostatak metoda EVS, s obzirom da je najčešće potrebno proračunati raspodelu struje kratkog spoja u celoj mreži, da bi se precizno podesila i koordinisala relejna zaštita, izabrala zaštitna oprema itd. Pored toga, uticaj potrošača je potpuno zanemaren, što može da dovede do značajnih grešaka u slučaju mreža s dugčkim vodovima (mreže u ruralnim predelima, u najvećem broju slučajeva). Takođe, u napred citiranoj verziji standarda obrađene su samo tradicionalne naizmjenične mašine. IBDER i DFIM nisu obuhvaćeni ovim proračunima. Sličan postupak je predložen i u međunarodnom standardu IEEE [36], pa i on ima iste nedostatke.

U najnovijoj verziji standarda IEC [37], metod EVS je dopunjen predlozima za uvažavanje DFIM i IBDER. Međutim, njihova obrada je suviše pojednostavljena i samim tim nedovoljno tačna. Upravljačke strategije koje mogu biti ugrađene za upravljanje strujom kvara nisu uopšte uvažene, dok se za vrednost njihove struje zahteva informacija od proizvođača. U najvećem broju slučajeva ova informacija nije dostupna. Pored toga, kao i svim do sada navedenim postupcima za proračun kratkih spojeva, metodom EVS se obrađuju samo osnovne vrste metalnih kratkih spojeva, dok se složeniji kratki spojevi ne obrađuju.

Da bi se izbeglo ograničenje da se proračunima kratkih spojeva obuhvataju samo predefinisani kratki spojevi, u ovoj disertaciji se definiše *kompleksan kratak spoj*. On se sastoji od po želji izabranih jednostrukih ili simultanih kratkih spojeva, sa po želji izabranim brojem čvorova s kratkim spojevima, kao i po želji izabranim brojem faza čvorova s kratkim spojem.

Jedini do sada razvijeni postupak za proračun kratkih spojeva kojim se ne zahteva predefinisanje i složeno izvođenje uslova kvara za svaki različit kratak spoj jeste kanonični model („*Canonical Model*“) [6]. Ovim se postupkom proračunavaju bilo kakvi kompleksni kratki spojevi sa jednakom efikasnošću. Međutim, kanonični model je razvijen za proračune kratkih spojeva prenosnih mreža, pa je postupak zasnovan na modelovanju mreže matricom admitansi. On je zasnovan na pretpostavci da je mreža uravnotežena i trofazna. Takođe, i u tom postupku se pretpostavlja da su tradicionalne naizmjenične mašine jedini aktivni elementi.

Praktično svi postupci za proračun kratkih spojeva koji se zasnivaju na pretpostavci da su naizmjenične mašine jedini aktivni elementi u mreži, izvode se pomoću dekompozicije kola s kratkim spojem na kolo sa režimom pre kratkog spoja i tradicionalno pasivno Δ -kolo. U ovoj

disertaciji će biti pokazano da to nije moguće u slučaju savremenih mreža sa integrisanim DFIM i IBDER. Zato će biti predložen novi koncept *generalizovanog Δ -kola*.

1.2 MOTIVACIJA ZA ISTRAŽIVANJEM

Iz prethodno navedenog se mogu utvrditi sledeći nedostaci svih do sada razvijenih postupaka za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža:

1. Ne postoje jasno utvrđeni i opšte prihvaćeni modeli za DFIM i IBDER pogodni za proračune kratkih spojeva distributivnih mreža velikih dimenzija;
2. S obzirom na prirodu DFIM i IBDER, oni ne mogu biti integrisani u tradicionalne proračune kratkih spojeva, zasnovane na konceptu tradicionalnog Δ -kola;
3. Svim do sada razvijenim postupcima za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža potrebno je predefinisati – unapred izvoditi uslove kvara vrlo složenim postupcima u vidu vrlo složenih formula, za svaki kratak spoj.

Stoga, motivacija za istraživanjem predstavljenim u ovoj disertaciji bila je potreba za razvojem jednog rigidnog i robusnog postupka za proračun kratkih spojeva neuravnoteženih, aktivnih distributivnih mreža velikih dimenzija, koje sadrže DER najsavremenijih tehnologija i kojim se efikasno mogu rešavati kompleksni kratki spojevi, bez složenog izvođenja uslova kvara. Shodno tome, mogu se istaći sledeći ciljevi disertacije:

1. Razviti matematičke modele za DFIM i IBDER za potrebe proračuna kratkih spojeva;
2. Razviti novi koncept generalizovanog Δ -kola koji omogućuje integraciju DFIM i IBDER u proračun kratkih spojeva;
3. Unaprediti ideju kanoničnog modela za opis kompleksnih kratkih spojeva za potrebe aktivnih distributivnih mreža velikih dimenzija;
4. Razviti unapređenu verziju postupka SSKN (USSKN) za proračun stanja neuravnoteženog generalizovanog Δ -kola i u njega integrisati opis kompleksnog kratkog spoja iz tačke 3.

Ovi ciljevi će se realizovati razvojem jednog rigidnog, robusnog i brzog postupka za proračun kompleksnih kratkih spojeva u neuravnoteženim distributivnim mrežama velikih dimenzija, sa integrisanim DER savremenih tehnologija.

Rad je organizovan po sledećim glavama: Posle uvoda, u glavi 2 je opisana struktura aktivnih distributivnih mreža, kao i struktura i pogon različitih vrsta DER. Takođe, DER su svrstani u četiri kategorije, na osnovu načina njihovog priključenja na mrežu. U glavi 3 su opisani matematički modeli elemenata tradicionalnih distributivnih mreža za proračune kratkih spojeva. To su: potrošači, sekcije vodova, transformatori i tradicionalni uređaji za kompenzaciju reaktivne snage. U glavi 4 su opisani matematički modeli svih vrsta DER, za proračune kratkih spojeva. Glavni akcenat ove glave je stavljen na uvođenju modela za DFIM i IBDER, zato što je to od suštinske važnosti za proračun kratkih spojeva savremenih distributivnih mreža. U glavi 5 su data opšta razmatranja distributivne mreže s kratkim spojem

i opisane su četiri dekompozicije modela mreže koje se koriste za proračun kratkih spojeva. U glavi 6 su opisana četiri postojeća reprezentativna postupka za proračun kratkih spojeva: 1) proračun zasnovan na inverziji (LU faktorizaciji) matrice admitansi mreže, 2) proračun zasnovan na postupku SSKN, 3) proračun zasnovan na metodu konturnih struja i 4) proračun zasnovan na metodu EVS. U glavi 7 je dat proračun generalizovanog Δ -kola s kompleksnim kratkim spojem. Za taj proračun je korišćen USSKN postupak koji je predložen u ovoj disertaciji. U glavi 8 je dat blok-dijagram proračuna kompletnog režima distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem. U glavi 9 su dati rezultati i numerička verifikacija predloženog postupka za proračun režima distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem. U glavi 10 su dati zaključci i predlozi za dalji rad na materiji koja je obrađena u ovoj disertaciji. Glava 11 sadrži prilog koji jeste važan kao podrška doprinosu metoda koji je predložen, ali bi opterećivao osnovni deo disertacije. Glava 12 sadrži literaturu koja je korišćena za pisanje disertacije.

GLAVA 2

AKTIVNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

U ovoj glavi je opisana struktura aktivnih distributivnih mreža (deo 2.1), kao i struktura i pogon različitih vrsta DER (deo 2.2). To je potrebno radi utvrđivanja matematičkih modela elemenata aktivnih distributivnih mreža za proračun kratkih spojeva.

2.1 STRUKTURA DISTRIBUTIVNIH MREŽA

Distributivne mreže su delovi EES kojima se električna energija, preuzeta iz (sub)prenosnih mreža, distribuirana (raspodeljuje) potrošačima. Kada je u pitanju srpski EES (praktično i evropski), električna energija se iz trofazne prenosne mreže VVN 400 i 220 kV preuzima trofaznim transformatorima 400/115 i 220/115 kV/kV. S tih transformatora se napajaju trofazni VN vodovi 110 kV. Oni čine *sub-prenosnu mrežu*. Sa trofazne sub-prenosne mreže električna energija se preuzima trofaznim *napojnim transformatorima* 110/21(10.5) kV/kV¹. S njih se napajaju trofazni vodovi SN 20(10) kV. Sa ovih vodova električna energija se preuzima trofaznim *distributivnim transformatorima* 20(10)/0.4 kV. S njih se napajaju trofazni vodovi NN 0.380 kV (380 V)². Sa ovih vodova se električnom energijom napajaju individualni potrošači (domaćinstva, radnje itd.) [38, 39].

Transformatori VVN/VN uglavnom su regulacioni s regulacijom pod opterećenjem. Isti je slučaj i s napojnim transformatorima VN/SN. Distributivni transformatori su takođe regulacioni ali s regulacijom u beznaponskom stanju. Nominalni naponi sekundara svih tih transformatora veći su za 5% od nominalnih napona mreža koje se s njih napajaju. To je potrebno radi prevencije suviše niskih napona na „krajevima“ napajanih mreža.

Vodovi VN najčešće su golih provodnika, s retkim izuzecima kada su kablovski. U ovom drugom slučaju se ukopavaju u zemlju. Vodovi SN su kako golih provodnika tako i kablovski. Isto se odnosi i na vodove NN.

Sa mreža NN se često napajaju motori većih snaga (više desetina kVA), a sa mreža SN (npr. 6 kV) još većih snaga (stotine kVA).

Kao što je rečeno u uvodu, u proteklim decenijama sve je češća pojava DER koji se priključuju na mreže SN i NN. Snage DER se nalaze u širokom opsegu od nekoliko kVA do nekoliko MVA, pa i desetina MVA. DER manjih snaga se priključuju na mrežu NN, a većih na mrežu SN i sub-prenosnu mrežu. Kada su u pitanju DG, za njihov pogon se koriste dizelmotori, vodotokovi, vetar, sunce, itd. Opis strukture DER (DG i DS), kao i njihovog načina rada, predmet je dela 2.2.

¹ Sub-prenosna i distributivna mreža sa tri naponska nivoa u Srbiji je 110 kV/20 kV/0.4 kV (npr. u Vojvodini), ili 110 kV/10 kV/0.4 kV (npr. u Beogradu). U Srbiji se nailazi i na SN nivo 35 kV, koji se napušta.

² U Srbiji je u toku prelaz sa NN nivoa 3×0.380 (3×0.220) kV na 3×0.400 (3×0.230) kV. Sledstveno tome, s nominalnih napona NN strana distributivnih transformatora od 0.400 kV prelazi se na 0.420 kV.

Transformatori VVN/VN pripadaju preduzećima za prenos električne energije. Sub-prenosna mreža VN negde pripada preduzećima za prenos električne energije, a negde preduzećima za distribuciju električne energije. Isti je slučaj i s napojnim transformatorima (transformatorskim stanicama) VN/SN. Mreže SN i NN, do brojila električne energije, pripadaju preduzećima za distribuciju električne energije. Brojila električne energije ponegde pripadaju individualnim potrošačima, a težnja je da ih preuzmu preduzeća za distribuciju električne energije. Električne instalacije unutar individualnih potrošača pripadaju isključivo tim potrošačima.

Dakle, mrežom jednog preduzeća za distribuciju električne energije mogu da budu obuhvaćeni: 1) transformatori VN/SN, 2) mreže SN, 3) transformatori SN/NN i 4) mreže NN sa uključenim brojilima električne energije individualnih potrošača. Nije redak slučaj da tim preduzećima pripadaju i sub-prenosne mreže, ili delovi tih mreža.

Zbog ogromnog broja čvorova mreže jednog distributivnog preduzeća, problem njenog proračuna obično se postavlja za deo, a ne za celu mrežu. Modelovanje i proračun distributivnih mreža su uglavnom sledeći:

1. Sub-prenosna mreža VN i mreža SN koja se napaja sa transformatora VVN/VN (*glavni izvor* sub-prenosne i mreže SN). Njeni potrošači jesu sabirnice SN distributivnih transformatora SN/NN kojima se električna energija preuzima s tih mreža i dalje distribuira *potrošačkim područjima* NN koja se s njih napajaju (redak slučaj).
2. Mreža SN koja se napaja sa jednog napojnog transformatora – glavni izvor mreže SN. Njeni potrošači jesu sabirnice SN ili NN distributivnih transformatora kojima se električna energija preuzima s tih mreža i dalje distribuira *potrošačkim područjima* NN koja se s njih napajaju (vrlo čest slučaj).
3. Više mreža SN koje se napajaju sa istog napojnog transformatora – glavni izvor mreža SN. Njeni potrošači su opisani u prethodnom slučaju (vrlo čest slučaj).
4. NN mreža koja se napaja sa jednog distributivnog transformatora – glavni izvor mreže NN. Njeni potrošači jesu individualni potrošači (vrlo čest slučaj).
5. Cela mreža SN i NN koja se napaja sa jednog napojnog transformatora – glavni izvor mreže (redak slučaj).

Radi obrade strukture distributivnih mreža u narednom tekstu se utvrđuje nekoliko definicija.

Definicija 2.1.1 – *Staza distributivne mreže* jeste skup rednih elemenata kojima su povezana dva čvora.

Definicija 2.1.2 – *Staza distributivne mreže* koja počinje i završava u istom čvoru, ili počinje u jednom glavnom izvoru i završava u drugom glavnom izvoru, jeste *petlja distributivne mreže*.

Definicija 2.1.3 – *Radijalna distributivna mreža* jeste mreža u kojoj nema petlji.

Definicija 2.1.4 – *Upetljana distributivna mreža* jeste mreža u kojoj ima petlji.

Sub-prenosne mreže VN su još uvek uglavnom upetljane. Distributivne mreže su uglavnom radijalne, s malim brojem izuzetaka. Petlje u distributivnim mrežama se pojavljuju retko. Evo nekoliko izuzetaka:

1. Situacija trajnog pogona kada se sa dva ili više paralelno povezanih distributivnih transformatora napaja mreža NN.
2. Situacija trajnog pogona dva ili više paralelno povezanih vodova SN.
3. Privremeni paralelan pogon dva napojna transformatora VN/SN radi prebacivanja napajanja dela mreže SN (jedan ili više vodova SN) sa jednog na drugi napojni transformator, bez prekida napajanja potrošača vodova.
4. Privremena petlja u toku prebacivanja dela potrošnje s jednog voda na drugi vod SN bez prekida napajanja potrošača oba voda.
5. Upetljana gradska mreža NN koja se napaja s nekoliko distributivnih transformatora.

U ovoj disertaciji se razmatraju aktivne, neuravnotežene trofazne, radijalne i slabopetljane distributivne mreže velikih dimenzija, sa jednim korenom i proizvoljnim brojem DER.

2.2 STRUKTURA I POGON RAZLIČITIH VRSTA DER

Tradicionalni načini proizvodnje električne energije, kao što su hidroelektrane, elektrane na fosilna goriva, nuklearne i ostale elektrane koje su zasnovane na sinhronim generatorima direktno povezanim na mrežu, neće biti posebno opisani u ovom poglavlju. Struktura i način rada tradicionalnih generatora se mogu naći u bilo kom udžbeniku analize EES [1, 2, 41, 42]. Njihovi matematički modeli za proračun kratkih spojeva biće vrlo kratko obrađeni u glavi 4 radi kompletnosti izlaganja. U nastavku ovog dela biće opisana struktura i način rada savremenih DER povezanih na mrežu drugačije od tradicionalnih generatora. Ova izlaganja su zasnovana na referencama [43-51]. Njihovi matematički modeli za proračun kratkih spojeva biće obrađeni takođe u glavi 4.

Na svim slikama u ovoj glavi, za svaki uređaj energetske elektronike biće korišćen opšti termin „pretvarač“. Sa same slike i teksta koji je prati biće jasno o kom se uređaju radi (pretvarač prema mreži ili mašini, DC–DC, DC–AC, AC–DC pretvarač, inverter, ispravljač itd.)

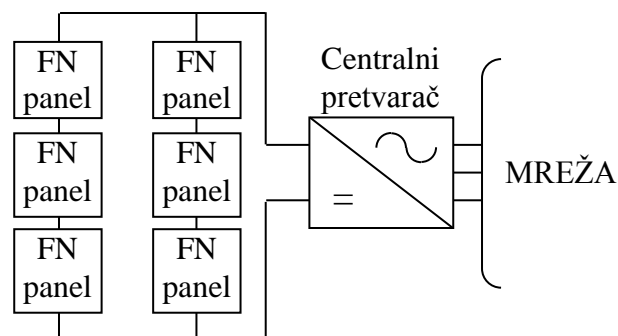
2.2.1 Fotonaponske elektrane

Fotonaponski generatori i elektrane zasnivaju se na procesu proizvodnje električne energije iz sunčeve (solarne) energije, uz pomoć fotonaponskih ćelija. Fotonaponske ćelije su napravljene od poluprovodničkih materijala, kao što je kristalni silicijum, kojima se apsorbuje sunčeva energija, a proizvodi električna energija kroz proces koji se naziva *fotonaponski efekat*. Step en iskoristivosti fotonaponske ćelije je tipično između 15% i 20%. Zato, da bi se proizvela velika količina električne energije, fotonaponski paneli moraju biti veliki, odnosno moraju da se sastoje od velikog broja ćelija. Jedan panel se uglavnom sastoji od 36 do 72 ćelije. Veličina

panela se razlikuje u zavisnosti od proizvođača, ali je uglavnom u opsegu od 0,5 do 1 m². Njime se proizvodi oko 150 W/m² električne energije tokom najveće osunčanosti, za panel sa koeficijentom iskoristivosti 15%. Takođe, paneli se grupišu u velikim količinama, da bi se formirali sistemi jedinstvenih naponskih i strujnih karakteristika. Ovi sistemi se na distributivnu mrežu povezuju pomoću elemenata energetske elektronike, kao što su trofazni (za manje snage jednofazni) invertori.

Fotonaponskim sistemom se proizvodi jednosmeran (DC) napon, čija vrednost zavisi od konfiguracije i količine panela u sistemu. Zbog ove osobine, za povezivanje na mrežu neophodni su invertori kojima se jednosmerni napon transformiše u naizmenični (AC) napon, pogodan za mrežu. Proizvedeni jednosmerni napon u najvećem broju slučajeva prvo mora da se podigne na višu vrednost, koristeći se odgovarajućim DC-DC pretvaračima, a zatim da se transformiše u naizmenični napon, pomoću invertora. Proces upravljanja izlaznog napona i struje fotonaponskog sistema u normalnim uslovima rada mora biti optimizovan u zavisnosti od vremenskih uslova. Specijalizovani upravljački algoritmi, tzv. „*maximum power point tracking*“ – MPPT, razvijeni su da bi se omogućila maksimalna izlazna snaga, za različite vremenske uslove. Upravljački proces MPPT i povećanje modula napona su uglavnom ugrađeni u DC-DC pretvarače, dok se inverter koristi za kontrolu izlazne struje. Ovde je vrlo bitno napomenuti da se inverter koristi i za kontrolu izlazne struje u slučajevima kratkog spoja u mreži. Ovim inverterima se ograničava modul struje kratkog spoja, ali je njime moguće određivati i odnos aktivnog i reaktivnog dela ove struje. Ovo je naročito važno za izvođenje matematičkih modela ovog tipa DER, koji će detaljnije biti obrađeni u glavi 4.

Fotonaponski sistemi mogu biti strukturirani u nekoliko različitih konfiguracija. Svaka konfiguracija je preko elemenata energetske elektronike povezana na mrežu, kao što je ranije rečeno. Na slici 2.2.1.1 prikazana je konfiguracija u kojoj se jedan centralni trofazni inverter koristi za povezivanje fotonaponskih sistema na mrežu. Ovo je i najčešća konfiguracija u današnjim fotonaponskim sistemima. Fotonaponski moduli su međusobno povezani redno i/ili paralelno. Ostale konfiguracije i njihova objašnjenja mogu da se nađu u referenci [43].



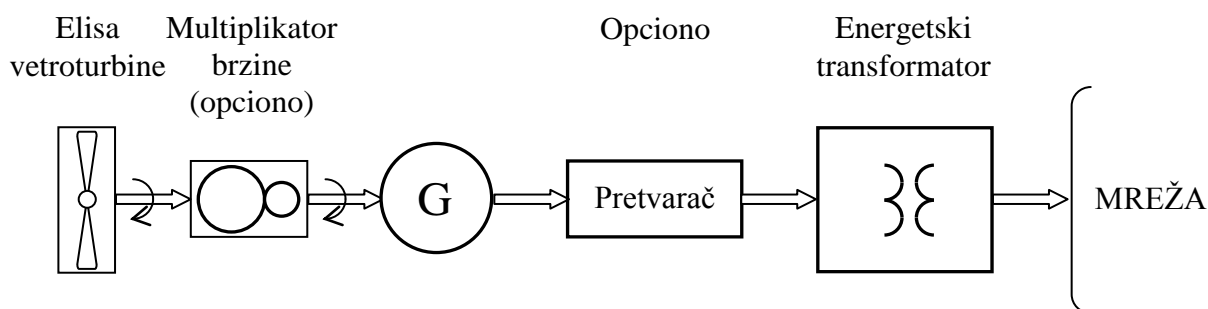
Slika 2.2.1.1 – Fotonaponski sistem povezan na mrežu preko centralnog trofaznog pretvarača

2.2.2 Vetrogeneratori

Vetroturbinama se kinetička energija vetra transformiše u mehaničku energiju, koja se pomoću generatora transformiše u električnu energiju. Električna energija se uglavnom proizvodi asinhronim ili sinhronim generatorima. Ako su u pitanju sinhroni generatori, oni su povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike. Kada su u pitanju asinhroni generatori, oni mogu biti povezani i direktno, ali i preko uređaja energetske elektronike. Tipična snaga vetrogeneratora je između 10kW i 8MW. Snaga vetra se preuzima koristeći se

elisom koja je povezana na rotor generatora. U poslednje dve decenije tehnologija vetrogeneratora je toliko napredovala da je postala opšte prihvaćena i u rangu je sa tradicionalnim tehnologijama. Danas je samo u Evropi instalisano blizu 100GW vetrogeneratora, dok se njihov rast do kraja ove decenije predviđa i do 240GW [52].

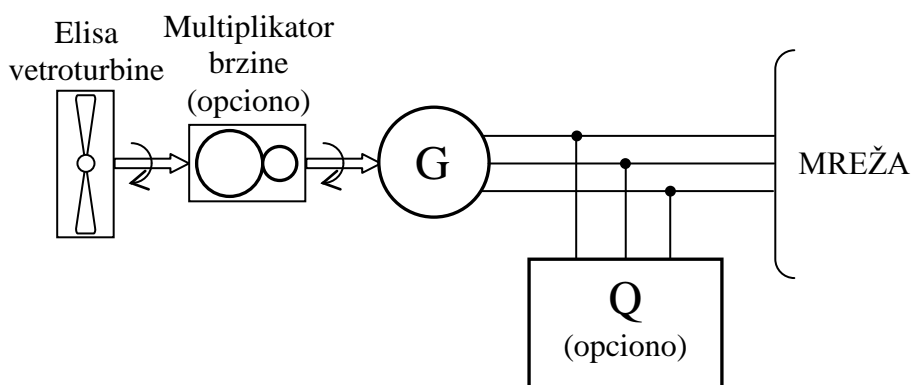
Glavne komponente vetrogeneratora su prikazane na slici 2.2.2.1. To su: elisa, multiplikator brzine („gear box“), generator (G), energetski transformator i (u najvećem broju slučajeva) uređaj energetske elektronike (konvertor).



Slika 2.2.2.1 – Komponente vetrogeneratora

Postoji četiri tipa vetrogeneratora koji se svrstavaju u sledeće tri kategorije: 1) vetrogeneratori direktno povezani na mrežu, 2) vetrogeneratori povezani na mrežu delimično preko uređaja energetske elektronike, 3) vetrogeneratori povezani na mrežu potpuno preko uređaja energetske elektronike.

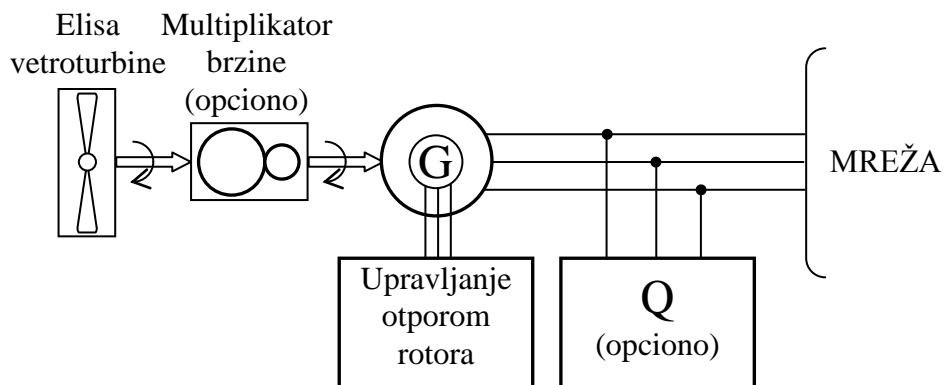
U vetrogeneratoru koji je direktno povezan na mrežu koristi se kavezni asinhroni generator. On je poznat kao *vetrogenerator tipa 1* – slika 2.2.2.2. Turbinom vetrogeneratora se okreće rotor asinhronog generatora priključenog direktno na mrežu, bez uređaja energetske elektronike. Ovakva turbina mora da se okreće konstantnom brzinom (sa 1-2% dozvoljenog odstupanja). Asinhroni generator troši reaktivnu snagu, koja mora biti obezbeđena ili iz mreže, ili iz priključene baterije kondenzatora (Q) na mestu priključenja generatora na mrežu. Ovakvim se generatorom ne može proizvoditi reaktivna snaga.



Slika 2.2.2.2 Vetrogenerator tipa 1

Vetrogenerator u kojem se koristi asinhroni generator (G) s namotanim rotorom i spoljnim otpornikom u kolu rotora poznat je kao *vetrogenerator tipa 2* – slika 2.2.2.3. Otpor spoljnog otpornika rotora se može menjati pretvaračem sa diodnim mostnim ispravljačem. Sa različitim vrednostima otpora, generator može da radi u različitim radnim tačkama. To omogućava ograničeni opseg brzina, obično manje od 10% od nominalne brzine [52]. Iako se

u ovoj konfiguraciji nalaze uređaji energetske elektronike za povezivanje spoljnog otpornika rotora, ovaj tip vetrogeneratora je povezan direktno na mrežu, pa i on spada u prvu vrstu vetrogeneratora. Za napajanje reaktivnom snagom ovog tipa generatora važi isto što i za prethodni tip 1.



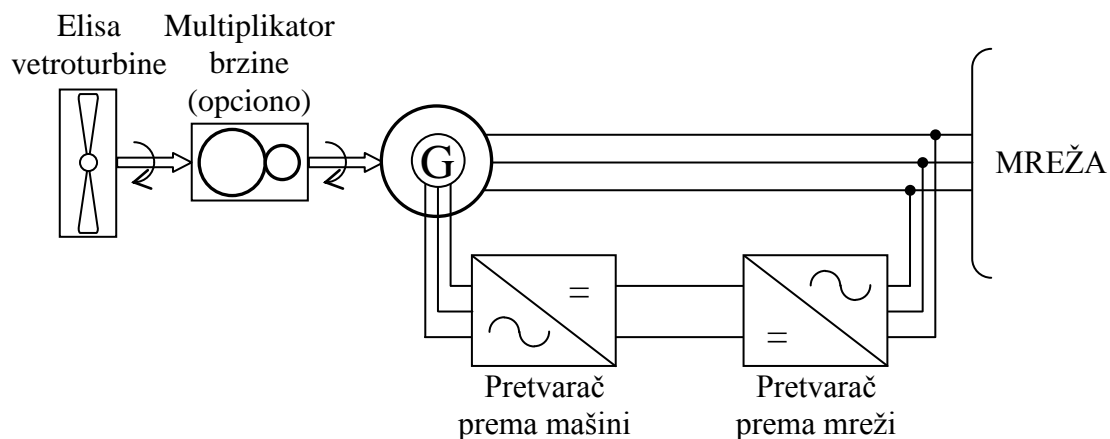
Slika 2.2.2.3 – Vetrogenerator tipa 2

Vetrogeneratori prikazani na slikama 2.2.2.2 (tip 1) i 2.2.2.3 (tip 2) svrstavaju se u prvu kategoriju.

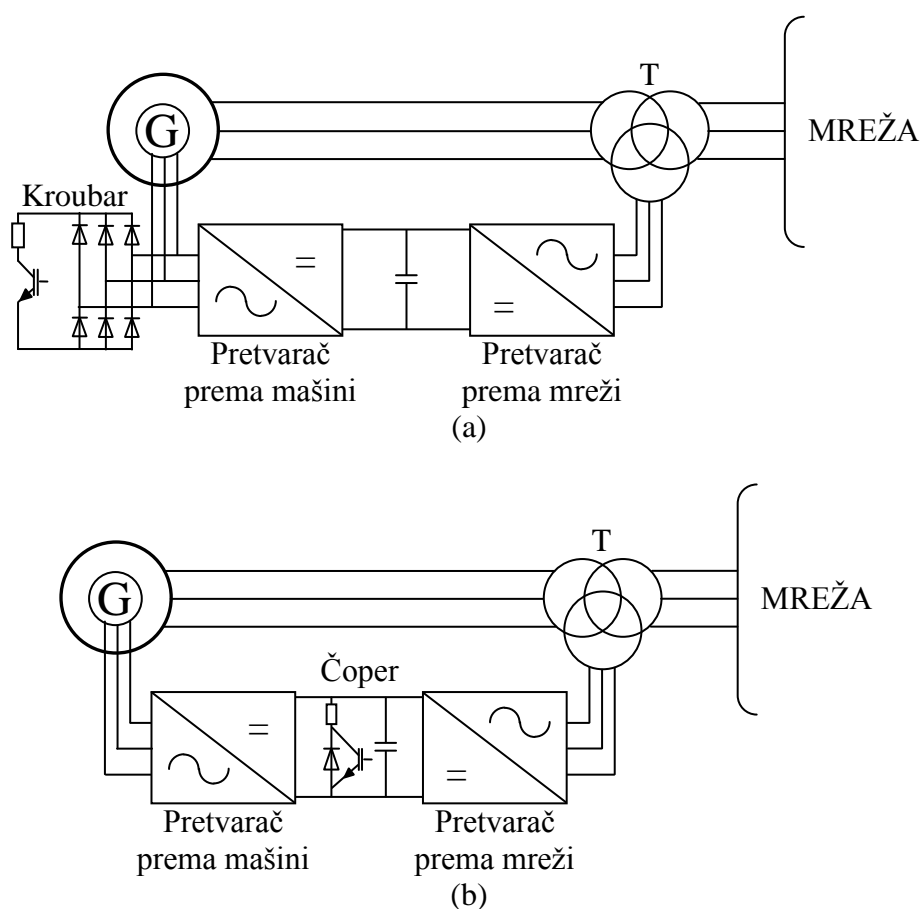
Vetrogenerator u konfiguraciji DFIM poznat je kao *vetrogenerator tipa 3* – slika 2.2.2.4. Stator generatora DFIM (G) je direktno povezan na mrežu, dok je rotor povezan na mrežu preko energetskog pretvarača, pa DFIM spada u kategoriju vetrogeneratora koji su povezani na mrežu delimično preko uređaja energetske elektronike. Ovakva konfiguracija omogućava da se koristi promenljiva brzina turbine. Brzina ovog tipa vetrogeneratora pripada opsegu od 70% do 130% nominalne brzine. Prednosti ovog tipa generatora su to što se njime može proizvesti/trošiti reaktivna snaga i što ima veći stepen iskoristivosti. Takođe, pretvaračem na strani rotora može da se kontroliše momenat i/ili aktivna/reaktivna snaga generatora, dok se pretvaračem na strani mreže može kontrolisati napon jednosmernog međukola i reaktivna snaga (ili struja) na naizmeničnoj strani [52]. Pretvarač je osetljiv na struje iznad nominalnih, pa mora da bude zaštićen u slučaju kratkog spoja u blizini generatora. Dve osnovne zaštite pretvarača (invertora) koje su danas u upotrebi jesu *kroubar* („crowbar“) i *čoper* („chopper“). DFIM sa ove dve vrste zaštite su prikazani na slikama 2.2.2.5a i b, respektivno (T – tronamotajni transformator). Kroubar predstavlja trofazni otpornik koji se na red povezuje na namotaj rotora i kontroliše se pomoću uređaja energetske elektronike. U slučaju kratkog spoja blizu vetrogeneratora, namotaj rotora se kratkospaja delovanjem kroubara, čime se pretvarač potpuno odvaja od kola. U ovom slučaju, u DFIM se gubi kontrola izlazne struje u toku trajanja kratkog spoja. Ukoliko se za zaštitu pretvarača koristi čoper, njime se mogu ograničiti struje kratkih spojeva, ali bez odvajanja pretvarača. Zato će se u ovom slučaju zadržati kontrola izlazne struje DFIM tokom kratkog spoja u mreži.

Ove zaštite i njihov uticaj na model DFIM u slučaju kratkog spoja biće detaljnije izložene u glavi 4.

Vetrogeneratori tipa 3 se svrstavaju u drugu kategoriju.



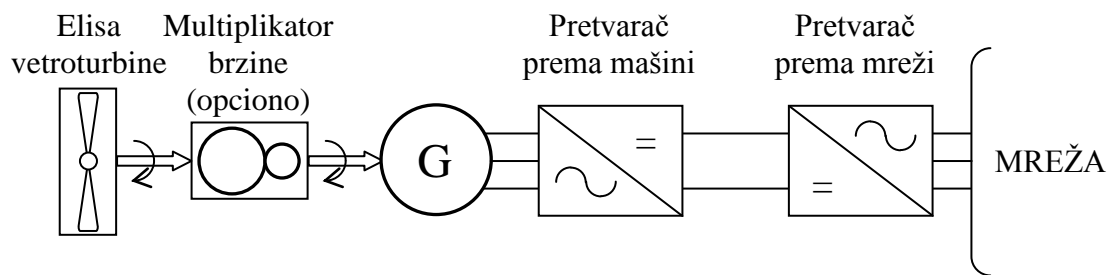
Slika 2.2.2.4 – Vetrogenerator tipa 3



Slika 2.2.2.5 – Vetrogenerator tipa 3 zaštićen kroubarom (a) i čoperom (b)

Poslednja generacija vetrogenerators, kod kojih je generator (G) uređajima energetske elektronike potpuno odvojen od mreže, poznati su kao *vetrogeneratori tipa 4* – slika 2.2.2.6. U vetrogeneratoru tipa 4 koristi se energetska pretvarač nominalne snage jednake nominalnoj snazi generatora. Generator može biti i asinhroni, ali je uglavnom ili klasičan sinhroni, ili sinhroni generator s permanentnim magnetima. Pošto su uređajem energetske elektronike potpuno odvojeni od mreže, ovi vetrogenerators se svrstavaju u treću kategoriju. Prikazana konfiguracija može da radi promenljivom brzinom, čime se omogućuje veća iskoristivost vetra. Takođe, s obzirom da je generator uređajima energetske elektronike potpuno odvojen od mreže, omogućava se potpuna kontrola izlazne aktivne i reaktivne snage u normalnom režimu,

kao i izlazne struje u slučaju kratkog spoja u mreži. Zbog najbolje kontrole reaktivne snage, kao i struje kratkog spoja, ovaj tip vetrogeneratora se sve više koristi i verovatno će u budućnosti najveći deo vetrogeneratora biti baš ovog tipa.



Slika 2.2.2.6 – Vetrogenerator tipa 4

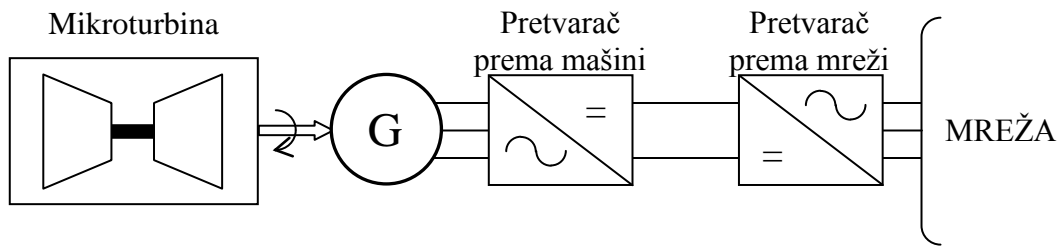
2.2.3 Mikroturbine

Mikroturbine su tip turbina sa unutrašnjim sagorevanjem relativno malih snaga. Njima se proizvodi toplotna i električna energija. Tipične snage mikroturbina se nalaze između 30kW i 500 kW. Za mikroturbine se mogu koristiti različita goriva, uključujući gas, benzin, dizel, kerozin, nafta, propan, metan, itd. Za većinu njih danas se koristi gas.

Vratilo mikroturbine se obrće i do 120.000 obrtaja u minuti. Njime se pokreće generator velikom brzinom. Zbog toga je frekvencija generatora jako velika, pa se njegov napon mora ispraviti AC-DC pretvaračem (ispravljačem). Zatim se taj napon, koristeći se uređajem energetske elektronike, mora transformisati u naizmeničan sa frekvencijom mreže. Step en iskoristivosti mikroturbina je oko 25–30%. Ceo sistem se hladi vazduhom, pa ne mora da se koristi voda ili ulje za hlađenje. Mikroturbine su dimenzionisane za komercijalne ili male industrijske potrošače, za kombinovano snabdevanje toplotnom i električnom energijom („combined heat and power“ – CHP), ili samo električnom energijom.

Konstrukcijom vratila turbine definiše se puno važnih karakteristika mikroturbine, kojima se određuju potrebni uređaji energetske elektronike i potrebni upravljački sistemi. Najčešća konstrukcija u današnjoj upotrebi je mikroturbina sa jednostrukim vratilom. U ovoj konfiguraciji, kompresor i turbina su smešteni na isto vratilo i rotor generatora (G) se obrće brzinom između 90.000 i 120.000 obrtaja u minuti. Mikroturbinom se pokreće generator velike frekvencije, koji može biti sinhroni ili asinhroni. Asinhroni generator s kaveznim rotorom je jeftiniji, pa može da posluži kao alternativa (mnogo češćem) sinhronom generatoru. Za ostale konfiguracije, videti referencu [43].

Za razliku od tradicionalnih gasnih turbina, kod kojih je sinhroni generator direktno povezan na mrežu, to nije slučaj s mikroturbinama. U svim njihovim konstrukcijama, proizvedeni napon visoke frekvencije (u rasponu od 1.000 do 3.000 Hz) mora da se transformiše u napon s frekvencijom mreže (50Hz ili 60Hz) da bi se proizvedena snaga mogla koristiti. Na slici 2.2.3.1 je prikazan dijagram klasičnih komponenti mikroturbine i generatorskog sistema. Osnovna funkcija uređaja energetske elektronike je da se transformiše napon visoke frekvencije u napon mrežne frekvencije. Invertorom se mogu obezbediti i druge pogodnosti: podrška naponu mreže, kompenzacija reaktivne snage, rezervno snabdevanje reaktivne snage, kontrola struje kratkog spoja, itd.



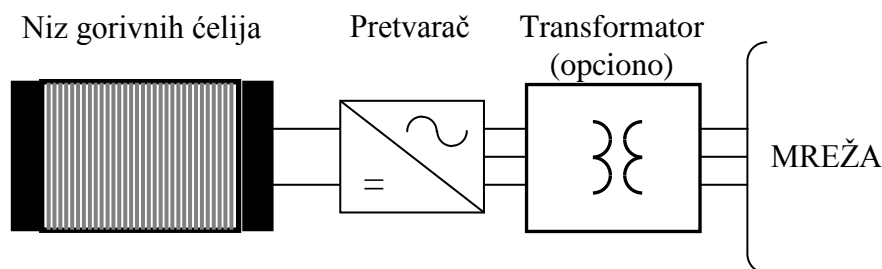
Slika 2.2.3.1 – Komponente generatorskog sistema mikroturbine

2.2.4 Gorivne ćelije

Gorivna ćelija je galvanski element kojim se direktno proizvodi električna energija, bez prethodne konverzije hemijske u mehaničku energiju. Ova osobina omogućuje vrlo visok stepen iskoristivosti gorivnih ćelija, koji dostiže 60%. Kada se uzme u obzir i to da gorivne ćelije kao nusproizvod proizvode toplu vodu i ako se ona iskoristi za kogeneraciju, ukupan stepen iskoristivosti može da dostigne 80%. Pored toga, bitna karakteristika gorivnih ćelija je i to što ne zagađuju okolinu.

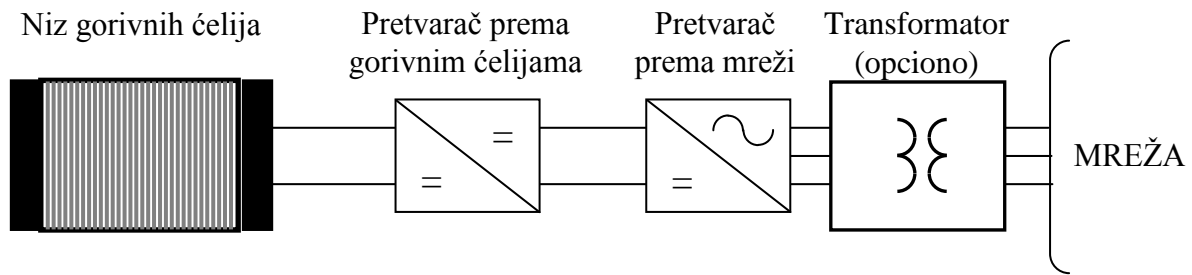
Najčešće gorivne ćelije su takozvane „proton exchange membrane fuel cells“ (PEMFC). To su ćelije s membranama kojima se obezbeđuje protok protona a sprečava protok elektrona. One su sve popularnije zbog velike gustine energije, niskih radnih temperatura i robusnosti, s vrlo jednostavnom strukturom. U ovom tipu gorivne ćelije kao gorivo se koriste hidrogen i kiseonik. Jednom ćelijom se proizvodi napon od oko 0.7 volti, pa je uobičajeno da se više ćelija vezuju redno, formirajući niz gorivnih ćelija, da bi se izlazni napon uvećao. Slično kao u slučaju fotonaponskih modula, gorivnim ćelijama se proizvodi jednosmeran napon, pa zato moraju da se koriste uređaji energetske elektronike za povezivanje na mrežu.

Najjednostavnija konfiguracija sistema gorivnih ćelija je prikazana na slici 2.2.4.1. Ona se sastoji od niza gorivnih ćelija, povezanih na inverter. Ako se zahteva galvansko odvajanje invertora od mreže, ili transformacija napona na višu vrednost, između invertora i priključka na mrežu se dodaje transformator. Glavni nedostatak ove konfiguracije je da transformator čini sistem fizički vrlo velikim i skupim.



Slika 2.2.4.1 – Generatorski sistem gorivnih ćelija – osnovna varijanta

Da bi se prevazišli nedostaci prethodne konfiguracije, proizvođači su počeli da ugrađuju DC-DC pretvarače između gorivnih ćelija i invertora. Ovakva konfiguracija je prikazana na slici 2.2.4.2. DC-DC pretvarač ima osnovnu funkciju da njime proizvede dovoljno visok napon na ulazu u inverter, da bi na izlazu iz invertora mogao realizovati zahtevani naizmeničan napon. Ovo je i najčešće korišćena konfiguracija sistema gorivnih ćelija.



Slika 2.2.4.2 – Generatorski sistem gorivnih ćelija – unapređena varijanta

2.2.5 Motori sa unutrašnjim sagorevanjem

U ovim motorima se sagorevaju tečna ili gasovita goriva da bi se hemijska energija goriva transformisala u mehaničku energiju koja pokreće klipove. Klipovima se zatim okreće vratilo i generatorom se transformiše mehanička energija u električnu energiju. Generator je povezan direktno na mrežu (bez uređaja zasnovanog na energetskej elektronici).

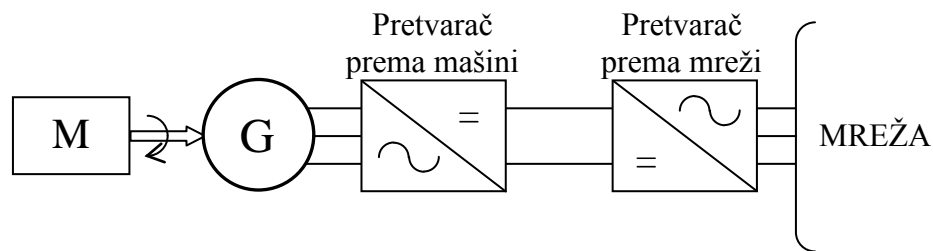
Motori sa unutrašnjim sagorevanjem mogu biti ili motori u kojima se koristi prirodni gas, propan ili benzin kao gorivo – Oto/benzinski motori („*spark ignition engines*“), ili dizel motori („*compression engines*“), u kojima se koristi dizel (nafta) kao gorivo. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem koji su danas u upotrebi pružaju mnoge pogodnosti, kao što su mala početna ulaganja, velika pouzdanost, lako pokretanje, itd. Zagađivanje vazduha je bila najveća mana ovih motora, ali je ono značajno ublaženo poslednjih godina, uvođenjem izduvnih katalizatora i modernijim procesom sagorevanja. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem se najviše koriste kao CHP jedinice za snabdevanje komercijalnih i industrijskih potrošača do 10MW.

Za većinu ovih sistema se koriste sinhroni ili asinhroni generatori koji su direktno povezani na mrežu. Brzina generatora mora biti konstantna da bi se zadovoljila frekvencija mreže od 50 (60) Hz, pa nije moguće iskoristiti pun opseg promene brzine motora. Iz ovog razloga su poslednjih godina počeli da se koriste uređaji energetske elektronike za povezivanje ovih motora na mrežu. Ovakvim konfiguracijama se omogućava korišćenje promenljive brzina motora, čime se sa druge strane omogućava mnogo bolja iskoristivost goriva. Brzina motora može da se kontroliše zavisno od promene potrošnje u sistemu, da bi se optimizovala kombinovana efikasnost motora i generatora. Pored toga, uređaji energetske elektronike pružaju mogućnost da se sistemu dodaju i različita DS, posebno u slučaju ostrvskog rada (mikromreža).

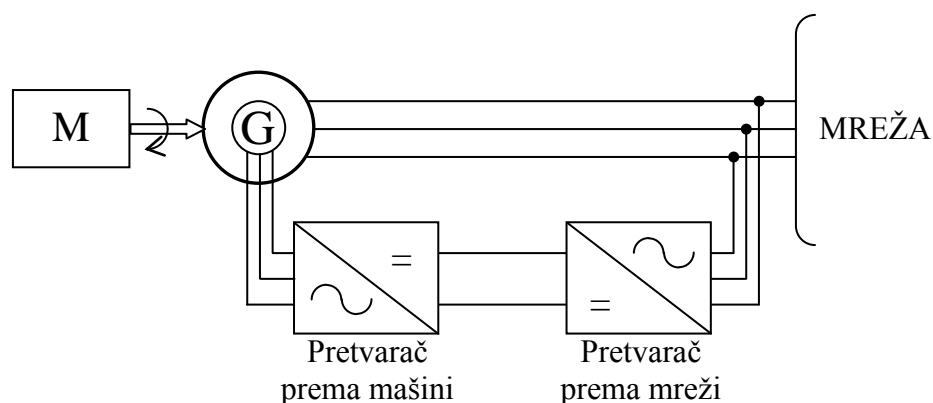
Na slici 2.2.5.1 je prikazana konfiguracija motora sa unutrašnjim sagorevanjem (M) promenljive brzine i sinhronog/asinhronog generatora (G), koji su na mrežu povezani preko uređaja energetske elektronike. Generatorom se mehanička energija motora transformiše u električnu energiju promenljivog napona i promenljive frekvencije, koji zavise od brzine motora. Zatim, ispravljačem i inverterom, oni se transformišu da bi se dobila energija pogodna za isporuku mreži.

Još jedno zanimljivo rešenje je korišćenje pretvarača manje snage i asinhronog generatora s namotanim rotorom (G), u konfiguraciji DFIM – slika 2.2.5.2. Ovo rešenje je slično onom u slučaju vetrogeneratora tipa 3. Pretvarač je povezan na rotor generatora i njime se kontroliše struja rotora, dok je stator direktno povezan na mrežu. Prednosti ove konfiguracije su da se njome može obezbediti kompenzacija/proizvodnja reaktivne snage i veća iskoristivost

motora (M), dok je cena ulaganja malo viša. Takođe, ovom konfiguracijom se omogućava da namotaji statora budu dimenzionisani 25% ispod nominalne vrednosti, dok se ostatak snage obezbeđuje pretvaračem iz namotaja rotora.



Slika 2.2.5.1 – Motor sa unutrašnjim sagorevanjem i sinhroni/asinhroni generator povezan na mrežu preko uređaja energetske elektronike



Slika 2.2.5.2 – Motor sa unutrašnjim sagorevanjem i asinhroni generator u konfiguraciji DFIM

2.2.6 Distribuirana skladišta energije

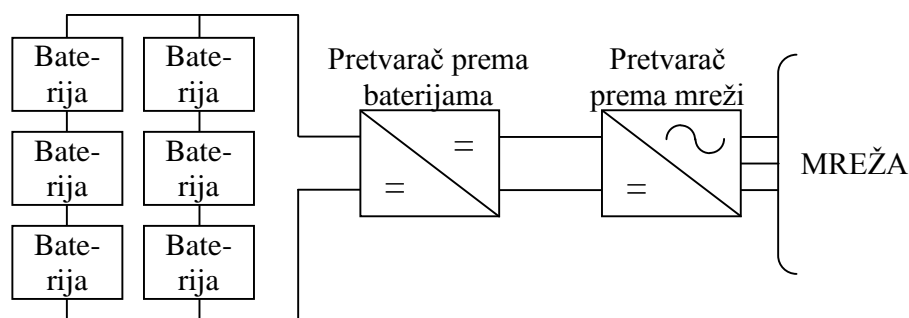
Većina DG je zasnovana na obnovljivim izvorima energije intermitentnog pogona, kao što su vetar i sunce. Ovi DER nisu upravljivi u smislu kontrolisane promene aktivne snage („non-dispatchable“). Ovo je glavni razlog što su DS u intenzivnom razvoju poslednjih godina. Njima može da se obezbedi upravljivost prethodno opisanih DG ako se sa njima integrišu DS. Tako se dobijaju DG-DS. DS se koriste i zasebno. Tokom perioda male potrošnje, višak proizvedene energije može da se skladišti, a zatim u periodima visoke potrošnje, uskladištena energija se koristi – transformiše u električnu ili direktno koristi da bi se smanjila potrošnja električne energije (npr. topla voda). Postoji veliki broj različitih (teoretski ostvarivih) tehnologija za skladištenje energije. Među značajnim skladištima, za sada su najrasprostranjenije i najčešće integrisane u distributivne mreže baterije akumulatora i zamajci.

2.2.6.1 Baterije akumulatora

Zbog svoje niske cene, olovne baterije akumulatora su najčešće korišćen oblik baterija akumulatora priključenih na distributivnu mrežu. Olovni akumulatori se sastoje od olovnih elektroda potopljenih u elektrolit koji se sastoji od sumporne kiseline (35%) u vodi. Ovakvom konfiguracijom se proizvode elektroni koji stvaraju tok električne energije kroz spoljašnje kolo. Olovnim baterijama može da se proizvodi napon od oko 2.14 V po ćeliji, što znači oko 12.8 V po dvanaestovoltnoj bateriji, kada su ćelije maksimalno napunjene.

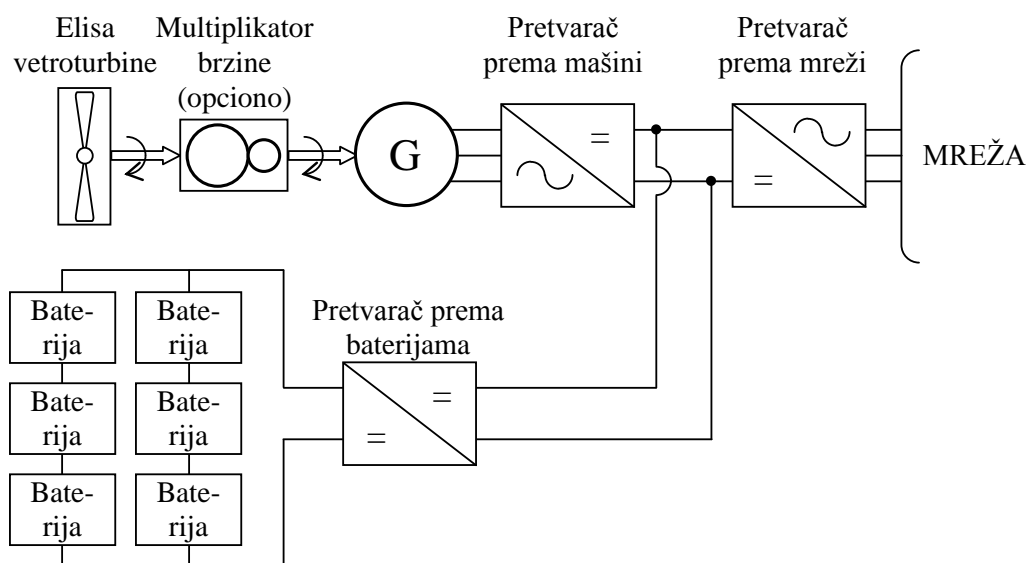
Svi oblici baterija su jednosmernog napona, pa kada se priključuju na mrežu, mora da postoji uređaj zasnovan na energetskej elektronici (pretvarač) kojim će se jednosmerni napon transformisati u naizmenični. Pojedinačne baterije su različito konfigurisane, redno i/ili paralelno da bi se postigao zahtevani napon i struja. Pretvarači ovih DER (baterija) moraju da budu dvosmerni (DG-DS), čime se postiže kako punjenje baterija iz mreže (DS), tako i njihovo pražnjenje u mrežu (DG).

Najjednostavnija konfiguracija baterija akumulatora i uređaja energetske elektronike sastoji se od baterije povezane direktno na inverter, ali slično kao u slučaju gorivnih ćelija, ovakva konfiguracija u većini slučajeva zahteva i transformator na niskoj frekvenciji koji može biti velikih dimenzija i visoke cene, pa se ne koristi često u praksi. Zbog toga je mnogo češća konfiguracija ona sa dodatim (dvosmernim) DC-DC pretvaračem između baterije i invertora – slika 2.2.6.1.1. Glavna uloga ovog pretvarača je da se proizvede dovoljno visok napon na ulazu u inverter, da bi na izlazu iz invertora mogao da se proizvede zahtevani naizmenični napon.



Slika 2.2.6.1.1 – Baterija akumulatora za skladištenje energije povezana na mrežu

Kao što je već rečeno, baterije akumulatora se često integrišu sa DG, pa zajedno čine dvosmerne (hibridne) DER. Kada se koriste sa DG zasnovanim na intermitentnim izvorima energije kao što su sunce i vetar, baterijama se mogu ublažiti promenljivost pogona tih DG, smanjiti fluktuacije u mreži izazvane promenljivom potrošnjom, obezbediti ostrvski rad (mikromreže u autonomnom pogonu) itd. Na slici 2.2.6.1.2 prikazan je jedan hibridni DER, u kojem je niz baterija akumulatora integrisan sa vetrogeneratorom.



Slika 2.2.6.1.2 – Hibridni DER koji se sastoji od vetrogeneratora i skladišta u vidu baterija akumulatora

2.2.6.2 Zamajci

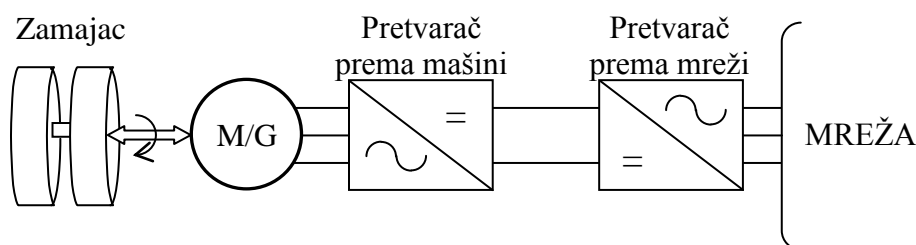
Zamajcima se skladišti kinetička energija u obliku rotirajuće mase. I oni se koriste u konfiguraciji dvosmernih DG-DS. Transformacija kinetičke u električnu energiju i obrnuto vrši se elektromehaničkim mašinama, kao što su mašine sa permanentnim magnetima, asinhronne mašine itd. Osnovni zahtev kod zamajaca je da se njihove opadajuće brzine tokom „pražnjenja“ i rastuće brzine tokom „punjenja“ usaglase s frekvencijom mreže. U ovu svrhu se koriste uređaji energetske elektronike.

Zamajac funkcioniše na sledećem principu: kada postoji mogućnost proizvodnje jeftine električne energije iznad potreba potrošača taj „višak“ se skladišti u zamajcu koji se pokreće električnom mašinom koja radi kao motor (M). Sa druge strane, kada postoji nedostatak električne energije u mreži, električna mašina se pokreće zamajcem i radi kao generator (G) kojim se isporučuje električna energija mreži.

Ovakvi DG-DS povezuju se na mrežu pomoću uređaja energetske elektronike kojima se reguliše njihov izlaz – slika 2.2.6.2.1. U slučaju snabdevanja mreže iz DS zasnovanog na zamajcu (dakle u pitanju je generatorski režim), izlazni napon je promenljive frekvencije, pa mora biti ili ispravljen ili promenjen u napon konstantne frekvencije. Uređaji energetske elektronike u ovoj konfiguraciji služe da se prvo ispravi izlazni napon pomoću pretvarača 1, a zatim da se pomoću pretvarača 2 transformiše u naizmenični napon konstantne frekvencije. U obrnutom slučaju, kada se DG-DS puni iz mreže (dakle u pitanju je potrošački režim), ti isti uređaji se koriste da se električna energija mreže koristi za ubrzanje zamajca.

Zamajci mogu da se koriste zajedno s baterijama akumulatora, da bi se smanjio broj pražnjenja baterija, čime se znatno skraćuje njihov životni vek. Takođe, zamajci mogu da se koriste integrisani sa nužnim („*emergency*“) generatorima da bi se obezbedilo privremeno snabdevanje u periodima povećane potrebe za električnom energijom. Međutim, osnovna uloga zamajaca u distributivnim mrežama je da pomognu u regulaciji napona i frekvencije.

Najčešća konfiguracija DG-DS zasnovanog na zamajcu prikazana je na slici 2.2.6.2.1. Tokom punjenja, pretvarač 2, povezan na mrežu, radi kao ispravljač, dok pretvarač 1, povezan na mašinu, radi kao inverter. Tokom pražnjenja pretvarači menjaju uloge da bi se energija iz skladišta isporučila mreži.



Slika 2.2.6.2.1 – DG-DS zasnovan na zamajcu

Slično baterijama akumulatora, DS zasnovana na zamajcima mogu da se koriste i u konfiguraciji sa drugim DER zasnovanim na intermitentnim izvorima energije radi smanjenja fluktuacija opterećenja, propada napona i varijacija frekvencije.

2.2.7 Podela DER prema načinu povezivanja na mrežu

Na osnovu izlaganja u ovoj glavi, u tabeli 2.2.7.1 sumirani su svi opisani DER i dati su načini na koji su oni povezani na distributivnu mrežu.

Tabela 2.2.7.1 – Lista tipova DER i načini na koji su povezani na mrežu

DER	Način povezivanja na mrežu
Male i srednje hidroelektrane	Sinhroni generatori, direktno povezani na mrežu
Elektrane na gas	Sinhroni generatori, direktno povezani na mrežu
Motori sa unutrašnjim sagorevanjem	Sinhroni/asinhroni generatori, direktno povezani na mrežu; u modernijim slučajevima, povezani su na mrežu preko invertora ili DFIM
Mikro hidroelektrane	Asinhroni generatori, direktno povezani na mrežu
Vetrogeneratori tipa 1	Asinhroni generatori, direktno povezani na mrežu
Vetrogeneratori tipa 2	Asinhroni generatori, direktno povezani na mrežu
Vetrogeneratori tipa 3	DFIM
Vetrogeneratori tipa 4	Povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike
Fotonaponske elektrane	Povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike
Mikroturbine	Povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike
Gorivne ćelije	Povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike
Baterije za skladištenje električne energije	Povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike
Zamajci za skladištenje električne energije	Povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike

Načinom povezivanja DER na mrežu određen je matematički model za proračun kratkih spojeva. Zato je na osnovu tabele 2.2.7.1 u ovoj disertaciji napravljena sledeća podela DER prema načinu njihovog povezivanja na mrežu:

1. DER tipa 1: Sinhroni generator direktno povezan na mrežu;
2. DER tipa 2: Asinhroni generator direktno povezan na mrežu;
3. DER tipa 3: DFIM;
4. DER tipa 4: IBDER.

Utvrđivanje matematičkih modela DER, predmet je glave 4.

GLAVA 3

MODELI ELEMENATA TRADICIONALNIH DISTRIBUTIVNIH MREŽA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

U ovom delu predstavljeni su modeli elemenata tradicionalnih distributivnih mreža koji se koriste u proračunima kratkih spojeva. To su: potrošači, sekcije vodova, transformatori i tradicionalni uređaji za kompenzaciju reaktivne snage. Njima je pridružen i koren mreže.

3.1 POTROŠAČI

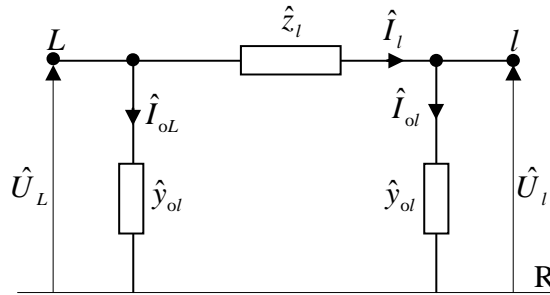
Potrošači se u proračunima kratkih spojeva distributivnih mreža tretiraju na sledeća tri načina [38, 39, 53-55.]:

1. Smatra se da je razmatrana mreža pre kratkog spoja bila u praznom hodu (isključeni svi potrošači). Ovo je najgrublja aproksimacija režima mreže s kratkim spojem. Ona se može koristiti u proračunima mreža s vrlo velikim strujama kratkog spoja u odnosu na radne struje. Primer takvih mreža su gradske kablovske mreže s kratkim vodovima. Suprotan primer su vangradske mreže s dugačkim vodovima golih provodnika, kod kojih greška u proračunu može da dostigne i 20% kada se zanemari uticaj potrošača [54, 55].
2. Potrošači se zamenjuju idealnim strujnim generatorima. Struje idealnih strujnih generatora se izračunavaju koristeći se snagama i naponima potrošača iz režima pre kratkog spoja.
3. Potrošači se zamenjuju admitansama (impedansama). Admitanse (impedanse) se izračunavaju koristeći se snagama i naponima potrošača iz režima pre kratkog spoja.

S obzirom da potrošači mogu biti priključeni na mrežu trofazno ili pofazno, u ma kojoj od prethodno navedene tri varijante tretmana oni se tako modeluju i u proračunu.

3.2 SEKCIJE VODOVA

Sekcije vodova se modeluju Π šemama. *Prvi čvor* (čvor L) bliži je korenu mreže od *drugog čvora* (čvor I). U slučaju trofaznih mreža, koje se u ovoj disertaciji obrađuju u domenu simetričnih komponenti, Π kolo sekcije voda za simetričan režim bilo kog redosleda prikazano je na slici 3.2.1. Ono se sastoji od redne impedanse \hat{z}_l i dve otočne admitanse \hat{y}_{ol} , koje su međusobno jednake. Sa \hat{U} i \hat{I} označeni su odgovarajući naponi i struje. Parametri pogonskih kola direktnog i inverznog redosleda međusobno su jednaki. Impedantni reprezentanti pogonskih kola nultog redosleda tri do pet puta su veći u odnosu na odgovarajuće parametre direktnog redosleda.



Slika 3.2.1 – Pogonsko kolo sekcije voda između čvorova L i l

Ukoliko su trofazni vodovi neuravnoteženi, induktivne i kapacitivne sprege između faza se obrađuju jednostavno i u domenu simetričnih komponenti. Taj tretman je prikazan na kraju ove glave.

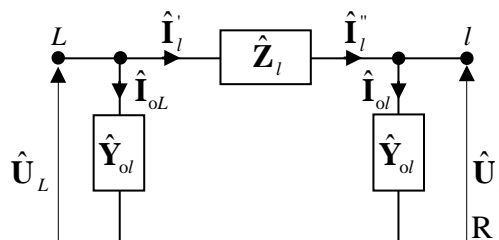
U slučaju višefaznih mreža, koje se u ovoj disertaciji ne obrađuju eksplicitno, modeli su dati u faznom domenu. Šema n -faznog voda prikazana je na slici 3.2.2, pri čemu su korišćene sledeće oznake za vektor-kolone dimenzija $n \times 1$ i matrice dimenzija $n \times n$:

$\hat{\mathbf{U}}_L, \hat{\mathbf{U}}_l$ – vektori faznih napona na početku i kraju voda;

$\hat{\mathbf{I}}'_l, \hat{\mathbf{I}}''_l$ – međusobno jednaki vektori struja na krajevima rednih impedansi voda;

$\hat{\mathbf{I}}_{oL}, \hat{\mathbf{I}}_{ol}$ – vektori struja otočnih parametara na početku i kraju voda;

$\hat{\mathbf{Z}}_l, \hat{\mathbf{Y}}_{ol}$ – matricni reprezentanti rednih i otočnih parametara voda (jednaki na oba kraja voda).



Slika 3.2.2 – Načelna šema n -faznog voda između čvorova L i l

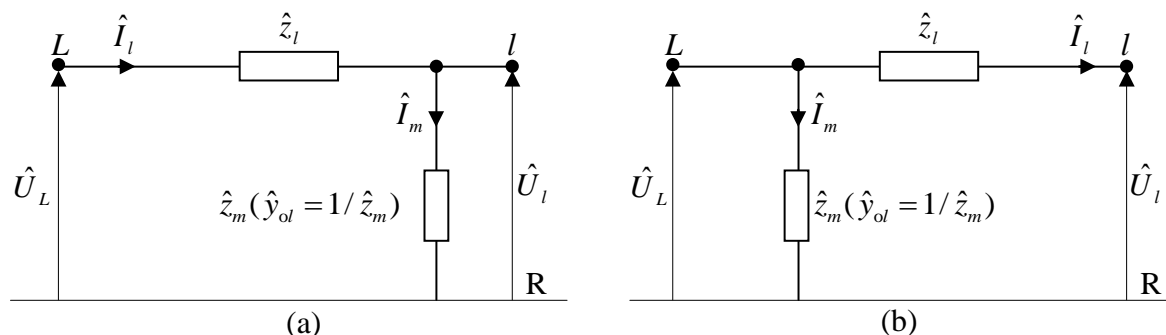
Ako je vod trofazan, onda su vektori-kolone dimenzije 3×1 , a matrice 3×3 . Ako je vod dvofazan, onda su vektori-kolone dimenzije 2×1 , a matrice 2×2 , koje se odnose na odgovarajuće – dve faze. Ako je vod jednofazan, onda su vektori i matrice dimenzije 1×1 , odnosno, u pitanju su skalari koji se odnose se na odgovarajuću – jednu fazu.

3.3 TRANSFORMATORI

Kada se razmatra distributivna mreža s više naponskih nivoa, koji su međusobno povezani transformatorima, onda se ona uglavnom modeluje u domenu relativnih vrednosti (normalizacija). Ukoliko se proračuni vrše u domenu simetričnih komponenti, onda se prelazi i u domen relativnih uglova (Θ transformacija), da bi se eliminisali idealni transformatori kompleksnog odnosa transformacije [56, 57].

Transformatori mogu biti trofazni uravnoteženi, trofazni neuravnoteženi i jednofazni. Poseban akcent je stavljen na trofazne s obzirom da su ekvivalentne šeme i modeli jednofaznih transformatora vrlo jednostavni [58-60]. Trofazni neuravnoteženi transformatori mogu biti transformatori konstituisani od tri jednofazna transformatora koja nisu međusobno ista [61], ili transformatori sa otvorenim spregama [59, 60]. Njihovi matematički modeli su formalno isti s modelima trofaznih neuravnoteženih transformatora [40].

U slučaju trofaznih mreža, koje se u ovoj disertaciji obrađuju u domenu simetričnih komponenti, transformatori se zamenjuju pogonskim Γ kolima s pridruženim idealnim transformatorima [39]. Dve varijante pogonskih kola transformatora prikazane su na slikama 3.3.1a i b. Idealni transformator, obično kompleksnog odnosa transformacije eliminisan je (sveden na jedinicu) primenom sistema relativnih vrednosti i Θ transformacije. Sa \hat{z}_l i \hat{z}_m označene su normalizovane impedanse kratkog spoja i impedanse magnećenja transformatora, respektivno. Sa \hat{y}_{ol} označena je admitansa magnećenja. Sa \hat{U} i \hat{I} označeni su naponi i struje. (Napomena: Ekvivalencija dva kola sa slike 3.3.1 nije egzaktna, već samo praktična – aproksimativna.) U slučaju da se modul kompleksnog odnosa transformacije idealnog transformatora ne može svesti na jedinicu, tada se redna veza impedanse \hat{z}_l i idealnog transformatora realnog odnosa transformacije zamenjuje ekvivalentnim Π kolom impedansi (admitansi). To kolo ima strukturu kola sekcije voda sa slike 3.2.1, ali s različitim otočnim admitansama.



Slika 3.3.1 – Normalizovano pogonsko kolo transformatora u domenima relativnih vrednosti i relativnih uglova, s koncentrisanom impedansom kratkog spoja i impedansom magnećenja priključenom u čvoru l (a) i impedansom magnećenja priključenom u čvoru L (b)

Prikazana pogonska kola važe za simetrične režime sva tri redosleda za transformatore kod kojih su namotaji sa obe strane povezani u direktno uzemljenu zvezdu. Šeme ostalih transformatora, kod kojih su namotaji bar na jednoj strani povezani u trougao ili zvezdu koja nije uzemljena mogu se naći u referencama [40], [58-60].

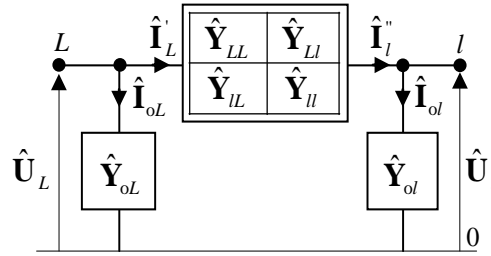
Načelna šema trofaznog transformatora u faznom domenu (sa eliminisanim idealnim transformatorom), prikazana je na slici 3.3.2. Slova L i l se odnose na početak i kraj transformatora, a ostale oznake vektora 3×1 i matrica 3×3 znače:

\hat{U}_L, \hat{U}_l – vektori faznih napona prvog i drugog čvora;

\hat{I}'_L, \hat{I}''_l – međusobno različiti vektori struja na krajevima rednih impedansi transformatora;

$\hat{I}_{oL}, \hat{I}_{ol}$ – vektori struja otočnih parametara na početku i kraju transformatora;

$\hat{Y}_{oL}, \hat{Y}_{ol}$ – matricni reprezenti magnećenja transformatora (otočni parametri) predstavljeni alternativno u prvom, odnosno drugom čvoru transformatora.



Slika 3.3.2 – Načelna šema trofaznog transformatora priključenog između čvorova L i l

Šema transformatora na slici 3.3.2 ista je za sve transformatore sa spregama Yy, Yd, Dy i Dd [40]. Matricni reprezentii rednih parametara transformatora dimenzija 3×3 , za sve četiri sprege, date su u tabeli 3.3.1 [40] (T je znak za transpoziciju matrice). Matrice iz tabele 3.3.1 odnose se na sprege Yy i Dd sa sprežnim brojem 0, a za Yd i Dy sa sprežnim brojem 1. Matricni reprezentii za sve sprege se dobijaju preko odgovarajućih matrica incidencije [62].

Matrice $\hat{Y}_I, \hat{Y}_{II}, \hat{Y}_{III}$ iz tabele 3.3.1 iznose:

$$\hat{Y}_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{Y}; \quad \hat{Y}_{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \hat{Y}; \quad \hat{Y}_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{Y}, \quad (3.3.2)$$

pri čemu je sa \hat{Y} označena admitansa kratkog spoja transformatora.

Matrica \hat{Y}_I je regularna, a matrice \hat{Y}_{II} i \hat{Y}_{III} su singularne matrice. Tako, na osnovu tabele 3.3.1 je očigledno da, u zavisnosti od sprege transformatora, matrice $\hat{Y}_{LL}, \hat{Y}_{Ll}, \hat{Y}_{lL}$ i \hat{Y}_{ll} mogu da budu i regularne i singularne.

U slučaju transformatora kod kojih su namotaji sa obe strane povezani u direktno uzemljenu zvezdu, struje i naponi se jednostavno prenose sa jednog kraja na drugi, kao i u slučaju vodova. Međutim, u slučaju da namotaji sa makar jedne strane transformatora nisu povezani u direktno uzemljenu zvezdu, tada zbog singularnosti matrica modela (tabela 3.3.1), struje i naponi ne mogu se trivijalno prenositi sa jednog kraja na drugi. Ovaj problem za sprege Yd, Dy i Dd, rešen je u referenci [40] pa se ne ponavlja ovde.

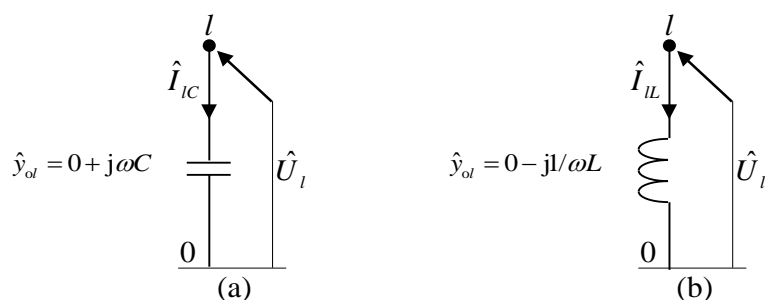
Tabela 3.3.1 – Matricni reprezentii rednih parametara transformatora [40]

Sprega	\hat{Y}_{LL}	\hat{Y}_{Ll}	\hat{Y}_{lL}	\hat{Y}_{ll}
Y_{Ny_n}	\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_{y_n}	\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_{Nd}	\hat{Y}_I	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}	\hat{Y}_{II}
Y_d	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}	\hat{Y}_{II}
D_{y_n}	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}	\hat{Y}_I
D_y	\hat{Y}_{II}	\hat{Y}_{III}^T	\hat{Y}_{III}	\hat{Y}_{II}
D_d	\hat{Y}_{II}	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	\hat{Y}_{II}

3.4 TRADICIONALNI UREĐAJI ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE

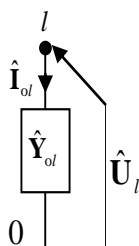
Najčešće korišćeni uređaji za kompenzaciju reaktivne snage u distributivnim mrežama jesu baterije otočnih kondenzatora. Oni se izvode s fiksnim kapacitetom, ili s diskretnom promenom kapaciteta. Promenom njihovog kapaciteta mogu se kontrolisati injektirane reaktivne snage i, indirektno, moduli napona čvorova u kojima su priključeni.

U slučaju trofaznih distributivnih mreža, koje se u ovoj disertaciji obrađuju u domenu simetričnih komponenti, baterije kondenzatora mogu se predstaviti odgovarajućim pogonskim admitansama $\hat{y}_{ol} = 0 + j\omega C$ koje su priključene otopno u čvorove mreže – slika 3.4.1a. Isto se modeluju i otočne prigušnice (induktivnosti) – slika 3.4.1b, admitansama $\hat{y}_{ol} = 0 - j1/\omega L$. Ta kola jesu pogonska za sva tri redosleda.



Slika 3.4.1 – Pogonska kola baterije kondenzatora (a) i prigušnice (b) priključeni u čvoru l

U slučaju višefaznih mreža, šema n -faznog otočnog elementa (kondenzatora ili prigušnice), data je na slici 3.4.2. Dimenzije vektora-kolona $\hat{\mathbf{I}}_{ol}$ i $\hat{\mathbf{U}}_l$ su $n \times 1$; dimenzije matrice $\hat{\mathbf{Y}}_{ol}$ su $n \times n$. Ako je otočni element trofazan, onda su vektori dimenzije 3×1 , a matrice 3×3 . Ako je otočni element dvofazan, onda su vektori dimenzija 2×1 , a matrice 2×2 , koje se odnose na odgovarajuće faze. Ako je otočni element jednofazan, onda su vektori i matrice dimenzije 1×1 , odnosno, u pitanju su skalari koji se odnose se na odgovarajuću – jednu fazu.



Slika 3.4.2 – Načelna šema otočnog n -faznog elementa priključenog u čvoru k

Savremeni uređaji za kompenzaciju reaktivne snage su statički VAR sistemi, odnosno sami DER (zasnovani na savremenim tehnologijama), koji su osnovni predmet ove disertacije, pa se ne obrađuju u ovoj glavi.

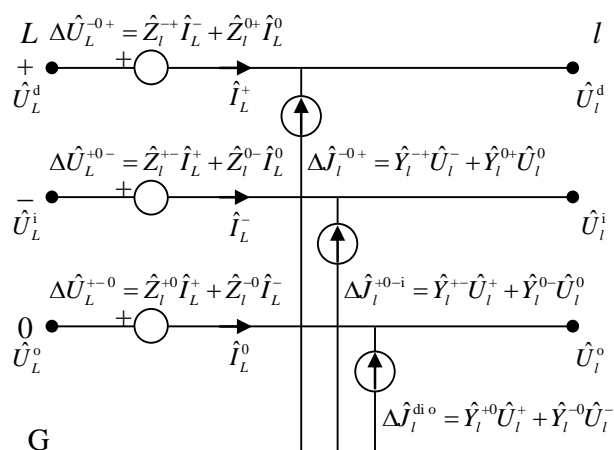
3.5 KOREN MREŽE

Koren mreže predstavlja njen glavni izvor napajanja. U proračunu kratkih spojeva smatra se da je u korenu mreže priključen naponski generator (nije idealan). On predstavlja Thevenenov ekvivalent *nadređene mreže* s koje se napaja razmatrana distributivna mreža.

3.6 TRETMAN INDUKTIVNIH I KAPACITIVNIH SPREGA

Ukoliko trofazna mreža sadrži neuravnotežene elemente, induktivne i kapacitivne sprege kao i povezanost faza tih elemenata se moraju uvažiti. To je u ovoj disertaciji urađeno kako sledi. Na slici 3.6.1 prikazan je jedan trofazni neuravnoteženi vod, u domenu simetričnih komponenti. Na njoj su istaknute samo sprege da se ne bi opterećivala slika.

Induktivne sprege su opisane indukovanim naponima. One su na slici 3.6.1 prikazane idealnim naponskim generatorima elektromotornih sila ($\Delta\hat{U}_l^{sc\ t}$). Njihovi naponi se izračunavaju kako je prikazano na slici, gde su sa $\hat{Z}_l^{\Delta sc}$ označene impedanse kojima se opisuju induktivne sprege, a sa $\hat{I}_l^{\Delta c}$ su označene struje grana u domenu simetričnih komponenti. Kapacitivne sprege su opisane injektiranim kapacitivnim strujama ($\Delta\hat{J}_l^{sc\ t}$), koncentrisanim na drugom kraju sekcije (l). Ove struje se izračunavaju kako je prikazano na slici. Sa \hat{U}_l^s su označeni naponi drugog kraja sekcije, u domenu simetričnih komponenti, a sa \hat{Y}_l^{sc} su označene admitanse kojima se opisuju kapacitivne sprege. Direktna, inverzna i nulta komponenta su označene sa +, -, 0, respektivno: $s, c, t = +, -, 0, s \neq c \neq t$.



Slika 3.6.1 – Trofazni neuravnotežen vod u domenu simetričnih komponenti sa uvažnim induktivnim i kapacitivnim spregama

Tretman sprega između različitih elemenata mreže (npr. dva voda golih provodnika s bilo kojim brojevima faza) jednostavno se može izvesti generalizacijom ideje prikazane na slici 3.6.1. Ta generalizacija je urađena u faznom domenu u [40], pa se ne ponavlja ovde.

GLAVA 4

MODELI DER ZA PRORAČUN REŽIMA DISTRIBUTIVNIH MREŽA S KRATKIM SPOJEVIMA

U ovoj glavi biće predstavljeni modeli DER koji se koriste za proračun režima distributivnih mreža s kratkim spojevima. Glava je podeljena na četiri dela, u saglasnosti sa podelom DER iz glave 2. U prvom delu su vrlo kratko prikazani modeli sinhrona mašine direktno priključene na mrežu, a u drugom delu, takođe vrlo kratko, prikazani su modeli asinhrona mašine direktno priključene na mrežu. U trećem delu su predloženi modeli za DFIM, dok su u četvrtom delu predloženi modeli za IBDER. Posebna pažnja će biti posvećena utvrđivanju modela za DFIM i IBDER pošto je to od suštinske važnosti za proračune režima savremenih distributivnih mreža s kratkim spojevima.

S obzirom na to da su DER u najvećem broju slučajeva priključeni na mrežu trofazno, kao i na to da se upravljačke strategije ne samo tradicionalnih mašina, nego i DFIM i IBDER realizuju u domenu simetričnih komponenti, njihovi modeli su dati u tom domenu. Njihova transformacija u fazni domen vrši se jednostavno, pomoću odgovarajuće matrice transformacije (paragraf 5.2.4).

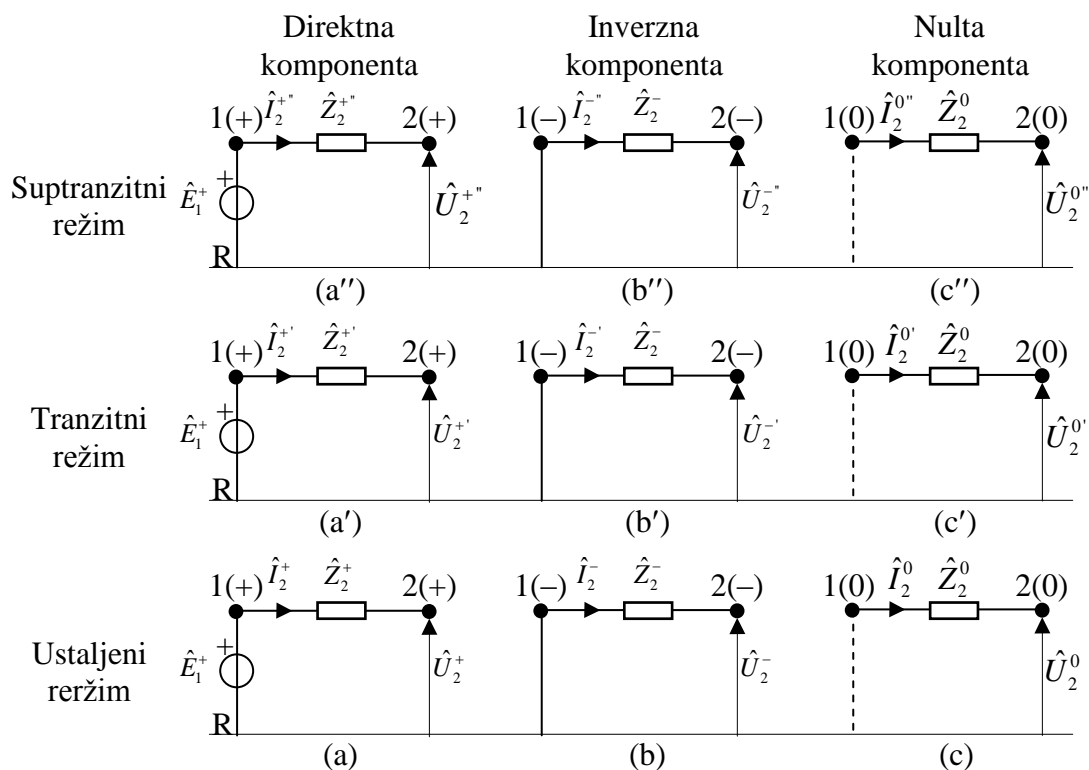
4.1 DER TIPA 1: SINHRONA MAŠINA DIREKTNO PRIKLJUČENA NA MREŽU

Sinhrona mašine direktno priključene na mrežu se u proračunima režima mreža s kratkim spojevima prikazuju njihovim (linearnim) Theveninovim ili Nortonovim ekvivalentima. U ovom radu one će biti prikazane Theveninovim ekvivalentima. S obzirom da su režimi s kratkim spojevima generalno nesimetrični, sinhrona mašine se prikazuju sa sva tri pogonska kola – za sva tri redosleda simetrije (direktnog, inverznog i nultog). Ta kola su prikazana na slici 4.1.1. Sa 1 je označen interni čvor mašine, a sa 2 čvor u kojem je mašina priključena na mrežu. S obzirom na uravnoteženost sinhronih mašina, njihova pogonska kola za simetrične režime sva tri redosleda, u sve tri vremenske sekvence, međusobno su raspregnuta [41].

Sa \hat{E}^+ je označena direktna komponenta faznih elektromotornih sila indukovanih u namotajima statora sinhrona mašine usled obrtanja konstantnog elektromagnetnog polja rotora. To polje je izazvano pobudnom jednosmernom mašinom – „budilicom“ koja je priključena na pobudni namotaj rotora. S obzirom na simetriju tih elektromotornih sila direktnog redosleda, njihova inverzna i nulta komponenta jednake su nuli. Otud kratki spojevi u pogonskim kolima za te redoslede na slikama 4.1.1. U pogonskim kolima za nulti redosled (slike 4.1.1c'', c' i c), ti su kratki spojevi nacrtani isprekidanim linijama, pošto za namotaje statora sinhrona mašine, koji su povezani u zvezdu koja nije uzemljena ili trougao, struje nultog redosleda u tim namotajima ne mogu se uspostaviti. Statori mašina s tako povezanim namotajima predstavljaju prekide za nulte komponente struja.

Impedansa pogonskog kola sinhrona mašine za simetričan režim direktnog redosleda menja se u vremenu od trenutka nastanka kratkog spoja: 1) u prvoj vremenskoj sekvenci – prvih stotinak milisekundi, pogonska impedansa direktnog redosleda jeste *suptranzitna*; ona je označena sa \hat{z}^+ ; 2) u drugoj vremenskoj sekvenci – oko jedne sekunde, pogonska impedansa

direktnog redosleda jeste *tranzitna*; ona je označena sa \hat{z}^{+} i 3) u trećoj vremenskoj sekvenci – kada se ustali, pogonska impedansa direktnog redosleda jeste *ustaljena*; ona je označena sa \hat{z}^{+} . Parametri pogonskih kola za simetrične režime inverznog i nultog redosleda ne menjaju se u vremenu.



Slika 4.1.1 – Pogonska kola (Thevenenovi ekvivalenti) sinhrona mašine za simetričan režim direktnog redosleda (a'', a' i a), inverznog redosled (b'', b' i b) i nultog redosleda (c'', c' i c), u suptranzitnom – sekundum, tranzitnom – prim i ustaljenom režimu – bez naznake

4.2 DER TIPA 2: ASINHRONA MAŠINA DIREKTNO PRIKLJUČENA NA MREŽU

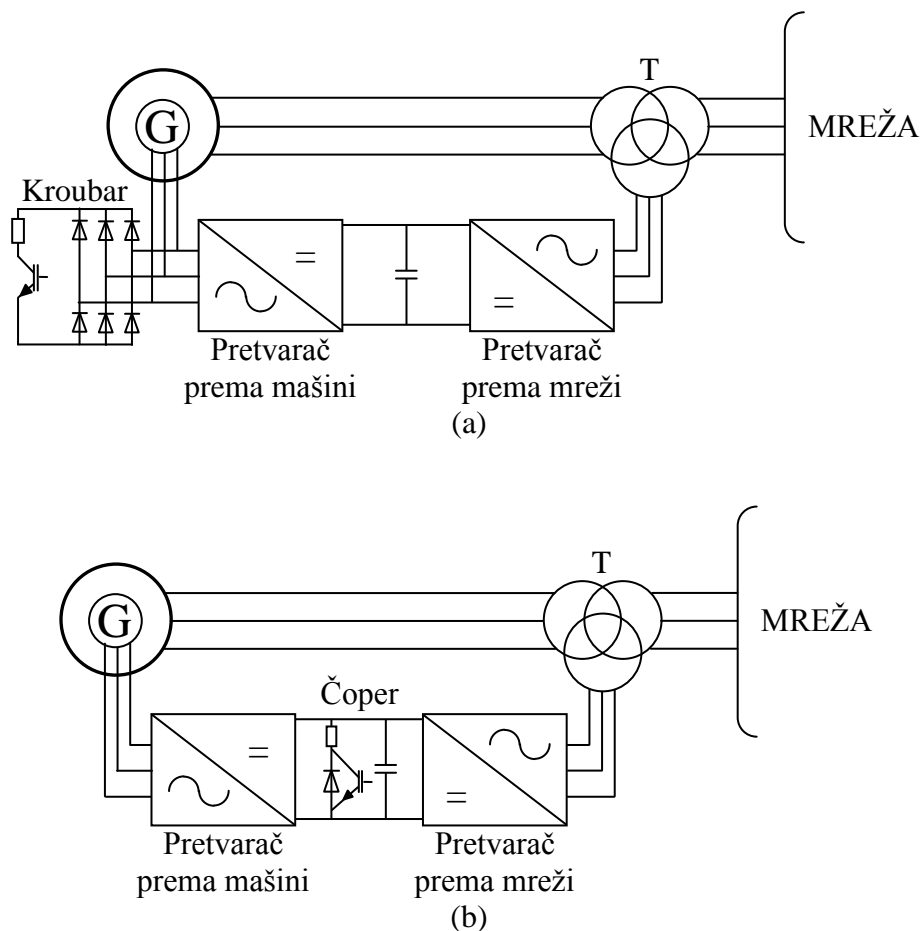
Asinhrona mašine direktno priključene na mrežu se takođe tretiraju Tevenenovim (Nortonovim) ekvivalentima u proračunima režima mreža s kratkim spojevima. Za razliku od sinhronih, u slučaju asinhronih mašina ne postoji tranzitna sekvenca [41]. Još jedna razlika između sinhronih i asinhronih mašina odnosi se na način pobude. Kao što je već rečeno, kod sinhrona mašina pobuda se obezbeđuje iz nezavisnog jednosmernog generatora – budilice. S obzirom na to, model sinhrona mašina ima idealan naponski generator u sve tri vremenske sekvence, u direktnom redosledu. Za razliku od sinhrona mašina, u slučaju asinhrona mašina, pobuda se obezbeđuje iz mreže, pa će promena napona izazvana kratkim spojem prouzrokovati da asinhrona mašina vrlo brzo izgubi pobudu. Zbog toga, kod modela asinhrona mašina ne postoji idealan naponski generator u ustaljenoj vremenskoj sekvenci. Model asinhrona mašina u inverznom redosledu isti je kao i u direktnom, ali sa anuliranim idealnim naponskim generatorom i u suptranzitnoj sekvenci. Simetrična komponenta režima nultog redosleda najčešće ne postoji, jer su namotaji statora uglavnom povezani u trougao ili zvezdu koja nije uzemljena.

Shodno prethodnom objašnjenju, asinhrona mašina se u proračunima režima mreže s kratkim spojevima modeluje kao što je prikazano na slici 4.1.1, ali bez tranzitne sekvence i sa anuliranim idealnim naponskim generatorima i u sva tri pogonska kola direktnog redosleda.

4.3 DER TIPA 3: DFIM

Kao što je već rečeno u glavi 2, stator DFIM (vetrogenerator tipa 3) direktno je priključen na mrežu, dok je rotor priključen na mrežu preko invertora. Taj priključak je izveden preko tercijera tronamotajnog transformatora – slika 4.3.1 (ponovljena slika 2.2.2.5). U glavi 2 je takođe rečeno da je jedan od zadataka invertora i kontrola izlazne struje DFIM. Invertor je u ovoj konfiguraciji izuzetno osetljiv na struje iznad nominalnih, pa mora da bude zaštićen. Dve osnovne zaštite invertora u današnjim DFIM su kroubar (slika 4.3.1a) i čoper (slika 4.3.1b) [22-28]. Model DFIM pogodan za proračun režima mreže s kratkim spojevima izuzetno zavisi od toga koja je od ove dve zaštite invertora ugrađena u DFIM [22-28]. Iz ovog razloga, DFIM je najsloženiji za modelovanje.

Ukoliko se inverter DFIM štiti kroubarom, u slučaju kratkog spoja sa strujama koje mogu da oštete osetljive uređaje energetske elektronike (npr. ukoliko se kratak spoj desi blizu čvora s priključenim DFIM), namotaji rotora će se kroubarom kratkospojiti preko dodatnog otpornika da bi se zaštitio inverter od velikih struja kratkog spoja [27, 28]. U ovom slučaju se potpuno gubi kontrola izlazne struje. S obzirom da su namotaji rotora kratkospojeni, DFIM se tretira modelom vrlo sličnim modelu asinhronne mašine (deo 4.2). Jedina razlika između ta dva modela je da je potrebno dodati otpornik kroubara u kolu rotora. Taj otpornik može da ima i do 20 puta veću otpornost od otpornosti rotora, tako da se ne može zanemariti u preciznim proračunima [25-28].



Slika 4.3.1 (2.2.2.5) – DFIM sa inverterom zaštićenim kroubarom (a) i čoperom (b)

U slučaju kratkog spoja s manjim strujama u DFIM (npr. ukoliko se kratak spoj desi daleko od čvora s priključenim DFIM), kada struje nisu tako velike da oštete uređaje energetske elektronike, kroubar neće reagovati i inverter će uspeti da zadrži kontrolu izlazne struje [27, 28]. U ovom slučaju, u ovoj disertaciji se DFIM modeluje identično kao DER tipa 4, koji je opisan u sledećem delu.

U ovoj disertaciji, „ozbiljnost“ kratkog spoja se određuje na osnovu napona u čvoru priključenja DFIM na mrežu, u trenutku kratkog spoja. Ukoliko napon u čvoru priključenja padne ispod unapred zadate granične vrednosti, pretpostavlja se da će kroubar reagovati. To se dešava kada je kratak spoj dovoljno blizu čvora sa priključenim DFIM, odnosno, takav kratak spoj je ozbiljan za razmatrati DFIM. Ukoliko napon u čvoru priključenja DFIM ostane iznad granične vrednosti, pretpostavlja se da kroubar neće reagovati i da će se inverterom nastaviti kontrola izlazne struje. To se dešava kada je kratak spoj dovoljno daleko od čvora sa DFIM, odnosno, takav kratak spoj nije ozbiljan za razmatrati DFIM.

Ukoliko se inverter DFIM štiti čoperom, onda se može postići mnogo bolja kontrola struje u slučaju kratkog spoja. Čoperom se obezbeđuje da inverter ostane aktivan čime će se ograničiti struja kratkog spoja, koliko god on bio blizu DFIM. Stoga, čoperom se omogućava da se inverterom održi kontrola izlazne struje tokom kratkog spoja. U ovoj disertaciji se DFIM sa ugrađenim čoperom modeluje identično kao DER tipa 4, koji je opisan u sledećem delu.

Na slici 4.3.2 dat je blok dijagram za modelovanje DFIM u zavisnosti od načina zaštite invertora i ozbiljnosti kratkog spoja u odnosu na razmatrati DFIM. Ovaj blok dijagram je u glavi 8 ugrađen u blok dijagram kompletne iterativne procedure za proračun režima mreže s kratkim spojem, u kome je obrađen tretman svih DER u slučaju različitih konfiguracija, u situacijama struja kratkih spojeva različitih veličina.

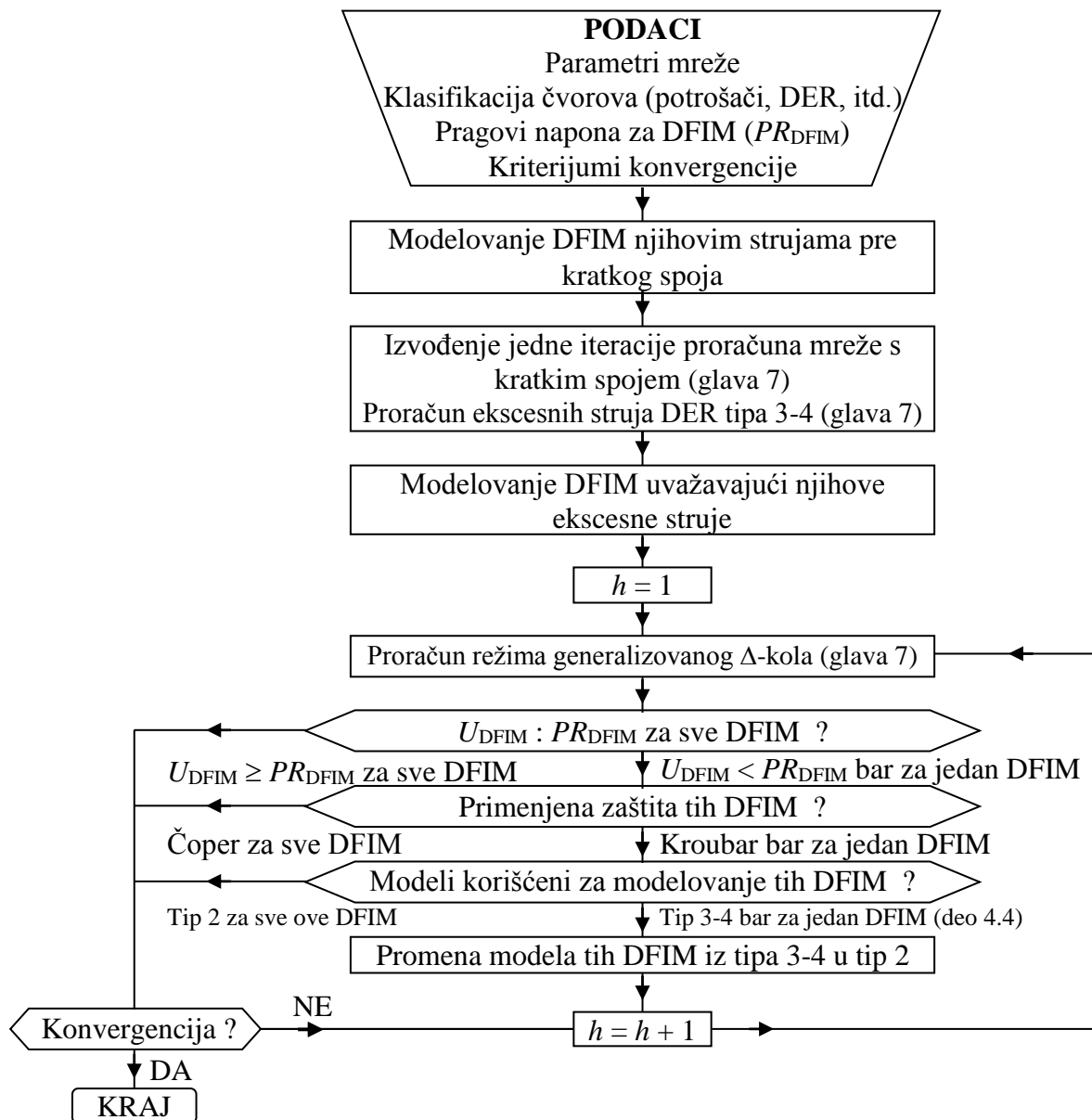
4.4 DER TIPA 3-4: IBDER I DFIM U SLUČAJU USPEŠNE KONTROLE STRUJE KRATKOG SPOJA

U ovoj disertaciji, IBDER kao i DFIM u slučaju da se uspe zadržati kontrola struje kratkog spoja (ako je kratak spoj dovoljno daleko od DFIM, ili ako se inverter DFIM štiti čoperom – deo 4.3) biće modelovani na isti način. U takvoj situaciji, oba tipa DER će u nastavku biti nazivana *DER tipa 3-4*.

S obzirom da se dinamički režimi mreža s tradicionalnim generatorima u slučaju kratkog spoja aproksimiraju suptranzitnim, tranzitnim i ustaljenim modelima, u ovoj disertaciji će i za DER tipa 3-4 biti predloženi modeli takođe za sve tri vremenske sekvence. To je urađeno iz dva razloga: 1) da se obuhvati dinamički odziv DER tipa 3-4 u slučaju kratkog spoja i 2) da se proračuni kratkih spojeva u zavisnosti od potrebe vrše posebno za svaku od ove tri vremenske sekvence; tradicionalni DER imaju različite modele u ove tri sekvence; dakle, da bi se proračuni kratkih spojeva vršili konzistentno i za mreže sa DER tipa 3-4, njima će se pridružiti odgovarajući modeli.

Modeli DER tipa 3-4 potpuno zavise od upravljačkih strategija koje su ugrađene u invertore, a ne od fizičkih karakteristika samog generatora/skladišta energije [22-28]. Iz ovog razloga, modeli koji se koriste za tradicionalne generatore (deo 4.1 i deo 4.2) nisu adekvatni za modelovanje DER tipa 3-4 [63-65]. U zavisnosti od posebnih zahteva koji su ugrađeni u

Pravilima o pogonu distributivnih mreža različitih zemalja, pa čak i u zavisnosti od različitih proizvođača, invertori u ovim vrstama DER mogu biti podešeni na različite načine. Ovo je osnovni razlog što do sada još uvek ne postoje opšte prihvaćeni modeli za DER tipa 3-4 za proračune režima mreža velikih dimenzija pogođenih kratkim spojevima [66-68]. Ovaj nedostatak je bio jedan od motiva za istraživanje predstavljeno u ovom delu disertacije.



Slika 4.3.2 – Blok dijagram za modelovanje DFIM u zavisnosti od načina zaštite invertora i ozbiljnosti kratkog spoja

Većina razvijenih zemalja ima jasno definisana *Pravila o pogonu prenosnih i distributivnih mreža*. Između ostalih zahteva, u ovim pravilima su definisani i posebni zahtevi „Fault Ride Through – FRT“ (ili opštije – „Low Voltage Ride Through – LVRT“). Ovi zahtevi se odnose na sposobnost DER da ostanu u pogonu pri sniženim naponima. Zahtevima FRT se jasno utvrđuje kako generatori zasnovani na uređajima energetske elektronike (DER tipa 3-4 u distributivnim mrežama) reaguju u slučaju smanjenih napona u čvorovima u kojima su oni priključeni na mrežu, koji su prouzrokovani kvarovima bilo gde u mreži. U većini zemalja, zahtevi FRT su definisani za prenosne mreže. Međutim, ovi zahtevi se poslednjih godina

utvrđuju u sve više zemalja i za distributivne mreže [66-68]. S obzirom na veliki porast broja DER tipa 3-4 u distributivnim mrežama širom sveta, vrlo je verovatno da će većina zemalja pratiti ovaj trend i utvrditi zahteve FRT za svoje distributivne mreže.

Cilj ovog dela disertacije je da se predlože modeli za DER tipa 3-4 koji su: 1) zasnovani na zahtevima FRT utvrđenim u Pravilima o pogonu distributivnih mreža i 2) kompatibilni s modelima tradicionalnih generatora, odnosno predstavljeni u tri vremenske sekvence – u sup tranzitnoj, tranzitnoj i ustaljenoj.

Stoga su prvo predstavljeni zahtevi FRT definisani u Pravilima o pogonu distributivnih mreža tri reprezentativne zemlje i izvedene su njihove zajedničke karakteristike. Zatim su na osnovu ovih karakteristika predloženi modeli DER tipa 3-4 za proračune režima distributivnih mreža s kratkim spojevima.

4.4.1 Zahtevi FRT

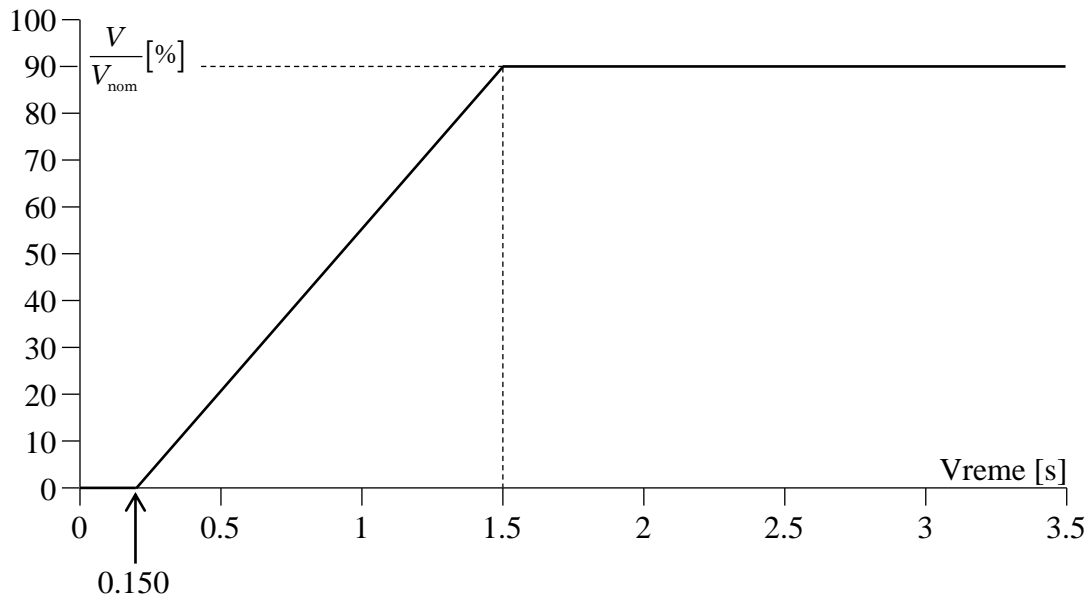
Pravilima o pogonu distributivnih mreža od DER se zahteva da se obezbedi podrška distributivnoj mreži tokom kratkog spoja [66]. Da bi se ispunio ovaj zahtev, DER bi trebali da ostanu u pogonu tokom trajanja kratkog spoja u mreži, ukoliko je to moguće. S obzirom da DER tipa 3-4 injektiraju kontrolisane struje kratkog spoja, oni mogu da ostanu priključeni na mrežu jer njihove struje kratkog spoja nisu velike i neće oštetiti ni svoje elemente niti elemente mreže [10, 66]. Savremena Pravila o pogonu distributivnih mreža, kao što su nemačka [66, 67], irska [68] i danska [66], sadrže striktno definisane zahteve FRT za svoje distributivne mreže. U nastavku će ukratko biti objašnjeni zahtevi FRT saglasni sa Pravilima o pogonu distributivnih mreža ove tri zemlje.

4.4.1.1 Nemački zahtevi FRT

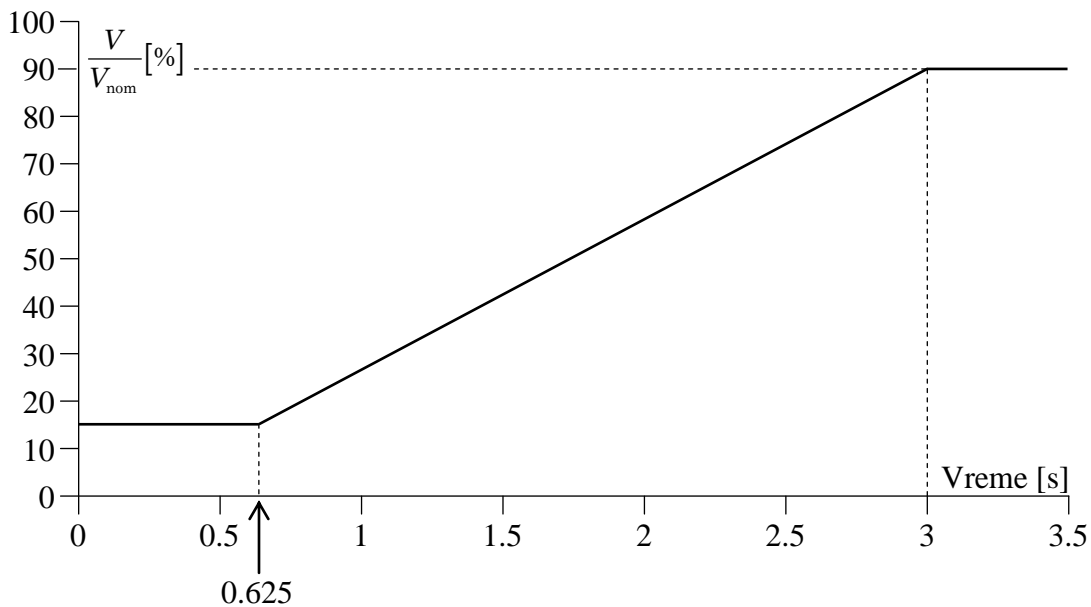
Nemački zahtevi FRT su prikazani na slici 4.4.1.1.1 [67]. Njima se zahteva da DER tipa 3-4 ostanu priključeni na mrežu 150 ms, čak i u slučaju da naponi na mestima njihovog priključenja (V na slici 4.4.1.1.1) na mrežu padnu na nulu. Između 150 ms i 1500 ms, granica napona ostanka DER u pogonu raste linearno od 0% do 90% (ordinata dijagrama na slici 4.4.1.1.1). Posle 1500 ms, DER tipa 3-4 moraju da ostanu trajno priključeni na mrežu ukoliko naponi na mestima njihovog priključenja nisu manji od 90% nominalnih napona (V_{nom} na slici 4.4.1.1.1). Ukoliko ti naponi padnu ispod granične linije sa slike 4.4.1.1.1, dozvoljeno je njegovo isključenje sa mreže nakon isteka predviđenog vremena (apscisa dijagrama na slici 4.4.1.1.1).

4.4.1.2 Irski zahtevi FRT

Na slici 4.4.1.2.1 su prikazani irski zahtevi FRT [68]. Sa slike se vidi da DER tipa 3-4 moraju da ostanu u pogonu prvih 625 ms ukoliko naponi na mestu njihovog priključenja na mrežu padnu ispod 15% nominalnih napona. Od 625 ms do 3000 ms, granica napona raste linearno od 15% do 90% nominalnih napona. Posle 3000 ms, DER tipa 3-4 moraju da ostanu trajno u pogonu ukoliko naponi na mestima njihovog priključenja na mrežu nisu manji od 90% nominalnih napona. Slično kao u slučaju nemačkih pravila, ukoliko naponi na mestima njihovog priključenja padnu ispod granične linije sa slike 4.4.1.2.1, dozvoljeno je isključenje DER tipa 3-4 sa mreže saglasno sa apscisom dijagrama.



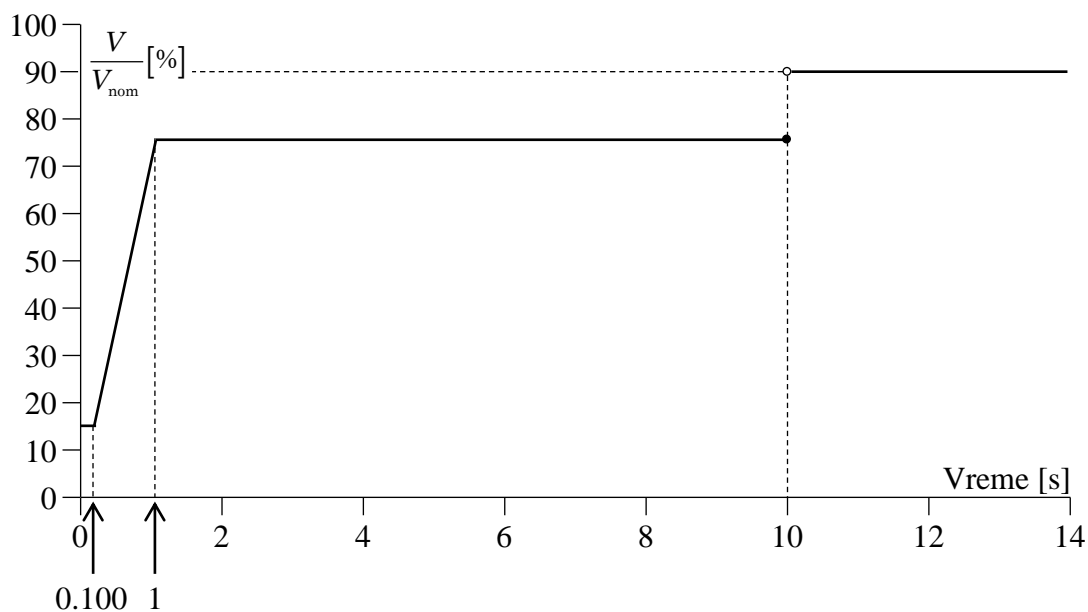
Slika 4.4.1.1.1 – Zahtevi FRT u pravilima o radu distributivnih mreža Nemačke [67]



Slika 4.4.1.2.1 – Zahtevi FRT u pravilima o radu distributivnih mreža Irske [68].

4.4.1.3 Danski zahtevi FRT

Na slici 4.4.1.3.1 su prikazani danski zahtevi FRT [66]. DER tipa 3-4 moraju da ostanu priključeni na mrežu prvih 100 ms ukoliko naponi na mestima njihovog priključenja na mrežu padnu ispod 25% nominalnih napona. Od 100 ms do 1000 ms, granica napona raste linearno od 25% do 75% nominalnih napona. Od 1000 ms do 10000 ms, DER tipa 3-4 moraju da ostanu priključeni na mrežu ukoliko se naponi povećavaju iznad 75% nominalnih napona. Posle 10000 ms, DER tipa 3-4 moraju trajno da ostanu u pogonu ukoliko naponi na mestu njihovog priključenja nisu manji od 90% nominalnih napona. Ukoliko se ti naponi smanje ispod granične linije sa slike 4.4.1.3.1, dozvoljeno je isključenje DER tipa 3-4 sa mreže saglasno sa apscisom dijagrama.

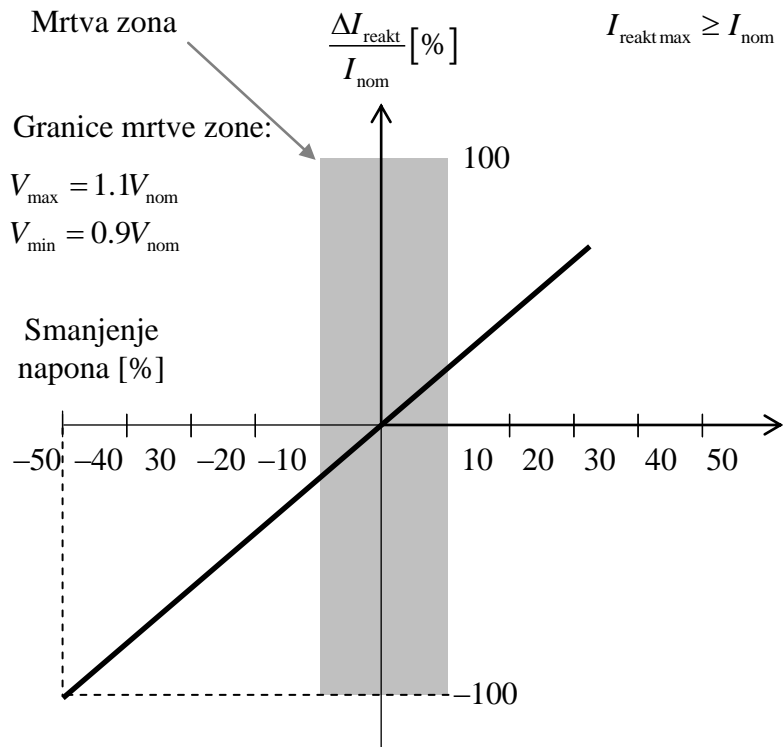


Slika 4.4.1.3.1 – Zahtevi FRT u pravilima o radu distributivnih mreža Danske [66].

4.4.1.4 Zahtevi za injektiranjem reaktivne struje za vreme kratkog spoja

Pravilima o pogonu distributivnih mreža od DER tipa 3-4 se zahteva da podrže distributivnu mrežu tako što će generisati reaktivnu snagu (struju) tokom kratkog spoja (reaktivna struja je na slici 4.4.1.4.1 označena sa I_{reakt}), da bi doprineli brzem povratku napona u normalne granice [10], [66-68]. Pod reaktivnom strujom se podrazumeva kompleksna komponenta struje DER kojom će se kada se pomnoži s kompleksnim naponom obezbediti reaktivna snaga injektirana u mrežu [10]. Pravilima o pogonu distributivnih mreža Irske i Nemačke od DER tipa 3-4 se zahteva da injektiraju reaktivne struje u vrednosti od 2% njihovih nominalnih struja po procentu pada napona na mestu priključenja DER na mrežu [10], [66, 67]. To znači da ukoliko napon padne na 50% od nominalne vrednosti, reaktivna struja DER tipa 3-4 treba da iznosi 100% nominalne struje. Ovaj zahtev je prikazan na slici 4.4.1.4.1 [66]. Međutim, sa DER tipa 3-4 mora da se kontrolišu njihove ukupne struje kratkog spoja, sa jasno definisanim ograničenjem tih struja, da bi osetljivi uređaji energetske elektronike bili zaštićeni od strujnog preopterećenja [69]. Ograničenja struja kratkih spojeva se razlikuju kod različitih proizvođača, ali ne prelaze 1.5 nominalnih struja [10], [22-29]. Zbog toga, u slučajevima ozbiljnih smanjenja napona u čvorovima priključenja DER tipa 3-4 na mrežu (više od 75%), reaktivne struje koje će se iz DER tipa 3-4 injektirati u mrežu s kratkim spojem ne mogu da budu takve da se naruše zadata strujna ograničenja. Što se tiče kompleksnih aktivnih komponenti struja kratkog spoja DER tipa 3-4, za njih ne postoje striktni zahtevi, pa će u paragrafu 4.4.2 biti predložen tretman i tih komponenti. Aktivne komponente struja su one kojima će se kada se pomnože s naponima obezbediti injektiranje aktivne snage DER.

Prethodna razmatranja strujne podrške režimima mreža s kratkim spojevima (sa smanjenim naponima) bila su načelna sa aspekta smanjenja napona. Ovde se naglašava da se pod smanjenjem napona podrazumeva smanjenje direktne komponente nesimetričnih napona na priključku DER tipa 3-4 na mrežu [10], [26-28]



Slika 4.4.1.4.1 – Zahtevi za injektiranjem reaktivne struje [66].

4.4.1.5 Zajedničke karakteristike prikazanih zahteva FRT

Saglasno s prethodnim izlaganjem, može se zaključiti da su osnovni zahtevi FRT od DER tipa 3-4 sledeći:

1. Da ostane priključen na mrežu u slučaju kratkog spoja bilo gde u mreži;
2. Da se iz njih injektira reaktivna snaga (struja) u mrežu u slučaju kratkog spoja bilo gde u mreži.

Na osnovu ovih zahteva, u sledećem paragrafu su predloženi modeli za DER tipa 3-4 u mreži s kratkim spojem.

4.4.2 Modeli DER tipa 3-4 u suptranzitnom, tranzitnom i ustaljenom režimu

Iz DER tipa 3-4 se u najvećem broju slučajeva injektiraju simetrične struje direktnog redosleda, čak i u slučaju neuravnoteženih kratkih spojeva [10], [26-28]. Kako je već rečeno na kraju tačke 4.4.1.4, ovi DER reaguju isključivo na smanjenje napona direktnog redosleda u čvorovima njihovog priključenja na mrežu. Shodno tome, modeli DER tipa 3-4 predloženi u ovoj disertaciji sastoje se isključivo od direktne komponente. Režimi njihovih pogonskih kola inverznog i nultog redosleda su anulirani. Predloženi modeli se sastoje od idealnih strujnih generatora simetričnih struja direktnog redosleda.

Invertorima ugrađenim u DER tipa 3-4 uglavnom je potrebno jedna do dve periode (20-40 ms) da se detektuje kratak spoj u mreži [27, 28]. U tom kratkom periodu, njima se pokušava održati konstantnom njihova injektirana snaga pre kratkog spoja [27, 28]. Ovo će prouzrokovati porast injektirane struje, s obzirom na smanjeni napon čvora njihovog priključenja na mrežu.

Zatim se struja DER počinje kontrolisati. S obzirom da je strujno ograničenje poznato, problem za istraživače do sada je bio određivanje odnosa aktivne i reaktivne komponente (ograničene) struje kratkog spoja [22-28].

U ovoj disertaciji, vrednost struje kratkog spoja u kratkom periodu pre nego što se invertorom detektuje kratak spoj, kao i odnos aktivne i reaktivne komponente (kontrolisane) struje kratkog spoja nakon što se invertorom kratak spoj detektuje, određuju se u zavisnosti od vrednosti napona direktnog redosleda u čvoru priključenja na mrežu, u trenutku kratkog spoja. Ovaj napon označen je sa \hat{V}_T^+ (T – terminal). Neka je broj DER tipa 3-4 označen sa N_{DER3-4} .

Na početku iterativnog proračuna režima mreže s kratkim spojem, svi DER tipa 3-4 modeluju se idealnim strujnim generatorima, sa strujama jednakim njihovim strujama režima neposredno pre kratkog spoja ($\hat{I}_{DER3-4,i}^{pre}, i = 1, \dots, N_{DER3-4}$). Ove struje su poznate ili iz proračuna tokova snaga, ili iz estimacije stanja. U nastavku proračuna raspolaže se dovoljno dobrim aproksimacijama napona cele mreže, pa i napona u čvorovima priključenja DER tipa 3-4 ($\hat{V}_{T,i}^+, i = 1, \dots, N_{DER3-4}$).

Posle utvrđivanja dovoljno dobrih aproksimacija napona \hat{V}_T^+ , modeli DER tipa 3-4 dele se na suptranzitne, tranzitne i ustaljene. Suptranzitna sekvenca je definisana kao vreme dok DER tipa 3-4 ne detektuju kratak spoj, a u ovoj disertaciji se uzima vreme od 40 ms. Tranzitna i ustaljena sekvenca definišu se na osnovu zahteva FRT.

U ovoj disertaciji su za proračune izabrani nemački zahtevi FRT, kao najstroži. Međutim, ti modeli se lako mogu modifikovati ukoliko se razmatraju drugi zahtevi FRT i drugo vreme potrebno da se kratak spoj detektuje invertorom.

Na osnovu nemačkih zahteva FRT, tranzitna i ustaljena sekvenca su definisane kao što je prikazano na slici 4.4.2.1. Tranzitna sekvenca počinje u trenutku kada se invertorom detektuje kratak spoj (posle 40 ms od trenutka kratkog spoja) i završava se posle 1500 ms od momenta kada se desio kratak spoj. Ustaljena sekvenca počinje po završetku tranzitne sekvence i traje dokle god se kratak spoj ne izoluje iz mreže.

Ovako definisane suptranzitna, tranzitna i ustaljena sekvenca, prilično se dobro slažu s tim sekvencama klasičnih naizmeničnih mašina [41].



Slika 4.4.2.1 – Tranzitna i ustaljena vremenska sekvenca za DER tipa 3-4

4.4.2.1 Modeli DER tipa 3-4 u suptranzitnoj vremenskoj sekvenci

S obzirom da je suptranzitna sekvenca definisana kao vreme dok kratak spoj u mreži nije detektovan invertorom, pretpostavlja se da se invertorom održava konstantna injektirana snaga u mrežu. Stoga, struje DER tipa 3-4 u suptranzitnoj sekvenci ($\hat{I}_{DER3-4}^{k''}$) računaju se na osnovu poznate injektirane snage pre kratkog spoja ($\hat{S}_{T i}^{pk}$) i direktne komponente napona $\hat{V}_{T i}^+$. Te veličine su poznate ili iz proračuna tokova snaga ili iz estimacije stanja. Superskript k ukazuje na režim s kratkim spojem, a superskript pk na režim pre kratkog spoja. Struje DER tipa 3-4 u suptranzitnoj sekvenci računaju se na sledeći način:

$$\hat{I}_{DER3-4 i}^{k''} = \left(\frac{\hat{S}_{T i}^{pk}}{\hat{V}_{T i}^+} \right)^*, \quad i = 1, \dots, N_{DER3-4}, \quad (4.4.2.1.1)$$

s tim da ako modul izračunate struje $\hat{I}_{DER3-4 i}^{k''}$ prevaziđe vrednost definisanu strujnim ograničenjem invertora ($I_{DER3-4 i}^{max}$), odnos aktivne i reaktivne komponente struje $\hat{I}_{DER3-4 i}^{k''}$ se zadržava, dok se njen modul ograničava na vrednost $I_{DER3-4 i}^{max}$.

U slučaju da se trolpolni metalni kratak spoj desio na samom invertoru (odnosno u tački priključenja na mrežu), tada će napon $\hat{V}_{T i}^+$ biti jednak nuli i ne može da se koristi relacija 4.4.2.1.1. U tom slučaju se pretpostavlja da će DER tipa 3-4 injektirati struju sa modulom jednakim strujnom ograničenju ($I_{DER3-4 i}^{max}$) i uglom koji prednjači uglu napona u čvoru priključenja DER na mrežu u režimu pre kratkog spoja za $\frac{\pi}{2}$. Taj ugao je ovde označen sa $\delta_{I_{reakt i}^{pk}}$. Relacija za proračun struje DER tipa 3-4 u suptranzitnoj sekvenci, u ovom slučaju data je kako sledi:

$$\hat{I}_{DER3-4 i}^{k''} = I_{DER3-4 i}^{max} e^{j \delta_{I_{reakt i}^{pk}}}, \quad (4.4.2.1.1)$$

Ako proizvođač ovog tipa DER obezbedi drugačiju vrednost struje DER pri trolpolnom metalnom kratkom spoju na njegovim priključcima na mrežu, onda se ona može uzeti u obzir. S obzirom da trolpolni kratak spoj potpuno rasporeže razmatrani DER od ostatka mreže, kako god bila određena struja DER s trolpolnim kratkim spojem, to ne utiče na predloženi proračun struja kratkog spoja u ostatku mreže.

4.4.2.2 Modeli DER tipa 3-4 u tranzitnoj vremenskoj sekvenci

Tranzitna sekvenca započinje kada se invertorom detektuje kratak spoj u mreži, što znači da se od tog trenutka invertorom počinje kontrolisati njegova struja kratkog spoja saglasno sa upravljačkom strategijom definisanom zahtevima FRT (paragraf 4.4.1).

Na osnovu (poznatih) uglova aproksimacija direktne komponente napona $\hat{V}_{T i}^+$, uglovi (direktnih komponenti) reaktivnih struja svih DER tipa 3-4 ($\hat{I}_{DER3-4 i}^{reakt}$, $i = 1, \dots, N_{DER3-4}$) računaju se na sledeći način:

$$\delta_{I_{reakt i}} = \delta_{V i} + \frac{\pi}{2}, \quad i = 1, \dots, N_{DER3-4}, \quad (4.4.2.2.1)$$

gde je sa $\delta_{I_{\text{reakt } i}}$ označen ugao reaktivne struje i -tog DER tipa 3-4, a sa $\delta_{V i}$ ugao direktne komponente napona čvora priključenja i -tog DER tipa 3-4.

Sada se izračunava relativni odnos odstupanja direktne komponente napona DER tipa 3-4 od nominalnog napona na mestu priključenja DER tipa 3-4 ($V_{T_{\text{nom } i}}$):

$$\Delta V_{T i} = 1 - \frac{V_{T i}^+}{V_{T_{\text{nom } i}}}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{DER3-4}}. \quad (4.4.2.2.2)$$

Na osnovu relativnog odnosa odstupanja direktne komponente napona $\Delta V_{T i}$ i na osnovu zahteva sa slike 4.4.2.1, procenjuje se vreme koliko u tranzitnoj sekvenci DER tipa 3-4 treba da ostanu priključeni na mreži:

$$t_{\text{tranzitno } i} = 110 + \frac{1500-150}{0.9} \Delta V_{T i} \text{ [ms]}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{DER3-4}}. \quad (4.4.2.2.3)$$

Nakon isteka vremena $t_{\text{tranzitno } i}$, i -ti DER tipa 3-4 automatski se isključuje sa mreže.

Odnos modula reaktivne struje i nominalne struje i -tog DER tipa 3-4 ($I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{nom}}$) jednak je dvostrukoj vrednosti $\Delta V_{T i}$ (saglasno sa slikom 4.4.1.4.1):

$$\frac{I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{reakt}}}{I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{nom}}} = 2 \Delta V_{T i}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{DER3-4}}. \quad (4.4.2.2.4)$$

Sada se računa vrednost modula reaktivne struje i -tog DER tipa 3-4:

$$I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{reakt}} = 2 \Delta V_{T i} I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{nom}}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{DER3-4}}. \quad (4.4.2.2.5)$$

Na kraju, modul reaktivne struje $I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{reakt}}$ poredi se sa ograničenjem struje kratkog spoja i -tog DER tipa 3-4 ($I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{max}}$) i na osnovu njihovog odnosa se određuje ukupna struja kratkog spoja i -tog DER tipa 3-4 u tranzitnoj sekvenci ($\hat{I}_{\text{DER3-4 } i}^{\text{k'}}$):

$$I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{reakt}} \begin{cases} > I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{max}} \Rightarrow \hat{I}_{\text{DER3-4 } i}^{\text{k'}} = I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{max}} e^{j\delta_{I_{\text{reakt } i}}} \\ \leq I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{max}} \Rightarrow \hat{I}_{\text{DER3-4 } i}^{\text{k'}} = I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{akt}} e^{j\delta_{V i}} + I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{reakt}} e^{j\delta_{I_{\text{reakt } i}}} \end{cases}, \quad (4.4.2.2.6)$$

gde je:

$$I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{akt}} = \sqrt{(I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{max}})^2 - (I_{\text{DER3-4 } i}^{\text{reakt}})^2}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{DER3-4}}. \quad (4.4.2.2.7)$$

4.4.2.3 Modeli DER tipa 3-4 u ustaljenoj vremenskoj sekvenci

Saglasno sa slikom 4.4.2.1, u ustaljenoj sekvenci DER tipa 3-4 treba da ostanu priključeni na mrežu ukoliko naponi čvorova njihovog priključenja na mrežu imaju vrednost koja je veća ili jednaka 90% nominalnih vrednosti napona tih čvorova. To znači da će u ustaljenoj sekvenci samo DER tipa 3-4 locirani dovoljno daleko od mesta kratkog spoja ostati priključeni na mrežu. Saglasno sa slikom 4.4.1.4.1, reaktivne komponente struje kratkog spoja će u ustaljenoj sekvenci biti najviše 20% nominalne struje, s obzirom da napon nije smanjen više od 10%. Ostatak struje kratkog spoja je aktivna komponenta. Shodno tome, struje DER tipa 3-4 u ustaljenoj sekvenci računaju se na sledeći način:

$$\hat{I}_{DER3-4i}^k = I_{DER3-4i}^{akt} e^{j\delta_{vi}} + I_{DER3-4i}^{reakt} e^{j\delta_{I_{reakt}i}}, \quad (4.4.2.3.1)$$

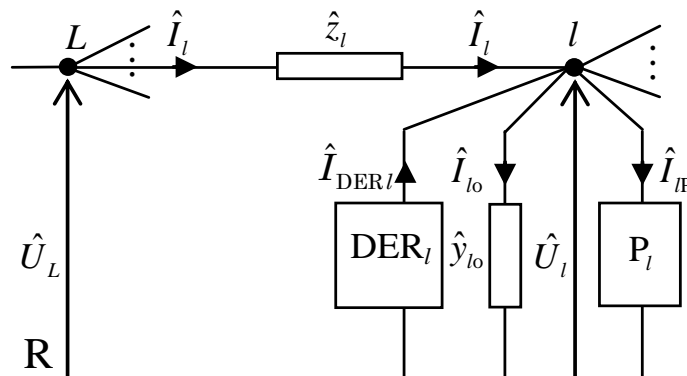
gde je:

$$I_{DER3-4i}^{reakt} = 0.2I_{DER3-4i}^{nom}, \quad I_{DER3-4i}^{akt} = \sqrt{(I_{DER3-4i}^{max})^2 - (I_{DER3-4i}^{reakt})^2}. \quad (4.4.2.3.2)$$

Ovde je potrebno napomenuti da se korišćenjem aproksimacije direktne komponente napona \hat{V}_T^+ izračunate u trenutku kada se desio kratak spoj, za izvođenje modela DER tipa 3-4 u tranzitnoj i ustaljenoj vremenskoj sekvenci unosi mala greška s obzirom da će se ovi naponi malo promeniti po završetku suptranzitne sekvence. Tačniji modeli bi bili izvedeni korišćenjem napona dobijenih po završetku proračuna u suptranzitnoj sekvenci. Međutim, s obzirom da je u većini slučajeva samo jedna sekvenca od interesa (najčešće tranzitna) i da bi posebni modeli za po želji izabrane vremenske sekvence trebali da mogu da se izračunaju u bilo kom trenutku, određene aproksimacije se moraju koristiti.

4.5 MODEL DISTRIBUTIVNE MREŽE – Γ SEGMENTI

Model kola trofazne distributivne mreže s kratkim spojem redukovano je na tri pogonska – jednofazna kola direktnog, inverznog i nultog redosleda. Ova kola su spregnuta samo na neuravnoteženim i međusobno spregnutim elementima, kao i na mestima s neuravnoteženim kratkim spojevima. U ovoj disertaciji se koriste Γ segmenti za prikaz ovih kola – slika 4.5.1. Čvor bliži korenu označen je sa L , dok je čvor dalji od korena označen sa l . Čvorovi i grane su memorisani saglasno s principom slojeva [38-40]. Petlje se tretiraju korišćenjem čvorova prekida petlji [38-40]. Sa \hat{z}_l i \hat{y}_{lo} su označeni redni i otočni parametri l -tog Γ segmenta, respektivno; \hat{I}_l i \hat{I}_{lo} se odnose na njihove struje; \hat{U}_L i \hat{U}_l su naponi čvorova L i l , respektivno; sa P_l je označen potrošač priključen u čvoru l , a \hat{I}_{IP} je struja tog potrošača. Sa DER_l je označen DER priključen u čvoru l , a njegova struja je označena sa \hat{I}_{DERl} . Čvor referentnog potencijala (zemlja) je označen sa R.



Slika 4.5.1 – Γ segment

GLAVA 5

OPŠTA RAZMATRANJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA S KOMPLEKSNIM KRATKIM SPOJEVIMA

U ovoj glavi su data opšta razmatranja režima distributivnih mreža s kompleksnim kratkim spojevima. Kao što je rečeno u glavi 1, u ovoj disertaciji kompleksni kratak spoj je definisan kao po želji izabran jednostruki kratak spoj ili skup simultanih kratkih spojeva u po želji izabranim čvorovima, kao i po želji izabranim brojevima faza čvorova zahvaćenim kratkim spojevima. To mogu biti kratki spojevi faza sa zemljom i međufazni kratki spojevi sa i bez zemlje, kao i kratki spojevi preko impedansi.

Načelno, režimi s kompleksnim kratkim spojevima nisu simetrični. Glavna karakteristika tih režima jeste da moduli napona i/ili struja mreža s kompleksnim kratkim spojevima značajno odstupaju od nominalnih vrednosti. Za razliku od normalnih režima, koji se bez velikih aproksimacija mogu tretirati ustaljenim, režimi s kompleksnim kratkim spojevima su dinamički. Uzroci te dinamike jesu delovanje teorije o zaleđenom fluksu u namotajima statora, pobudnim i prigušnim namotajima rotora tradicionalnih naizmjeničnih mašina, kao i DFIM (u slučaju da izgube kontrolu nad strujama kratkih spojeva) u distributivnoj mreži, odnosno nadređenoj mreži s koje se distributivna mreža napaja. Moduli struja i napona režima mreže posle uspostavljanja kompleksnog kratkog spoja menjaju se u vremenu, a ustaljeno stanje s kratkim spojem se retko kad uspostavlja s obzirom da se delovi distributivnih mreža s kratkim spojevima, delovanjem relejne zaštite, vrlo brzo električno izdvajaju iz ostataka mreže.

Režimi s kratkim spojevima najčešće se dele na vremenske sekvence u kojima se oni aproksimiraju ustaljenim, pa i obrađuju postupcima utvrđenim za obradu ustaljenih režima.

U delu 5.1 date su pretpostavke na osnovu kojih će se modelovati i proračunavati režimi distributivnih mreža s kompleksnim kratkim spojevima. Opšti model distributivnih mreža s kratkim spojevima prikazan je u delu 5.2.

5.1 OSNOVNE PRETPOSTAVKE

Problemi s kompleksnim kratkim spojevima biće postavljeni i rešeni koristeći se odgovarajućim matematičkim modelima. Pri tome, za distributivne mreže i njihove matematičke modele važiće sledeće pretpostavke:

1. Koren distributivne mreže pre kratkog spoja zamenjen je idealnim generatorom nepoznate aktivne i reaktivne snage, a ostali DER i potrošači mreže zamenjeni su poznatim snagama ili snagama koje su funkcije napona. Zato ekvivalentno kolo mreže pre kratkog spoja nije linearno. Njegov režim se može izračunati koristeći se proračunom toкова snaga ili estimacijom stanja.
2. Dakle, režim distributivne mreže pre kratkog spoja je poznat.
3. Potrošači u proračunima kratkih spojeva se tretiraju na jedan od sledeća tri načina (deo

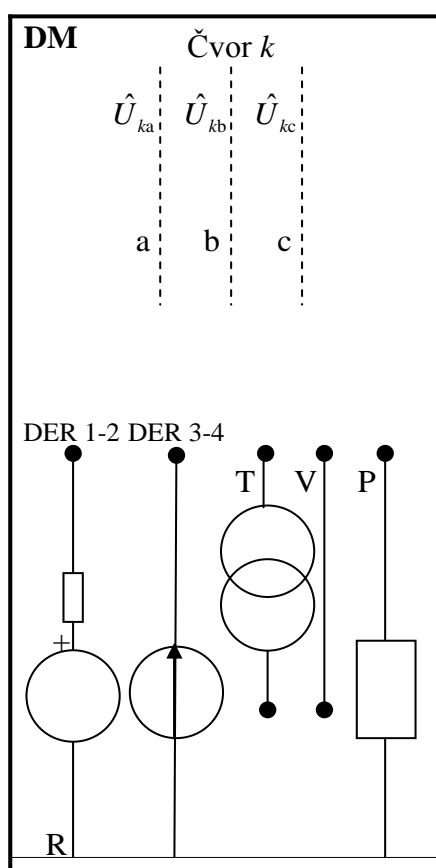
- 3.1): 1) snage potrošača su anulirane (mreža je pre kratkog spoja bila u praznom hodu); 2) potrošači su zamenjeni idealnim strujnim generatorima; struje tih generatora su izračunate koristeći se snagama i naponima iz režima pre kratkog spoja i 3) potrošači su zamenjeni impedansama (admitansama) koje su izračunate koristeći se snagama i naponima režima pre kompleksnog kratkog spoja. Ako se uz to, koristeći se poznatim režimom nadređene mreže pre kratkog spoja, u korenu priključi (linearan) Thevenenov generator i ako se ostali DER u mreži zamene Thevenenovim ekvivalentima u slučaju tradicionalnih naizmeničnih mašina i idealnim strujnim generatorima u slučaju DER tipa 3-4, distributivna mreža se i pre i za vreme kratkog spoja smatra linearnom, odnosno, u njoj nema nelinearnih parametara, niti elemenata specificiranih snaga.
4. Zemlja, zemljovodna užad i, ako postoje, neutralni provodnici vodova distributivnih mreža, nalaze se na referentnom potencijalu, odnosno, oni su direktno povezani sa čvorom referentnog potencijala R, ne samo pre, nego i za vreme kratkog spoja.
 5. Režimi s kratkim spojevima aproksimiraju se prostoperiodičnim režimima.
 6. U pogonskim kolima trofaznih mreža se pojavljuju idealni transformatori realnih i kompleksnih odnosa transformacije; posle transformacije tih kola u domen relativnih vrednosti i domen relativnih uglova, u njima neće biti idealnih transformatora niti realnih niti kompleksnih odnosa transformacije; zato se njihovi matematički modeli mogu generisati jednostavno i rešavati relativno jednostavno.
 7. Frekvencija distributivnih mreža za vreme kratkih spojeva se ne menja u odnosu na njenu vrednost pre kratkog spoja. To znači da regulacija aktivnih snaga i frekvencije, u relativno kratkim periodima režima distributivnih mreža s kratkim spojevima (do njihovog vrlo brzog izdvajanja iz mreže delovanjem relejne zaštite), nije počela da deluje. Isto važi i za regulaciju napona generatora i transformatora.
 8. Svi naponi u distributivnim mrežama pre i za vreme kratkih spojeva su referisani u odnosu na čvor referentnog potencijala R.

5.2 OPŠTI MODEL DISTRIBUTIVNE MREŽE S KOMPLEKSNIM KRATKIM SPOJEM

Pod *problemom distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem* podrazumeva se proračun režima (napona svih čvorova i struja svih elemenata) distributivne mreže u kojoj se desio kompleksan kratak spoj. Za proračun celokupnog režima jednog sistema (mreže) dovoljno je izračunati konačan broj veličina stanja. Kada su u pitanju električne mreže, onda se stanjem najčešće proglašava skup napona svih čvorova mreže. To je učinjeno i u ovoj disertaciji. Naponima i strujama mreže s kratkim spojem obuhvaćen je i režim čvora (čvorova) s kompleksnim kratkim spojem, tj. odgovarajući fazni naponi i struje kratkog spoja. Načelan zahtev za proračunom stanja (režima) cele distributivne mreže istaknut je s obzirom da na kratke spojeve deluje ne samo relejna zaštita na mestima kompleksnog kratkog spoja (ako je tamo uopšte ima), nego i na elementima koji su prvi, drugi, ili dalji „susedi“ elementa s kratkim spojevima. Zaštita se podešava ne na struje kratkih spojeva, nego na struje koje se u režimu s kratkim spojevima imaju u elementima na kojima su releji locirani. Npr. vrlo često se rastavna oprema (prekidači) SN izvoda postavlja samo na njihovim počecima, pa se samo na taj način štiti ceo izvod od svih kratkih spojeva duž njega.

Režim distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem zavisan je od vrste kompleksnog kratkog spoja, od nadređene mreže s koje se napaja distributivna mreža s kratkim spojem, od parametara distributivne mreže, od njene topologije, kao i od rasporeda i snage DER u odnosu na mesto kompleksnog kratkog spoja. Nadređena mreža i DER u distributivnoj mreži dominantno utiču na režime s kratkim spojevima. Njima je određena i dinamika tih režima.

Razmatra se distributivna mreža u ustaljenom režimu pre kratkog spoja. Ona je načelno prikazana na slici 5.2.1. Sa DER 1-2, DER 3-4, T, V i P naznačeni su osnovni konstitutivni elementi mreže – DER tipa 1 i DER tipa 2 (obuhvaćen i Tevenenov ekvivalent u korenu); DER tipa 3-4; transformatori; vodovi i potrošači, respektivno. U potrošače su uvrštene i baterije kondenzatora, statički VAR sistemi, prigušnice itd.

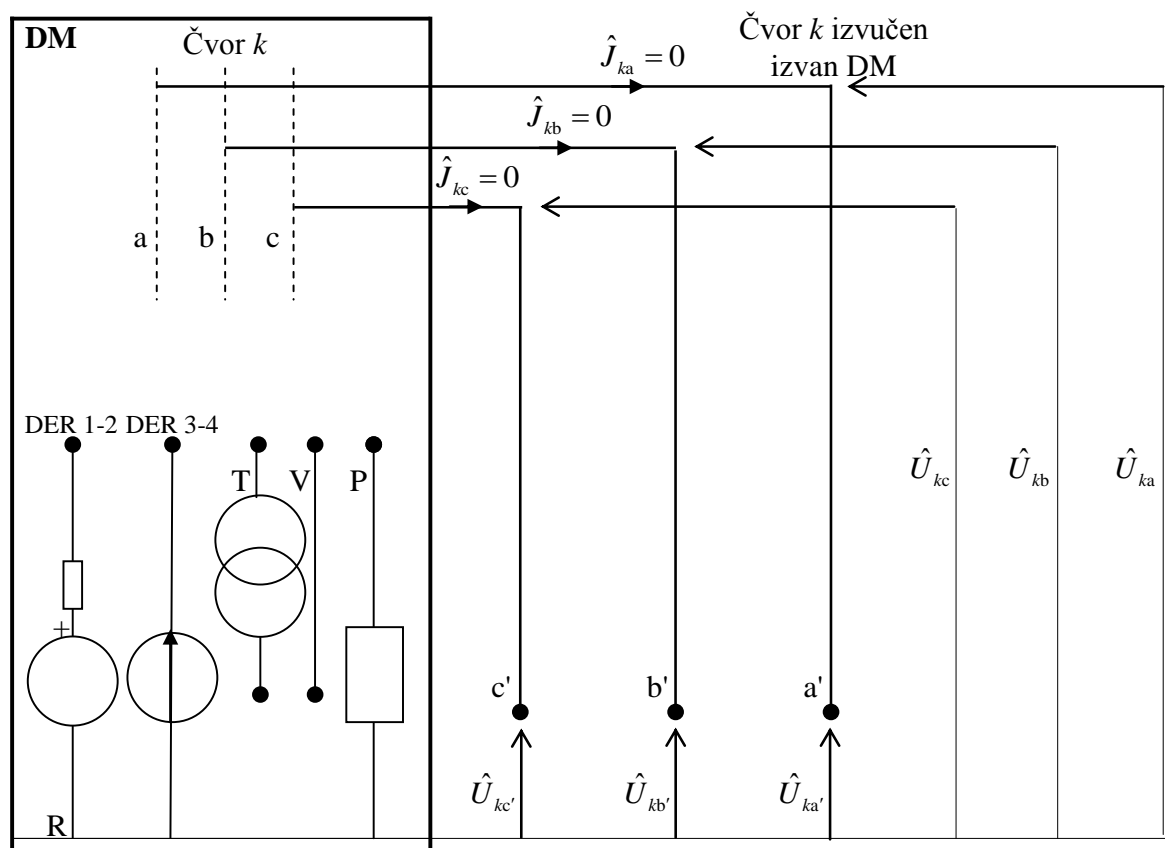


Slika 5.2.1 – Distributivna mreža u ustaljenom režimu pre kratkog spoja, sa istaknutim čvorom k u kojem će se simulirati kratak spoj

Od čvorova distributivne mreže istaknut je čvor k , pošto će se u njemu simulirati kompleksni kratak spoj. Faze a, b i c označene su isprekidanim linijama pošto ovaj čvor može da sadrži sve tri faze, bilo koje dve faze, ili bilo koju – jednu fazu. S obzirom da se pod kompleksnim kratkim spojem podrazumevaju i simultani kratki spojevi, čvor k ne mora biti jedini čvor s kratkim spojem. Ostali čvorovi s kratkim spojevima nisu prikazani da se ne bi opterećivala slika. Pored čvora k , istaknut je i čvor referentnog potencijala R. Grane incidentne čvoru k , preko kojih je on povezan sa ostatkom distributivne mreže (DM), nisu istaknute. Ako se kratak spoj simulira na krajevima elemenata distributivne mreže, tada je

čvor k jedan od već utvrđenih čvorova. Npr. to mogu biti jedne od sabirnica nekog razvodnog postrojenja distributivne mreže, čvor u kojem se mreža grana itd. Ako se kratak spoj simulira na izabranom mestu sekcije voda, onda je na tom mestu potrebno generisati poseban čvor. Tim čvorom sekcija je podeljena na dva dela koja su povezana u tom čvoru.

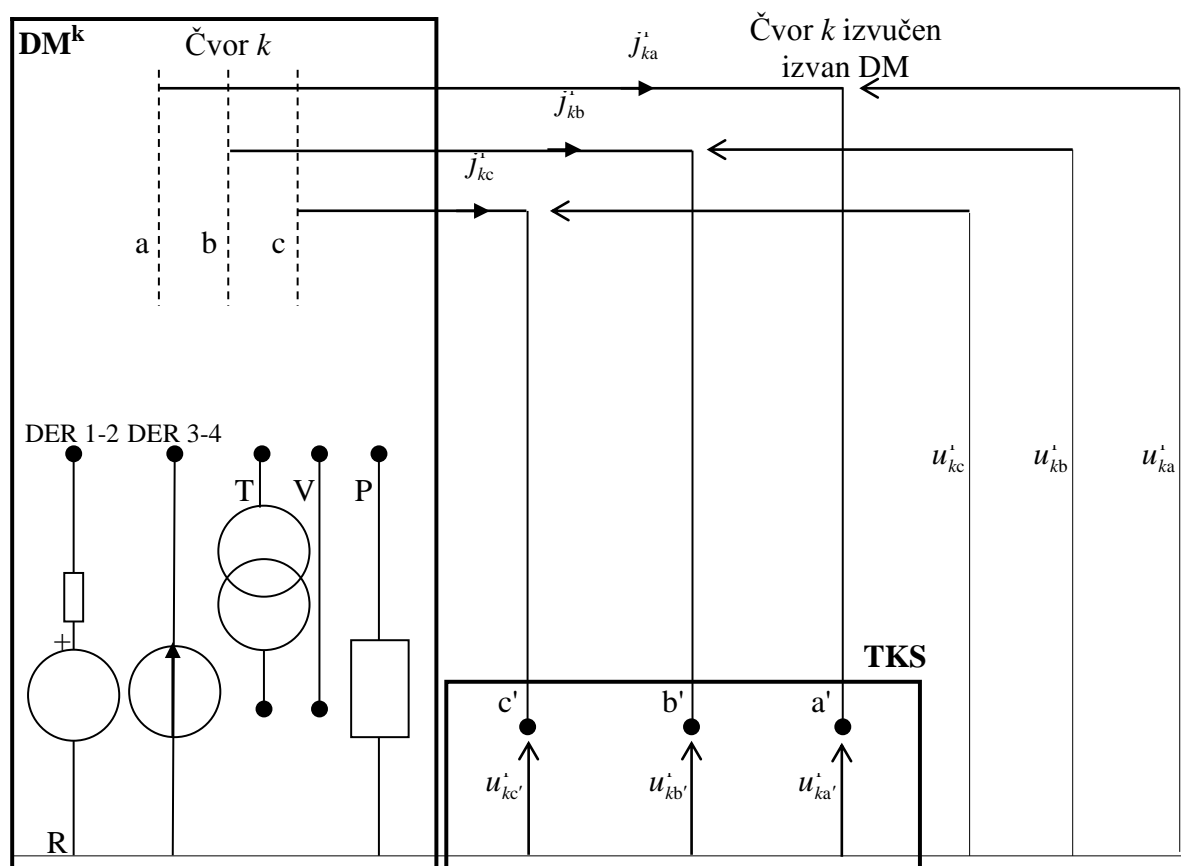
U razmatranoj distributivnoj mreži, pored čvora referentnog potencijala R , ima n čvorova. Sa \hat{U}_{ka} , \hat{U}_{kb} , \hat{U}_{kc} označeni su fazni naponi čvora k , pre kratkog spoja, referisani u odnosu na čvor referentnog potencijala R . Za označavanje tih napona korišćena je kompleksna notacija s obzirom da je režim distributivne mreže pre kratkog spoja prostoperiodičan. Distributivna mreža sa slike 5.2.1 prikazana je u ekvivalentnom obliku na slici 5.2.2. Na njoj je čvor k bezimpedantnim linijama (linijama nultih impedansi i bez međusobnih sprega) razvučen van okvira distributivne mreže, do tačaka a' , b' i c' . Struje u tim linijama jednake su nuli, a naponi faznih čvorova a' , b' i c' jednaki su naponima faznih čvorova a , b i c . To razvlačenje je učinjeno isključivo iz formalnih razloga radi pojednostavljenja crtanja topologije kratkog spoja i označavanja režimskih veličina čvora k . Drugim rečima, kompleksni kratak spoj će se simulirati koristeći se topološkom strukturom kratkog spoja (**TKS**). Ona neće biti insertovana direktno u fazne čvorove čvora k , već u fazne čvorove a' , b' i c' – slika 5.2.3. Mreža na toj slici predstavlja distributivnu mrežu s kratkim spojem (**DM^k**). Zato se u supskriptu veličina na slici 5.2.3 pojavljuje slovo „ k “. Ovde je potrebno napomenuti da se sa k („Normal“) u superskriptu oznaka u tekstu ukazuje na „kratak spoj“. Kada se slovo k („Italic,“) nađe u supskriptu oznaka u tekstu, onda se ukazuje na indeks čvora. Ovde je potrebno naglasiti da s obzirom na to da se u ovoj disertaciji obrađuju po želji izabrani (kompleksni) kratki spojevi, topologija kratkog spoja koja se insertuje na slici 5.2.3 nije ničim ograničena.



Slika 5.2.2 – Distributivna mreža pre kratkog spoja sa izvučenim čvorom k u kojem će se simulirati kratak spoj

Sada, struje u bezimpedantnim linijama kojima je čvor k razvučen, više nisu jednake nuli, ali naponi u tačkama a' , b' i c' i dalje jesu jednaki naponima u tačkama a , b i c .

Pošto režim distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem nije prostoperiodičan, veličine režima nisu ustaljene, pa su korišćene oznake malim slovima, koje treba shvatiti kao funkcije vremena [$x=x(t)$, $x=u, j$]. U tom smislu, sa $j_{ka}^k, j_{kb}^k, j_{kc}^k$ označene su *struje na mestu kratkog spoja* (struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja), a sa $u_{ka}^k = u_{ka'}^k, u_{kb}^k = u_{kb'}^k, u_{kc}^k = u_{kc'}^k$ *naponi čvora s kompleksnim kratkim spojem* (naponi kratkog spoja na mestu kratkog spoja).



Slika 5.2.3 – Distributivna mreža s kompleksnim kratkim spojem u čvoru k

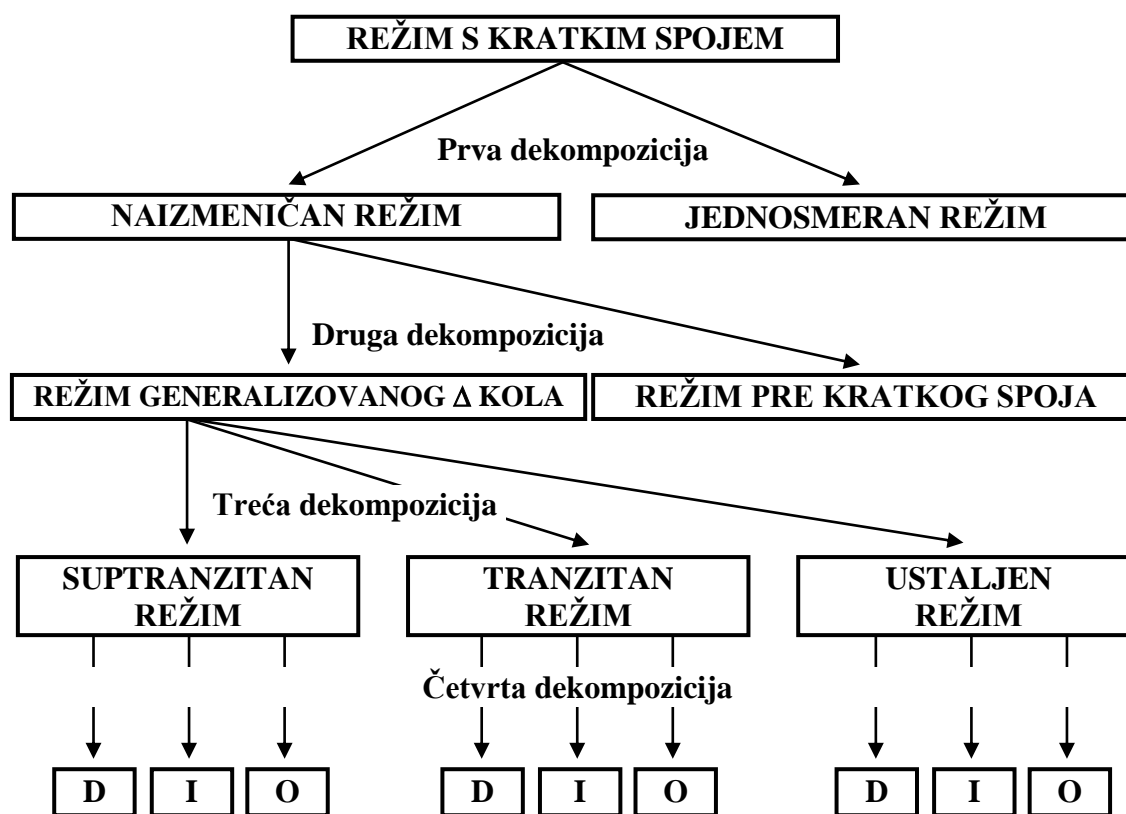
Struje i naponi u celoj distributivnoj mreži se nazivaju *strujama i naponima distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem* (struje i naponi kratkog spoja mreže). Njima su obuhvaćene i prethodno definisane struje i naponi čvorova zahvaćenih kompleksnim kratkim spojem. Takva će terminologija biti korišćena za sva kola kojima će biti prikazana distributivna mreža.

Dakle, u izlaganjima koja slede razmatra se režim distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem. Od interesa je proračun režima cele distributivne mreže. Proračun se zasniva na četiri dekompozicije – slika 5.2.4 [38, 39, 41] .

1. *Prva dekompozicija režima s kompleksnim kratkim spojem na naizmeničan i jednosmeran režim.*

2. *Druga dekompozicija* naizmeničnog režima s kompleksnim kratkim spojem na naizmeničan režim *generalizovanog Δ -kola* i (naizmeničan i prostoperiodičan – ustaljen) režim mreže pre kratkog spoja.
3. *Treća dekompozicija* naizmeničnog režima generalizovanog Δ -kola na tri vremenske sekvence (*perioda*) – *suptranzitna, tranzitna i ustaljena sekvenca (suptranzitni, tranzitni i ustaljeni režim)*. Suptranzitni i tranzitni režimi nisu ustaljeni pa se aproksimiraju ustaljenim režimima.
4. *Četvrta dekompozicija* aproksimacija suptranzitnog i tranzitnog režima, kao i ustaljenog režima generalizovanog Δ -kola iz domena faznih veličina u domen simetričnih komponenti.

Prva, druga i četvrta dekompozicija moguće su s obzirom na linearnost distributivne mreže. Treća dekompozicija je rezultat dinamičkog režima distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem.



Slika 5.2.4 – Četiri dekompozicije režima distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem

5.2.1 Prva dekompozicija

S obzirom da je distributivna mreža s kompleksnim kratkim spojem linearna, njen režim može se primenom principa dekompozicije-superpozicije dekomponovati na naizmeničan režim (supskript „ ω “) i jednosmeran režim (supskript „-“). Apsolutne vrednosti ekstremuma veličina naizmeničnog režima menjaju se u vremenu, što protivreči definiciji ustaljenog prostoperiodičnog režima. Dakle naizmenični režim nije ustaljen prostoperiodičan režim. Ova dekompozicija se može iskazati sledećom relacijom koja važi

za svaki napon i struju distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem, odnosno za svaku veličinu koja se dobija kao linearna kombinacija tih napona i struja:

$$x^k(t) = x_o^k(t) + x_z^k(t). \quad (5.2.1.1)$$

Proračun jednosmerne komponente nije od osnovnog interesa za ovu disertaciju. Ovaj proračun se može se naći u [43].

5.2.2 Druga dekompozicija

Proračuni režima tradicionalnih distributivnih mreža s kompleksnim kratkim spojem vrše se dekompozicijom na (poznati) režim mreže pre kratkog spoja i režim tradicionalnog Δ -kola [38, 39, 41]. Tako se proračun režima mreže s kompleksnim kratkim spojem svodi na proračun Δ -kola. Osnovna karakteristika Δ -kola je da je ono pasivno svuda osim na mestima kratkih spojeva [2], [6-9], [38, 39]. To znači da su idealni generatori tradicionalnih naizmjeničnih mašina anulirani u Δ -kolu. Njihov uticaj je uzet u obzir u režimu mreže pre kratkog spoja.

Koncept tradicionalnog Δ -kola ne može da se primeni na mrežama koje sadrže DER tipa 3-4. Njihovi aktivni delovi ne mogu da se zanemare u Δ -kolu, tako da osim mesta kompleksnog kratkog spoja, Δ -kola ovakvih distributivnih mreža aktivna su u svim čvorovima gde su priključeni DER tipa 3-4. S obzirom na navedeni nedostatak koncepta tradicionalnog Δ -kola, u ovoj disertaciji se uvodi novi koncept *generalizovanog* Δ -kola.

S obzirom da je novi koncept generalizovanog Δ -kola jedan od glavnih doprinosa ove disertacije, detaljno objašnjenje potrebe za uvođenjem generalizovanog Δ -kola, kao i njegovo izvođenje i proračun, još detaljnije se obrađuju u glavi 7.

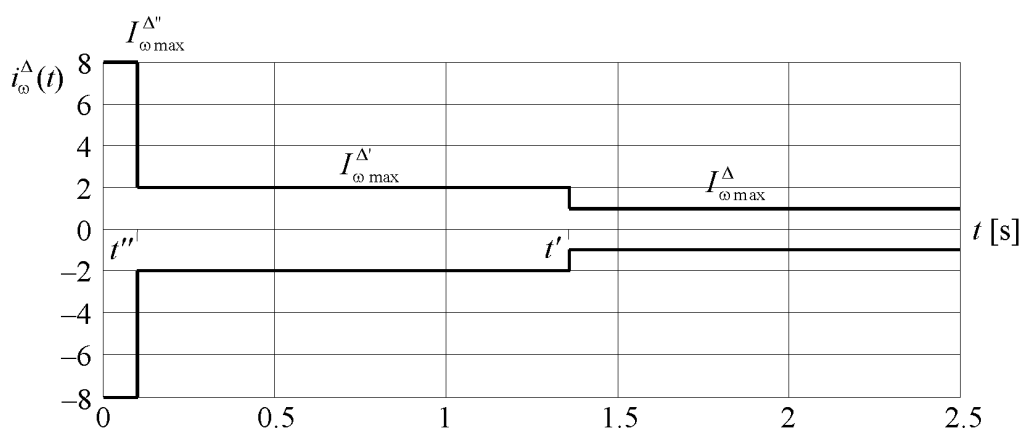
5.2.3 Treća dekompozicija

Apsolutne vrednosti ekstremuma bilo koje veličine naizmjeničnog režima generalizovanog Δ -kola promenljivi su u vremenu. Te promene su diktirane tradicionalnim naizmjeničnim mašinama i DFIM (u slučaju da izgube kontrolu nad strujama kratkog spoja) u nadređenoj mreži, kao i onima u distributivnoj mreži u kojoj se dešava kompleksni kratak spoj. Kao što je objašnjeno u glavi 4, struje kratkog spoja DER tipa 3-4 su ograničene (kontrolisane). Vrednosti ovih struja (odnosi njihovih aktivnih i reaktivnih delova) značajno se menjaju u zavisnosti od vremenske sekvence koja je od interesa, kao što je to opisano u glavi 4.

Parametri ekvivalentnih kola tradicionalnih naizmjeničnih mašina menjaju se prolazeći kroz tri vremenske sekvence – suptranzitna (sekundum u superskriptu), tranzitna (prim u superskriptu) i ustaljena (bez oznake u superskriptu) [41]. Zato, apsolutne vrednosti ekstremuma svake struje naizmjeničnog režima generalizovanog Δ -kola opadaju u prvoj vremenskoj sekvenci (suptranzitnoj) saglasno s ponašanjem tradicionalnih naizmjeničnih mašina u nadređenoj mreži i distributivnoj mreži u suptranzitnoj sekvenci. Taj prelazni proces je diktiran parametrima i pobudnih i prigušnih namotaja rotora mašina u nadređenoj mreži i distributivnoj mreži. Ova vremenska sekvenca (suptranzitna) traje nekoliko desetina milisekundi. Zatim, u narednoj – tranzitnoj sekvenci, koja traje do jedne sekunde, apsolutne vrednosti ekstremuma struja opadaju saglasno s ponašanjem naizmjeničnih mašina u toj sekvenci. Taj prelazni proces je diktiran parametrima samo pobudnih namotaja rotora

tradicionalnih naizmeničnih mašina u nadređenoj mreži i distributivnoj mreži. Poslednja sekvenca, posle završetka prelaznog procesa, uspostavila bi se samo kada ne bi delovala relejna zaštita u distributivnoj mreži s kratkim spojem. To je u praksi vrlo redak slučaj. Relejna zaštita uglavnom deluje u tranzitnoj sekvenci, osim u slučajevima vrlo dugačkih vodova s kratkim spojevima na njihovim krajevima. Dakle, ustaljena sekvenca struje kratkog spoja se praktično ne uspostavlja u mreži.

Iako se apsolutne vrednosti ekstremuma struja u prve dve od tri opisane vremenske sekvence menjaju (opadaju), struje u te dve sekvence se u proračunima mreža s kratkim spojevima pesimistički aproksimiraju sa tri struje konstantnih amplituda. To su prostoperiodične struje. Dakle, umesto anvelopa struja grana naizmeničnog režima generalizovanog Δ -kola, koje su promenljive u vremenu, pesimističke anvelope tih struja prikazane su na slici 5.2.3.1 [41]. To su prave linije, paralelne s vremenskom osom. Sa „max“ u supskriptu se ukazuje na amplitude prostoperiodičnih aproksimacija. Ovde je potrebno napomenuti da su vrednosti amplitude struje na slici 5.2.3.1 (od -8 do 8 kA) date samo aproksimativno, a s idejom da se prikaže priroda aproksimacije struje kratkog spoja u tri vremenske sekvence.



Slika 5.2.3.1 – Oblik aproksimiranih anvelopa struja naizmeničnog režima generalizovanog Δ -kola

Dakle, uvedena aproksimacija za posledicu ima pesimističke vrednosti struja kratkih spojeva. Naime, trenutne vrednosti i integralna dejstva struja naizmeničnih režima mreža s kratkim spojevima uvek su manje od pesimističkih vrednosti koje su rezultat uvedene aproksimacije: apsolutne vrednosti ekstremuma suptranzitne, tranzitne (i ustaljene) struje ne opadaju u odgovarajućim vremenskim sekvencama t'' (trajanje suptranzitne sekvence), t' (trajanje tranzitne sekvence) i vremena većeg od t' (ustaljena sekvenca) – slike 5.2.3.1. Ta aproksimacija glasi:

1. Naizmenična struja $i_{\omega}^{\Delta}(t)$ bilo koje grane generalizovanog Δ -kola prostoperiodična je u trajanju do samo nekoliko perioda (nekoliko desetina milisekundi), koliko traje suptranzitna sekvenca; sa t'' je označeno trajanje ove sekvence.
2. Posle toga, u trajanju do jedne sekunde, koliko praktično traje tranzitna sekvenca, struja je takođe prostoperiodična, ali sada sa znatno manjom amplitudom; sa t' je označeno trajanje ove sekvence.

³ Pod trajanjem jednog eksponencijalnog procesa s vremenskom konstantom T , podrazumeva se period od tri do pet vremenskih konstanti. Tada se taj proces praktično ustaljuje.

Napomena: Trajanje tranzitne sekvence se formalno računa od početka režima s kratkim spojem, odnosno ona pokriva i suptranzitnu sekvencu. Praktično je svejedno kako se definiše to trajanje, sa ili bez suptranzitne sekvence, s obzirom na relativno beznačajno trajanje suptranzitne u odnosu na tranzitnu sekvencu.

3. Konačno, kada se završi tranzitna sekvenca (reda jednog sekunda), uspostavlja se ustaljeni (prostoperiodični) režim (kada to ne bi bilo sprečeno delovanjem relejne zaštite u distributivnoj mreži).

Dakle, svaka veličina aproksimiranog naizmjeničnog režima generalizovanog Δ -kola $x_{\omega}^{\Delta}(t)$, dekomponovana na vremenske sekvence s prostoperiodičnim režimima, glasi:

$$x_{\omega}^{\Delta}(t) = \begin{cases} x_{\omega}^{\Delta''}(t), & 0 \leq t < t'' \\ x_{\omega}^{\Delta'}(t), & 0 \leq t < t' \\ x_{\omega}^{\Delta}(t), & t' \leq t. \end{cases} \quad (5.2.3.1)$$

S obzirom da su struje naizmjeničnog režima generalizovanog Δ -kola aproksimirane sa po tri prostoperiodične veličine u tri vremenske sekvence, aproksimirani fluksevi i naponi generalizovanog Δ -kola su takođe prostoperiodični u sve tri vremenske sekvence. Zato se režimi u sve tri vremenske sekvence mogu obrađivati u domenu kompleksnih brojeva, primenom standardnih postupaka za proračun prostoperiodičnih režima električnih kola. Ovaj stav definitivno opravdava sprovođenje prve dekompozicije. Naime, tom dekompozicijom, od jednosmernog odvojen je naizmjenični režim, pa je njegov proračun, u okviru prethodne dve dekompozicije (druga i treća), značajno pojednostavljen. Ono što se pri tome pojednostavljenju izgubilo, to je dinamika suptranzitnog i tranzitnog režima. Oni su pesimistički tretirani prostoperiodičnim režimima.

Ako se slika 5.2.3.1 uporedi sa slikom 4.4.2.1 na kojoj su definisani suptranzitni, tranzitni i ustaljeni režim za modele DER tipa 3-4 uvedene u ovoj disertaciji, može se primetiti vrlo dobro vremensko podudaranje trajanja tih režima tradicionalnih naizmjeničnih mašina i DER tipa 3-4.

Sada se aproksimirani naizmjenični režim generalizovanog Δ -kola sastoji od tri ustaljena – naizmjenična (prostoperiodična) režima. Sva tri režima – suptranzitni, tranzitni i ustaljeni, računaju se koristeći se odgovarajućim matematičkim modelima generalizovanog Δ -kola u ustaljenim režimima. Ti modeli se razlikuju samo po tome što se Tevenenova impedansa ekvivalenta nadređene mreže i parametri DER u distributivnoj mreži, biraju saglasno s vremenskom sekvencom koja se obrađuje (suptranzitna, tranzitna ili ustaljena).

Dakle, generalizovano Δ -kolo u naizmjeničnom režimu dekomponovano je u vremenu na tri generalizovana Δ -kola ($DM^{\Delta''}$, $DM^{\Delta'}$ i DM^{Δ}), svako u naizmjeničnom (pesimističkom prostoperiodičnom) režimu. Po jedno od tih kola se odnosi na jednu vremensku sekvencu – suptranzitnu, tranzitnu i ustaljenu.

5.2.4 Četvrta dekompozicija

Ova dekompozicija se odnosi na aproksimacije naizmjeničnog režima distributivne mreže s kratkim spojem, u svakoj od tri vremenske sekvence (treća dekompozicija). Saglasno s pesimističkom pretpostavkom uvedenom u okviru treće dekompozicije, svaka trofazna veličina naizmjeničnog režima generalizovanog Δ -kola – $x_a(t)$, $x_b(t)$ i $x_c(t)$, (napon, struja,

fluks...), u svakoj od tri vremenske sekvence, – prostoperiodična je, pa se može tretirati u: 1) domenu kompleksnih brojeva (\hat{X}_a , \hat{X}_b i \hat{X}_c) i 2) u domenu simetričnih komponenti (\hat{X}^+ , \hat{X}^- , \hat{X}^0). Ova druga transformacija predstavlja ovde obrađivanu četvrtu dekompoziciju.

Pod transformacijom modela kola iz domena faznih veličina u domen simetričnih komponenti podrazumeva se: 1) transformacija svih trofaznih veličina režima kola iz faznog domena u domen simetričnih komponenti i 2) zamena trofaznog kola (matematičkog modela) s njegova tri jednofazna reprezentata – pogonska kola (modela) za simetrične režime sva tri redosleda. Tim kolima (modelima) povezane su simetrične komponente trofaznih veličina razmatranog trofaznog kola. Simetrične komponente trofaznih režimskih veličina, kao i pogonska kola razmatranog trofaznog kola, raspregnute su svuda osim na trofaznim elementima koji nisu uravnoteženi. To mogu biti neuravnoteženi vodovi i transformatori, međusobno spregnuti elementi mreža (npr. paralelni vodovi golih provodnika), kao i topološke strukture neuravnoteženih (kompleksnih) kratkih spojeva.

Transformacija svih trofaznih veličina sve tri vremenske sekvence u domen simetričnih komponenti glasi:

$$\hat{\mathbf{X}}^{+-0} = \hat{\mathbf{S}}\hat{\mathbf{X}}_{abc} \quad (5.2.4.1a)$$

pri čemu su korišćene sledeće oznake:

$$\hat{\mathbf{X}}_{abc} = \begin{bmatrix} \hat{X}_a \\ \hat{X}_b \\ \hat{X}_c \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{X}}^{+-0} = \begin{bmatrix} \hat{X}^+ \\ \hat{X}^- \\ \hat{X}^0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{S}} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{a} = e^{j2\pi/3}. \quad (5.2.4.1b)$$

Ova transformacija se u disertaciji primenjuje na trofazno generalizovano Δ -kolo. Relacije između simetričnih komponenti režimskih trofaznih veličina određene su pogonskim kolima trofaznog generalizovanog Δ -kola za sve tri vremenske sekvence. Pogonska kola trofaznih elemenata generišu se na sledeći način:

1. Koren distributivne mreže: U ovom čvoru je razmatrana distributivna mreža priključena na (sub)prenosnu mrežu. Ta mreža se zamenjuje pogonskim ekvivalentima za sva tri simetrična režima – direktnog, inverznog i nultog redosleda, za sve tri vremenske sekvence – suptranzitna, tranzitna i ustaljena.
2. DER tipa 1 i DER tipa 2 (tradicionalne naizmjenične mašine – glava 4): Njihovi pogonski parametri (impedanse) u svakom od tri pogonska kola imaju posebne vrednosti. Pogonski parametri direktnog redosleda se razlikuju za sve tri vremenske sekvence. Pogonski parametri inverznog redosleda su međusobno isti za sve tri vremenske sekvence i razlikuju se od pogonskih parametara direktnog redosleda. (Napomena: Ova kola su aktivna u pogonskom kolu mreže, ali su pasivna u generalizovanom Δ -kolu.) Za pogonske parametre nultog redosleda važi isto kao za pogonske parametre inverznog redosleda. Ako su namotaji statora povezani u trougao, ili zvezdu sa zvezdištem koje nije uzemljeno, onda naizmjenična mašina predstavlja prekid za nultu komponentu.
3. DER tipa 3-4 (glava 4): Njihovi modeli sadrže aktivne elemente (idealne strujne

generatore) samo u pogonskim kolima direktnog redosleda. Vrednosti struja idealnih strujnih generatora kojima se modeluju DER tipa 3-4 u generalizovanom Δ -kolu računaju se na osnovu vrednosti injektiranih struja iz režima pre kratkog spoja i struja izračunatih procedurom opisanom u glavi 4. Detaljno izvođenje dato je u glavi 7.

4. Potrošači (glava 2): Kako je već rečeno, oni se tretiraju na tri načina: i) zanemaruju se, ii) zamenjuju se idealnim strujnim generatorima, iii) zamenjuju se impedansama (admitansama). Kada se zamenjuju idealnim strujnim generatorima, onda se njihovi efekti uzimaju u obzir u režimu pre kratkog spoja, pa su njihovi priključci u generalizovanom Δ -kolu u praznom hodu. Dakle, generalizovano Δ -kolo je sa aspekta potrošača pasivno za svaki od tri njihova tretmana.
5. Vodovi [38-41]: Topološke strukture njihovih pogonskih kola za sva tri simetrična režima međusobno su iste. Kolo za nulti redosled se po vrednostima parametara razlikuje od prva dva (koja su međusobno ista).
6. Transformatori [38-41], [58-60]: Njihova pogonska kola za simetrične režime direktnog i inverznog redosleda razlikuju se samo kada su im odnosi transformacije kompleksni. Pogonska kola za simetrične režime nultog redosleda uvek se razlikuju od prethodna dva, osim u slučaju transformatora sa spregama Yy , s direktnim uzemljenjima oba zvezdišta. Njihova ekvivalentna kola imaju istu topološku strukturu za simetrične režime sva tri redosleda.

Proračune režima tri pogonska kola trofaznog generalizovanog Δ -kola, u tri vremenske sekvence, za mreže s više naponskih nivoa, najjednostavnije je vršiti u domenu relativnih vrednosti i domenu relativnih uglova. U prvi domen se „prelazi“ primenom transformacije iz domena apsolutnih vrednosti u domen relativnih vrednosti, a u drugi domen primenom Θ transformacije [41], [56, 57]. Kada se izračunaju ti režimi (sve trofazne veličine koje su od interesa – struje, naponi...), onda se te veličine transformišu iz domena relativnih uglova u domen apsolutnih uglova i iz domena relativnih vrednosti u domen apsolutnih vrednosti. Tada se raspoloža sa simetričnim komponentama svih trofaznih veličina koje su od interesa, ali u generalizovanom Δ -kolu, za svaku od tri vremenske sekvence.

Kada se raspoloža sa simetričnim komponentama, njihova transformacija u fazni domen vrši se matičnom transformacijom koja je inverzna matičnoj transformaciji (5.2.4.1):

$$\hat{\mathbf{X}}_{abc} = \hat{\mathbf{S}}^{-1} \hat{\mathbf{X}}^{+-0} \quad (5.2.4.2a)$$

pri čemu inverzna matrica matrice transformacije $\hat{\mathbf{S}}$ glasi:

$$\hat{\mathbf{S}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.2.4.2b)$$

GLAVA 6

PREGLED POSTOJEĆIH REPREZENTATIVNIH POSTUPAKA ZA PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

U ovoj glavi su ukratko izložena četiri postojeća reprezentativna postupka za proračun kratkih spojeva. Svaki od četiri postupka je izabran kao adekvatan predstavnik sledeće četiri različite vrste proračuna kratkih spojeva koji su opisani u uvodu disertacije:

1. Postupci za proračun mreža s kratkim spojevima zasnovani na inverziji (LU faktorizaciji) matrice admitansi – na čvorovima zasnovani postupci. Oni su zasnovani na modelima mreža napisanih saglasno s metodom nezavisnih napona.
2. Postupci za proračun mreža s kratkim spojevima zasnovani na proceduri SSKN – na granama zasnovani postupci. Oni su zasnovani na modelima mreža napisanih direktnom primenom Kirhofovih zakona.
3. Postupci za proračun mreža s kratkim spojevima zasnovani na metodu konturnih struja.
4. Postupci za proračun mreža s kratkim spojevima zasnovani na metodu EVS, predloženim u međunarodnom IEC standardu. Oni su zasnovani na teoremi superpozicije.

U delu 6.1 prikazan je kanonični model [6]. To je vrlo efikasan postupak za proračun kratkih spojeva prenosnih mreža, zasnovan na LU faktorizaciji matrica admitansi. U delu 6.2 prikazan je HKM (hibridni kompenzacioni metod) za proračun kratkih spojeva [16]. On je najefikasniji među postojećim postupcima za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža zasnovanim na SSKN proceduri. U delu 6.3 prikazan je postupak [30] kao predstavnik postupaka za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža zasnovanih na metodu konturnih struja. U delu 6.4 prikazan je postupak EVS za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža, predložen u međunarodnom IEC standardu [37].

6.1 KANONIČNI MODEL

Kanonični model je razvijen za proračun kratkih spojeva tradicionalnih prenosnih mreža. On je orijentisan na čvorove, odnosno zasniva se na modelovanju mreže matricom admitansi (metodom nezavisnih napona). U njemu se pretpostavlja da su jedini aktivni elementi u prenosnoj mreži tradicionalne naizmjenične mašine. Zato je postupak zasnovan na dekompoziciji režima mreže s kratkim spojem na režim pre kratkog spoja i režim tradicionalnog Δ -kola. S obzirom da je režim mreže pre kratkog spoja poznat, proračun se svodi na proračun režima tradicionalnog Δ -kola. Zato je ovde predstavljen samo proračun režima tradicionalnog Δ -kola.

Topologija kratkog spoja je opisana trofaznim modulima kratkog spoja. Jedan takav modul je prikazan na slici 6.1.1a. On se sastoji od:

1. Pet jednofaznih čvorova: a, b, c, n i referentnog čvora R. Čvorovi a, b i c su čvorovi u kojima se modul povezuje na distributivnu mrežu.
2. Četiri grane sa impedansama jednakim $\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}$, i šest idealnih naponskih generatora sa vrednostima jednakim naponima čvora u kome se simulira kratak spoj (k), pre kratkog spoja: $\hat{U}_{ka}^{pk}, \hat{U}_{kb}^{pk}, \hat{U}_{kc}^{pk}$. U svakoj grani dva idealna naponska generatora su sa istim vrednostima, ali suprotnih smerova.

Napomena: Sa k i pk („Normal“) u superskriptima se ukazuje na veličinu režima s kratkim spojem i režima pre kratkog spoja, respektivno. Kada je u supskriptu, sa k („Italic“) ukazuje se na redni broj čvora.

Trofazni modul kratkog spoja M_j može se predstaviti skupom od sledećih sedam elemenata:

$$M_j = \{\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}, (\hat{U}_{ka}^{pk} - \hat{U}_{ka}^{pk}), (\hat{U}_{kb}^{pk} - \hat{U}_{kb}^{pk}), (\hat{U}_{kc}^{pk} - \hat{U}_{kc}^{pk})\}, \quad (6.1.1)$$

gde je sa j označen indeks trofaznog modula kratkog spoja. Po želji izabran kratak spoj može se opisati preko odgovarajućeg skupa $N1$ trofaznih modula kratkog spoja:

$$M = \{M_j, j = 1, \dots, N1\}. \quad (6.1.2)$$

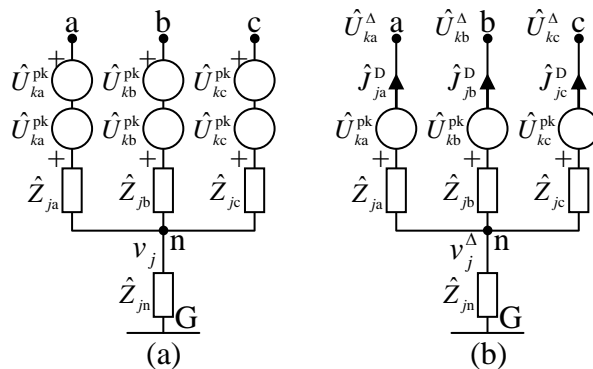
S obzirom da se režim mreže s kratkim spojem dekomponuje na režim pre kratkog spoja i režim Δ -kola, tako se i trofazni moduli kratkog spoja dekomponuju na osnovne trofazne module kratkog spoja i njihova Δ -kola. Δ -kolo trofaznog modula kratkog spoja prikazano je na slici 6.1.1b.

Sada se *osnovni trofazni moduli* kratkog spoja i *Δ -kola trofaznih modula* mogu predstaviti sledećim skupovima:

$$M_j^{pk} = \{\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}, (\hat{U}_{ka}^{pk}), (\hat{U}_{kb}^{pk}), (\hat{U}_{kc}^{pk})\}, \quad (6.1.3)$$

$$M_j^{\Delta} = \{\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}, (-\hat{U}_{ka}^{pk}), (-\hat{U}_{kb}^{pk}), (-\hat{U}_{kc}^{pk})\}, \quad (6.1.4)$$

$$j = 1, \dots, N1.$$



Slika 6.1.1 – Osnovni trofazni modul kratkog spoja M_j (a) i njegovo Δ -kolo (b)

Ako je j -ti trofazni modul kratkog spoja povezan sa čvorom k (slika 6.1.1b), režim njegovog Δ -kola se sastoji od sledeće dve vektor-kolone i jednog skalara:

$$\hat{\mathbf{U}}_k^\Delta = [\hat{U}_{ka}^\Delta \hat{U}_{kb}^\Delta \hat{U}_{kc}^\Delta]^\text{T}, \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta = [\hat{J}_{ja}^\Delta \hat{J}_{jb}^\Delta \hat{J}_{jc}^\Delta]^\text{T}, \hat{v}_j^\Delta. \quad (6.1.5)$$

Kombinacijom prvog i drugog Kirhofovog zakona, matematički model Δ -kola j -tog trofaznog modula kratkog spoja, povezanog sa čvorom k , u faznom domenu, može da se utvrdi na sledeći način [6]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}}_j^U \hat{\mathbf{U}}_k^\Delta + \hat{\mathbf{A}}_j^J \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta + \hat{\mathbf{A}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= \hat{\mathbf{A}}_j^0, \\ \hat{\mathbf{C}}_j^J \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta + \hat{\mathbf{C}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= 0, \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

$$j = 1, \dots, N1,$$

pri čemu se parametri ovih jednačina izračunavaju *inspekcijom* na sledeći način:

$$[\hat{\mathbf{A}}_j^U]_{3 \times 3} = \text{diag}[\hat{A}_{ja}^U \hat{A}_{jb}^U \hat{A}_{jc}^U], \hat{A}_{ji}^U = \begin{cases} 0, \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ 1, \text{ u ostalim slučajevima} \end{cases}; \quad (6.1.7)$$

$$[\hat{\mathbf{A}}_j^J]_{3 \times 3} = \text{diag}[\hat{A}_{ja}^J \hat{A}_{jb}^J \hat{A}_{jc}^J], \hat{A}_{ji}^J = \begin{cases} 1, \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ \hat{Z}_{ji}, \text{ u ostalim slučajevima} \end{cases}; \quad (6.1.8)$$

$$[\hat{\mathbf{A}}_j^v]_{3 \times 1} = [\hat{A}_{ja}^v \hat{A}_{jb}^v \hat{A}_{jc}^v]^\text{T}, \hat{A}_{ji}^v = \begin{cases} 0, \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ -1, \text{ u ostalim slučajevima} \end{cases}; \quad (6.1.9)$$

$$[\hat{\mathbf{A}}_j^0]_{3 \times 1} = [\hat{A}_{ja}^0 \hat{A}_{jb}^0 \hat{A}_{jc}^0]^\text{T}, \hat{A}_{ji}^0 = \begin{cases} 0, \hat{Z}_{ji} \rightarrow \infty \\ -\hat{U}_{ki}^0, \text{ u ostalim slučajevima} \end{cases}; \quad (6.1.10)$$

$$[\hat{\mathbf{C}}_j^J]_{1 \times 3} = [\hat{C}_{ja}^J \hat{C}_{jb}^J \hat{C}_{jc}^J], \hat{C}_{ji}^J = \begin{cases} 1, \hat{Z}_{jn} \rightarrow \infty \\ \hat{Z}_{jn}, \text{ u ostalim slučajevima} \end{cases}; \quad (6.1.11)$$

$$\hat{C}_j^v = \begin{cases} 0, \hat{Z}_{jn} \rightarrow \infty \\ 1, \text{ u ostalim slučajevima} \end{cases}. \quad (6.1.12)$$

U formulama (6.1.7) – (6.1.12), sa i je označena odgovarajuća faza – a, b, ili c.

6.1.1 Matrica incidencije

U svrhu povezivanja trofaznih modula kratkog spoja sa distributivnom mrežom, uvodi se matrica incidencije **T1**:

$$\mathbf{T1}_{kj} = \begin{cases} \mathbf{I} & \text{– kada je trofazni modul kratkog spoja } j \text{ povezan sa } \check{\text{c}}\text{vorom} \\ & \text{pogođenim kratkim spojem kojem odgovara indeks } k \\ \mathbf{0} & \text{– kada trofazni modul kratkog spoja } j \text{ nije povezan sa } \check{\text{c}}\text{vorom} \\ & \text{pogođenim kratkim spojem kojem odgovara indeks } k \end{cases} \quad (6.1.1.1)$$

$$k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, N1,$$

\mathbf{I} i $\mathbf{0}$ predstavljaju jediničnu i nultu matricu dimenzija 3×3 . Sa n je označen ukupan broj čvorova u mreži, dok je sa $N1$ označen broj trofaznih modula kratkog spoja. Kao što je prethodno rečeno, kanonični model je zasnovan na modelovanju mreže metodom nezavisnih napona (matricom admitansi), pa su dimenzije matrice $\mathbf{T1}$ jednake $3n \times 3N1$. U slučaju distributivnih mreža, n je relativno veliki broj, pa i matrica $\mathbf{T1}$ ima relativno velike dimenzije, što znatno otežava proračun. Iz tog razloga se u glavi 7 ove disertacije uvodi nova matrica incidencije \mathbf{T} , u kojoj se prva dimenzija sa ukupnog broja čvorova $3n$ svodi na broj čvorova zahvaćenih kratkim spojem.

Koristeći se napred uvedenom matricom incidencije $\mathbf{T1}$, vektor injektiranih struja svih čvorova Δ -mreže – $\hat{\mathbf{j}}^\Delta$ (dimenzija $3n$) može da se napiše na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{j}}^\Delta = \mathbf{T1}\hat{\mathbf{j}}_F^\Delta, \quad (6.1.1.2)$$

gde je $\hat{\mathbf{j}}_F^\Delta$ vektor koji sadrži struje svih trofaznih modula kratkog spoja; njegove dimenzije su $3N1 \times 1$.

6.1.2 Kanonični model Δ -kola mreže s kratkim spojem

Model Δ -kola, opisan preko matrice admitansi mreže ($\hat{\mathbf{Y}}$, dimenzija $n \times n$) ima sledeći oblik:

$$\hat{\mathbf{Y}}\hat{\mathbf{U}}^\Delta = \hat{\mathbf{j}}^\Delta, \quad (6.1.2.1)$$

gde je $\hat{\mathbf{U}}^\Delta$ vektor napona Δ -kola, dimenzija $n \times 1$.

Integracijom relacija (6.1.1.2) i (6.1.2.1) model Δ -kola mreže može da se napiše na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{Y}}\hat{\mathbf{U}}^\Delta = \mathbf{T1}\hat{\mathbf{j}}_F^\Delta. \quad (6.1.2.2)$$

Sada integracijom modela (6.1.6) za sve trofazne module kratkog spoja u mreži, i modela (6.1.2.2), kanonični model Δ -kola mreže s kratkim spojem može da se napiše na sledeći način:

$$\begin{matrix} & 3n & 3N_1 & N_1 & & 1 & 1 \\ 3n & \hat{\mathbf{Y}} & \mathbf{T1} & \mathbf{0} & & \hat{\mathbf{U}}^\Delta & \mathbf{0} \\ 3N_1 & \hat{\mathbf{A}}^U & \hat{\mathbf{A}}^J & \hat{\mathbf{A}}^V & & \hat{\mathbf{j}}^\Delta & \hat{\mathbf{A}}^0 \\ N_1 & \mathbf{0} & \hat{\mathbf{C}}^J & \hat{\mathbf{C}}^V & & \hat{\mathbf{V}}^\Delta & \mathbf{0} \end{matrix} \times = \begin{matrix} \hat{\mathbf{U}}^\Delta \\ \hat{\mathbf{j}}^\Delta \\ \hat{\mathbf{V}}^\Delta \end{matrix} = \begin{matrix} \mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{A}}^0 \\ \mathbf{0} \end{matrix}, \quad (6.1.2.3)$$

ili u kompaktnijoj formi:

$$\widehat{\mathbf{F}}\mathbf{1}\widehat{\mathbf{X}}^\Delta = \widehat{\mathbf{F}}\mathbf{1}^0. \quad (6.1.2.4)$$

Ovaj model može biti obrađen kako u faznom tako i u domenu simetričnih komponenti.

Sada se matrica $\widehat{\mathbf{F}}\mathbf{1}$, $(3n+4N1) \times (3n+4N1)$ faktoriše i proračunava se vektor nepoznatih veličina $\widehat{\mathbf{X}}^\Delta$.

Ovaj postupak je izuzetno efikasan za proračun kompleksnih kratkih spojeva, s obzirom da se ne zahteva složeno izvođenje uslova kvara, već se kratki spojevi definišu jednostavnim inspekcijom. Ideja opisa kompleksnog kratkog spoja iz kanoničnog modela je korišćena i u ovoj disertaciji (glava 7). Međutim, kanonični model je nastao kao postupak za proračun tradicionalnih, trofaznih prenosnih mreža, pa je zasnovan na korišćenju tradicionalnog Δ -kola, kao i proračuna režima mreže preko faktorizacije matrice admitansi mreže. To su dva osnovna nedostatka, zbog kojih ovaj postupak nije pogodan za proračun savremenih distributivnih mreža velikih dimenzija, koje sadrže DFIM i IBDER.

6.2 HIBRIDNI KOMPENZACIONI METOD (HKM)

Ovaj metod je namenjen proračunu kratkih spojeva radijalnih i slaboupetljanih trofaznih distributivnih mreža. On je razvijen u faznom domenu. Jedini aktivni elementi koji se razmatraju jesu tradicionalne naizmjenične mašine.

Velika prednost ovog metoda kada su u pitanju radijalne ili slaboupetljane distributivne mreže velikih dimenzija, u odnosu na matricne metode (na čvorovima zasnovane metode), jeste da je on orijentisan na grane, a čvorovi su numerisani saglasno sa principom slojeva. Zato nema faktorizacije matrice admitansi mreže. Slaboupetljane distributivne mreže se svode na radijalne (radijalizovane) mreže uvođenjem čvorova prekida petlji. Ti prekidi se zamenjuju kompenzacionim strujama [16]. Zatim se uvodi Tevenenova matrica petlji viđena iz čvorova prekida petlji. Kompenzacione struje se računaju na sledeći način:

$$\widehat{\mathbf{Z}}_b^{-1}\widehat{\mathbf{V}}_b = \widehat{\mathbf{J}}_b, \quad (6.2.1)$$

gde je $\widehat{\mathbf{Z}}_b$ Tevenenova matrica petlji, $\widehat{\mathbf{V}}_b$ vektor razlika napona čvorova prekida petlji i $\widehat{\mathbf{J}}_b$ vektor kompenzacionih struja. Ovde je potrebno napomenuti da je ovaj proračun iterativan, s obzirom da vektor $\widehat{\mathbf{V}}_b$ nije poznat i mora da se izračunava iterativno. Takođe, svaka pojedinačna iteracija proračuna vektora $\widehat{\mathbf{V}}_b$, sastoji se od zasebnog, takođe iterativnog SSKN postupka za proračun stanja radijalizovane mreže.

Sličan postupak se koristi i za proračun kompenzacionih struja tradicionalnih naizmjeničnih mašina u mreži s kratkim spojem. Takođe se računa Tevenenova matrica viđena iz čvorova u kojima su naizmjenične mašine priključene na mrežu, pa se njihove struje računaju na sledeći način:

$$\widehat{\mathbf{Z}}_g^{-1}\widehat{\mathbf{V}}_g = \widehat{\mathbf{J}}_g, \quad (6.2.2)$$

⁴ Iako se u disertaciji koriste oznake „U“ za fazne napone, ovde su za te napone korišćene originalne oznake „V“ iz [16].

gde je $\hat{\mathbf{Z}}_g$ Tevenenova matrica viđena iz čvorova u kojima su tradicionalne naizmjenične mašine priključene na mrežu, $\hat{\mathbf{V}}_g$ vektor (fiksiranih) napona naizmjeničnih mašina i $\hat{\mathbf{J}}_g$ vektor struja kratkog spoja naizmjeničnih mašina. Ovaj postupak je direktan (neiterativan), s obzirom da je vektor $\hat{\mathbf{V}}_g$ poznat.

Za proračun struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja koristi se sledeća formula:

$$\hat{\mathbf{Z}}_f^{-1} \hat{\mathbf{V}}_f = \hat{\mathbf{J}}_f, \quad (6.2.3)$$

gde je $\hat{\mathbf{Z}}_f$ Tevenenova matrica viđena iz čvora s kratkim spojem, $\hat{\mathbf{V}}_f$ vektor (nepoznatih) napona čvora s kratkim spojem i $\hat{\mathbf{J}}_f$ vektor struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja. Sa f se u [16] ukazuje na parametre i veličine koje se odnose na mrežu s kratkim spojem.

Da bi se izračunao vektor $\hat{\mathbf{V}}_f$, za svaki različit kratak spoj, izvode se različiti uslovi kvara. U referenci [16] ovo izvođenje je dato samo za četiri osnovna (metalna) kratka spoja. Kada se vektor $\hat{\mathbf{V}}_f$ izračuna, vektor struja $\hat{\mathbf{J}}_f$ se izračunava direktno (neiterativno).

Umesto tri posebna proračuna za izračunavanje kompenzacionih struja petlji, struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja i struja kratkog spoja naizmjeničnih mašina, u [16] se formira *hibridna kompenzaciona matrica* $\hat{\mathbf{Z}}_t$, od tri Tevenenove matrice iz formula (6.2.1), (6.2.2) i (6.2.3), na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{Z}}_t = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_b & \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_{bf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_g & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bf} & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} & \hat{\mathbf{Z}}_f \end{bmatrix}. \quad (6.2.4)$$

Dijagonalni elementi tri sub-matrice $\hat{\mathbf{Z}}_b$, $\hat{\mathbf{Z}}_g$ i $\hat{\mathbf{Z}}_f$ izračunavaju se tako što se sabiraju sve impedanse koje se nalaze na putu od čvora od interesa do korena mreže. Vandijagonalni elementi u svih devet sub-matrica se izračunavaju tako što se sabiraju sve impedanse koje se nalaze na zajedničkom delu puteva između svakog od dva čvora koja su od interesa i korena (ako zajedničkog puta nema, odgovarajući vandijagonalni element je jednak nuli). U [16], gde je predstavljen metod HKM, prilikom opisanog izračunavanja elemenata hibridne kompenzacione matrice (6.2.1.) zanemaruju se otočni parametri elemenata mreže (otočne admitanse kola vodova i impedanse magnećenja transformatora).

Zatim se utvrđuje postupak za izračunavanje kompenzacionih struja za petlje, kratke spojeve i generatora na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{Z}}_t^{-1} \hat{\mathbf{V}}_t = \hat{\mathbf{J}}_t, \quad (6.2.5)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_b & \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_{bf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bg} & \hat{\mathbf{Z}}_g & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} \\ \hat{\mathbf{Z}}_{bf} & \hat{\mathbf{Z}}_{gf} & \hat{\mathbf{Z}}_f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{V}}_b \\ \hat{\mathbf{V}}_f \\ \hat{\mathbf{V}}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{J}}_b \\ \hat{\mathbf{J}}_f \\ \hat{\mathbf{J}}_g \end{bmatrix}, \quad (6.2.6)$$

gde su vektori $\hat{\mathbf{V}}_b$ i $\hat{\mathbf{V}}_f$ prethodno izračunati (vektor $\hat{\mathbf{V}}_g$ je poznat). Iz formule (6.2.6) jednostavno se izračunavaju vektori kompenzacionih struja petlji, struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja i struje naizmeničnih mašina mreže s kratkim spojem. Posle izračunavanja tih struja, one se injektiraju u mrežu, i vrši se još jedan (iterativan) SSKN postupak za proračun stanja mreže s kratkim spojem.

Na osnovu prethodnih izlaganja očigledna su sledeća dva osnovna nedostatka ovog metoda (navedena i u uvodu):

1. Za svaki različit kratak spoj, ovim metodom se moraju izvoditi odgovarajući uslovi kvara. Ovo čini HKM metod nepraktičnim za korišćenje u industrijskim softverima kojima bi trebali da se rešavaju po želji izabrani kompleksni kratki spojevi sa podjednakom lakoćom i bez složenog predefinisavanja uslova kvara za svaki različit kratak spoj.
2. Ovaj metod je zasnovan na pretpostavci da su tradicionalne naizmenične mašine jedini aktivni elementi u distributivnoj mreži, što više nije slučaj. U savremene distributivne mreže sve se više integrišu DFIM i IBDER, a oni ne mogu da se predstavljaju modelima tradicionalnih naizmeničnih mašina, niti mreže koje sadrže ove DER mogu da se proračunavaju na tradicionalan način.

Pored ovoga, još jedan nedostatak koji znatno usporava primenu metoda HKM je činjenica da se za proračun kompenzacionih struja petlji (odnosno razlika napona u čvorovima prekida petlji) u svakoj iteraciji izvodi posebna iterativna procedura za proračun radijalizovane mreže. Tako metod HKM sadrži jednu „unutrašnju“ iterativnu proceduru, koja je u postupku USSKN korišćenim u ovoj disertaciji (glava 7), potpuno izbegnuta.

6.3 PRORAČUN ZASNOVAN NA METODU KONTURNIH STRUJA

Ovaj postupak je namenjen proračunu trofaznih, radijalnih i slaboupetljanih distributivnih mreža. Proračun se vrši u faznom domenu. Jedini aktivni elementi obrađeni ovim postupkom su tradicionalne naizmenične mašine. Ovim postupkom je takođe potrebno izvoditi uslove kvara za svaki kratak spoj.

Modelovanje mreže ovim postupkom nije zasnovano niti na matrici admitansi (metod nezavisnih napona), niti na principu slojeva (direktna primena Kirhofovih zakona), već na metodu konturnih struja. Za formiranje modela mreže koriste se dve matrice, **BIBC** i **BCBV** [30]. Matricom **BIBC** se povezuju struje čvorova sa strujama grana, dok se matricom **BCBV** povezuju struje grana s naponima čvorova.

Neka je $\hat{\mathbf{I}}_{br}$ vektor struja grana, a $\hat{\mathbf{I}}_n$ vektor injektiranih struja čvorova. Korišćenjem matrice **BIBC** može da se napiše sledeća relacija:

$$\hat{\mathbf{I}}_{br} = \mathbf{BIBC} \times \hat{\mathbf{I}}_n \quad (6.3.1)$$

Matrica **BIBC** je gornje trougaone forme i formira se na sledeći način:

1. Za mrežu sa m grana i n čvorova, matrica **BIBC** ima dimenzije $m \times (n-1)$;

2. Ako su čvorovi i i j povezani sekcijom k , kopirati i -tu kolonu matrice **BIBC** u j -tu kolonu i popuniti presek k -te vrste i j -te kolone sa +1;
3. Ponavljati korak 2 sve dok se ne obrade sve sekcije.

Neka su vektori $\hat{\mathbf{V}}$ i $\hat{\mathbf{V}}_0$ vektor faznih napona mreže u pogonu (ili s kratkim spojem) i vektor faznih napona mreže u praznom hodu, respektivno. Korišćenjem matrice **BCBV**, može da se napiše sledeća relacija između injektiranih struja grana i faznih napona čvorova:

$$\Delta\hat{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}}_0 - \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{BCBV} \times \hat{\mathbf{I}}_{br}. \quad (6.3.2)$$

Matrica **BCBV** se formira na sledeći način:

1. Za mrežu sa m grana i n čvorova, matrica **BCBV** ima dimenzije $(n-1) \times m$;
2. Ako su čvorovi i i j povezani sekcijom k , kopirati i -tu vrstu u j -tu vrstu i popuniti poziciju na preseku j -te vrste i k -te kolone sa rednom impedansom sekcije \hat{Z}_{ij} ;
3. Ponavljati korak 2 sve dok se ne obrade sve sekcije.

Sa ove dve matrice opisan je model mreže, odnosno relacija struja grana i injektiranih struja čvorova, kao i relacija struja grana i faznih napona čvorova. Za opis kratkog spoja, potrebno je izvoditi uslove kvara za svaki kratak spoj. Ovde će ukratko biti opisana procedura za proračun stanja mreže s jednopolnim kratkim spojem faze a čvora i preko impedanse \hat{Z}_f . Uslovi kvara glase:

$$\hat{I}_{ia} = \hat{I}_{ia}^f, \quad (6.3.3)$$

$$\hat{I}_{ib} = 0, \quad \hat{I}_{ib}^f = 0, \quad (6.3.4)$$

$$\hat{I}_{ic} = 0, \quad \hat{I}_{ic}^f = 0, \quad (6.3.5)$$

$$\hat{V}_{ia}^f = \hat{Z}_f \hat{I}_{ia}^f, \quad (6.3.6)$$

gde su $\hat{I}_{ia}^f, \hat{I}_{ib}^f, \hat{I}_{ic}^f$ struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja. \hat{V}_{ia}^f je napon kratkog spoja faze a, čvora i . Neka je \hat{V}_{ia}^0 napon pre kratkog spoja faze a, čvora i , a $\Delta\hat{V}_{ia}^f$ razlika između napona pre i posle kratkog spoja, faze a, čvora i . Tada može da se napiše sledeća relacija:

$$\Delta\hat{V}_{ia}^f = \hat{V}_{ia}^0 - \hat{Z}_f \hat{I}_{ia}^f. \quad (6.3.7)$$

Integracijom relacija (6.3.3), (6.3.4) i (6.3.5) u relaciju (6.3.1), dobija se:

$$\hat{\mathbf{I}}_{br}^f = \mathbf{BIBC} \times [0 \dots \hat{I}_{ia}^f \dots 0]^T. \quad (6.3.8)$$

Sada relacija (6.3.8) može da se napiše na sledeći način:

^s Iako se u disertaciji koriste oznake „U“ za fazne napone, ovde su za te napone korišćene originalne oznake „V“ iz [30]. Sa f se u [30] ukazuje na parametre i veličine koje se odnose na mrežu s kratkim spojem.

$$\hat{\mathbf{I}}_{br}^f = \mathbf{BIBC}_{ia} \hat{I}_{ia}^f, \quad (6.3.9)$$

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

Sada integracijom relacija (6.3.2) i (6.3.9), može da se napiše sledeća relacija:

$$\Delta \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{BCBV} \times \mathbf{BIBC}_{ia} \hat{I}_{ia}^f, \quad (6.3.10)$$

odnosno:

$$\Delta \hat{V}_{ia}^f = \mathbf{BCBV}_{ia} \times \mathbf{BIBC}_{ia} \hat{I}_{ia}^f, \quad (6.3.11)$$

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

Sada se integracijom relacija (6.3.7) i (6.3.11) dobija relacija za proračun struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja:

$$\hat{I}_{ia}^f = (\mathbf{BCBV}_{ia} \times \mathbf{BIBC}_{ia} + \hat{Z}_f)^{-1} \hat{V}_{ia}^0. \quad (6.3.12)$$

Kada se raspolaze strujom kratkog spoja na mestu kratkog spoja \hat{I}_{ia}^f , proračun stanja mreže s kratkim spojem se računa korišćenjem relacija (6.3.9) i (6.3.10). U [30] je dat proračun stanja mreže i sa dvopolnim i trolnim kratkim spojem. U istoj referenci je opisano i uvažavanje tradicionalnih naizmeničnih mašina.

Postupak opisan u ovom delu ima iste nedostatke kao i postupak HKM. Pored toga u [40] je pokazano da modelovanje i proračun mreža na ovaj način ima lošije karakteristike od postupaka SSKN, odnosno pokazano je da je proračun znatno sporiji. Štaviše, zbog množenja matrica \mathbf{BCBV} i \mathbf{BIBC} , koje imaju vrlo velike dimenzije, pitanje je da li je uopšte moguće sprovesti ga za mrežu sa više hiljada čvorova.

6.4 POSTUPAK EVS

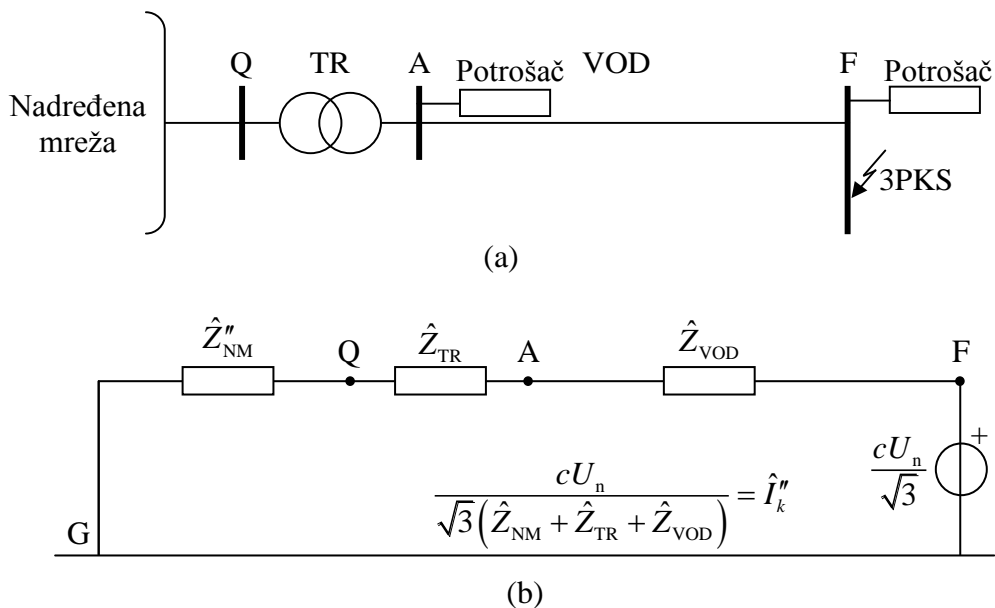
Postupak EVS je namenjen proračunu kratkih spojeva radijalnih i slaboupetljanih trofaznih, uravnoteženih distributivnih mreža. Proračun se vrši u domenu simetričnih komponenti. Ovaj postupak je namenjen proračunu isključivo četiri osnovna metalna kratka spoja: jednopolni kratak spoj, dvopolni kratak spoj, dvopolni kratak spoj sa zemljom i trolni kratak spoj (sa i bez zemlje). Ostali (kompleksni) kratki spojevi nisu obrađeni ovim postupkom.

Postupkom EVS se proračunava samo struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja. Uticaj potrošača, kondenzatorskih baterija, kao i otočnih elemenata vodova i transformatora je zanemaren. Tako je mreža znatno pojednostavljena. Uvažavaju se samo koren mreže i DER. Koristeći se principom dekompozicije-superpozicije [41] postupak se sastoji od posebnih proračuna uticaja svakog pojedinačnog izvora na struju kratkog spoja na mestu kratkog spoja. Zatim se superpozicijom izračunava ukupna struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja. U nastavku ovog dela prikazan je postupak EVS za proračun struje trolnog kratkog spoja. Proračun ostalih kratkih spojeva ovim postupkom može se naći u [37]. Na slici 6.4.1a prikazana je mala mreža koju čine koren (čvor Q), transformator (TR), vod (VOD), i dva potrošača bez

tradicionalnih naizmeničnih mašina. Tropolni kratak spoj (3PKS) je simuliran na kraju voda (čvor F). Razmatrana mreža je u čvoru Q (korenu) priključena na nadređenu mrežu (mrežu sa koje se ona napaja).

Na slici 6.4.1b prikazano je pogonsko kolo direktnog redosleda razmatrane trofazne mreže s tropolnim kratkim spojem, u suptranzitnoj sekvenci. Sa \hat{Z}_{NM}'' je označena Tevenenova pogonska impedansa direktnog redosleda nadređene mreže u suptranzitnoj sekvenci. (Napomena: Kada bi se razmatrali tranzitni i ustaljeni režim, tada bi se umesto ove impedanse nadređene mreže uvažile impedanse za te sekvence). Ekvivalentna Tevenenova elektromotorna sila te mreže je anulirana. Sa slike se vidi da su potrošači, otočni elementi transformatora i voda zanemareni. Na mestu kratkog spoja je priključen idealan naponski generator s faznom elektromotornom silom $cU_n/\sqrt{3}$. Sa je c označena konstanta koja zavisi od veličine mreže i udaljenosti kratkog spoja od korena. Njena vrednost pripada opsegu od 0.9 do 1.1 (za detalje videti [37]). Sa U_n je označen nominalni linijski napon čvora u kome se simulira kratak spoj. To je napon ekvivalentnog naponskog generatora koji leži u osnovi ovog postupka. Sa \hat{Z}_{TR} i \hat{Z}_{VOD} označene su pogonska impedansa kratkog spoja transformatora i pogonska redna impedansa voda direktnog redosleda, respektivno.

Očigledno je da se u ovom postupku, pored principa dekompozicije-superpozicije, spontano koristi metod zasnovan na tradicionalnom Δ -kolu bez da se to eksplicira.



Slika 6.4.1 – Primer razmatrane mreže (a) i ilustracija postupka EVS (b)

Kao što se vidi sa slike 6.4.1b, struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja se računa na sledeći način:

$$\hat{I}_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}(\hat{Z}_{NM}'' + \hat{Z}_{TR} + \hat{Z}_{VOD})}. \quad (6.4.1)$$

6 Kako što je napred napomenuto, iako se u disertaciji koriste oznake „U“ za fazne napone, ovde je za nominalni linijski napon korišćena oznaka „U_n“ iz [37].

Kada u razmatranoj mreži s kratkim spojem postoje i tradicionalne naizmenične mašine, njihovi idealni generatori se anuliraju i one se modeluju isključivo impedansama. Zatim se za svaki pojedinačni izvor struje kratkog spoja koristi formula identična kao 6.4.1, samo što se umesto impedanse \hat{Z}_{NM}'' koristi impedansa mašine koja se obrađuje, u razmatranoj vremenskoj sekvenci.

DFIM se u ovom postupku takođe zamenjuje impedansom i ne uvažava se slučaj da se sa DFIM može zadržati kontrola struje kratkog spoja. Impedansa DFIM, u direktnom redosledu se računa na sledeći način:

$$\hat{Z}_{DFIM} = \left(R_{WD}/X_{WD} + j \right) \frac{Z_{WD}}{\sqrt{1 + (R_{WD}/X_{WD})^2}}, \quad (6.4.2)$$

gde su:

$$Z_{WD} = \frac{\sqrt{2}k_{wd}U_n}{\sqrt{3}I_{max}}, \quad (6.4.3)$$

$R_{WD}/X_{WD} = 0.1$, ako proizvođač ne obezbedi drugačiju vrednost,

k_{wd} zavisi od vrednosti impedanse zaštite invertora DFIM (kroubar) i uzima se vrednost 1.7 ako proizvođač ne obezbedi drugačiju vrednost,

U_n – nominalni napon čvoru priključenja DFIM na mrežu,

I_{max} – maksimalna (unapred poznata) vrednost struje trolejnog kratkog spoja.

U slučaju neuravnoteženih kratkih spojeva, inverznu i nultu impedansu bi trebao da obezbedi proizvođač.

Za DER tipa 3-4, u standardu nisu obezbeđeni modeli. Jedino što se napominje u vezi ovih DER to je da treba da se modeluju idealnim strujnim generatorima u direktnom redosledu. Vrednosti struja tih izvora nisu obezbeđene i kaže se da njih treba da obezbedi proizvođač.

Kada se proračuna doprinos struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja od svakog pojedinačnog izvora, one se sabiraju i tako se dobija ukupna struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja.

Postupak EVS je „najslabiji“ od prethodno opisanih postupaka. Nedostaci ovog postupka su sledeći:

1. Ne proračunava se režim cele mreže s kratkim spojem, već samo struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja;
2. Obuhvaćena su samo četiri osnovna kratka spoja;
3. Obuhvaćene su samo trofazne, uravnotežene mreže u simetričnim režimima pre kratkog spoja;

4. Zanemarenjem uticaja potrošača, kondenzatorskih baterija, kao i otočnih elemenata vodova i transformatora na struju kratkog spoja, smanjuje se tačnost proračuna;
5. Modelovanje DFIM i DER tipa 3-4 je suviše pojednostavljeno, pa samim tim i nedovoljno tačno. Takođe, suviše se računa na informacije od proizvođača, koje se odnose na ove DER, a one vrlo često nisu dostupne.

GLAVA 7

PRORAČUN GENERALIZOVANOG Δ -KOLA

Proračuni režima tradicionalnih distributivnih mreža s kratkim spojem (distributivnih mreža u kojima su naizmjenične mašine jedini aktivni elementi) vrše se dekompozicijom na režim mreže pre kratkog spoja i režim tradicionalnog Δ -kola (glava 5). Režim mreže pre kratkog spoja poznat je ili iz proračuna tokova snaga ili iz estimacije stanja. Shodno tome, proračun režima tradicionalnih distributivnih mreža s kratkim spojem svodi se na proračun režima tradicionalnog Δ -kola. Osnovna karakteristika tog kola je da je ono pasivno svuda osim na mestu kratkog spoja, pa je proračun njegovog režima, a samim tim i proračun režima mreže s kratkim spojem znatno pojednostavljen. Idealni generatori ekvivalentnih tradicionalnih naizmjeničnih mašina su anulirani u Δ -kolu i njihov uticaj je uključen u režim mreže pre kratkog spoja. Tako, u Δ -kolu, naizmjenične mašine su modelovane isključivo njihovim suptranzitnim, tranzitnim, ili ustaljenim impedansama.

7.1 GENERALIZOVANO Δ -KOLO

Kao što je utvrđeno u glavi 4, DER tipa 3-4 se modeluju idealnim strujnim generatorima. Vrednosti tih struja zavise od upravljačkih strategija invertora i generalno se razlikuju od struja pre kratkog spoja. U glavi 4 su predloženi modeli DER tipa 3-4 u suptranzitnom, tranzitnom i ustaljenom režimu mreže s kompleksnim kratkim spojem, na osnovu zahteva FRT utvrđenih u Pravilima o pogonu distributivnih mreža. S obzirom da se ove struje razlikuju od injektiranih struja DER tipa 3-4 u režimu mreže pre kratkog spoja, njihov uticaj se u Δ -kolu ne može zanemariti. Zato je Δ -kolo distributivne mreže koja sadrži DER tipa 3-4, osim na mestima kratkih spojeva, aktivno i u svim čvorovima u kojima su DER tipa 3-4 priključeni na mrežu. U ovim čvorovima, deo struje DER tipa 3-4 koji prevazilazi struju pre kratkog spoja mora da se injektira u Δ -kolo. Ove struje su u ovoj disertaciji definisane kao *ekscsne struje*. DER tipa 3-4 se u Δ -kolu modeluju idealnim strujnim generatorima sa strujama jednakim ekscesnim strujama. S obzirom da su injektirane struje DER tipa 3-4 simetrične direktnog redosleda, samo se direktni redosled tradicionalnog Δ -kola menja. Ovako izvedeno Δ -kolo se u ovoj disertaciji definiše kao generalizovano Δ -kolo. Ekscesne struje svih DER tipa 3-4 se računaju na sledeći način:

$$\hat{I}_{\text{DER3-4}i}^{\Delta+} = \hat{I}_{\text{DER3-4}i}^{\text{k}+} - \hat{I}_{\text{DER3-4}i}^{\text{pk}+}, \quad i \in \alpha_{\text{DER3-4}}, \quad (7.1.1)$$

gde je sa $\alpha_{\text{DER3-4}}$ označen skup indeksa čvorova u kojima su priključeni DER tipa 3-4, $\hat{I}_{\text{DER3-4}i}^{\text{k}+}$ se odnosi na (suptranzitnu, tranzitnu ili ustaljenu) struju i -tog DER tipa 3-4 (deo 4.4), a $\hat{I}_{\text{DER3-4}i}^{\text{pk}+}$ je direktna komponenta struje i -tog DER tipa 3-4 iz režima pre kratkog spoja, koja je poznata ili iz proračuna tokova snaga ili iz estimacije stanja.

Pogonska kola inverznog i nultog redosleda generalizovanog Δ -kola su pasivna svuda osim na mestu kompleksnog kratkog spoja.

Na osnovu prethodnih izlaganja, generalizovano Δ -kolo se izvodi u sledeća četiri koraka:

1. Anulirati sve idealne generatore u faznom domenu;
2. Dodati topologije kratkih spojeva u čvorove s kompleksnim kratkim spojem;
3. Dodati trofazne idealne strujne generatore simetričnih struja direktnog redosleda u svim trofaznim čvorovima u kojima su DER tipa 3-4 priključeni na mrežu. Vrednosti struja ovih strujnih generatora jednake su ekscesnim strujama;
4. U slučaju trofazne mreže koja se obrađuje u domenu simetričnih komponenti, transformisati generalizovano Δ -kolo iz faznog domena u domen simetričnih komponenti.

U delu 7.2 predstavljen je proračun režima trofaznog generalizovanog Δ -kola s kompleksnim kratkim spojem.

7.2 PRORAČUN REŽIMA TROFAZNOG GENERALIZOVANOG Δ -KOLA

Proračun trofaznog generalizovanog Δ -kola se sastoji od proračuna tri naizmenična trofazna režima – tri simetrične komponente (direktna, inverzna i nulta), za svaku od tri vremenske sekvence – suptranzitne, tranzitne i ustaljene. Pošto su u pitanju prostoperiodični režimi (aproksimacije naizmeničnog režima trofaznog generalizovanog Δ -kola), oni se mogu obrađivati u vrlo komfornim domenima kompleksnih brojeva, relativnih vrednosti i relativnih uglova. Modeli DER za sve tri vremenske sekvence su obrađeni u delovima 4.1 (sinhrone mašine), 4.2 (asinhrone mašine) i u paragrafu 4.4.2 (DER tipa 3-4).

Posle prelaska u domen simetričnih komponenti, u matematičkim modelima pogonskih kola trofaznog generalizovanog Δ -kola, pojavljuju se idealni transformatori realnih odnosa transformacije iz pogonskih kola trofaznih transformatora s nultim sprežnim brojevima, kao i idealni transformatori kompleksnih odnosa transformacije iz pogonskih kola trofaznih transformatora s nenultim sprežnim brojevima. Obe vrste idealnih transformatora eliminišu se: 1) normalizacijom (transformacijom modela pogonskih kola iz domena apsolutnih u domen relativnih vrednosti – normalizacija) i 2) transformacijom modela pogonskih kola iz domena apsolutnih u domen relativnih uglova – Θ transformacija. Na taj se način matematički modeli pogonskih kola trofaznog generalizovanog Δ -kola maksimalno pojednostavljaju, pa se tako maksimalno pojednostavljuje i njihova obrada (proračun).

Dakle, u razmatranjima koja slede smatraće se da su sve prostoperiodične veličine izražene u kompleksnom domenu, domenu relativnih vrednosti i domenu relativnih uglova. To znači da se razmatraju distributivne mreže jednog naponskog nivoa, bez idealnih transformatora bilo realnih bilo kompleksnih odnosa transformacije.

Pod proračunom naizmeničnog režima generalizovanog Δ -kola podrazumeva se proračun naizmeničnih faznih napona svih čvorova i faznih struja svih grana generalizovanog Δ -kola, u tri vremenske sekvence – suptranzitna, tranzitna i ustaljena. U tu svrhu dovoljno je proračunati samo napone svih čvorova – stanje mreže. Stanjem se, po definiciji, obezbeđuje potpuna rekonstrukcija svih veličina režima mreže. Do tog cilja se stiže proračunom naizmeničnih režima pogonskih kola trofaznog generalizovanog Δ -kola u sve tri vremenske sekvence.

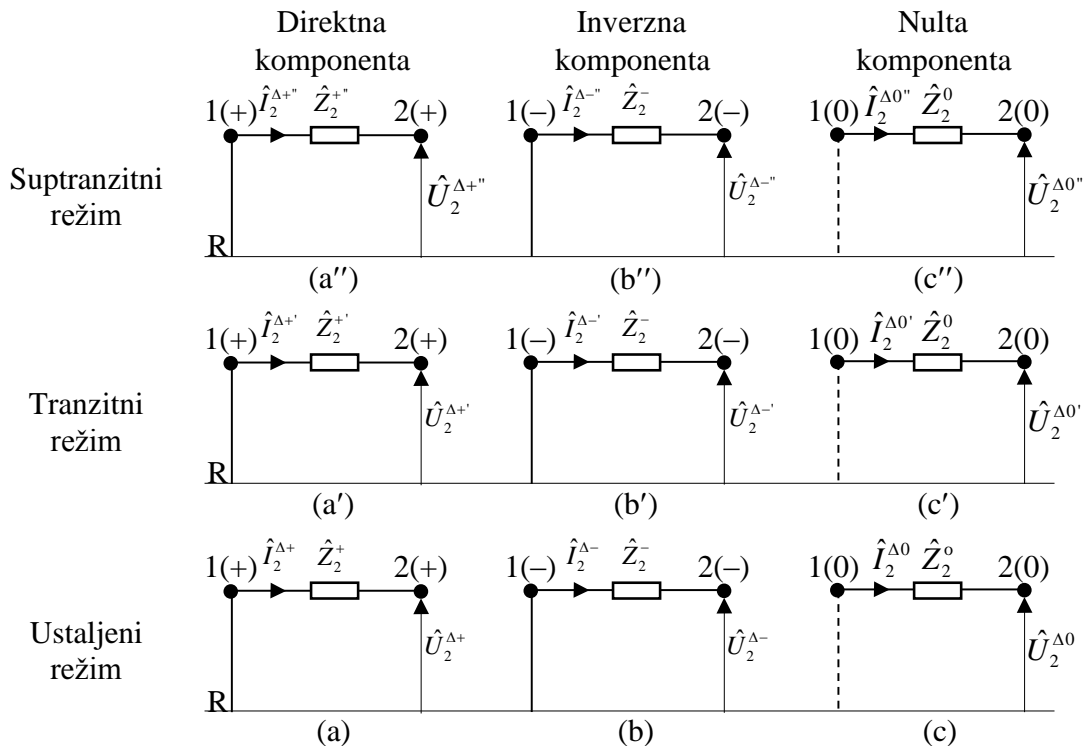
7.2.1 Trofazno generalizovano Δ -kolo

Matematički model kompleksnog kratkog spoja u generalizovanom Δ -kolu se izvodi integracijom Tevenenovih ekvivalenata pogonskih kola generalizovanog Δ -kola, viđenih iz čvorova zahvaćenih kompleksnim kratkim spojem, s modelom samog kratkog spoja.

Razmatra se trofazna distributivna mreža sa n trofaznih čvorova i p petlji, u prostoperiodičnom režimu. Kada se ova mreža radijalizuje (svaki čvor u kome se otvara jedna petlja deli se na dva čvora) [39], ona postaje mreža sa $n+p$ trofaznih čvorova, odnosno $3n+3p$ faznih čvorova. Među njima je i $N_{k.s.}$ trofaznih čvorova, $k_1, \dots, k_{N_{k.s.}}$, u kojima se simulira kompleksni kratak spoj. Čvor referentnog potencijala R je $(3n+3p+1)$ -vi čvor mreže. Generalizovano Δ -kolo mreže (bez uključenih Δ -kola modula kratkih spojeva) sastoji se takođe od $n+p$ trofaznih čvorova, odnosno od $3n+3p$ jednofaznih čvorova, uz čvor referentnog potencijala R. Dakle, trofazno generalizovano Δ -kolo se takođe sastoji od $3n+3p+1$ čvorova. Njegova pogonska kola se sastoje od po $n+p+1$ jednofaznih čvorova. U svakom od njih je ubrojan isti čvor referentnog potencijala R. On je jedinstven – zajednički čvor za sva tri pogonska kola. Pogonska kola inverznog i nultog redosleda, za sve tri vremenske sekvence, pasivna su svuda osim u čvorovima s kompleksnim kratkim spojem. Pogonsko kolo direktnog redosleda, pored čvorova s kratkim spojem, aktivno je i u čvorovima u kojima su priključeni DER tipa 3-4.

Radi modelovanja tri pogonska kola trofaznog generalizovanog Δ -kola potrebno je naglasiti sledeće karakteristike pogonskih kola trofazne mreže s kompleksnim kratkim spojem:

1. Ta kola su sa po jednim korenom (čvor 1).
2. Kola se prikazuju koristeći se Γ segmentima (deo 4.5) i memorišu se koristeći se principom slojeva [40].
3. Prilikom modelovanja distributivne mreže s kratkim spojem, u korenu (čvoru 1) priključuju se pogonski (pofazni) Tevenenovi ekvivalenti nadređene mreže za simetrične režime tri redosleda, s poznatim parametrima (elektromotornim silama i impedansama). Ti ekvivalenti su topološki isti s pogonskim ekvivalentima tradicionalnih naizmeničnih mašina prikazanih u delu 4.1, slike 4.1.1. Oni su aktivni pošto se u njima pojavljuju idealni naponski generatori u pogonskim kolima direktnog redosleda. U pogonskim kolima trofaznog generalizovanog Δ -kola, idealni naponski generatori priključeni u korenu pasivizirani su. Ta kola su prikazana na slici 7.2.1.1. Pošto je reč o generalizovanom Δ -kolu (njegovim pogonskim reprezentima Tevenenovih ekvivalenata nadređene mreže), veličine kola sa slike 7.2.1.1 imaju u superskriptima oznaku Δ . Kako je to napred rečeno, pogonska Tevenenova impedansa, kao i struje i naponi Tevenenovog ekvivalenta, imaju posebne vrednosti za svaku od vremenskih sekvenci. Tevenenova impedansa direktnog redosleda se menja od sekvence do sekvence, a Tevenenove impedanse inverznog i nultog redosleda se ne menjaju. Režimi Tevenenovih ekvivalenata nadređene mreže i režimi pogonskih kola trofaznog generalizovanog Δ -kola, menjaju se u sve tri vremenske sekvence. Tim činjenicama su prilagođene i oznake na slikama 7.2.1.1 – struje i naponi u Tevenenovim ekvivalentima za suptranzitnu sekvencu naznačeni su sa sekundum u superskriptu, za tranzitnu sa prim, a za ustaljenu nemaju naznaku.



Slika 7.2.1.1 – Pogonski Tevenenovi ekvivalenti nadređene mreže za simetrične režime direktnog (a), inverznog (b) i nultog redosleda (c), svaki za po tri vremenske sekvence, u generalizovanom Δ -kolu

Dakle, pogonska Tevenenova impedansa direktnog redosleda nadređene mreže menja se u tri vremenske sekvence (suptranzitna, tranzitna i ustaljena). U proračunima koji slede, njena vrednost će se odnositi na sekvencu koja se razmatra. Naznaka za sekvencu koja se razmatra neće biti isticana, pošto su modeli distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem za sve tri vremenske sekvence formalno isti.

U pogonskim kolima Tevenenovih ekvivalenata nadređene mreže za simetričan režim nultog redosleda, isprekidanim linijama na slikama 7.2.1.1c'', c' i c, naznačene su sledeće dve mogućnosti: 1) da se simetričan režim nultog redosleda ne može uspostaviti u nadređenoj mreži (mreža sa izolovanim zvezdištima transformatora); tada isprekidana linija predstavlja prekid; 2) da se simetričan režim nultog redosleda može uspostaviti u nadređenoj mreži (mreža sa uzemljenim zvezdištima transformatora); tada isprekidana linija predstavlja kratak spoj, pa je impedansa \hat{Z}_2^0 direktno povezana sa čvorom referentnog potencijala R.

4. Klasične naizmjenične mašine u distributivnoj mreži se modeluju Tevenenovim ekvivalentima (deo 4.1), koji su formalno isti sa onima koji su prikazani na slikama 7.2.1.1, za pogonske ekvivalente nadređene mreže. U pogonskim kolima trofaznog generalizovanog Δ -kola njihovi idealni generatori se takođe pasiviziraju. Dakle, tretman klasičnih naizmjeničnih mašina isti je s tretmanom Tevenenovih ekvivalenata nadređene mreže.
5. DER tipa 3-4 se u pogonskom kolu direktnog redosleda generalizovanog Δ -kola modeluju idealnim strujnim generatorima sa strujama jednakim ekscesnim strujama (7.1.1). Ove struje su simetrične, direktnog redosleda. Struje strujnih generatora u pogonskim kolima inverznog i nultog redosleda jednake su nuli.

6. Kao što je već rečeno u delu 3.1, potrošači u proračunima kratkih spojeva mogu se tretirati u sledeće tri varijante:
- Da se smatra da je razmatrana mreža pre kratkog spoja bila u praznom hodu (isključeni svi potrošači).
 - Potrošači se zamenjuju idealnim strujnim generatorima. Njihove struje se računaju na osnovu poznatih snaga i napona potrošača pre kratkog spoja.
 - Potrošači se zamenjuju admitansama (impedansama). One se računaju na osnovu poznatih snaga i napona potrošača pre kratkog spoja.

Forme modela pogonskih kola trofaznog generalizovanog Δ -kola razmatrane distributivne mreže, redosleda s ($s = +, -, 0$), svako sa po $n+1$ čvorova, za svaku od tri vremenske sekvence (suptranzitna, tranzitna i ustaljena), međusobno su iste. U tim modelima međusobno se razlikuju samo parametri impedansi Tevenenovih ekvivalenata nadređene mreže kao i DER u distributivnoj mreži, u vremenskim sekvencama. Zato u izlaganjima koja slede neće se insistirati na vremenskoj sekvenci, već će se izvesti opšti model koji važi za bilo koju od tri vremenske sekvence.

Matematički model kompleksnog kratkog spoja se izvodi integracijom Tevenenovih ekvivalenata pogonskih kola trofaznog generalizovanog Δ -kola, viđenih iz čvorova zahvaćenih kompleksnim kratkim spojem, s modelom topologije kompleksnog kratkog spoja. Tevenenovi ekvivalenti se sastoje od vektora Tevenenovih elektromotornih sila i Tevenenovih matrica impedansi. Za razliku od tradicionalnog Δ -kola, vektori Tevenenovih elektromotornih sila generalizovanog Δ -kola nenulti su pošto su u generalizovanom Δ -kolu uzeti u obzir i DER tipa 3-4.

7.2.1.1 Tevenenov ekvivalent trofaznog generalizovanog Δ -kola viđen iz čvorova s kompleksnim kratkim spojem

Vektor Tevenenovih elektromotornih sila u domenu simetričnih komponenti, viđen iz čvorova s kompleksnim kratkim spojem u generalizovanom Δ -kolu, izvodi se na sledeći način:

- Ukloniti Δ -kola modula kratkih spojeva koji čine kompleksni kratak spoj;
- Injektirati ekscesne struje svih DER tipa 3-4 u čvorove u kojima su oni priključeni na mrežu, u pogonskom kolu direktnog redosleda generalizovanog Δ -kola;
- Proračunati stanja sva tri pogonska kola generalizovanog Δ -kola opisanog u tački 1. Za proračun stanja mreže koristi se USSKN procedura, koja će biti izložena u delu 7.2.2.1 ove disertacije.

Izračunati naponi čvorova u kojima se simulira kompleksan kratak spoj jednaki su elementima vektor-kolone Tevenenovih elektromotornih sila dimenzija $1 \times 3N_{k.s.}$:

$$\hat{\mathbf{E}}_T^{\Delta} = [\dots \hat{\mathbf{E}}_i^+ \hat{\mathbf{E}}_i^- \hat{\mathbf{E}}_i^0 \dots]^T, \quad (7.2.1.1.1)$$

gde je $N_{k.s.}$ broj trofaznih čvorova pogođenih kratkim spojevima (podvučene oznake ukazuju na domen simetričnih komponenti).

Ovde je potrebno napomenuti da deo generalizovanog Δ -kola viđen iz čvorova s kratkim spojem sadrži aktivne elemente samo u pogonskom kolu direktnog redosleda, međutim

zbog induktivnih i kapacitivnih sprega između faza neuravnoteženih elemenata (deo 3.7), režimi pogonskih kola inverznog i nultog redosleda nenulti su.

Tevenenova matrica impedansi, viđena iz čvorova generalizovanog Δ -kola s kratkim spojem, računa se na sličan način kao i vektor Tevenenovih elektromotornih sila. Za ovaj proračun se u čvorove s kratkim spojem injektiraju jedinične struje, jedna po jedna u svaki čvor, u pogonskim kolima direktnog, inverznog i nultog redosleda. Ekscesne struje DER tipa 3-4 se anuliraju u ovom proračunu. U svakom koraku računa se stanje kola i pamte se naponi čvorova u kojima se simulira kompleksni kratak spoj (sa isključenim Δ -kolima modula kratkih spojeva). Stanje kola se i u ovom slučaju računa USSKN procedurom. U svakom koraku, jedna kolona Tevenenove matrice impedansi brojno je jednaka ovim naponima. Tevenenova matrica impedansi je kvadratna matrica dimenzije $3N_{k.s.} \times 3N_{k.s.}$:

$$\hat{\mathbf{Z}}_T = \begin{bmatrix} \dots & \hat{\mathbf{Z}}_{1i}^+ & \hat{\mathbf{Z}}_{1i}^- & \hat{\mathbf{Z}}_{1i}^0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \hat{\mathbf{Z}}_{3N_{k.s.},i}^+ & \hat{\mathbf{Z}}_{3N_{k.s.},i}^- & \hat{\mathbf{Z}}_{3N_{k.s.},i}^0 & \dots \end{bmatrix}. \quad (7.2.1.1.2)$$

Na osnovu prethodnog izlaganja, ekvivalent generalizovanog Δ -kola distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem viđen iz čvorova s kompleksnim kratkim spojem može da se opiše u domenu simetričnih komponenti na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{E}}_T^\Delta = \hat{\mathbf{U}}_K^\Delta + \hat{\mathbf{Z}}_T \hat{\mathbf{J}}_K^\Delta \Rightarrow \hat{\mathbf{Y}}_N \hat{\mathbf{E}}_T^\Delta = \hat{\mathbf{Y}}_N \hat{\mathbf{U}}_K^\Delta + \hat{\mathbf{J}}_K^\Delta, \quad (7.2.1.1.3)$$

gde je $\hat{\mathbf{Y}}_N$ Nortonova matrica admitansi ($\hat{\mathbf{Y}}_N = \hat{\mathbf{Z}}_T^{-1}$), a vektori $\hat{\mathbf{J}}_K^\Delta$ i $\hat{\mathbf{U}}_K^\Delta$ sadrže injektirane struje i napone čvorova s kompleksnim kratkim spojem, respektivno, u domenu simetričnih komponenti. Na njega se ukazuje podvučenim veličinama.

7.2.1.2 Opis topologije kompleksnog kratkog spoja

Kao što je rečeno u uvodu ove disertacije, jedan od osnovnih nedostataka svih do sada razvijenih postupaka za proračun režima distributivnih mreža s kratkim spojem jeste složeno izvođenje formula za opis topologije kratkog spoja. Ove formule se razlikuju za svaki kratak spoj, pa se moraju posebno izvoditi. Ovo predstavlja veliki problem kada su u pitanju industrijski softveri za proračune kratkih spojeva, s obzirom da bi se njima morao obezbediti proračun režima mreže sa po želji izabranim kompleksnim kratkim spojevima, bez prethodnog složenog predefinisavanja uslova kvara za te kratke spojeve, odnosno bez prethodnog složenog izvođenja formula za opis topologije bilo kog složenog kratkog spoja.

Zato, kao što je takođe istaknuto u uvodu ove disertacije, jedan od glavnih ciljeva disertacije je da se unapredi ideja predložena u [6], za opšti i jednostavan opis topologije kompleksnog kratkog spoja u aktivnim distributivnim mrežama.

Trofazna distributivna mreža s kompleksnim kratkim spojem se u ovoj disertaciji definiše koristeći se *trofaznim modulima kratkog spoja* [6] pridruženih distributivnoj mreži preko kratkog spoja (deo 6.1). Trofazni j -ti modul kratkog spoja je prikazan na slici 7.2.1.2.1a (ponovljena slika 6.1.1a, sa izmenjenom oznakom: čvor u kojem se desio kratak spoj je numerisan sa k_i umesto sa k). On se sastoji od:

1. Pet jednofaznih čvorova: a, b, c, n i čvora referentnog potencijala R. Modul se povezuje na distributivnu mrežu u čvorovima a, b, c i R.

2. Četiri grane sa impedansama jednakim $\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}$, i šest idealnih naponskih generatora elektromotornih sila jednakih naponima u kome se simulira kratak spoj (k_i), pre kratkog spoja (superskript „pk“): $\hat{U}_{k_ia}^{pk}, \hat{U}_{k_ib}^{pk}, \hat{U}_{k_ic}^{pk}$. U svakoj grani dva ista idealna naponska generatora su suprotnih smerova.

Sada se trofazni modul kratkog spoja M_j može predstaviti skupom sa sledećih sedam elemenata:

$$M_j = \{\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}, (\hat{U}_{k_ia}^{pk} - \hat{U}_{k_ia}^{pk}), (\hat{U}_{k_ib}^{pk} - \hat{U}_{k_ib}^{pk}), (\hat{U}_{k_ic}^{pk} - \hat{U}_{k_ic}^{pk})\}, \quad (7.2.1.2.1)$$

Po želji izabran kratak spoj može da se opiše preko odgovarajućeg skupa od $N1$ trofaznih modula kratkog spoja:

$$M = \{M_j, j = 1, \dots, N1\}. \quad (7.2.1.2.2)$$

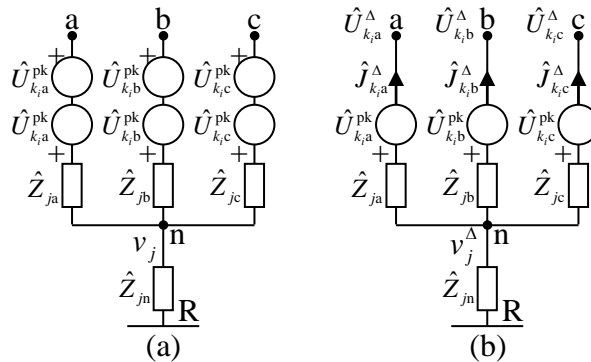
S obzirom da se režim distributivne mreže s kratkim spojem dekomponuje na režim pre kratkog spoja i režim generalizovanog Δ -kola, tako se i trofazni moduli kratkog spoja dekomponuju na osnovne trofazne module kratkog spoja i njihova Δ -kola. Δ -kolo j -tog trofaznog modula kratkog spoja prikazano je na slici 7.2.1.2.1b (ponovljena slika 6.1.1b, sa takođe izmenjenom oznakom: čvor u kojem se desio kratak spoj je numerisan sa k_i umesto sa k).

Sada se j -ti osnovni trofazni moduli kratkog spoja i njihova Δ -kola mogu respektivno predstaviti sledećim skupovima:

$$M_j^{pk} = \{\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}, (\hat{U}_{k_ia}^{pk}), (\hat{U}_{k_ib}^{pk}), (\hat{U}_{k_ic}^{pk})\}, \quad (7.2.1.2.3)$$

$$M_j^{\Delta} = \{\hat{Z}_{ja}, \hat{Z}_{jb}, \hat{Z}_{jc}, \hat{Z}_{jn}, (-\hat{U}_{k_ia}^{pk}), (-\hat{U}_{k_ib}^{pk}), (-\hat{U}_{k_ic}^{pk})\}, \quad (7.2.1.2.4)$$

$$j = 1, \dots, N1.$$



Slika 7.2.1.2.1 – Osnovni trofazni modul kratkog spoja M_j (a) i njegovo Δ -kolo (b)

7.2.1.3 Matematički model trofaznog modula kratkog spoja

Ako je j -ti trofazni modul kratkog spoja (slika 7.2.1.2.1b) priključen u čvoru k , režim njegovog Δ -kola se sastoji od sledeća dva vektora i jednog skalara:

$$\hat{\mathbf{U}}_k^\Delta = [\hat{U}_{ka}^\Delta \hat{U}_{kb}^\Delta \hat{U}_{kc}^\Delta]^\text{T}, \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta = [\hat{J}_{ja}^\Delta \hat{J}_{jb}^\Delta \hat{J}_{jc}^\Delta]^\text{T}, \hat{v}_j^\Delta. \quad (7.2.1.3.1)$$

Kombinacijom prvog i drugog Kirhofovog zakona, matematički model Δ -kola j -tog trofaznog modula kratkog spoja, povezanog sa čvorom k , u faznom domenu, može da se utvrdi na identičan način kako je opisano u delu 6.1. Tamo je izveden sledeći model u faznom domenu:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}}_j^u \hat{\mathbf{U}}_k^\Delta + \hat{\mathbf{A}}_j^j \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta + \hat{\mathbf{A}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= \hat{\mathbf{A}}_j^0, \\ \hat{\mathbf{C}}_j^j \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta + \hat{\mathbf{C}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= 0, \\ j &= 1, \dots, N1, \end{aligned} \quad (7.2.1.3.2)$$

Matematički model trofaznog modula kratkog spoja u domenu simetričnih komponenti se na osnovu modela (7.2.1.3.2) izvodi vrlo jednostavno, množeći odgovarajuće matrice i vektore s matricom transformacije $\hat{\mathbf{S}}$, ili sa njenom inverznom matricom $\hat{\mathbf{S}}^{-1}$:

$$\begin{aligned} (\hat{\mathbf{A}}_j^u \hat{\mathbf{S}}^{-1})(\hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{U}}_k^\Delta) + (\hat{\mathbf{A}}_j^j \hat{\mathbf{S}}^{-1})(\hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta) + \hat{\mathbf{A}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= \hat{\mathbf{A}}_j^0, \\ (\hat{\mathbf{C}}_j^j \hat{\mathbf{S}}^{-1})(\hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{J}}_j^\Delta) + \hat{\mathbf{C}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= 0, \\ j &= 1, \dots, N1. \end{aligned} \quad (7.2.1.3.3)$$

Sada model (7.2.1.3.3) u domenu simetričnih komponenti može da se napiše na sledeći način:

$$\begin{aligned} \underline{\hat{\mathbf{A}}}_j^u \underline{\hat{\mathbf{U}}}_k^\Delta + \underline{\hat{\mathbf{A}}}_j^j \underline{\hat{\mathbf{J}}}_j^\Delta + \hat{\mathbf{A}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= \hat{\mathbf{A}}_j^0, \\ \underline{\hat{\mathbf{C}}}_j^j \underline{\hat{\mathbf{J}}}_j^\Delta + \hat{\mathbf{C}}_j^v \hat{v}_j^\Delta &= \mathbf{0}, \\ j &= 1, \dots, N1, \end{aligned} \quad (7.2.1.3.4)$$

Pri čemu podvučene oznake i dalje ukazuju na veličine u domenu simetričnih komponenti.

7.2.1.4 Matrica incidencije

U svrhu povezivanja trofaznih modula kratkog spoja sa distributivnom mrežom, uvodi se *matrica incidencije* \mathbf{T} . U [6], koji je namenjen proračunu kratkih spojeva prenosnih mreža (deo 6.1) i u kome je mreža modelovana matricom admitansi (metodom nezavisnih napona), matrica incidencije ima dimenzije $3n \times 3N1$, gde je n ukupan broj trofaznih čvorova mreže. Kao što je ranije naglašeno, karakteristike distributivnih mreža se znatno razlikuju od prenosnih mreža i pokazano je da njihovo modelovanje matricom admitansi (metodom nezavisnih napona) nije efikasno. Zato se u ovoj disertaciji uvodi nova matrica incidencije, koja ima dimenzije $3N_{k.s.} \times 3N1$, gde je $N_{k.s.}$ broj čvorova zahvaćenih kompleksnim kratkim spojem. Ova matrica je sastavljena od blokova dimenzija 3×3 i formira se na sledeći način:

$$\mathbf{T}_{kj} = \begin{cases} \mathbf{I} & \text{– kada je trofazni modul kratkog spoja } j \text{ povezan sa } \check{\text{c}}\text{vorom} \\ & \text{pogođenim kratkim spojem kojem odgovara indeks } k \\ \mathbf{0} & \text{– kada trofazni modul kratkog spoja } j \text{ nije povezan sa } \check{\text{c}}\text{vorom} \\ & \text{pogođenim kratkim spojem kojem odgovara indeks } k \\ & k = 1, \dots, N_{k.s.}; j = 1, \dots, N1, \end{cases} \quad (7.2.1.4.1)$$

gde su \mathbf{I} i $\mathbf{0}$ jedinična i nulta matrica dimenzija (3×3) . U $k = 1, \dots, N_{k.s.}$, indeksi čvorova s kratkim spojem su sortirani od 1 do $N_{k.s.}$.

Sada, koristeći se uvedenom matricom incidencije \mathbf{T} , vektor injektiranih struja čvorova s kratkim spojem ($\hat{\mathbf{J}}_K^\Delta$) može da se napiše na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{J}}_K^\Delta = \mathbf{T} \hat{\mathbf{J}}_F^\Delta, \quad (7.2.1.4.2)$$

gde je $\hat{\mathbf{J}}_F^\Delta$ vektor koji sadrži struje svih trofaznih modula kratkog spoja; dimenzije ovog vektora su $3N1 \times 1$.

Konačno, opis ekvivalenta generalizovanog Δ -kola distributivne mreže viđen iz čvorova s kratkim spojem (7.2.1.3), sa integrisanim modelom kompleksnog kratkog spoja, može da se modifikuje na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{Y}}_N \hat{\mathbf{E}}_T^\Delta = \hat{\mathbf{Y}}_N \hat{\mathbf{U}}_K^\Delta + \mathbf{T} \hat{\mathbf{J}}_F^\Delta. \quad (7.2.1.4.3)$$

7.2.2 Matematički model kompleksnog kratkog spoja generalizovanog Δ -kola

Integracijom relacija (7.2.1.3.9) za sve trofazne module kratkog spoja u generalizovanom Δ -kolu i (7.2.1.4.3), matematički model kompleksnog kratkog spoja generalizovanog Δ -kola glasi:

$$\begin{array}{ccc} & \begin{array}{ccc} 3N_{k.s.} & 3N_1 & N_1 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 1 \end{array} \\ \begin{array}{c} 3N_{k.s.} \\ 3N_1 \\ N_1 \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \hat{\mathbf{Y}}_N & \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \hline \hat{\mathbf{A}}^U & \hat{\mathbf{A}}^J & \hat{\mathbf{A}}^v \\ \hline \mathbf{0} & \hat{\mathbf{C}}^J & \hat{\mathbf{C}}^v \\ \hline \end{array} & \times \begin{array}{|c|} \hline \hat{\mathbf{U}}_K^\Delta \\ \hline \hat{\mathbf{J}}_F^\Delta \\ \hline \hat{\mathbf{V}}^\Delta \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \hat{\mathbf{Y}}_N \hat{\mathbf{E}}_T^\Delta \\ \hline \hat{\mathbf{A}}^0 \\ \hline \mathbf{0} \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (7.2.2.1)$$

ili u kompaktnijoj formi:

$$\hat{\mathbf{F}} \hat{\mathbf{X}}^\Delta = \hat{\mathbf{F}}^0. \quad (7.2.2.2)$$

Oznake veličina $\hat{\mathbf{F}}$, $\hat{\mathbf{F}}^0$ i vektora stanja ekvivalenta generalizovanog Δ -kola $\hat{\mathbf{X}}^\Delta$ očigledne su na osnovu poređenja relacije (7.2.2.2) sa relacijom (7.2.2.1).

Matrice i vektori u (7.2.2.1) su definisani na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{A}}_{jk}^U = \begin{cases} \hat{\mathbf{A}}_j^U & \text{– kada je trofazni modul kratkog spoja } j \text{ povezan sa} \\ & \text{čvorom s kratkim spojem kojem odgovara indeks } k \\ \mathbf{0} & \text{– kada trofazni modul kratkog spoja } j \text{ nije povezan sa} \\ & \text{čvorom s kratkim spojem kojem odgovara indeks } k \\ & j = 1, \dots, N1; \quad k = 1, \dots, N_{k.s.} \end{cases}, \quad (7.2.2.3)$$

U $k = 1, \dots, N_{k.s.}$, indeksi čvorova s kratkim spojem su sortirani od 1 do $N_{k.s.}$.

Matrice iz modela (7.2.2.1) su definisane na sledeći način:

$$\hat{\underline{\mathbf{A}}}^J = \text{diag}[\dots \hat{\underline{\mathbf{A}}}_i^J \dots], i \in \alpha_{kvara}, \quad (7.2.2.4)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^v = [\hat{\mathbf{A}}_1^v, \hat{\mathbf{A}}_2^v, \dots, \hat{\mathbf{A}}_{N1}^v], \quad (7.2.2.5)$$

$$\hat{\underline{\mathbf{C}}}^J = [\hat{\underline{\mathbf{C}}}_1^J, \hat{\underline{\mathbf{C}}}_2^J, \dots, \hat{\underline{\mathbf{C}}}_{N1}^J], \quad (7.2.2.6)$$

$$\hat{\mathbf{C}}^v = \text{diag}[\hat{\mathbf{C}}_1^v, \hat{\mathbf{C}}_2^v, \dots, \hat{\mathbf{C}}_{N1}^v], \quad (7.2.2.7)$$

$$\hat{\mathbf{V}}^\Delta = [\hat{v}_1^\Delta, \hat{v}_2^\Delta, \dots, \hat{v}_{N1}^\Delta]^T, \quad (7.2.2.8)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^0 = [(\hat{\mathbf{A}}_1^0)^T (\hat{\mathbf{A}}_2^0)^T \dots (\hat{\mathbf{A}}_{N1}^0)^T]^T, \quad (7.2.2.9)$$

pri čemu je sa α_{kvara} označen skup čvorova zahvaćenih kompleksnim kratkim spojem.

7.2.3 Proračun stanja ekvivalenta generalizovanog Δ -kola

Vektor nepoznatih veličina $\hat{\underline{\mathbf{X}}}^\Delta$, koji sadrži struje i napone kratkog spoja čvorova s kratkim spojem ekvivalenta generalizovanog Δ -kola, računa se na sledeći način:

$$\hat{\underline{\mathbf{X}}}^\Delta = \hat{\mathbf{F}}^{-1} \hat{\mathbf{F}}^0. \quad (7.2.3.1)$$

Time je izračunat režim ekvivalenta generalizovanog Δ -kola ($\hat{\underline{\mathbf{X}}}^\Delta$), pa tako i struje kratkog spoja u čvorovima s kratkim spojem ($\hat{\underline{\mathbf{J}}}_F^\Delta$). Da bi se izračunalo stanje celog generalizovanog Δ -kola, opet se koristi USSKN procedura. U ovom slučaju izračunate struje kratkog spoja u čvorovima s kratkim spojem ($\hat{\underline{\mathbf{J}}}_F^\Delta$) injektiraju se u ove čvorove, dok se u čvorove gde su priključeni DER tipa 3-4 injektiraju njihove (prethodno izračunate) ekscesne struje. Stanje celog generalizovanog Δ -kola se računa koristeći se procedurom USSKN (paragraf koji sledi – 7.2.4).

Na kraju, stanje distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem se izračunava superpozicijom stanja generalizovanog Δ -kola i stanja distributivne mreže pre kratkog spoja.

7.2.4 Proračun stanja celokupnog generalizovanog Δ -kola (procedura USSKN)

U ovom paragrafu je izložena procedura USSKN, koja se koristi za proračun celokupnog stanja generalizovanog Δ -kola. Kao što je rečeno u tački 7.2.1.1, ova procedura se koristi i za proračun Tevenenovog ekvivalenta generalizovanog Δ -kola viđenog iz čvorova pogođenih kompleksnim kratkim spojem.

Koristeći se slikama 3.6.1 – Induktivne i kapacitivne sprege, 4.5.1 – Γ Segment i 7.2.1.2.1 – Trofazni modul kratkog spoja, procedura USSKN glasi:

Sumiranje struja

$$(\hat{I}_l^{\Delta s})^{h+1} = \hat{I}_l^{\Delta s} + (\hat{I}_{cl}^{\Delta s})^h + \hat{y}_{lo}^s (\hat{U}_l^{\Delta s})^h + \sum_{j \in \alpha_l} (\hat{I}_j^{\Delta s})^{h+1} + \hat{I}_{DER3-4l}^{\Delta s} + (\hat{J}C_l^{tus})^h, \quad (7.2.4.1)$$

$$l = n + p, \dots, 3, 2; \quad s, t, u = +, -, 0; \quad s \neq t, s \neq u, t \neq u.$$

Korekcija napona

$$(\hat{U}_l^{\Delta s})^{h+1} = (\hat{U}_l^{\Delta s})^{h+1} - \hat{z}_l^s (\hat{I}_l^{\Delta s})^{h+1} - (\hat{U}L_l^{tus})^{h+1}, \quad (7.2.4.2)$$

$$l = 2, 3, \dots, n + p; \quad s, t, u = +, -, 0; \quad s \neq t, s \neq u, t \neq u.$$

Kompensacione struje petlji

$$(\Delta \hat{J}_c^{\Delta s})^{h+1} = \hat{Y}_N^{Ps} [(\hat{U}_1^{\Delta s})^{h+1} - (\hat{U}_2^{\Delta s})^{h+1}], \quad [\hat{Y}_N^{Ps} = (\hat{Z}_T^{Ps})^{-1}], \quad (7.2.4.3)$$

$$(\hat{J}_c^{\Delta s})^{h+1} = (\hat{J}_c^{\Delta s})^h + (\Delta \hat{J}_c^{\Delta s})^{h+1}, \quad (7.2.4.4)$$

$$s = +, -, 0.$$

Struje kratkog spoja na mestu kompleksnog kratkog spoja, u domenu simetričnih komponenti, koje su sadržane u vektoru \hat{X}^Δ , izračunate su relacijom (7.2.3.1):

$$\hat{I}_l^{\Delta s} = \begin{cases} \hat{I}_{kl}^{\Delta s}, & l \in \alpha_{kvara}, \quad s = +, -, 0. \\ 0, & l \notin \alpha_{kvara} \end{cases} \quad (7.2.4.5)$$

Ekscesne struje DER tipa 3-4 su poznate (7.1.1):

$$\hat{I}_{DER3-4l}^{\Delta+} = \begin{cases} -\hat{I}_{DER3-4l}^{\Delta+}, & l \in \alpha_{DER3-4}, \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases}, \quad (7.2.4.6)$$

$$\hat{I}_{DER3-4l}^{\Delta s} = 0, \quad s = -, 0. \quad (7.2.4.7)$$

Kapacitivne struje i indukovani naponi su poznati (slika 3.6.1):

$$(\hat{J}C_l^{tus})^h = \begin{cases} (-\Delta \hat{I}_l^{tus})^h, & \text{ako je element } l \text{ neuravnotežen} \\ 0, & \text{ako je element } l \text{ uravnotežen} \end{cases}, \quad (7.2.4.8)$$

$$(\hat{U}L_l^{tus})^h = \begin{cases} (\Delta \hat{U}_l^{tus})^h, & \text{ako je element } l \text{ neuravnotežen} \\ 0, & \text{ako je element } l \text{ uravnotežen} \end{cases}, \quad (7.2.4.9)$$

$$s, t, u = +, -, 0; \quad s \neq t, s \neq u, t \neq u.$$

Procedura se zaustavlja kada se zadovolji kriterijum konvergencije:

$$|(\hat{U}_l^{\Delta s})^{h+1} - (\hat{U}_l^{\Delta s})^h| \leq \varepsilon_U, \quad s = +, -, 0. \quad (7.2.4.10)$$

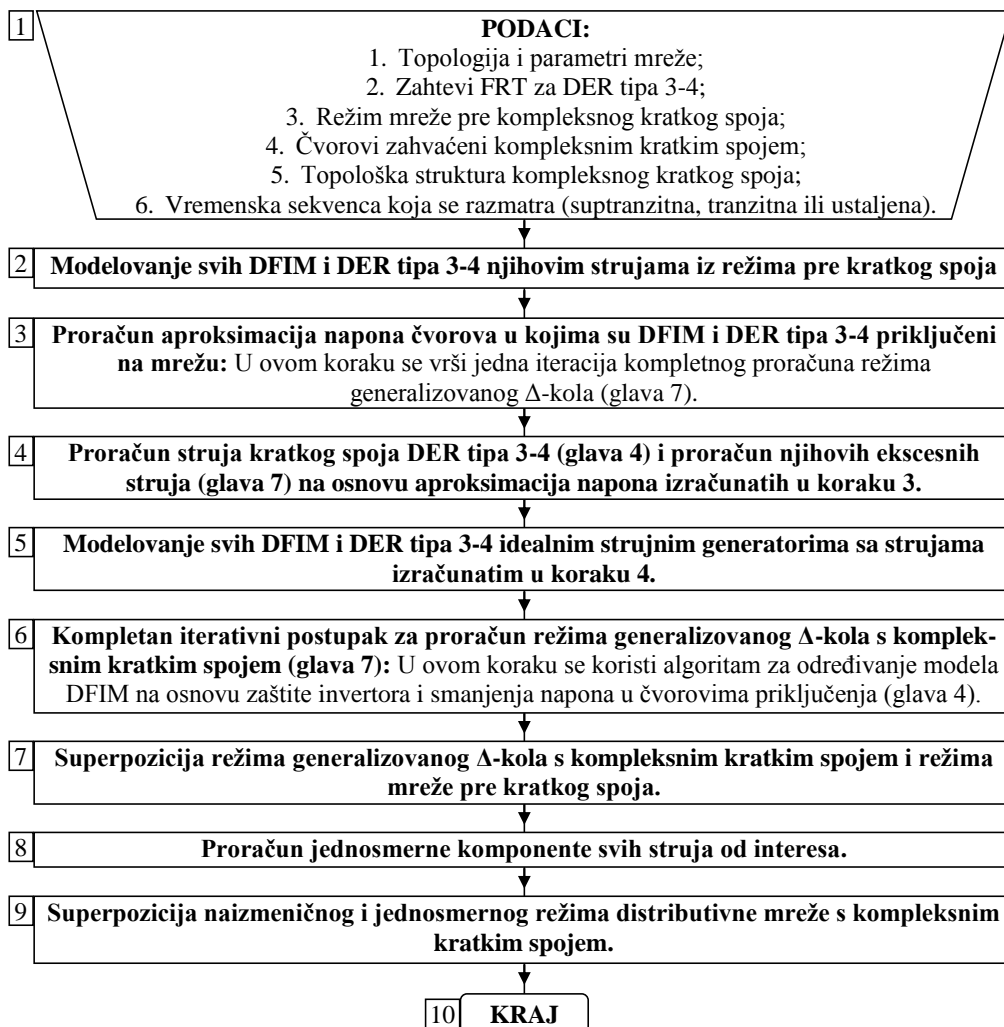
U formulama (7.2.4.1)-(7.2.4.10), sa h je označen redni broj iteracije; n je broj trofaznih čvorova u sistemu; p je broj petlji. \hat{z}_l^s i $\hat{y}_{l_0}^s$ su redni i otočni parametri l -tog Γ segmenta; α_l je skup Γ segmenata koji se napajaju sa l -tog segmenta; $\hat{U}_L^{\Delta s}$, $\hat{U}_l^{\Delta s}$ su naponi čvorova L i l , l -tog Γ segmenta, u domenu simetričnih komponenti; $\hat{I}_l^{\Delta s}$ je struja l -tog Γ segmenta, u domenu simetričnih komponenti; $\hat{I}_{cl}^{\Delta s}$ su kompenzacione struje u slučaju da je čvor l jedan od čvorova prekida petlji; ove struje su sadržane u vektorima kompenzacionih struja $\hat{I}_c^{\Delta s}$; vektori $\Delta \hat{I}_c^{\Delta s}$ se odnose na korekcije kompenzacionih struja; dimenzije ovih vektora su $p \times 1$; sa $\hat{U}_1^{\Delta s}$ i $\hat{U}_2^{\Delta s}$ su označeni vektori napona prvih i drugih čvorova prekida petlji; njihove dimenzije su takođe $p \times 1$. \hat{Y}_N^{Ps} i \hat{Z}_T^{Ps} su Nortonova i Thevenenova matrica viđene iz čvorova prekida petlji, u domenu simetričnih komponenti; njihove dimenzije su $p \times p$. Naponi korena, kao i početne aproksimacije napona svih čvorova u generalizovanog Δ -kola su jednaki nuli.

Ovde je potrebno napomenuti da se u proceduri USSKN kompenzacione struje petlji računaju iz iteracije u iteraciju u istom iterativnom postupku kao i struje i naponi radijalizovane mreže. Time je izbegnuta jedna kompletna „unutrašnja“ iterativna procedura iz standardnih SSKN postupaka [15-17], pa su i performanse postupka znatno poboljšane.

GLAVA 8

TOK PRORAČUNA REŽIMA NEURAVNOTEŽENE DISTRIBUTIVNE MREŽE S KOMPLEKSNIM KRATKIM SPOJEM

Na osnovu izlaganja datih u prethodnim glavama, tok proračuna režima neuravnotežene distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem, u izabranoj vremenskoj sekvenci – suptranzitnoj, tranzitnoj ili ustaljenoj, prikazan je na slici 8.1.



Slika 8.1 – Blok dijagram toka proračuna režima neuravnotežene distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem

Blokovi 1, 2, 3, 4 i 5 se sastoje od unosa podataka i formiranja modela elemenata distributivne mreže. U blokovima 3, 4 i 5 se izračunavaju modeli za DER tipa 3-4, na osnovu aproksimacija napona u čvorovima njihovog priključenja na mrežu u trenutku kompleksnog kratkog spoja. To je u potpunoj saglasnosti sa glavom 4. Blok 6 se odnosi na kompletan proračun režima generalizovanog Δ -kola s kompleksnim kratkim spojem. U ovom delu se

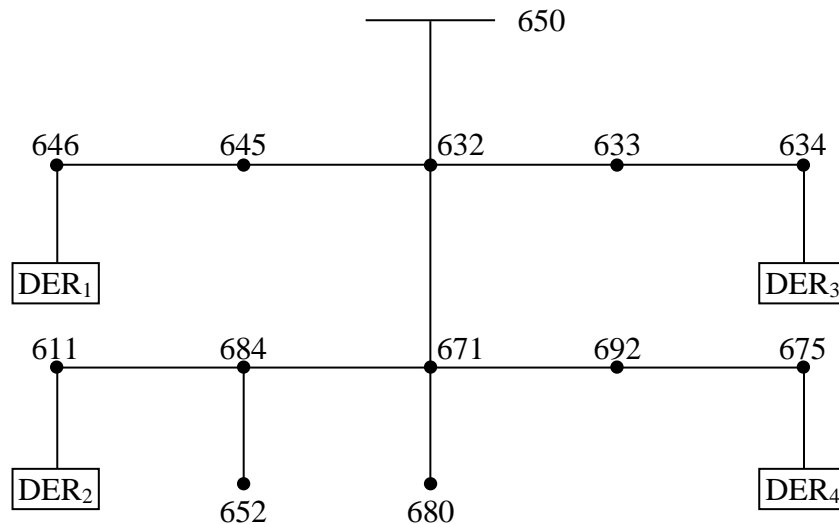
koristi materija izložena u glavi 7 i sastoji se od proračuna struja kratkog spoja na mestu kompleksnog kratkog spoja, a zatim i čitavog režima generalizovanog Δ -kola s kompleksnim kratkim spojem. Blok 7 se odnosi na superpoziciju izračunatog režima generalizovanog Δ -kola i poznatog režima mreže pre kratkog spoja. U bloku 8 se izračunavaju jednosmerne komponente struja koje su od interesa. Taj proračun je samo načelno prikazan pošto nije predmet ove disertacije. Načela za taj proračun u mrežama s tradicionalnim naizmeničnim mašinama, koristeći se ekvivalentnom vremenskom konstantom, dat je u [39, 41]. One se u bloku 9 superponiraju sa odgovarajućim naizmeničnim strujama. Time se dobijaju struje kratkog spoja celokupne distributivne mreže.

Izračunati režim je pesimistička aproksimacija režima distributivne mreže s kompleksnim kratkim spojem. To je rezultat, pre svega, aproksimacije naizmeničnog režima generalizovanog Δ -kola u suptranzitnoj i tranzitnoj sekvenci prostoperiodičnim režimima.

GLAVA 9

NUMERIČKA VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG POSTUPKA ZA PRORAČUN KOMPLEKSNIH KRATKIH SPOJEVA

Predloženi postupak prvo je verifikovan na standardnoj test mreži IEEE 13 [70]. Ona je prikazana na slici 9.1. Za prvu klasu proračuna, mreža je jako pojednostavljena. Pojednostavljenje se sastoji od sledećeg: sve sekcije su trofazne i uravnotežene, a mreža je pre kratkog spoja u simetričnom režimu. Sve sekcije imaju iste parametre, preuzete iz test mreže IEEE 4 [70]. Takođe, transformator između čvorova 633 i 634 je zamenjen sekcijom. Pored toga, rastavni uređaj između čvorova 671 i 692, kao i regulacioni transformator između čvorova 650 i 632, zamenjeni su sekcijama. DER tipa 1, DER tipa 2, DER tipa 3 i DER tipa 4 su priključeni u čvorovima 646, 611, 634 i 675, respektivno. U svakom čvoru osim u čvorovima gde su priključeni DER, nalaze se potrošači sa međusobno jednakim snagama koje iznose: $\hat{S} = (1 + j0.5)$ [MVA]. Parametri za sva četiri DER su preuzeti iz reference [35] i svi imaju istu nominalnu snagu, jednaku 12% od ukupne potrošnje u mreži. Na ovaj način je test mreža modifikovana da služi kao dobar primer budućih mreža sa velikim brojem DER svih vrsta. Čvor 650 je koren mreže sa fiksiranim (simetričnim) naponima jednakim $21/\sqrt{3}$ [kV]. U svim primerima koji slede, korišćeni su podaci za tranzitnu vremensku sekvencu.



Slika 9.1 – Modifikovana test mreža IEEE 13

Da bi se verifikovala tačnost predloženog postupka (USSKN), rezultati su prvo upoređeni s postupkom HKM [16]. S obzirom da tim postupkom ne mogu da se uvažavaju DFIM i IBDER, oni su za ovo poređenje anulirani u test mreži. Rezultati su prikazani u tabeli 9.1 za četiri standardna metalna kratka spoja – jednopolni (1P), dvopolni (2P), dvopolni sa zemljom (2PZ) i trolpolni (3P). Kratki spojevi su simulirani u čvoru 680. Struja na početku izvoda (\hat{I}_{PI}), struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja (\hat{I}_{KS}) i struje kratkog spoja DER tipa 1 i DER tipa 2 (\hat{I}_{DER1} i \hat{I}_{DER2} , respektivno), prikazane su u tabeli 9.1. U slučaju neuravnoteženih kratkih spojeva, samo najveća struja među tri fazne struje je prikazana.

Tabela 9.1 – Poređenje rezultata dobijenih postupcima USSKN i HKM za sva četiri metalna kratka spoja u čvoru 680

	USSKN [kA]	HKM [kA]	Razlika modula struje [%]
3P			
\hat{I}_{PI}	4.007-j7.748	3.928-j7.692	0.62
\hat{I}_{DER1}	0.056+j0.105	0.042+j0.117	3.49
\hat{I}_{ks}	3.631-j7.854	3.741-j7.956	1.62
\hat{I}_{DER2}	0.102-j0.225	0.119-j0.233	5.73
2PZ (faze b, c)			
\hat{I}_{PI}	-7.285-j2.049	-7.239-j2.020	0.51
\hat{I}_{DER1}	-0.048+j0.034	-0.054+j0.024	3.46
\hat{I}_{ks}	-7.087-j1.859	-7.225-j1.956	2.16
\hat{I}_{DER2}	-0.178-j0.116	-0.190-j0.122	5.82
2P (faze b, c)			
\hat{I}_{PI}	-7.048-j3.290	-6.999-j3.221	0.93
\hat{I}_{DER1}	-0.054+j0.022	-0.060+j0.016	5.81
\hat{I}_{ks}	-6.844-j3.122	-6.933-j3.303	2.09
\hat{I}_{DER2}	-0.152-j0.131	-0.166-j0.133	5.93
1P (faza a)			
\hat{I}_{PI}	1.594-j4.080	1.700-j4.011	0.55
\hat{I}_{DER1}	-0.083-j0.029	-0.079-j0.028	5.80
\hat{I}_{ks}	1.086-j3.905	1.252-j3.911	1.58
\hat{I}_{DER2}	-0.043-j0.056	-0.026-j0.076	4.90

Male razlike rezultata prikazanih u tabeli 9.1, koji su dobijeni primenom postupaka USSKN i HKM, posledica su toga što se u postupku HKM potrošači modeluju konstantnim impedansama, dok se u postupku USSKN oni modeluju konstantnim strujama. Te razlike su jednake kada se iskazuju u kiloamperima (kA) za sve struje u tabeli 9.1, međutim s obzirom da su struje \hat{I}_{PI} i \hat{I}_{ks} znatno veće od struja \hat{I}_{DER1} i \hat{I}_{DER2} , procentualne razlike su mnogo veće u slučaju struja \hat{I}_{DER1} i \hat{I}_{DER2} .

Sledeći korak u verifikaciji predloženog postupka je njegovo poređenje sa unapređenim EVS postupkom [35, 37]. Da bi se pokazala prednost modela za DFIM i IBDER predloženih u ovoj disertaciji, u ovom primeru su sva četiri DER priključena na mrežu. Za DFIM je pretpostavljeno da se njegov inverter štiti kroubarom, zato što EVS metodom nije predviđena mogućnost zaštite čoperom. Granična vrednost napona u čvoru priključenja DFIM na mrežu za prorađu kroubara je 70% nominalnog napona. Ova vrednost se odnosi na fazu s najmanjim naponom. Za IBDER se pretpostavlja da je strujno ograničenje 1.5 nominalne struje. Takođe, s obzirom da su u postupku EVS zanemareni potrošači, isto je urađeno i u postupku USSKN. Tako je USSKN znatno pojednostavljen da bi poređenje bilo korektno. Tropolni kratak spoj je simuliran u čvorovima 671 i 680. U tabelama 9.2 i 9.4 su prikazani rezultati za struje početka izvoda, struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja i struje DER tipa 1, DER tipa 2 i DER tipa 3, za kratke spojeve u čvorovima 671 i 680, redom. U tabelama 9.3 i 9.5 su prikazani naponi, struje, aktivne snage i reaktivne snage DER tipa 4, za kratke spojeve u čvorovima 671 i 680, respektivno. Ovo je urađeno da bi se pokazala prednost modela predloženih u ovoj disertaciji i da bi se pokazalo kako se predloženim modelima uvažavaju zahtevi FRT.

Tabela 9.2 – Poređenje rezultata dobijenih postupcima USSKN i EVS za DER tipa 1, DER tipa 2 i DER tipa 3, za kratak spoj u čvoru 671

	USSKN [kA]	EVS [kA]	Razlika modula struje [%]
\hat{I}_{PI}	5.634-j10.793	5.689-j11.656	6.5
\hat{I}_{KS}	5.997-j11.394	6.442-12.452	8.9
\hat{I}_{DER1}	0.133-j0.424	0.102-j0.458	5.6
\hat{I}_{DER3}	0.232-j0.386	0.305-j0.405	14.8
\hat{I}_{DER2}	0.383-j0.447	0.311-j0.422	9.9

U slučaju kratkog spoja u čvoru 671, napon u čvoru priključenja DFIM na mrežu pao je ispod specificirane granične vrednosti. Zato kroubar treba da reaguje tako što će se priključiti rotora kratkospojiti preko odgovarajućeg otpornika.

Tabela 9.3 – Poređenje rezultata dobijenih postupcima USSKN i EVS za DER tipa 4, za kratak spoj u čvoru 671

	Pre kratkog spoja	USSKN (kratak spoj)	EVS (kratak spoj)
\hat{I}_{DER4}	-0.041-j0.0013	0.029-j0.054	-0.0615-j0.0019
\hat{U}_{DER4}	12.311+j0.415	4.092+j0.037	4.092+j0.037
P_{DER4}	1.5	0.35	0.75
Q_{DER4}	0	0.67	0.03

Iz tabele 9.3 se jasno vidi da se korišćenjem modela za DER tipa 3-4, predloženih u ovoj disertaciji, precizno uvažavaju zahtevi FRT za injektiranjem reaktivne snage (struje) u toku kratkog spoja.

Tabela 9.4 – Poređenje rezultata dobijenih postupcima USSKN i EVS za DER tipa 1, DER tipa 2 i DER tipa 3, za kratak spoj u čvoru 680

	USSKN [kA]	EVS [kA]	Razlika modula struje [%]
\hat{I}_{PI}	3.615-j7.568	3.754-j7.819	3.40
\hat{I}_{KS}	4.366-8.559	4.590-j9.089	5.93
\hat{I}_{DER1}	0.119-j0.397	0.102-j0.449	10.15
\hat{I}_{DER3}	0.054-0.027	0.296-j0.207	601.90
\hat{I}_{DER2}	-0.293+j0.353	0.303-j0.414	11.82

U slučaju kratkog spoja u čvoru 680, napon u čvoru priključenja DFIM na mrežu ostao je iznad predefinisane granične vrednosti. Zato u tom slučaju kroubar neće reagovati i struja DFIM će biti kontrolisana. Ova činjenica je potpuno uvažena postupkom USSKN, dok se postupkom EVS pretpostavlja da će kroubar reagovati uvek. Kao što se vidi iz tabele 9.4, time se unosi izuzetno velika greška u rezultatima dobijenim postupkom EVS.

Tabela 9.5 – Poređenje rezultata dobijenih postupkom USSKN i postupkom EVS za DER tipa 4, za kratak spoj u čvoru 680

	Pre kratkog spoja	USSKN (kratak spoj)	EVS (kratak spoj)
\hat{I}_{DER4}	-0.041-j0.0006	0.054-0.027	-0.0615-0.0009
\hat{U}_{DER4}	12.242+j0.259	8.141+j0.044	8.141+j0.044
P_{DER4}	1.5	1.33	1.5
Q_{DER4}	0	0.67	0

Slično kao u tabeli 9.3, iz table 9.5 se jasno vidi da se korišćenjem modela za DER tipa 3-4, predloženih u ovoj disertaciji, precizno uvažavaju zahtevi FRT za injektiranjem reaktivne snage (struje) u toku kratkog spoja.

Druga klasa proračuna vršena je na istoj test mreži sa slike 9.1, ali sada modifikovano tako da bude neuravnotežena. To je urađeno tako što su svim sekcijama pridruženi sledeći parametri [25]:

$$\hat{\mathbf{Z}}^{0+-} = \begin{bmatrix} 0.7735 + j1.9373 & 0.0256 + j0.0115 & -0.0321 + j0.0159 \\ -0.0321 + j0.0159 & 0.3061 + j0.06270 & -0.0723 - j0.0060 \\ 0.0256 + j0.0115 & -0.0723 - j0.0059 & 0.3061 + j0.06270 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{mi}.$$

USSKN postupak ponovo je prvo upoređen s postupkom HKM da bi se verifikovala tačnost rezultata. Potrošači su zanemareni u ovom primeru. DFIM i IBDER su isključeni sa mreže. Za ovo poređenje su simulirani svih pet standardnih metalnih kratkih spojeva: 1P, 2P, 2PZ, 3P, kao i troljni kratak spoj sa zemljom (3PZ). Ovde treba napomenuti da kada su u pitanju neuravnotežene mreže, dakle u nesimetričnim režimima pre kratkog spoja, 3P i 3PZ kratki spojevi nisu ekvivalentni. Rezultati su prikazani u tabeli 9.6, za struje početka izvoda u sve tri faze (\hat{I}_{PIa} , \hat{I}_{PIb} , \hat{I}_{PIc}) i za struje i napone kratkog spoja na mestu kratkog spoja (\hat{I}_{ksa} , \hat{I}_{ksb} , \hat{I}_{ksc} , \hat{U}_{ksa} , \hat{U}_{ksb} , \hat{U}_{ksc}).

Tabela 9.6 – Rezultati za pet metalnih kratkih spojeva u neuravnoteženoj mreži

	1P	2PZ	2P	3PZ	3P
USSKN					
Struje [kA]					
\hat{I}_{PIa}	0.062-j0.032	1.53-j8.44	-0.16-j8.20	3.30-j8.65	3.42-j8.60
\hat{I}_{PIb}	-0.003+j0.07	1.99+j8.06	0.22+j8.24	4.30+j8.06	4.41+j8.11
\hat{I}_{PIc}	-5.22+j0.58	-0.059-j0.037	-0.059-j0.037	-7.97+j0.42	-7.84+j0.48
\hat{I}_{ksa}	0+j0	1.47-j8.40	-0.22-j8.17	3.24-j8.62	3.36-j8.57
\hat{I}_{ksb}	0+j0	1.99+j7.98	0.22+j8.17	4.30+j7.99	4.42+j8.04
\hat{I}_{ksc}	-5.16+j0.16	0+j0	0+j0	-7.91+j0.46	-7.78+j0.52
Naponi [kV]					
\hat{U}_{ksa}	14.14+j3.73	0+j0	2.80+j5.15	0+j0	0.01-j0.56
\hat{U}_{ksb}	-3.83+j14.64	0+j0	2.80+j5.15	0+j0	0.01-j0.56
\hat{U}_{ksc}	0+j0	-6.87-j13.17	5.45-j10.50	0+j0	0.01-j0.56

HKM					
Struje [kA]					
\hat{I}_{PIa}	0.064-j0.037	1.53-j8.44	-0.16-j8.23	3.30-j8.65	3.44-j8.61
\hat{I}_{PIb}	-0.001+j0.04	1.99+j8.06	0.24+j8.27	4.30+j8.06	4.40+j8.21
\hat{I}_{PIc}	-5.30+j0.54	-0.059-j0.037	-0.059-j0.037	-7.98+j0.43	-7.85+j0.49
\hat{I}_{ksa}	0+j0	1.41-j8.40	-0.24-j8.19	3.26-j8.63	3.36-j8.57
\hat{I}_{ksb}	0+j0	1.93+j7.96	0.24+j8.19	4.32+j7.99	4.42+j8.04
\hat{I}_{ksc}	-5.16+j0.18	0+j0	0+j0	-7.94+j0.47	-7.78+j0.52
Naponi [kV]					
\hat{U}_{ksa}	14.14+j3.73	0+j0	2.80+j5.15	0+j0	0.01-j0.56
\hat{U}_{ksb}	-3.85+j14.67	0+j0	2.80+j5.15	0+j0	0.01-j0.56
\hat{U}_{ksc}	0+j0	-6.89-j13.18	5.44-j10.50	0+j0	0.01-j0.56

Kao što se vidi iz tabele 9.6, rezultati dobijeni postupkom USSKN i postupkom HKM gotovo su identični za svih pet kratkih spojeva.

USSKN postupak je zatim testiran na tri kompleksna kratka spoja. Standardnim postupcima za proračune kratkih spojeva bi morali „ručno“ da se izvode vrlo složeni uslovi kvara za ova tri kratka spoja. To izvođenje je za jedan kompleksni kratak spoj dato u Prilogu. Za razliku od toga, USSKN postupkom se ovi kratki spojevi simuliraju vrlo jednostavno, menjanjem mesta nenultih elemenata u matrici incidencije **T** (tačka 7.2.1.4).

Simulirani kompleksni kratki spojevi su označeni sa KS1, KS2 i KS3. Oni glase:

1. KS1: 2P metalni kratak spoj (faze a i b) u čvoru 671 (čvor 1 za KS1) i 1P metalni kratki spoj (faza c) u istom čvoru,
2. KS2: 3PZ kratak spoj sa zemljom preko impedanse $\hat{Z}_n = 1 + j0.5$ [Ω] u čvoru 611 (čvor 1 za KS2) i 1P metalni kratki spoj u čvoru 675 (čvor 2 za KS2);
3. KS3: 3PZ kratak spoj preko impedanse $\hat{Z}_{n1} = 1 + j0.5$ [Ω] u čvoru 611 (čvor 1 za KS3), 2PZ kratak spoj (faze a i b) preko impedanse $\hat{Z}_{n2} = 1 + j0.5$ [Ω] u čvoru 675 (čvor 2 za KS3) i 1P metalni kratak spoj u čvoru 680 (čvor 3 za KS3).

Rezultati za struje i napone kratkog spoja na mestu kratkog spoja su prikazani u tabeli 9.7. Sa 1, 2 i 3 u supskriptima su označeni redni brojevi čvorova s kratkim spojem u kompleksnim kratkim spojevima KS1, KS2 i KS3.

Tabela 9.7 – Rezultati za tri kompleksna kratka spoja

	KS1	KS2	KS3
Struje [kA]			
\hat{I}_{ks1a}	-0.67-j16.48	2.14-j5.72	2.06-j5.56
\hat{I}_{ks1b}	-0.67+j16.48	2.87+j5.31	2.72+j5.32
\hat{I}_{ks1c}	-10.26+j0.65	-5.16+j0.29	-4.01+j0.28
\hat{I}_{ks2a}	/	0+j0	-0.016-j0.26
\hat{I}_{ks2b}	/	0+j0	0.23+j0.16
\hat{I}_{ks2c}	/	-0.24+j0.14	0+j0
\hat{I}_{ks3a}	/	/	0+j0
\hat{I}_{ks3b}	/	/	0+j0
\hat{I}_{ks3c}	/	/	-4.01+j0.39

Naponi [kV]			
$\hat{U}_{ks1 a}$	4.67+j9.16	-0.09-j0.02	0.75+j0.41
$\hat{U}_{ks1 b}$	4.67+j9.16	-0.09-j0.02	0.75+j0.41
$\hat{U}_{ks1 c}$	0+j0	-0.09-j0.02	0.75+j0.41
$\hat{U}_{ks2 a}$	/	7.97-j0.09	0.26+j0.03
$\hat{U}_{ks2 b}$	/	-4.10+j6.92	0.26+j0.03
$\hat{U}_{ks2 c}$	/	0+j0	-3.31-j5.79
$\hat{U}_{ks3 a}$	/	/	9.52+j2.66
$\hat{U}_{ks3 b}$	/	/	-2.39+j9.75
$\hat{U}_{ks3 c}$	/	/	0+j0

USSKN postupak je zatim testiran za kompleksan kratak spoj KS2, ali sa promenom vrednosti impedansi kratkog spoja u oba čvora s kratkim spojem. Vrednosti impedansi kratkog spoja se menjaju od 5 do 20 [Ω], u četiri koraka. Za trofazni kratak spoj, vrednosti sve tri fazne impedanse, u svakom koraku, su međusobno jednake ($\hat{Z}_{611a} = \hat{Z}_{611b} = \hat{Z}_{611c} = \hat{Z}_{611}$). Rezultati za struje kratkog spoja su prikazani u tabeli 9.8.

Tabela 9.8 – Rezultati za kompleksni kratak spoj sa promenom vrednosti impedanse kratkog spoja

$\hat{Z}_{611} = \hat{Z}_{675} =$	5 [Ω]	10 [Ω]	15 [Ω]	20 [Ω]
Struje [kA]				
$\hat{I}_{ks1 a}$	-1.89+0.66	-1.08+j0.21	-0.75+j0.11	-0.57+j0.06
$\hat{I}_{ks1 b}$	0.47-j1.84	0.39-j0.99	0.30-j0.67	0.24-j0.51
$\hat{I}_{ks1 c}$	1.41+j1.23	0.69+j0.81	0.45+j0.58	0.33+j0.45
$\hat{I}_{ks2 a}$	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0
$\hat{I}_{ks2 b}$	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0
$\hat{I}_{ks2 c}$	0.34-0.16	0.37-0.08	0.36-j0.02	0.33+j0
Naponi [kV]				
$\hat{U}_{ks1 a}$	9.4-j3.3	10.8-j2.2	11.3-j1.6	11.5-j1.2
$\hat{U}_{ks1 b}$	-2.3+j9.1	-3.8+j9.9	-4.5+j10.2	-4.8+j10.2
$\hat{U}_{ks1 c}$	-7.1-j6.2	-6.8-j8.1	-6.7-j8.7	-6.6-j9.1
$\hat{U}_{ks2 a}$	11.1-j1.2	11.5-j0.8	11.7-j0.6	11.8-j0.6
$\hat{U}_{ks2 b}$	-4.9+j9.9	-5.4+j10.2	-5.6+j10.2	-5.7+j10.3
$\hat{U}_{ks2 c}$	-1.7+j0.8	-3.6+j0.9	-5.4+j0.41	-6.7-j0.39

Ovde je potrebno napomenuti da za neke kompleksne kratke spojeve (posebno kada su u pitanju simultani kratki spojevi), struje kratkog spoja mogu da budu izuzetno niske, odnosno približnih vrednosti sa nominalnim strujama. Na primer u slučaju KS3, takve su struje $\hat{I}_{ks2 a}$ i $\hat{I}_{ks2 b}$. Takođe, primer takvih struja su i struje svih kratkih spojeva preko impedansi većih od 10 [Ω] u tabeli 9.8. Zbog toga je izuzetno važno da je postupak za proračun kratkih spojeva rigidan, odnosno da je njime moguće na jednostavan način precizno izračunati struje bilo kako složenog kratkog spoja. Ovo je od posebne važnosti kada je u pitanju podešenje i koordinacija relejne zaštite u mreži.

Treća klasa proračuna je vršena na četiri radialne distributivne mreže velikih dimenzija. Sve četiri test mreže su neuravnotežene u nesimetričnim režimima pre kratkog spoja. 30% od svih sekcija je izabrano da budu neuravnotežene i potrošači se razlikuju u različitim fazama.

Broj trofaznih čvorova u test mrežama varira od 1300 do 10530. U ovim proračunima je vreme potrebno za proračun režima mreže s kratkim spojem USSKN postupkom poređeno s vremenom potrebnim za proračun režima istih mreža korišćenjem postupka HKM. Postupak HKM je izabran za ovo poređenje kao najbrži među svim postupcima za proračun neuravnoteženih mreža. Rezultati su prikazani u tabeli 9.9. Ovde je potrebno napomenuti da su samo standardni kratki spojevi simulirani, da bi se izbeglo složeno izvođenje uslova kvara koje je potrebno kada se koristi postupak HKM.

Poređenja su izvođena na PC, Intel i3 – 2330 M, 4 GB RAM računaru. Sve procedure su programirane u FORTRAN-u 2008.

Tabela 9.9 – Poređenje vremena potrebnog za proračun kratkih spojeva postupcima USSKN i HKM

Test mreža i tip kratkog spoja	Broj čvorova	USSKN T_{USSKN} [ms]	HKM T_{HKM} [ms]	T_{USSKN}/T_{HKM}
A (1P)	1300	10.7	15.6	0.68
B (2PZ)	2600	23.8	33.4	0.71
C (2P)	5200	42.7	58.6	0.71
D (3P)	10530	67.2	121.2	0.55

Na osnovu prikazanih rezultata, može se zaključiti sledeće:

1. Iz tabela 9.1 i 9.6 se vidi da se rezultati proračuna kratkih spojeva distributivnih mreža bez DER tipa 3 i DER tipa 4 dobijeni postupkom USSKN i postupkom HKM vrlo dobro slažu, kako za uravnotežene tako i za neuravnotežene mreže. Ta činjenica je dobra verifikacija tačnosti predloženog postupka, s obzirom da je postupak HKM tradicionalan postupak za proračune kratkih spojeva. On se uspešno koristi više od dve decenije.
2. Iz tabela 9.2 i 9.4 se vidi da se predloženim postupkom DFIM uvažavaju znatno preciznije nego postupkom EVS koji je predložen u međunarodnom IEC standardu. Dok se postupkom EVS DFIM uvek modeluju kao DER tipa 2, postupkom predloženim u ovoj disertaciji se uvažava činjenica da u slučaju kratkih spojeva dovoljno udaljenih od DFIM, zaštite invertora kroubarom neće reagovati, pa će struja DFIM biti kontrolisana. Kao što je prikazano u tabeli 9.4, EVS postupkom se na ovaj način unosi izuzetno velika greška – razlika struja DFIM iznosi preko 600%. Ovo može ozbiljno da utiče na podešavanje i koordinaciju zaštite kako samog DFIM, tako i otepa („*lateral*“) koji se nalaze blizu DFIM. Takođe, za razliku od postupka EVS, postupkom predloženim u ovoj disertaciji moguće je uvažiti čopere kao zaštitu invertora DFIM.
3. Iz tabela 9.3 i 9.5 se vidi prednost modela za DER tipa 3-4 predloženih u ovoj disertaciji, u odnosu na način njihovog uvažavanja predloženog u [35]. Korišćenjem predloženih modela, zahtevi FRT za injektiranjem reaktivne snage (struje) u toku kratkog spoja su precizno uvaženi. Na osnovu smanjenja napona u čvoru priključenja DER tipa 3-4 na mrežu, određuje se reaktivna komponenta struje kratkog spoja (saglasno sa vremenskom sekvencom od interesa, u ovom primeru tranzitnoj sekvenci), dok se aktivni deo struje kratkog spoja određuje na osnovu specificirane maksimalne vrednosti i izračunate reaktivne komponente. Tako, bez obzira što je u prvom slučaju (kratak spoj u čvoru 671) smanjenje napona u čvoru priključenja DER tipa 3-4 na mrežu dva puta veće nego u drugom slučaju (kratak spoj u čvoru 680) reaktivne snage koje DER tipa 3-4 injektira u

mrežu u oba slučaja su jednake. Za razliku od ovoga, postupkom EVS se samo nominalna struja DER tipa 3-4 množi sa 1.5 i tako se dobija vrednost njihove struje kratkog spoja.

4. Iz tabela 9.7 i 9.8 se vidi kako se predloženim postupkom vrlo efikasno i precizno mogu proračunavati bilo kako složeni kompleksni kratki spojevi bez prethodnog složenog izvođenja uslova kvara. Kratki spojevi se predloženim postupkom definišu jednostavnom inspekcijom.
5. Rezultati iz tabele 9.9 pokazuju da je predloženi postupak izuzetno efikasan i brz. U poređenju sa postupkom HKM, smanjenje vremena potrebnog za proračun kratkih spojeva u neuravnoteženim mrežama dostiže 45%. Ovo smanjenje u vremenu proračuna pripisuje se činjenici da je predloženi postupak obrađen u domenu simetričnih komponenti, za razliku od postupka HKM koji je obrađen u faznom domenu. Ovde je potrebno napomenuti i da se predloženim postupkom petlje uvažavaju mnogo efikasnije, kao i to da za izvođenje kompleksnih kratkih spojeva predloženim postupkom nije potrebno prethodno izvoditi uslove kvara. Ove dve činjenice dodatno doprinose efikasnosti predloženog postupka.

GLAVA 10

ZAKLJUČCI I PREDLOZI ZA NOVA ISTRAŽIVANJA

Kao što je rečeno u uvodu disertacije, svi do sada razvijeni postupci za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža imaju sledeća tri nedostatka:

1. Ne postoje jasno utvrđeni i opšte prihvaćeni modeli za DFIM i IBDER, pogodni za proračune kratkih spojeva distributivnih mreža velikih dimenzija;
2. S obzirom na prirodu DFIM i IBDER, oni ne mogu biti integrisani u tradicionalne proračune kratkih spojeva, zasnovane na konceptu tradicionalnog Δ -kola;
3. Svim do sada razvijenim postupcima za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža potrebno je predefinisati – unapred izvoditi uslove kvara vrlo složenim postupcima u vidu vrlo složenih formula, za svaki kratak spoj.

Da bi se uspešno prevazišli ovi nedostaci, sledeći ciljevi su postignuti u ovoj disertaciji:

1. Razvijeni su matematički modeli za DFIM i IBDER za potrebe proračuna kratkih spojeva distributivnih mreža velikih dimenzija;
2. Razvijen je novi koncept generalizovanog Δ -kola koji omogućuje integraciju modela DFIM i IBDER u proračune kratkih spojeva;
3. Unapređena je ideja kanoničnog modela za opis kompleksnih kratkih spojeva za potrebe aktivnih distributivnih mreža velikih dimenzija;
4. Korišćena je unapređena verzija postupka SSKN – USSKN za proračun stanja neuravnoteženog generalizovanog Δ -kola i u njega je integrisan opis kompleksnog kratkog spoja iz tačke 3.

Realizacijom ovih ciljeva, razvijen je jedan rigidan, robustan i brz postupak za proračun kompleksnih kratkih spojeva u neuravnoteženim distributivnim mrežama velikih dimenzija, sa integrisanim DER savremenih tehnologija.

Rigidnost predloženog postupka je potvrđena time što je on testiran na vrlo rigidnom modelu distributivne mreže, odnosno svaki element mreže je uvažen i modelovan vrlo preciznim modelom. Naročito su naglašeni modeli savremenih DER, kao što su DFIM i IBDER, koji su modelovani dovoljno precizno, ali u isto vreme i dovoljno jednostavno, što čini predloženi postupak pogodnim za proračune distributivnih mreža velikih dimenzija, koje sadrže i veliki broj DER modernih tehnologija. Ovi modeli su izvedeni na osnovu FRT zahteva Pravila o pogonu distributivnih mreža, pa su time ispunjeni svi zahtevi koje ta pravila nalažu.

Robusnost razvijenog postupka se ogleda u tome da se njime mogu proračunavati najjednostavnije do najsloženijih mreža s podjednakom lakoćom. Takođe, složenost kratkog spoja ne utiče na efikasnost i preciznost proračuna. Koristeći postupak predložen u ovoj

disertaciji, bilo kako složen kompleksni kratak spoj moguće je rešiti sa podjednakom lakoćom i konzistentnošću, bez prethodnog složenog predefinisavanja uslova kvara. Predloženim postupkom, kompleksni kratki spojevi se definišu jednostavnom inspekcijom.

Brzina proračuna predloženim postupkom je testirana na nekoliko distributivnih mreža vrlo velikih dimenzija. U disertaciji je pokazano da se čitavo stanje distributivne mreže sa preko 10000 trofaznih čvorova, s kompleksnim kratkim spojem, proračunava za manje od 70 ms. Ovo vreme je upoređeno s vremenom proračuna potrebnim korišćenjem postupka HKM. Pokazano je da je predloženi postupak skoro dva puta brži. Postupak HKM je izabran za ovo poređenje kao najbrži među svim postojećim postupcima za proračun kratkih spojeva distributivnih mreža.

Buduća istraživanja na temu proračuna kratkih spojeva distributivnih mreža, trebalo bi usmeriti ka sledećim oblastima:

1. Obraditi proračun kratkih spojeva višefaznih mreža u domenu simetričnih komponenti i u faznom domenu i uporediti vreme potrebno za proračun u ova dva domena.
2. Razviti modele za jednofazne IBDER, na sličan način kao što su u ovoj disertaciji razvijeni modeli za trofazne IBDER. Oni su svakako jednostavniji od modela trofaznih IBDER.
3. Razviti postupak za podešavanje i koordinaciju relejne zaštite distributivnih mreža velikih dimenzija koje sadrže DER savremenih tehnologija, na osnovu modela i postupka za proračun predloženih u ovoj disertaciji.
4. Generalizovati predloženi postupak za proračun mikromreža u autonomnom pogonu, pogođenim kompleksnim kratkim spojevima, kao i proračun mreža sa virtuelnim elektranama.
5. Generalizovati poznate postupke za proračun jednosmerne komponente režima tradicionalnih mreža s kompleksnim kratkim spojem prema mrežama s velikim brojem i snagom DER koji nemaju elektromagnetnu inerciju.

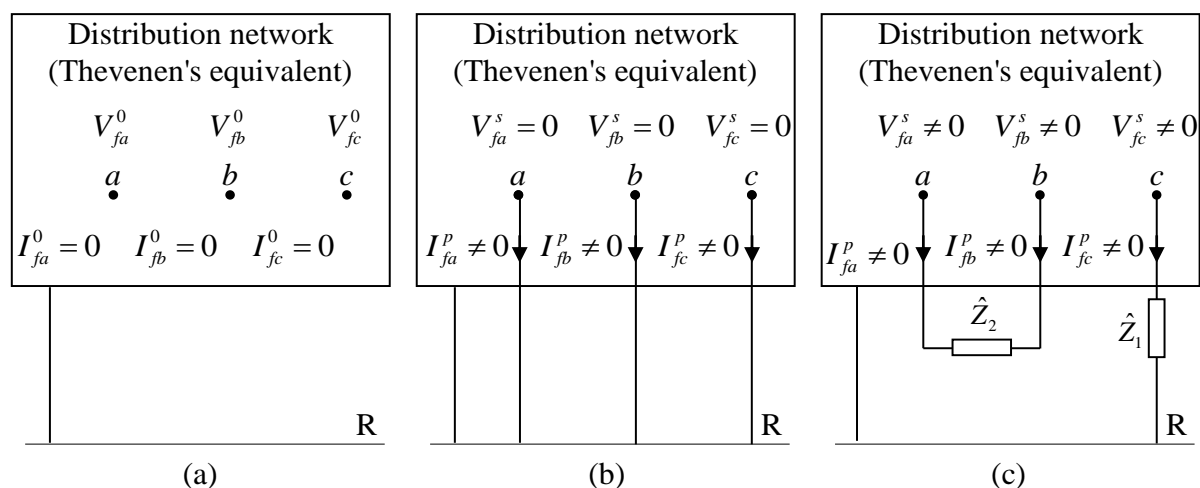
GLAVA 11

PRILOG

U ovoj glavi je dat prilog najavljen u osnovnom tekstu disertacije. On se odnosi na vrlo složena izvođenja uslova kvara kompleksnih kratkih spojeva, koji se zahtevaju u tradicionalnim proračunima. U tu svrhu, posmatra se jedan kompleksan kratak spoj u jednom trofaznom čvoru. Čvor pre kratkog spoja je prikazan na slici P.1a. Prvo se razmatra metalni trolezni kratak spoj čiji se uslovi kvara izvedu vrlo jednostavno u postupku HKM. On je prikazan na slici P.1b. Zatim se razmatra kompleksan kratak spoj koji se sastoji od dvopolnog kratkog spoja (faze a i b) preko impedanse \hat{Z}_2 , ($\hat{Z}_2 \neq 0$) i jednopolnog kratkog spoja preko impedanse \hat{Z}_1 , ($\hat{Z}_1 \neq 0$), faza c. Pored čvora s kratkim spojem, ostatak mreže nije prikazan. Stanje pre kratkog spoja se smatra poznatim.

Ova dva kratka spoja (standardan metalni kratak spoj i ne tako složen kompleksan kratak spoj u samo jednom čvoru) izabrana su upravo da bi se prikazala razlika u izvođenju ulova kvara standardnih (metalnih) kratkih spojeva i kompleksnih kratkih spojeva. Iz razmatranja koja slede biće očigledna prednost postupka predloženog u ovoj disertaciji u smislu tretmana uslova kvara.

Oznake koje su korišćene u ovom prilogu podudaraju se sa oznakama postupka [16]: Fazni naponi su označeni sa V umesto sa U , oznake veličina pre kratkog spoja u superskriptu imaju „0“, a oznake veličina u režimu s kratkim spojem u superskriptu imaju „p“. Veličine koje se odnose na čvor s kratkim spojem u superskriptu imaju „f“ („fault“). Specificirane veličine (specificirane ili izračunate veličine ma mestu kratkog spoja – uslovi kvara) imaju u superskriptu „s“. Faze su označene sa „a“, „b“ i „c“.



Slika P.1 – Čvor k u režimu pre kratkog spoja (a), trolezni metalni kratak spoj u čvoru k (b), kompleksni kratak spoj u čvoru k (c)

Za izvođenje uslova kvara tradicionalnim postupcima za proračun kratkih spojeva biće korišćena notacija iz [16]. U ovom postupku, za izvođenje uslova kvara koristi se Tevenenov

ekvivalent viđen iz čvora s kratkim spojem. Tevenenov ekvivalent se sastoji od vektora Tevenenovih elektromotornih sila $E_f (3 \times 1)$ i Tevenenove matrice admitansi $Z_f (3 \times 3)$:

$$E_f = \begin{bmatrix} E_{fa} \\ E_{fb} \\ E_{fc} \end{bmatrix}, \quad Z_f = \begin{bmatrix} Z_{faa} & Z_{fba} & Z_{fca} \\ Z_{fab} & Z_{fbb} & Z_{fcb} \\ Z_{fac} & Z_{fbc} & Z_{fcc} \end{bmatrix}. \quad (\text{P.1})$$

Vektor Tevenenovih elektromotornih sila jednak je naponima faza a, b i c čvora u kojem se simulira kratak spoj, pre kratkog spoja:

$$E_f = \begin{bmatrix} E_{fa} \\ E_{fb} \\ E_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix}. \quad (\text{P.2})$$

Tevenenova relacija koja povezuje vektor Tevenenovih elektromotornih sila (superskript 0), vektor faznih napona čvora s kratkim spojem (superskript s) i vektor struja kratkog spoja na mestu kratkog spoja (superskript p), ima sledeći oblik :

$$\begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{fa}^s \\ V_{fb}^s \\ V_{fc}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{faa} & Z_{fba} & Z_{fca} \\ Z_{fab} & Z_{fbb} & Z_{fcb} \\ Z_{fac} & Z_{fbc} & Z_{fcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa}^p \\ I_{fb}^p \\ I_{fc}^p \end{bmatrix}. \quad (\text{P.3})$$

METALNI TROPOLNI KRATAK SPOJ – SLIKA P.1b

S obzirom da je kratak spoj metalni (nije preko impedanse), očigledna je sledeća relacija

$$V_{fa}^s = V_{fb}^s = V_{fc}^s = 0. \quad (\text{P.4})$$

Integracijom relacija (P.3) i (P.4), struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja računaju se jednostavno, sledećom relacijom [16]:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^p \\ I_{fb}^p \\ I_{fc}^p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{faa} & Z_{fba} & Z_{fca} \\ Z_{fab} & Z_{fbb} & Z_{fcb} \\ Z_{fac} & Z_{fbc} & Z_{fcc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix} \quad (\text{P.5})$$

KOMPLEKSNI KRATAK SPOJ – SLIKA P.1c

Kompleksni kratki spojevi nisu razmatrani tradicionalnim postupcima za proračun kratkih spojeva [1-5], [7-12], [15-21]. Međutim, sledeći istu logiku kao za izvođenje uslova kvara standardnih kratkih spojeva iz [16], ovde će biti izloženo izvođenje ovih uslova za razmatrani kompleksni kratak spoj (slika P.1c).

Osnovna razlika ovog slučaja, u odnosu na prethodni (metalni kratak spoj) je to da naponi V_{fa}^s , V_{fb}^s i V_{fc}^s sada nisu poznati. Zato, oni moraju da se opišu na sledeći način:

$$I_{fa}^p = -I_{fb}^p, \quad (\text{P.6a})$$

$$I_{fa}^p = (V_{fa}^s - V_{fb}^s)/Z_2, \quad (\text{P.6b})$$

$$I_{fa}^p = V_{fc}^s/Z_1. \quad (\text{P.6c})$$

Integracijom relacija (P.3) i (P.6) može da se napiše matematički model stanja čvora s kompleksnim kratkim spojem:

$$\begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{fa}^s \\ V_{fb}^s \\ V_{fc}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{faa} & Z_{fba} & Z_{fca} \\ Z_{fab} & Z_{fbb} & Z_{fcb} \\ Z_{fac} & Z_{fbc} & Z_{fcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa}^p \\ I_{fb}^p \\ I_{fc}^p \end{bmatrix}. \quad (\text{P.7a})$$

$$I_{fa}^p = -I_{fb}^p, \quad (\text{P.7b})$$

$$I_{fa}^p = (V_{fa}^s - V_{fb}^s)/Z_2, \quad (\text{P.7c})$$

$$I_{fa}^p = V_{fc}^s/Z_1. \quad (\text{P.7d})$$

Ovaj matematički model se sastoji od šest relacija: tri relacije u matricnoj formi (P.7a) i tri relacije (P.7b), (P.7c) i (P.7d), sa šest nepoznatih veličina: $V_{fa}^s, V_{fb}^s, V_{fc}^s, I_{fa}^p, I_{fb}^p$ i I_{fc}^p (naponi $V_{fa}^0, V_{fb}^0, V_{fc}^0$ su poznati). Iz ovih šest relacija, potrebno je izračunati struje I_{fa}^p, I_{fb}^p i I_{fc}^p . To može da se uradi na sledeći način:

Integracijom relacija (P.7b), (P.7c) i (P.7d) u relacije (P.7a) dobija se:

$$\begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{fa}^s \\ V_{fb}^s \\ V_{fc}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{faa} & Z_{fba} & Z_{fca} \\ Z_{fab} & Z_{fbb} & Z_{fcb} \\ Z_{fac} & Z_{fbc} & Z_{fcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (V_{fa}^s - V_{fb}^s)/Z_2 \\ -(V_{fa}^s - V_{fb}^s)/Z_2 \\ V_{fc}^s/Z_1 \end{bmatrix}. \quad (\text{P.8})$$

Zatim:

$$\begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{faa}}{Z_2} (V_{fa}^s - V_{fb}^s) - \frac{Z_{fba}}{Z_2} (V_{fa}^s - V_{fb}^s) + \frac{Z_{fca}}{Z_1} V_{fc}^s \\ \frac{Z_{fab}}{Z_2} (V_{fa}^s - V_{fb}^s) - \frac{Z_{fbb}}{Z_2} (V_{fa}^s - V_{fb}^s) + \frac{Z_{fcb}}{Z_1} V_{fc}^s \\ \frac{Z_{fac}}{Z_2} (V_{fa}^s - V_{fb}^s) - \frac{Z_{fbc}}{Z_2} (V_{fa}^s - V_{fb}^s) + \frac{Z_{fcc}}{Z_1} V_{fc}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{fa}^s \\ V_{fb}^s \\ V_{fc}^s \end{bmatrix}. \quad (\text{P.9})$$

Zatim:

$$\begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_{faa}}{Z_2} - \frac{Z_{fba}}{Z_2} + 1\right) & \left(-\frac{Z_{faa}}{Z_2} + \frac{Z_{fba}}{Z_2}\right) & \left(\frac{Z_{fca}}{Z_1}\right) \\ \left(\frac{Z_{fab}}{Z_2} - \frac{Z_{fbb}}{Z_2}\right) & \left(-\frac{Z_{fab}}{Z_2} - \frac{Z_{fbb}}{Z_2} + 1\right) & \left(\frac{Z_{fcb}}{Z_1}\right) \\ \left(\frac{Z_{fac}}{Z_2} - \frac{Z_{fbc}}{Z_2}\right) & \left(-\frac{Z_{fac}}{Z_2} + \frac{Z_{fbc}}{Z_2}\right) & \left(\frac{c}{Z_1} + 1\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{fa}^s \\ V_{fb}^s \\ V_{fc}^s \end{bmatrix}, \quad (\text{P.10})$$

Iz relacije (P.10) mogu se izračunati fazni naponi čvorova s kratkim spojem (uslovi kvara):

$$\begin{bmatrix} V_{fa}^s \\ V_{fb}^s \\ V_{fc}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_{faa}}{Z_2} - \frac{Z_{fba}}{Z_2} + 1\right) & \left(-\frac{Z_{faa}}{Z_2} + \frac{Z_{fba}}{Z_2}\right) & \left(\frac{Z_{fca}}{Z_1}\right) \\ \left(\frac{Z_{faa}}{Z_2} - \frac{Z_{fbb}}{Z_2}\right) & \left(-\frac{Z_{fab}}{Z_2} - \frac{Z_{fbb}}{Z_2} + 1\right) & \left(\frac{Z_{fcb}}{Z_1}\right) \\ \left(\frac{Z_{fac}}{Z_2} - \frac{Z_{fbc}}{Z_2}\right) & \left(-\frac{Z_{fac}}{Z_2} + \frac{Z_{fbc}}{Z_2}\right) & \left(\frac{Z_{fcc}}{Z_1} + 1\right) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{fa}^0 \\ V_{fb}^0 \\ V_{fc}^0 \end{bmatrix}. \quad (\text{P.11})$$

Kada se izračunaju naponi $V_{fa}^s, V_{fb}^s, V_{fc}^s$ tada se korišćenjem relacija (P.6) mogu izračunati i struje kratkog spoja na mestu kratkog spoja I_{fa}^p, I_{fb}^p i I_{fc}^p .

Ovde je potrebno naglasiti jednu vrlo važnu napomenu: relacije za proračun struji kratkog spoja na mestu kratkog spoja nisu jedinstvene i kada se koriste tradicionalni postupci za proračun kratkih spojeva, ove struje se moraju predefinisati i izračunavati za svaki poseban kratak spoj. To izračunavanje se uvek mora vršiti na način sličan kao što je prethodno opisano. Kompleksni kratak spoj opisan u ovom prilogu nije složen i zahvaćen je samo jedan trofazni čvor. Međutim, u slučaju složenijih kratkih spojeva, u kojima je više čvorova zahvaćeno kratkim spojem, ovo izračunavanje je znatno složenije i opširnije nego za ovde opisani kompleksni kratak spoj. Zbog ove osobine, tradicionalni postupci za proračun kratkih spojeva nisu pogodni za korišćenje u industrijskim softverima, kojima je potrebno sa podjednakom lakoćom i konzistentnošću rešavati po želji izabrane kompleksne kratke spojeve.

GLAVA 12

LITERATURA

- [1] P.M. Anderson: *Analysis of Faulted Power Systems*. New York, NY, USA: IEEE Press, 1995.
- [2] R. Bergen and V. Vittal: *Power System Analysis (2nd Ed.)*, New Jersey, Prentice Hall, 2000.
- [3] G. Gross, H. W. Hong: "A Two-step Compensation Method for Solving Short Circuit Problems", *IEEE on PAS*, Vol. PAS-101, No.6, pp. 1322–1331, 1982.
- [4] F. L. Alvarado, S. K. Mong, M. K. Enps: "A Fault Program with Macros. Monitors and Direct Compensation in Mutual Croups". *IEEE on PAS*, Vol. PAS-104, N0.5, pp. 1109–1120, 1985.
- [5] V. Brandwajn, W. F. Tinney: "Generalized Method of Fault Analysis", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. PAS-104, No.6, pp. 1301–1306, 1985.
- [6] V. Strezoski and, D. Bekut: "A Canonical Model for the Study of Faults in Power Systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 6, No. 4, pp. 1493–1499, 1991.
- [7] R. A. Jabr and I. Dzafic: "A Fortescue Approach for Real-Time Short Circuit Computation in Multiphase Distribution Networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 30, No. 6, pp. 3276–3285, 2015.
- [8] T.-H. Chen, M.-S. Chen, W.-J. Lee, P. Kotas, and P. V. Olinda: "Distribution system short circuit analysis—a rigid approach", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 7, No. 1, pp. 444–450, 1992.
- [9] J. S. Lacroix, I. Kocar, and M. Belletête: "Accelerated computation of multiphase short circuit summary for unbalanced distribution systems using the concept of selected inversion", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 28, No. 2, pp. 1515–1522, 2013.
- [10] D. V. Tu, S. Chaitusaney, and A. Yokoyama: "Maximum-Allowable Distributed Generation Considering Fault Ride-Through Requirement and Reach Reduction of Utility Relay", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 29, No. 2, pp. 534–541, 2014.
- [11] M. E. Baran and I. M. El-Markaby: "Fault analysis on distribution feeders with distributed generators", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 4, pp. 1757–1764, 2005.
- [12] L. Strezoski and M. Prica: "Real-Time Short-Circuit Analysis of Active Distribution Systems", *IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, Champagne, IL, 2016.
- [13] M. Todorovski and D. Rajcic: "Handling Three-Winding Transformers and Loads in Short Circuit Analysis by the Admittance Summation Method", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 3, pp. 993–1000, 2003.
- [14] V. Strezoski and P. Vidovic: "Power Flow for General Mixed Distribution Networks", *International Transactions on Electrical Energy System*, Vol. 25, No. 10, pp. 2455–2471, 2015.
- [15] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, and G.X. Luo: "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 3, No. 2, pp. 753–762, 1988.
- [16] Z. Xiaofeng, F. Soudi, D. Shirmohammadi and C.S. Cheng: "A Distribution Short Circuit Analysis Method Using Hybrid Compensation Method", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 10, No. 4, pp. 2053–2059, Nov. 1995.
- [17] W. M. Lin and T. C. Ou: "Unbalanced Distribution Network Fault Analysis with Hybrid Compensation", *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 5, No. 1, pp. 92–100, 2011.

- [18] D. Rajicic and R. Taleski: "Two novel methods for radial and weakly meshed network analysis", *Electric Power Systems Research*, Vol. 48, No. 2, pp. 79–87, 1998.
- [19] S. Boljevic, M. Conlon, "The Contribution to Distribution Network Short Circuit Level from the Connection of Distributed Generation", *43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Padova, Italy, pp. 1–6, 2008.
- [20] I. Tristiu, C. Bulac, S. Costinas, L. Toma: "A New and Efficient Algorithm for Short-Circuit Calculation in Distribution Networks With Distributed Generation", *The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, Bucharest, Romania, pp. 816–821. 2015.
- [21] H. Margossian, G. Deconinck: "Short Circuit Calculation in Networks With High Penetration of Inverter Based Distributed Generation", *IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 1–5, 2014.
- [22] E. Muljadi and V. Gevorgian: "Short-Circuit Modeling of a Wind Power Plant," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, July 24–29, 2011.
- [23] R. A. Walling and M. L. Reichard: "Short Circuit Behavior of Wind Turbine Generators," in *Proc. 2009 IEEE Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, Mar. 30–Apr. 2, 2009.
- [24] F. Sulla, J. Svensson, and O. Samuelsson: "Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators," *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 7, pp. 1610–1618, 2011.
- [25] D. F. Howard, T. M. Smith, M. Starke, and R. G. Harley: "Short Circuit Analysis of Induction Machines – Wind Application," in *Proc. 2012 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Orlando, FL, May 7–10, 2012.
- [26] D. F. Howard: "Short-Circuit Currents in Wind-Turbine Generator Networks", Ph.D dissertation, Dept. Elec. Eng., Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA, 2013.
- [27] J. R. Williams, B. Karlson: "Wind Power Plant Short-Circuit Modeling Guide", Sandia Nat. Lab., Albuquerque, NM, 2012.
- [28] Joint Working Group: "Fault current contribution from wind plants", Report to the T&D Committee of the IEEE Power and Energy Society, Pro Relay, 2015.
- [29] F. Gao and M. Iravani: "A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 23, No. 2, pp. 850–859, 2008.
- [30] J.-H. Teng: "Systematic short-circuit-analysis method for unbalanced distribution systems", *IEE Gen. Trans. & Dist*, Vol. 152, No. 4, pp. 549–555, July 2005.
- [31] J.-H. Teng: "Unsymmetrical short-circuit fault analysis for weakly meshed distribution systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25, No. 1, pp. 96–105, Feb. 2010.
- [32] IEC 60909-0, Short-Circuit Currents in Three-Phase A. C. Systems—Part 0: Calculation of Short-Circuit Currents, 2001.
- [33] IEC 60909-1, Short-Circuit Currents in Three-Phase A. C. Systems—Part 1: Factors for the Calculation of Short-Circuit Currents According to IEC 60909-0, 2002.
- [34] IEC 60909-4, Short-Circuit Currents in Three-Phase A. C. Systems—Part 4: Examples for the Calculation of Short-Circuit Currents, 2000.
- [35] T. N. Boutsika, S. A. Papathanassiou: "Short Circuit Calculations in Network with Distributed Generation", *electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 7, pp. 1181–1191, 2008.
- [36] IEEE Std-551, IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems, 2006.
- [37] IEC 60909-0, 2016: Short-Circuit Currents in Three-Phase A. C. Systems—Part 0: Calculation of Short-Circuit Currents, 2016.

- [38] L. Strezoski: "Proračun radijalnih distributivnih mreža s kratim spojevima", Diplomski rad, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2013.
- [39] L. Strezoski: "Osnovni proračuni distributivnih mreža – tokovi snaga i kratki spojevi", Master rad, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2014.
- [40] P. Vidovic: "Proračuni tokova snaga neuravnoteženih distributivnih mreža", Doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2015.
- [41] V. Strezoski: *Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema (Tom I i Tom II)*. Srbija: Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [42] V. Strezoski: *Osnovi Elektroenergetike*, Srbija: Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.
- [43] W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, and H. Thomas: *Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems*. National Renewable Energy Laboratory. Report TP-581-42672, 2008.
- [44] B. Kroposki, C. Pink, R. DeBlasio, H. Thomas, M. Simoes, and P. K. Sen: "Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems", *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 25, No. 3, pp. 901–908, 2010.
- [45] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer: "Distributed generation: Definition, benefits and issues", *Energy Policy*, Vol. 33, No. 6, pp. 787–798, 2005.
- [46] L. Goldstein, B. Hedman, D. Knowles, S. Freedman, R. Woods, and T. Schweizer: "Gas-fired distributed energy resource technology characterizations", National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Tech. Rep. NREL/TP-620-34783, 2003.
- [47] F. A. Farret and M. G. Simoes: *Integration of Alternative Sources of Energy*. New York: Wiley, 2006.
- [48] Seventh Edition Fuel Cell Handbook, EG&G Technical Services, Inc., Albuquerque, NM, DOE/NETL-2004/1206, 2004.
- [49] A. Akhil and S. Kraft: "Battery energy storage market feasibility study— Expanded report", Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, SAND97-1275/2, 1997.
- [50] I. Gyuk, P. Kulkarni, J. H. Sayer, J. D. Boyes, G. P. Corey, and G. H. Peek: "The United States of storage", *IEEE Power Energy Mag.*, Vol. 3, No. 2, pp. 31–39, 2005.
- [51] N. R. Friedman: "Distributed energy resources interconnection systems: Technology review and research needs", National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Tech. Rep. NREL/SR-560-32459, 2002
- [52] V.Katic, B.Dumnic, D.Milicevic, S.Grubic, Z.Corba, N.Katic: "Moderne Tehnologije Vetrogeneratora", CIRED, Vrnjacka Banja, Serbia, 2012.
- [53] A. Tan, W. H. Edwin Liu, and D. Shirmohannadi: "Transformer and Load Modeling in Short Circuit Analysis for Distribution Systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 12, No. 3, pp. 1315-1321, 1997.
- [54] L. Strezoski, M. Prica: "The Influence of Load Modeling on Distribution Protective Relay Current", *GEARED Student Workshop*, Charlotte, NC, 2015.
- [55] L. Strezoski, M. Prica: "Calculation of Relay Currents in Active Weakly-Meshed Distribution Systems", *Clemson University Power System Conference*, Clemson, SC, 2016.
- [56] V. C. Strezoski: "New scaling concept in power system analysis", *IEE Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 143, No. 5, pp. 399–406, Sep. 1996.
- [57] V. C. Strezoski: "Advanced Symmetrical Components Method", *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 5, No. 8, pp. 833-841, 2011.

- [58] V. Strezoski, S. Milakovic: *Ekvivalentne šeme elektroenergetskih transformatora u analizi stacionarnih režima*. Srbija: Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, EPS-JP „Elektrovojvodina”, Stylos, 1998.
- [59] T.-H. Chen, J.-D. Chang, Y.-L. Chang: "Models of grounded mid-tap open wye and open delta connected transformers for rigorous analysis of a distribution system", *IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 143, No. 1, pp. 82-88, January 1996.
- [60] T.-H. Chen, J.-D. Chang: "Open way-open delta and open delta-open delta transformer models for rigorous distribution system analysis", *IEE Proc. –Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 139, No. 3, pp. 227-234, 1992.
- [61] W. H. Kersting: *Distribution System Modeling and Analysis*. USA: Boca Raton, CRC Press, 2002.
- [62] J. Arillaga, C. P. Arnold, B. J. Harker: *Computer Modeling of Electrical Power Systems*. USA: New Delhi, John Wiley & Sons Ltd, 1983.
- [63] L. Strezoski, M. Prica, K.A. Loparo: "Generalized Δ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generation in Online Short-Circuit Calculations", *IEEE Trans. Pow. Syst.*, Vol PP. no. 99, pp. 1-9, 2016.
- [64] L. Strezoski, M. Prica, K.A. Loparo: "Emerging Distribution Systems: Modeling Challenges in Faulted Conditions", *Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2017.
- [65] L. Strezoski, V.C. Strezoski, M. Prica, K.A. Loparo: "The Need for Advanced Modeling and Calculation of Basic EMS and DMS Applications for Electronically Coupled Energy Resources", *Power and Energy Conference in Illinois (PECI)*, Urbana-Champaign, IL, USA, 2017.
- [66] M. Tsili, S. Papathanassiou: "A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms", *IET Renew. Power Gen.*, 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 308–332, 2009.
- [67] BDWE Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V.: "Guideline for generating plants' connection to and parallel operation with the medium-voltage network", 2008.
- [68] Distribution System Operators – ESB Networks, 'Irish Distribution Code', 2015.
- [69] Z.R. Ivanovic, E.M. Adzic, M.S. Vekic, S.U. Grabic, N.L. Celanovic, V.A. Katic: "HIL Evaluation of Power Flow Control Strategies for Energy Storage Connected to Smart Grid Under Unbalanced Conditions", *IEEE Trans. on Power Elect.*, Vol. 27, Np. 11, pp. 4699–4710, 2012.
- [70] W.H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.