



ПРИМАРНА РЕГУЛАЦИЈА И СТАБИЛИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖА СА ПРЕТВАРАЧИМА ЕНЕРГЕТСКЕ ЕЛЕКТРОНИКЕ У УСЛОВИМА НЕПОСРЕДНЕ РАЗМЕНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментори: др Марко Векић др Милан Рапаић Кандидаткиња: Ивана Тодоровић

Нови Сад, 2024.

ОБРАЗАЦ – 5а

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ФКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Врста рада:	Докторска дисертација		
Име и презиме аутора:	Ивана Тодоровић		
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	др Марко Векић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду др Милан Рапаић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду		
Наслов рада:	Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије		
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)		
Физички опис рада:	Унети број: Страница: 98 Поглавља: 7 Референци: 189 Табела: 7 Слика: 16 Графикона: 22 Прилога: 2		
Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство		
Ужа научна област (научна дисциплина):	Енергетска електроника, машине, погони и обновљиви извори електричне енергије		
Кључне речи / предметна одредница:	енергетска електроника, дистрибуирани извори електричне енергије, микромреже, децентрализовано управљање, примарно управљање, функција циља, размена снаге		
Резиме на језику рада:	У овој докторској дисертацији предложен је нови потпуно децентрализован приступ управљању микромрежама, заснован на функцији циља која обједињује више управљачких циљева. Овај приступ обезбеђује стабилан рад микромрежа тако што директно управља одступањима учестаности и напона чворова. Истовремено, подржава жељену размену средње активне снаге између купаца-произвођача. Предложени управљачки алгоритам је независан од топологије мреже у којој се примењује, погодан је за употребу како у мрежама које су прикључене на главну мрежу, тако и у микромрежама у острвском режиму рада и подржава скалабилност система микромрежа. Како би се потврдио његов добар рад, у дисертацији су приказани и детаљно разматрани резултати добијени у бројним тестовима, који су спроведени коришћењем рачунарских и симулација у стварном времену. Понашање микромреже анализирано је у различитим реалистичним сценаријима. Добијени		

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

5б – Изјава о ауторству;

- 5г – Изјава о коришћењу.

^{- &}lt;sup>1</sup> Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

^{- 5}в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

	резултати показују да су сви управљачки циљеви постигнути коришћењем предложеног приступа и да је омогућен поуздан рад микромреже у широком опсегу радних услова.
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	30. 11. 2023.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Борис Думнић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Томислав Шекара, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду Члан: др Стеван Грабић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Дејан Јеркан, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Марко Векић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Марко Векић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Милан Рапаић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Напомена:	

UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

Document type:	Doctoral dissertation		
Author:	Ivana Todorovic		
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Dr. Marko Vekic, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Dr. Milan Rapaic, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad		
Thesis title:	Primary control and stabilization of microgrids with power electronics converters that enables electric energy exchange		
Language of text (script):	Serbian language (cyrillic script)		
Physical description:	Number of: Pages: 98 Chapters: 7 References: 189 Tables: 7 Illustrations: 16 Graphs: 22 Appendices: 2		
Scientific field:	Electrical and computer engineering		
Scientific subfield (scientific discipline):	Power electronics, electrical machines and drives		
Subject, Key words:	power electronics, distributed energy resources, microgrids, decentralized control, primary control, goal function, power exchange		
This doctoral dissertation proposes a new, entirely decentralized microgrid control, based on the goal function that takes into acc control objectives. This approach ensures the stable operation of directly controlling deviations in the node frequency and vo Simultaneously, it supports the desired exchange of average between prosumers. The proposed control algorithm can be a arbitrary network topology, it is suitable for use in both grid-c islanded microgrids, and it supports the microgrid scalability. T performance, the dissertation presents and thoroughly discusse obtained in numerous tests conducted on computer simulations simulations. The behavior of the microgrid is analyzed in var scenarios. The results obtained show that all control objectives using the proposed approach and reliable microgrid operation range of operating conditions is secured.			
Accepted on Scientific Board on:	2023-11-30		

KEY WORD DOCUMENTATION²

_

 $^{^{2}}$ The author of doctoral dissertation has signed the following Statements: _

^{56 -} Statement on the authority, _

⁵B - Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data, _

⁵r – Statement on copyright licenses. The paper and e-versions of Statements are held at he faculty and are not included into the printed thesis.

Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: Dr. Boris Dumnic, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr. Tomislav Sekara, School of Electrical Engineering, University of Belgrade Member: Dr. Stevan Grabic, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr. Dejan Jerkan, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr. Marko Vekic, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr. Marko Vekic, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Dr. Milan Rapaic, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note:	

Сажетак

Све већа распрострањеност дистрибуираних извора енергије и последична сегментација постојећих електричних мрежа у микромреже нуде низ предности. Ове предности обухватају постизање енергетске самосталности, смањење губитака енергије при преносу и повећање флексибилности у управљању енергијом. Међутим, како се очекује постепено напуштање традиционалне централизоване организације електричних мрежа и њихових управљачких структура, појавио се низ изазова који могу потенцијално угрозити стабилност и поузданост микромрежа. Стога, у литератури се могу пронаћи разна решења која нуде одговор на питање како што успешније управљати микромрежама. Ипак, понуђена решења карактеришу одређене мањкавости. На пример, потреба за прецизном разменом електричне енергије, управљањем одступањима учестаности и вредности напона у чворовима, могућност примене решења на различите топологије мрежа, као и могућност интеграције законских регулатива којима се дефинише рад мрежа, што су веома важни аспекти управљања, често нису свеобухватно остварени.

У овој докторској дисертацији предложен је нови приступ управљању микромрежама, заснован на функцији циља, која обједињује више управљачких циљева и у потпуности је децентрализован. Овај приступ у обзир узима и раније поменуте проблеме и обезбеђује стабилан рад микромрежа тако што директно управља одступањима учестаности и напона чворова од њихових називних вредности. Истовремено, подржава жељену размену средње активне снаге између купаца-произвођача. За разлику од управљачких структура заснованих на традиционално усвојеном друп (енгл. *droop*) методу и његовим варијацијама, предложени приступ је пројектован тако да се не дозволи одступање учестаности и вредности напона од жељених граничних вредности које су дефинисане од стране оператора мреже или које ће бити дефинисане будућим законским регулативама које ће уређивати рад микромрежа. Овакав приступ смањује вероватноћу нежељених искључења дистрибуираних јединица током прелазних процеса и поремећаја. Такође, предложени управљачки алгоритам је независан од топологије мреже у којој се примењује, погодан је за употребу како у мрежама које су прикључене на главну мрежу, тако и у микромрежама у острвском режиму рада и подржава скалабилност система микромрежа.

Како би се потврдио добар рад предложене управљачке стратегије, у дисертацији су приказани и детаљно разматрани резултати добијени у бројним тестовима, који су спроведени коришћењем рачунарских и симулација у стварном времену. У овим симулацијама су анализиране различите топологије микромрежа, како би се доказало да је предложени управљачки алгоритам заиста примењив у мрежи произвољне топологије. Коначно, понашање микромреже анализирано је у различитим реалистичним сценаријима, попут режима рада у којима је микромрежа прикључена на и искључена са главне мреже, "дрног старта" микромреже (поступка поновног покретања микромреже, односно постављања у радно стање након потпуног губитка напајања), изненадног искључења једне дистрибуиране јединице, промене параметара контролера, итд. Добијени резултати показују да су сви управљачки циљеви постигнути коришћењем предложеног приступа и да је омогућен поуздан рад микромреже у широком опсегу радних услова.

Abstract

The proliferation of distributed energy sources and the consequential segmentation of power systems into microgrids offer a host of compelling advantages. These advantages encompass achieving energy self-sufficiency, mitigating energy losses during transmission, and enhancing the adaptability of energy management. However, with the gradual abolition of traditional centralized networks and their corresponding centralized control mechanisms, several operational challenges have come to the forefront. These challenges can potentially undermine the stability and reliability of microgrids. As a result, various approaches have been devised to address the question of how microgrids should be effectively managed – albeit with several salient deficiencies. In particular, the necessity for precise power exchange, control of frequency and voltage fluctuations, applicability to diverse grid topologies, and the ability to integrate grid regulations and codes – very important aspects in control systems – are often not comprehensively addressed together in a universal framework.

This doctoral dissertation introduces an innovative approach grounded in a distinct goal function and the corresponding decentralized control methodology. This approach tackles the problems mentioned earlier and ensures the stability of microgrids by imposing constraints on frequency deviations and node voltage fluctuations. Simultaneously, it supports the desired exchange of active power among prosumers. Unlike control schemes rooted in the traditional droop method and its derivatives, the proposed approach is inherently designed to uphold frequency and voltage levels within the bounds stipulated by the grid operator or forthcoming microgrid regulations. This design prevents unwanted disconnections of generation units during transient events and disturbances. Furthermore, this control algorithm is agnostic to network topology, suitable for both grid-connected and islanded microgrids and secures system scalability.

To confirm the effectiveness of this proposed control strategy, a collection of results, obtained using computer and real-time simulations, is presented and thoroughly discussed. Different microgrid topologies were addressed in these simulations to prove that the proposed control algorithm is indeed applicable in an arbitrary network. Finally, the behaviour of a microgrid system was analysed under different, real-life, scenarios, such as grid-connected and islanded operations, black start (the process of microgrid restarting, after a complete loss of power), abrupt disconnection of a distributed generation unit, controller parameters variations, etc. The obtained results show that all control goals were achieved using the proposed approach and that the microgrid secure operation was attained in different operating conditions.

Садржај

1.	УВОД	1
	1.1. Организација докторске дисертације	1
2.	ПРЕГЛЕД СТАЊА У НАУЧНОЈ ОБЛАСТИ	3
	 2.1. О микромрежама	5 7 9 11 14 22 30
3.	ПОСТАВКА ПРЕДЛОЖЕНОГ ЗАКОНА УПРАВЉАЊА	33
	3.1. Хардверска структура претварача енергетске електронике	35
	3.2. Примењени нулти ниво управљања	38
	3.2.1. Струјна управљачка петља 3.2.2. Напонска управљачка петља	39
	3.2.2. Напонска управла на потла 3.2.3. Виртуелна импеданса	44
	3.3. Предложено примарно управљање засновано на функцији циља	44
	3.3.1. Анализа устаљеног стања система	50
	3.3.2. Стабилност предложеног закона управљања	50
	3.4. Предложено секундарно управљање учестаношћу	54
	3.5. Детаљна структура предложеног управљачког алгоритма	56
4.	ПОТВРДА ИСПРАВНОСТИ РАДА ПРЕДЛОЖЕНОГ ЗАКОНА УПРАВЉАЊА	58
	4.1. Статичка симулација	59
	4.2. Динамичке симулације с поједностављеним математичким моделом	60
	4.2.1. Тест с микромрежом од 4 чвора	61
	4.2.2. Тест с микромрежом од 13 чворова	62
	4.2.5. Тест с микромрежом од 125 чвора	65
	4.3.1. Потврла рала примарног закона управљања	69
	4.3.2. Потврда рада секундарног закона управљања	76
5.	ЗАКЉУЧАК	78
6	ПИТЕРАТУРА	81
~· 7	при логи	02
1.	ПГИЛОЭН	73
	 7.1. Прорачун излазне активне и реактивне снаге дистрибуиране јединице повезане на мрежу 7.2. Резултати динамичке симулације с поједностављеним математичким моделом за IEEE 123 те мрежу 	93 ст 94

Листа слика

Слика 1. у потреба снертије из различитих извора кроз време	4
Слика 2: Заступљеност микромрежа: а) према региону [23] и б) према различитим секторима [19]	6
Слика 3: Правци истраживања у области микромрежа	12
Слика 4: Хијерархијски организована структура управљања микромрежама	17
Слика 5: Облик Pf (a) и QV (б) друп карактеристика и кретање радне тачке након поремећаја	24
Слика 6: Облик PV (а) и Qf (б) друп карактеристика и кретање радне тачке након поремећаја	26
Слика 7: Начелна репрезентација микромреже у чијим чворовима су повезани купци-произвођачи	33
Слика 8: Шема повезивања инвертора на микромрежу.	36
Слика 9: Апроксимација излазног напона и струје претварача у делу прекидачке периоде [167]	37
Слика 10: Поједностављено електрично коло инвертора повезаног на микромрежу	39
Слика 11: Упрошћена струјна петља инвертора.	40
Слика 12: Упрошћена напонска петља инвертора	41
Слика 13: Амплитудна и фазна карактеристика за функцију преноса у отвореној спрези	42
Слика 14: Структура унутрашње напонске и струјне петље код инвертора повезаног на микромрежу	43
Слика 15: Графички приказ функција ограничења а и в у Декартовом координатном систему	46
Слика 16: Графички приказ сатурационе функције <i>η</i> .	47
Слика 17: Положај вектора S и d	54
Слика 18: Примена super-twisting ПИ регулатора у секундарном управљању.	55
Слика 19: Детаљна структура управљачког програма.	56
Слика 20: Топологије анализираних микромрежа: а) нисконапонска мрежа с 4 чвора, б) уравнотежен	a
IEEE тест мрежа с 13 чворова и в) уравнотежена IEEE тест мрежа с 123 чвора	58
Слика 21: Резултати добијени извршавањем статичке симулације за мрежу од 13 чворова	59
Слика 22: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк	ИМ
молелом (прва и трећа врста) и линамичкој симулацији с прекилачким молелом (друга и четврта врс	та)
modenom (npbu n ipenu bperu) n dinumi moj enmysiudnjn e npenudu mim modenom (dpyru n ierbyru bpe	
за мрежу од 4 чвора.	61
за мрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк	61 им
за мрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс	61 им та)
за мрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова.	61 им та) 63
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн	61 им та) 63 ие
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже.	61 им та) 63 ие 64
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација	61 им та) 63 ие 64 66
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже. Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама	61 им та) 63 ие 63 ие 64 66 67
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења	61 им та) 63 ие 63 ие 64 66 67 67
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам	61 им та) 63 ие 63 ие 63 64 67 67 68
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора	61 им та) 63 ие 63 ие 63 ие 64 66 67 67 68 70
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреже	61 им та) 63 ie 63 ie 63 64 66 67 67 68 70 уу од
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреж 4 чвора.	61 им та) та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та та та та та та та та та та та та
за мрежу од 4 чвора	61 им та) та) та) та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та та та та та та та та та та та та
за мрежу од 4 чвора Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреж 4 чвора.	61 им та) та) та) та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та) та та та та та та та та та та та та та
за мрежу од 4 чвора	61 им та) та) та) та та) та та) та та та та та та та та) та та) та та) та та) та та) та та та) та та та та та та та та та та та та та
за мрежу од 4 чвора	61 им та) 63 ие 63 ие 63 ие 64 67 67 67 67 68 70 у од 71 ји за 72 L 73
за мрежу од 4 чвора	61 им та) 63 ie 63 ie 63 ie 66 67 67 67 67 67 67 67 63 70 у од 71 ји за 72 L 73 ;e,
амрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова. Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже. Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација. Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама. Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам. Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 31: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреж 4 чвора. Слика 32: Резултати теста у коме је микромрежа повезана на круту мрежу, добијени у HIL симулаци имкромрежу од 4 чвора. Слика 32: Резултати теста у коме је микромрежа изненада искључена од круте мреже, добијени у HI симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 33: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреж добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.	61 им та) 63 ие 63 ие 63 ие 64 66 67 67 67 67 67 67 63 и 70 у од 71 ји за 72 L 73 ие, 73
амрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова. Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазн углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже. Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација. Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама. Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам. Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреж 4 чвора. Слика 31: Резултати теста у коме је микромрежа повезана на круту мрежу, добијени у HIL симулаци имикромрежу од 4 чвора. Слика 32: Резултати теста у коме је микромрежа изненада искључена од круте мреже, добијени у HI симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 33: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреж добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 34: Резултати теста у коме се мењају дозвољене вредности одступања учестаности и модула	61 им та) 63 ие 63 ие 63 ие 64 67 67 67 67 67 67 70 у од 71 ји за 72 L 73 ие, 73
а мрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова. Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазе углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже. Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација. Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација. Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама. Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам. Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреж 4 чвора. Слика 31: Резултати теста у коме је микромрежа повезана на круту мрежу, добијени у HIL симулацији микромрежу од 4 чвора. Слика 32: Резултати теста у коме је микромрежа изненада искључена од круте мреже, добијени у HI симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 33: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреж добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 34: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреж добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.	61 им та) 63 ие 63 ие 63 ие 64 67 67 67 67 67 68 70 ту од 71 ји за 72 L 73 те, 73 74
а мрежу од 4 чвора. Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичк моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врс за мрежу од 13 чворова. Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазе углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже. Слика 25: Еккпериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација. Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама. Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења. Слика 28: Структура развијеног <i>Simulink</i> модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам. Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромреж 4 чвора. Слика 31: Резултати теста у коме је микромрежа повезана на круту мрежу, добијени у HIL симулаци имикромрежу од 4 чвора. Слика 32: Резултати теста у коме је микромрежа изненада искључена од круте мреже, добијени у HI симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 33: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреж добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 34: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреж добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 35: Резултати теста у коме се мењају дозвољене вредности одступања учестаности и модула фазора напона, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора. Слика 35: Резултати теста у коме се мењају управљачки параметри <i>kv</i> и <i>kθ</i> , добијени у HIL симулац	61 им та) 63 ие 63 ие 63 ие 64 66 67 67 67 67 67 67 67 63 и 70 у од 71 ји за 72 L 73 ие, 74 цији

Слика 36: Естимиране учестаности чворова без активираног секундарног управљања (лево) и с	
активираним секундарним управљањем (десно).	77
Слика 37: Естимирана учестаност чвора 1	77
Слика 38: Поједностављено коло претварача повезаног на електричну мрежу	93

Листа табела

Табела 1: Особине различитих типова паралелно повезаних инвертора.	. 22
Табела 2: Уобичајени параметри водова	. 25
Табела 3: Очитани резултати у последњој радној тачки у устаљеном стању за мрежу од 4 чвора	. 62
Табела 4: Очитани резултати у последњој радној тачки у устаљеном стању за IEEE тест мрежу од 13	
чворова	. 64
Табела 5: Параметри коришћени у моделу микромреже и управљачки параметри	. 69
Табела 6: Параметри коришћени у Т7	.75
Табела 7: Очитани резултати у последњој радној тачки у устаљеном стању за IEEE тест мрежу од 123	
чвора	. 94

1. Увод

Ова докторска дисертација резултат је вишегодишњег научно-истраживачког рада ауторке у области управљања претварачима енергетске електронике који се користе за повезивање купаца-произвођача у самостално функционалне делове електроенергетског система, односно у микромреже. На основу пређашњих научно-истраживачких резултата и доступне научне литературе, развијен је управљачки закон који се примењује у контроли рада претварача енергетске електронике. Приликом развоја свеобухватног управљачког алгоритма у обзир су узети уобичајени режими рада и у којима могу да се нађу микромреже и пратећи изазови.

Како у појединим режимима рада микромрежа може доћи до великих и потенцијално опасних промена у учестаности и ефективној вредности напона у чворовима микромреже, управљање радом претварача енергетске електронике је изазован истраживачки задатак, посебно уколико се захтева остваривање децентрализоване управљачке структуре. Поред тога, пожељно је омогућити потпуно самостални рад микромреже, односно независност од постојећег електроенергетског система. У складу с тим, неопходно је подржати слободну размену активне снаге између купаца-произвођача, која неће угрозити стабилан рад микромреже.

Инспирисани теоријом вишеагентних система и алгоритмима којима се постиже координисано кретање објеката у роботици, осмишљен је нови управљачки закон за претвараче енергетске електронике који се користе у микромрежама, који представља оригинални допринос ове дисертације. Предложени закон управљања омогућава директно управљање одступањима учестаности и ефективне вредности напона у чворовима од жељених вредности, као и прецизну размену активне снаге између чворова. Уз то, у потпуности је децентрализован пошто не захтева постојање комуникационе мреже између чворова, а његов коначан облик је једноставан и као такав погодан за практичну имплементацију у контролерима.

Ово истраживање је природни наставак вишегодишњег научно-истраживачког рада на Катедри за енергетску електронику и претвараче Факултета техничких наука у Новом Саду у области микромрежа и енергетских претварача уопште. Остварени резултати се присно ослањају на савремена истраживања у области управљања која се успешно негују на Катедри за аутоматско управљање на истом факултету. Приказани резултати су оригинални и делимично већ објављени у научним часописима [1], [2], [3] и зборницима научних конференција [4], [5], [6], [7]. Део резултата је по први пут приказан у овој дисертацији.

У наставку је описана структура докторске дисертације.

1.1. Организација докторске дисертације

Ова докторска дисертација се састоји из 7 поглавља.

У другом поглављу изложени су тренутни начини употребе енергије и проблеми који их прате. Описан је концепт микромрежа и њихов значај, извршена је класификација микромрежа и предочене су архитектуре које се користе у њиховом управљању. Дат је опсежан преглед научне литературе из области управљања микромрежама, с посебним нагласком на примарно децентрализовано управљање. На крају, јасно је изложен предмет и циљ истраживања.

Поставка предложене управљачке структуре приказана је у трећем поглављу. Како су претварачи енергетске електронике основни медијум за управљање радом микромрежа, у овом поглављу је описана структура и склоп претварача који се користи приликом повезивања купаца-произвођача у микромрежу и дат је његов математички модел. Детаљно је изложена децентрализована хијерархијски организована управљачка структура претварача. Разматрани су односи између електричних величина од значаја у устаљеном стању. Потом, доказана је стабилност микромреже у случају примене предложеног управљачког закона. Оригинални допринос ове дисертације се огледа управо у предложеном децентрализованом примарном закону управљања претварача енергетске електронике у микромрежама, заснованом на примени функције циља која обједињује неколико битних критеријума за ефикасан, стабилан и проширив рад микромреже.

Четврто поглавље пружа увид у поступак провере рада предложене управљачке структуре. Вршене су различите врсте симулација у којима су испитиване разнолике топологије микромрежа и тумачени добијени одзиви. Како је скалабилност врло пожељна карактеристика у микромрежама, вршене су симулације у којима је примењени децентрализовани управљачки закон примењен у испитним мрежама с различитим бројем чворова. Потврђено је да је предложена управљачка структура погодна за примену у микромрежама различитих топологија. Затим, вршене су детаљне симулације у стварном времену, које уважавају реалистичне сценарије рада микромрежа и добијени одзиви су подробно анализирани.

Пето поглавље даје коначан осврт на спроведено истраживање, закључна разматрања, као и увид у могућа даља истраживања.

У шестом поглављу наведена је коришћена научна литература.

У седмом, додатном, поглављу су издвојена поједина математичка извођења и резултати испитивања, како би се лакше пратио остатак текста.

2. Преглед стања у научној области

Разматрањем профила употребе енергетских ресурса, који су коришћени у прошлости, који се користе данас и који ће се изгледно користити у будућности, долази се до следећих закључака. Слично многим другим сложеним системима, и еволуција система за снабдевање енергијом кренула је од једноставних поставки, након чега је дошло до усложњавања, а (привидни) крај еволутивног процеса ће се извесно остварити у компаративно једноликом устројству система. Наиме, у прошлости је људско друштво у пренесеном и у дословном смислу било покретано енергијом која је долазила из малог броја извора (превасходно хране и ватре). Дакле, путања од примарног извора енергије до жељеног рада је била кратка и једноставна. Данас се користе практично сви познати механизми за добијање, за људско друштво употребљиве, енергије (изузимајући фузионе процесе који су још увек неистражени). Мрежа складишта енергије и процеса где се та енергија користи је врло сложена. У не тако далекој будућности оправдано је очекивати да ће доћи до драматичног поједностављења у механизмима за проток енергије у људском друштву. Сви су изгледи да ће се умањити разноврсност примарних извора енергије, али ће се још више променити медијуми којима се енергија распростире. Енергија ће се у људском друштву готово у целости кретати у виду једног медијума - електричне енергије. Разлози за овакву прогнозу су бројни, али крију се првенствено у чињеницама да је пренос електричне енергије једноставан и ефикасан, да је конверзија електричне енергије у друге облике енергије и обрнуто релативно лако изводљива и да су све више доступни системи за складиштење електричне енергије. Ипак, "енергетски крај историје" неће наступити једноставно.

Тренутно се тек око четвртине светских потреба за енергијом подмирује употребом електричне енергије. Индустријски процеси, транспорт, грејање итд., су енергетски подмирени коришћењем фосилних горива, односно кроз процес раскидања хемијских веза. Додатно, с развојем друштва, растом броја становника, с жељом да се побољшава животни стандард људи, развијају привреде и нове технологије и повећава урбанизација, кумулативно расте и потрошња енергије. Ове тврдње илустроване су сликом 1. Очигледан је огроман пораст глобалне експлоатације свих доступних извора енергије, нарочито након педесетих година прошлог века, тако да је 2022. године 11111 TWh енергије произведено користећи биомасу (на пример, дрво), 44854 TWh користећи угаљ, 52969,6 TWh уз употребу нафте, 39413 TWh уз употребу природног гаса, 6702,3 TWh користећи нуклеарну енергију, 11299,8 TWh хидроенергију, 5487,6 TWh енергију ветра, 3448,2 TWh енергију сунца, 1199,2 TWh модерна биогорива попут биодизела и 2413,8 TWh користећи остале изворе обновљиве енергије [8]. Не само да расту потребе човечанства за енергијом, већ и укупна енергија потрошње, највећим делом у виду електричне енергије, тренутно долази из нуклеарних централа, хидрогенератора, ветропаркова, соларних система и осталих извора обновљиве енергије. Сагоревањем нафте и њених деривата добија се драстично мања количина енергије која се директно троши. Тачно је да се угаљ користи и за генерисање електричне енергије, али овај вид конверзије, заједно с употребом нафте, полако се напушта. Другим речима, неопходно је симултано подмиривати све веће потребе човечанства за



OurWorldInData.org/energy • CC BY

Слика 1: Употреба енергије из различитих извора кроз време.

енергијом и обезбедити инфраструктуру за употребу електричне енергије (убрзати процес даље електрификације, рекло би се, читаве планете).

Иако је у овом тренутку још увек тешко замисливо да ће сва електрична енергија долазити искључиво из обновљивих извора енергије [9], многе државе су дефинисале стратешке циљеве и усвојиле одређене правне регулативе како би подстакле производњу тзв. чисте енергије. На пример, Европска Унија усвојила је директиву 2018/2001/ЕС (*RED II- Renewable Energy Directive*) у којој је предочено да је циљ да до 2030. године укупно 32% потреба за енергијом буде подмирено из обновљивих извора [10], док за САД тај удео за исту годину износи чак амбициозних 80% [11]. Кина такође интензивно ради на инсталисању нових производних капацитета и циљ је да 1200 GW енергије буде произведено користећи енергију сунца и ветра до 2030. [12].

Не само да је изузетно важно за кратко време обезбедити велика новчана улагања у инсталацију нових система за производњу, већ је неопходно и постојећу електричну мрежу надоградити тако да може да ради под новим условима. Постојећа електрична мрежа пројектована је тако да омогући доток енергије од великих електрана (тзв. традиционалних извора) до крајњих, груписаних, потрошача. Ове електране су удаљене од крајњих потрошача јер су позициониране на местима где су одређени ресурси за производњу електричне енергије доступни. Стога, да би се губици електричне енергије свели на прихватљив ниво, неопходна је промена напонских нивоа електричних водова којима су произвођачи и потрошачи повезани. Узимајући у обзир то да су инвеститори углавном досад биле државне институције и приватне и државне електричне компаније, а да је одржавање и управљање електроенергетским системом било руковођено од стране малог броја компанија, може се рећи да су електроенергетски системи били крајње централизовани. Даље, усклађивање производње и потрошње вршено је на основу промене учестаности система и углавном је било релативно једноставно – ако је потребно више енергије, сагоревало се више угља или се повећавао доток воде до турбина. Смер тока енергије је био увек исти – од произвођача ка потрошачима.

За разлику од традиционалних извора, обновљиви извори енергије су територијално погодније распоређени, тј. дистрибуирани – где год постоје повољни услови за производњу, може се поставити одговарајућа производна јединица. Дистрибуирани извори енергије су обично мањих снага у поређењу с традиционалним електранама. На пример, мале соларне електране могу да се постављају на кровове домаћинстава или зграда. Дакле, број произвођачких јединица електричне енергије значајно расте. Самим тим, долази до децентрализације производње електричне енергије. Уз то, дистрибуирани извори енергије, засновани на обновљивим изворима, по природи су интермитентни и није могуће са стопроцентном сигурношћу предвиђати њихову производњу. Да би се умањиле последице интермитенције обновљивих извора неопходан је развој технологија за складиштење електричне енергије (попут батерија, реверзибилних хидроелектрана, замајаца, итд.). Једноставно, с порастом инсталација обновљивих извора постало је јасно да ће без система за складиштење бити врло тешко остварити равнотежу између неизвесне производње и неизвесне потрошње. Додатно, употреба ових дистрибуираних производних система подразумева двосмеран ток енергије, у многим деловима мрежа, за шта постојећи електроенергетски систем није пројектован. Сходно томе, пројектовање рада заштитних уређаја у модерним системима се значајно усложњава, а потребно је обезбедити и инфраструктуру која подржава прикључење нових дистрибуираних произвођачких јединица.

Услед потребе да се изврши интензивна електрификација друштва како би се искористиле све предности употребе електричне енергије, затим ради подмиривања све већих потреба за енергијом (што ће великим делом бити омогућено обновљивим изворима и нуклеарном енергијом), али и због многих процеса који воде децентрализацији, извесно је да ће електроенергетски системи претрпети значајну реорганизацију. Као могућа градивна јединица и парадигма организовања настајућих електроенергетских система предложена је *микромрежа*.

У наредном поглављу ће појам микромрежа бити ближе одређен, биће дата подела микромрежа, као и предности и мане њихове примене, те представљени досадашњи правци истраживања у области микромрежа.

2.1. О микромрежама

Иако се средином прошлог века у руралним пределима електрификација често вршила тако што су мање територијалне целине биле покривене електричном мрежом и нису биле прикључене на главну мрежу, сматра се да је појам микромрежа у данашњем облику настао у САД у касним деведесетим годинама прошлог века, када је на захтев америчког Конгреса започета студија о повећању броја дистрибуираних јединица и побољшању отпорности и поузданости електричне мреже [13]. У научну литературу се концепт микромрежа први пут уводи 2001. године [14]. Министарство енергије САД је дало дефиницију микромреже [15]:

Микромрежа је скуп међусобно повезаних потрошача и дистрибуираних енергетских извора унутар јасно дефинисаних електричних граница који се понаша као један контролабилни ентитет у односу на главну електроенергетску мрежу и који се повезује и искључује са те мреже како би се омогућио рад у режиму повезане микромреже с главном мрежом или изолованом режиму рада.

Ову дефиницију усвојила је и IEEE организација (Institute of Electrical and Electronics Engineers), док CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) организација даје следећу дефиницију [16]:

Микромреже представљају делове електродистрибутивних система који садрже потрошаче и дистрибуиране електроенергетске ресурсе (као што су дистрибуирани генератори, уређаји за складиштење или контролабилни потрошачи) којима може да се управља на контролисан, координисан начин, било да су прикључени на главну електричну мрежу или у острвском режиму рада.

Може се доћи до закључка да су у суштини ове две дефиниције еквивалентне.

Концепт микромрежа је прихваћен од стране научне заједнице и сви напори усмерени су ка томе да се омогући његова широка имплементација у организацији електроенергетског система. Често се каже да су микромреже градивне јединице модерних електроенергетских система [17]. Микромреже омогућавају лакшу интеграцију обновљивих извора енергије, складишта енергије, електричних возила и осталих напредних технологија у постојећу електричну мрежу [18]. Процене су да је вредност светског тржишта микромрежа у 2023. години износила 68,9 милијарди америчких долара, а да ће годишња стопа раста (енгл. *Compound Annual Growth Rate* – CAGR) овог тржишта износити 16,3% у периоду од 2023. до 2030. [19]. Највећи удео инсталисане снаге у микромрежама је у Северној Америци, али ни државе Азије (пре свих, Кина) не заостају много. Када је реч о областима у којима су микромреже биле заступљене, образовни сектор предњачи. Инсталисан је велики број огледних, лабораторијских микромрежа, а кампуси многих универзитета функционишу као енергетски самосталне целине и могу се сматрати микромрежама. Заступљеност микромрежа по регионима и по секторима илустроване су на слици 2а и 26, редом.

Уз то, свеприсутна дигитализација није заобишла ни електричну мрежу [20], [21]. Под дигитализацијом електричне мреже подразумева се употреба великог броја мерних сензора, аутоматизације система и увођење информационих и комуникационих технологија за оптимизацију и унапређење ефикасности електроенергетског система. Дигитализација пружа бољи увид у рад енергетског система, што омогућава оптимално управљање енергијом и ефикаснију расподелу ресурса. Даље, доприноси повећању отпорности енергетског система на сметње и кварове, бољи увид у рад и планирање проширења система. Посебно важно је да дигитализација електроенергетског система доноси развој нових пословних модела и услуга који омогућавају корисницима да боље управљају својом потрошњом енергије и реагују на варијације у ценама електричне енергије. Из ових разлога је и настао појам "паметних мрежа" (енгл. *smart grids*) [22]. Самим тим, омогућена је либерализација и дерегулација електроенергетског система, чиме некада пасивни потрошачи електричне енергије добијају активну улогу у мрежама.



Слика 2: Заступљеност микромрежа: а) према региону [23] и б) према различитим секторима [19].

Предности које се остварују прихватањем концепта микромрежа, односно паметних мрежа сумирано су следеће.

- Микромреже омогућавају лакшу и ефикаснију интеграцију обновљивих извора енергије попут соларне и ветроенергије. Мале и дистрибуиране електране, засноване на обновљивим изворима енергије, могу се поставити близу потрошача, што смањује губитке енергије при преносу и доприноси одрживости система.
- Захваљујући интегрисању обновљивих извора енергије, микромреже свеукупно доприносе смањењу загађења животне средине.
- Микромреже омогућавају локалним заједницама, индустријским или руралним комплексима да постану енергетски независни или бар делимично независни од централизованих енергетских система. То значи да могу производити и користити сопствену електричну енергију.
- Микромреже пружају већу поузданост снабдевања енергијом јер функционишу као самоодрживи системи који се могу одвојити од главног електроенергетског система у случају прекида напајања, кварова и сл. То помаже у смањењу ризика од масовних прекида напајања.
- Микромреже могу боље искористити локалне изворе електричне енергије и топлотне енергије која би иначе била неискоришћена у централизованим системима. Ово такође доприноси смањењу губитака и ефикаснијем коришћењу ресурса.
- Микромреже, посебно ако су опремљене системима за складиштења енергије, могу бити отпорније на кварове и ванредне ситуације, у поређењу с централизованим електроенергетским системима.
- Микромреже могу допринети развоју економија на локалном нивоу.

Ипак, постоје и неке препреке због којих ће имплементација концепта микромрежа потрајати. Пре свега, потребан је значајан капитал за инвестиције у микромреже. Овде претходно поменута децентрализација представља олакшавајућу околност јер више заинтересованих учесника на тржишту повећава шансе да се пројекти што пре започну и заврше. Међутим, и даље постоје одређени технички изазови и потребно је да неке технологије додатно сазру како би порастао број њихових корисника. Уз то, највећа препрека за масовно усвајање концепта микромрежа јесу правне регулативе које регулишу рад микромрежа и њихово учешће на тржишту електричне енергије. У многим земљама оне или нису уопште или нису довољно свеобухватно дефинисане. Међутим, на овоме се интензивно ради и очекују се велики помаци у предстојећем периоду [24].

Узимајући у обзир да су микромреже врло сложени системи, специфични по начину рада и разноврсности припадајућих елемената, управљање радом микромрежа представља један изазован задатак. Да би различити елементи микромрежа (дистрибуирани енергетски извори, складишта енергије, потрошачи) могли бити повезани у једну функционалну целину, неопходни су претварачи енергетске електронике као спрежни елементи. Управо они омогућавају управљање радом микромрежа. У наставку ће бити изложене класификације микромрежа, најважније специфичности рада микромрежа, као и главни правци истраживања који се односе на развој како микромрежа уопште, тако и управљачких структура које руководе радом микромрежа.

2.1.1. Класификација микромрежа

Са становишта природе напајања у микромрежама, може се направити следећа подела микромрежа [25]:

- 1) микромреже с наизменичним напајањем (енгл. alternating current AC),
- 2) микромреже с једносмерним напајањем (енгл. direct current DC),
- 3) хибридне микромреже.

Сматра се да је прве микромреже конструисао Томас Едисон (последње две деценије XIX века) и оне су биле једносмерног типа. Функционисале су као самосталне целине, а електрична мрежа какву данас познајемо тада није ни постојала. Због природе напајања, ефикасност рада ових микромрежа је већа пошто је избегнут утрошак ресурса који се иначе користе за пренос реактивне снаге. Природа једносмерних величина је таква да је управљање њима, па и читавим једносмерним микромрежама, поједностављено. Једносмерне микромреже су посебно интересантне из разлога што велики број потрошача за напајање захтева једносмеран напон [26]. С друге стране, избор склопне и заштитне опреме за ове микромреже захтева већа новчана улагања, тако да је прилагођавање постојећих мрежа оваквој парадигми за сада неисплативо. Уз то, падови напона су вишеструко сложенији проблем, у поређењу са падовима напона у наизменичним микромрежама. Поред тога, промена напонских нивоа у једносмерним микромрежама, иако могућа, никако није једноставна и захтева употребу сложених претварача енергетске електронике. Коначно, данас је највећи број инсталисаних микромрежа по природи наизменичан. Због већ дефинисаних стандарда, познатих шема заштите и принципа управљања, лакше их је инкорпорирати у постојећу мрежу. Из претходно наведених разлога су у овој дисертацији разматране баш микромреже наизменичних струја. Код хибридних микромрежа постоји заједничка наизменична сабирница на коју се повезују наизменични извори енергије, складишта енергије и потрошачи, као и заједничка једносмерна сабирница на коју се повезују уређаји који користе једносмерни напон. Ове две сабирнице повезане су у једну целину користећи спрежни претварач енергетске електронике. У будућности се очекује раст заступљености хибридних електричних мрежа услед тога што је повезивање разноврсних извора и потрошача енергије једноставније и због тога што обједињују предности које имају и микромреже једносмерних и микромреже наизменичних струја.

Са становишта режима рада, микромреже могу бити [27]:

- 1) повезане на главну електричну мрежу (енгл. grid-connected microgrids),
- 2) у самосталном раду у коме нису прикључене на главну мрежу, тј. у острвском режиму рада (енгл. *islanded microgrids*).

Микромрежа би требало да буде оперативна у оба режима рада, а прелазак из једног у други режим рада би требало да буде контролисан, уз задовољавајуће прелазне процесе и без појаве нестабилности у раду. Управо прелазак из једног режима у други, при чему потрошачи и даље имају напајање, представља врло значајну предност микромрежа у погледу сигурности напајања и отпорности на нежељене поремећаје у раду главне електричне мреже у односу на сигурност напајања у традиционалним мрежама. Како присуство круте мреже доприноси мањем одступању учестаности од називне вредности у микромрежи и намеће напон приближно називне вредности у тачки прикључења, острвски режим рада је много изазовнији за управљање и одржавање стабилности пошто тзв. крута мрежа није повезана. С друге стране, вишак енергије у микромрежи може бити предат крутој мрежи уколико је она повезана, али се и из круте мреже може повлачити енергија ка микромрежи, ако постоји мањак енергије, па је управљање микромрежом нешто флексибилније.

Ако се разматрају области примене, микромреже се према типу апликације деле на [19]:

1) микромреже у болницама и другим здравственим установама, које се најчешће користе за обезбеђивање резервног напајања и замењују или смањују употребу дизел-генератора,

- резиденцијалне микромреже, које омогућавају квартовима, градовима и селима да задовоље своје енергетске потребе на локалном нивоу; неке од њих имају улогу да повећају поузданост и одрживост напајања, док друге служе критичним инфраструктурама као што су ватрогасна и полицијска постројења,
- индустријске и комерцијалне микромреже, које су намењене за обезбеђивање енергије за производне процесе у фабричким и другим објектима, затим за пословне зграде, канцеларије и трговинске објекте,
- 4) микромреже у образовном сектору, које се користе за напајања кампуса, делова факултетских зграда, огледне лабораторије за истраживања,
- 5) руралне микромреже, које су пројектоване да обезбеде енергију за мања, удаљена рурална подручја који нису повезани с електроенергетским системом,
- 6) микромреже у лукама, аеродромима, бродовима, за специјалне апликације у свемирским програмима,
- 7) војне микромреже за обезбеђивање поузданог напајања за реализацију војних операција.

2.1.2. Изазови у раду микромрежа

Иако је могућност рада микромреже у острвском режиму рада изузетно значајна и повољна особина ових система, са становишта управљања је овај режим рада изазован. Пре свега, имајући на уму да су доминантни извори енергије обновљиви извори, који су повезани на микромрежу преко претварача енергетске електронике, и да у таквој мрежи има мање или нема уопште обртних маса синхроних машина, јасно је да је у микромрежама смањен природни потенцијал за пригушење прелазних процеса, односно смањена је инхерентна инерција мреже. Инерција се може квантификовати инерционом константом и утиче на трајање раније поменутих прелазних процеса у микромрежи након неког поремећаја [28]. Кад год дође до неравнотеже између производње и потрошње у традиционалним системима, дође до промене учестаности. Ово се у електричним мрежама начелно дешава јер генератори почињу да успоравају услед недостатка активне снаге у систему (вишка потрошње) и самим тим учестаност опада. Слично, са смањењем потрошње, повећава се брзина обртања генератора и учестаност се повећава. Самим тим, неравнотежа у систему постоји увек када учестаност одступа од називне вредности и промена учестаности се користи као индикатор промене у потрошњи енергије. Већа инхерентна инерција у систему спречава велике и брзе промене учестаности дајући систему више времена да поново успостави равнотежу између укупне енергије производње и укупне енергије потрошње. С друге стране, брзина реакције претварача енергетске електронике је много већа него брзина реакције управљачких структура које контролишу рад великих синхроних генератора. Стога, иако инхерентно имају мање инерционих капацитета, у микромрежама постоји прилика да се генерише вештачка инерција, и то употребом напредних управљачких структура које руководе радом претварача енергетске електронике. Дакле, поред традиционалне инерције која у микромрежама потиче од извора у којима се користе синхрони генератори (хидроелектране, геотермални извори, електране на биомасу, неки ветрогенератори), пригушење промена у учестаности у микромрежама може бити реализовано и коришћењем претварача енергетске електронике преко којих се дистрибуирани извори енергије, као и складишта електричне енергије, повезују с остатком микромреже [29].

Даље, када је микромрежа у острвском режиму рада, због недостатка круте мреже, код које је стабилност система инхерентно већа, поред промене учестаности долази и до промене вредности напона у чворовима. Пошто су снаге извора мање у поређењу с класичним електроенергетским мрежама, долази до већих промена у напону када производња или потрошња варирају. Уз то, треба имати на уму да се дистрибуирани извори енергије углавном

повезују на ниже напонске нивое, односно у дистрибутивне мреже. Отпорности водова у дистрибутивној мрежи су значајно веће од отпорности водова у преносној мрежи, па самим тим и падови напона могу бити израженији [30]. Ово утиче и на перформансе појединих управљачких алгоритама који се користе у микромрежама, а о којима ће касније бити речи.

Управљање токовима снаге у микромрежи је такође један од интересантних изазова, посебно имајући у виду интермитентност производње енергије и корелацију између токова активне и реактивне снаге с учестаношћу и ефективном вредношћу напона у микромрежи. Складишта електричне енергије омогућавају повећање поузданости напајања дистрибуираних извора енергије и ублажавање зависности напајања од доба дана и временских прилика. Међутим, већина складишних система захтева велика инвестициона улагања за имплементацију, а неки складишни системи и посебну конфигурацију терена на коме би се користили (на пример, реверзибилне хидроелектране или складишта која користе компримован ваздух). Такође, управљање током енергије се донекле ослања и на временску прогнозу, као и предвиђања потрошње у микромрежи [31].

Пројектовање заштитне опреме је један од највећих изазова у раду микромрежа [32]. Заштитни уређаји би требало да исправно функционишу и у режиму рада прикључене микромреже на главну мрежу и у острвском режиму рада. Струје кратких спојева нису исте у овим режимима. Присуство дистрибуираних извора енергије има утицај и на простирање кварова у мрежи [33]. Додатно, двосмеран ток енергије знатно усложњава проблем координације и селективности заштитних уређаја.

Да би се одржавала равнотежа између производње и потрошње, у микромрежама се тежи да се омогући управљивост радом потрошача. Тренутно, ово се одвија тако што се установе приоритети у потрошњи и осигура напајање најважнијим уређајима, док се мање приоритетним потрошачима напајање може привремено смањити или искључити [34]. Такође, различитим управљачким алгоритмима, уз уграђене напредне системе за мерење потрошње, може се управљати вршним оптерећењем, чиме се спречава преоптерећење мреже и у крајњој линији одлажу улагања у надоградњу система преноса електричне енергије. Уз то, уколико се корисници подстичу да сами управљају својом производњом и потрошњом, пре свега користећи информације о ценама и доступности електричне енергије, могуће је оптимално користити ресурсе у микромрежи [35].

Имајући у виду умрежавање различитих компоненти и употребу рачунарских система у управљању микромрежама, сајбер безбедност представља незанемарив изазов. Наиме, ефикасност управљачких алгоритама се значајно повећава уколико се у микромрежи размењују информације о стањима чворова, мереним величинама, врши агрегација података ради будуће анализе и сл. У складу с тим, пожељна је интензивнија употреба дигиталних уређаја. Међутим, повећање броја ових уређаја смањује сигурност рада микромреже, пошто се повећава вероватноћа отказа неког дигиталног уређаја, комуникационог канала или сајбер напада на исте [36]. Осигуравање аутентификације и идентификације корисника и уређаја у микромрежи помаже у спречавању неовлашћеног приступа и некомпетентног управљања. Даље, коришћење енкрипције и заштите података спречава да неовлашћено лице дође до осетљивих информација персоналног или оперативног карактера [37].

Познато је да у традиционалним мрежама свака држава, односно националне агенције и оператори, законски уређују рад мреже у нормалним режимима рада и у режимима с поремећајима [33]. Скупови ових правила могу се објединити под енглеским називом *Grid codes*. Начелно, иако се подстиче раст броја повезаних дистрибуираних извора енергије, приоритет у управљању електроенергетских система остаје очување стабилности система, која је

дефинитивно угрожена интеракцијом ових извора с мрежом. Стога, *Grid codes* дефинишу ограничења у раду дистрибуираних извора и њихови управљачки алгоритми морају бити усклађени с овим правилима. Очекивања су да ће слични скупови правила бити дефинисани и за микромреже. У овим правилима наводе се дозвољена одступања учестаности и напона мреже од називних вредности пошто су ови параметри најважнији индикатори стабилног рада микромреже. Наравно, *Grid codes* сами по себи не отежавају функционисање микромрежа, али отежавају пројектовање управљачких структура које њима управљају и тренутно се углавном и не разматрају у научној литератури на одговарајући начин. Стога, поставља се питање како ће се до сада развијени управљачки алгоритми ускладити с наступајућим законским регулативама.

Даље, у складу с дерегулацијом и либерализацијом тржишта електричне енергије, више ентитета добија могућност управљања производњом и потрошњом електричне енергије. Услед увећане употребе дистрибуираних извора, повећава се и број потрошача који имају и могућност производње електричне енергије, па постају тзв. купци-произвођачи (енгл. prosumer, комбинација речи producer и consumer). У Србији је током 2021. г. усвојен правни оквир који регулише статус купца-произвођача, лица које и производи и троши електричну енергију тако да се произведена електрична енергија користи за снабдевање сопствене потрошње, а вишак произведене електричне енергије испоручује у мрежу [38]. У свету је врло актуелна тема трговине електричном енергијом од чвора до чвора (енгл. peer-to-peer energy trading), а која би требало да представља главни механизам за управљање енергијом у паметним мрежама [39]. Купцима-произвођачима би требало да се обезбеди могућност активног учествовања у управљању токовима енергије у мрежи кроз трговину енергијом између купаца-произвођача међусобно и између купца-произвођача и (микро)мреже. Овакав приступ подржава масовну инсталацију система који користе обновљиве изворе енергије, смањује цену потрошње електричне енергије купцима-произвођачима, даје им разне погодности ако посвећено учествују у тржишту електричном енергијом и умањује њихову зависност од главне мреже. Уз то, губици у преносу и дистрибуцији електричне енергије се на овај начин драстично смањују. Дакле, овакви видови трговине и размене електричне енергије ће морати бити интегрисани у већ компликовано устројство микромрежа.

Из набројаних изазова у раду микромрежа природно произилазе правци истраживања и могућности за развој електроенергетских система.

2.1.3. Општи правци истраживања у области микромрежа

Узимајући у обзир колико је важно да се дефинитивно направи план о енергетској будућности човечанства, уложени су велики напори да би се обновљиви извори електричне енергије даље развијали као технологија и да би се дошло до што више сазнања о функционисању микромрежа као усвојеној парадигми интеграције дистрибуираних извора. У овој дисертацији, правци истраживања ће бити грубо подељени у ниже побројане групе, док су главни правци у истраживању микромрежа сумирани на слици 3.

– Пројектовање инфраструктуре микромрежа.

Прва интересантна област је можда и више технички него истраживачки оријентисана и тиче се пројектовања саме инфраструктуре микромрежа. Одабир локације инсталације микромреже спрам доступних обновљивих ресурса, анализа доступности ових ресурса на датој локацији, избор типа обновљивих извора и њихове инсталисане снаге спрам захтеване потрошње, анализа потребе за складиштима електричне енергије, одабир типа складишта спрам конфигурације система и цене, распоред складишта, одабир типа напајања микромреже итд., само су неки од захтева који се постављају пред инжењере који се баве овом облашћу [40]. Тип



Слика 3: Правци истраживања у области микромрежа.

конфигурације (радијална или упетљана) и број чворова бира се на основу броја произвођачких и потрошачких јединица и места прикључења на главну мрежу. У суштини, на почетку процеса пројектовања од великог значаја је имати поуздан сет података за анализу – податке о временским условима, критичним потрошачима, правним регулативама које важе за дату област итд. [41].

– Пројектовање заштитних система.

За поуздан и сигуран рад микромрежа врло је важно обезбедити и адекватну заштиту. У ужем смислу, ово се односи на пројектовање заштитних уређаја који би требало да обезбеде адекватан рад микромреже у случају преоптерећења или квара и обезбеђивање одговарајућег степена сајбер безбедности.

О овим аспектима заштите је већ било речи у одељку 2.1.2. Вредно је напоменути да примена вештачке интелигенције даје добре резултате у овој области пошто омогућава адаптивну промену вредности на коју се подешавају заштитни уређаји, а која се мења у зависности од конфигурације и режима рада микромреже [42]. Сензитивност и селективност заштитних уређаја су највећи изазови [43]. Када је реч о сајбер безбедности, могуће је развијање тзв. сајбер-физичких модела микромрежа како би се квантификовала отпорност на сајбер нападе. Оваква квантификација важна је и због праћења напретка у овој области [44]. Комуникациона мрежа је најосетљивија на нападе и стога управљачке алгоритме треба прилагодити тако да се могућност сајбер напада смањи или у потпуности елиминише [45].

Моделовање микромрежа.

Да би се могао предвидети рад микромреже и анализирати њена стабилност у различитим условима рада, моделовање микромрежа је нужно, па су и развој и употреба математичких и софтверских алата за моделовање актуелне теме за истраживање. Динамика понашања дистрибуираних генератора и микромрежа уопштено је врло сложена, те се мора тражити компромис између тога колико је модел детаљан и тачности модела. Врло често се почетно поједностављење модела постиже тако што се приликом моделовања дистрибуираних јединица и не узима у обзир примаран извор енергије, већ само структуре коришћене за управљање те конкретне јединице [46]. Резултат математичког моделовања микромреже је модел у простору стања, или модел малих сигнала који, може бити изузетно сложен у зависности од конфигурације микромреже и примењеног управљања [47]. Овакви модели се користе за утврђивање стабилности малих сигнала (енгл. small-signal stability) система, односно стабилност приликом малих поремећаја око радне тачке. Уз то, може се радити и провера стабилности великих сигнала (енгл. large-signal stability). Најчешће се прибегава доказивању стабилности у смислу Љапунова [48]. Моделовање рада микромреже се може вршити и користећи симулационе софтверске алате, који олакшавају анализу рада микромрежа и они најчешће пружају визуелизацију динамичког понашања, из ког се може стећи увид у стабилност рада у симулираним условима [7]. Концепт дигиталних близанаца (енгл. digital twins) има велику примену у анализи рада дистрибуираних извора и микромрежа уопште пошто омогућава детаљну анализу рада микромрежа с минималним новчаним улагањима [49], [50]. Многе компаније су развиле одговарајуће алате који омогућавају моделовање изузетно сложених система у стварном времену, па се тиме могу тестирати учинци различитих управљачких алгоритама, пратити ефикасност система, утицај старења на перформансе система итд., чиме је могуће микромреже анализирати чак и пре инсталације и пронаћи најбољи могући приступ за њихову употребу. Ако се дигитални близанци буду показали као довољно поуздана платформа за доказивање функционалности микромрежа, отклониће се многе препреке у проналажењу инвеститора и начелно инсталацији система микромрежа.

- Управљање микромрежама.

Управљање микромрежама подразумева успостављање контроле над различитим компонентама и параметрима у микромрежи како би се осигурала ефикасност, стабилност и оптималан рад система. Управљање учестаношћу и вредношћу напона у чворовима су кључни за очување стабилности рада микромреже и за рад микромреже у називним радним тачкама или радним тачкама које су блиске називним у устаљеном режиму [51], [52], [53]. Управљање токовима снага представља главни механизам за оптимизацију губитака у мрежи и остваривање напредних механизама за размену снаге између произвољних чворова мреже [54], [55], [56]. Ова два управљачка аспекта су у тесној спрези, што њихово изучавање и развој припадајућих управљачких структура чини врло сложеним, али и атрактивним за истраживаче, и о њима ће у овом разматрању бити више речи касније.

Даље, узимајући у обзир да није могуће прецизно предвидети производњу и потрошњу снаге у микромрежи, балансирање производње и потрошње представља такође изазован задатак за управљање микромрежама и засад се често ослања на двосмерну комуникацију између потрошача и дистрибутера електричне енергије [57]. Додатно, динамичка промена цена је један од начина да се потрошачи мотивишу да мењају своје навике потрошње енергије и тако допринесу очувању равнотеже између производње и потрошње, превасходно кроз промене образаца потрошње енергије. Цена електричне енергије се може мењати у стварном времену или може бити позната за наредни дан. Додатно, и мрежни оператери или дистрибутери електричне енергије могу директно управљати једним делом потрошње. На пример, у том случају по потреби диспечера могу да се укључују или искључују климатизациони уређаји. Уз то, потрошачи који су своје уређаје дали на располагање за даљинско управљање се додатно награђују. Награђивање потрошача се у пракси тренутно постиже тако што се потрошачима обезбеђује куповина електричне енергије по нижој цени, инсталирају напредни мерни уређаји и/или друга опрема, дају додатни попусти за сваку акцију потрошача која иде у корист остваривању равнотеже и сл. [58]. У крајњој линији, да би се очувала равнотежа потрошње и производње, мање критичним потрошачима се може ускратити напајање електричном енергијом. Наравно, како је ово непопуларна мера, прибегава јој се само кад нема другог решења. С тим у вези, у литератури се могу наћи истраживања на тему оптималних шема искључивања потрошача које у обзир узимају типове потрошача, њихову локацију, економске аспекте искључења, итд. [59].

Купци-произвођачи не само да могу да руководе профилом сопствене потрошње (у складу с тренутним тржишним кретањима или потребама мрежних диспечера, односно саме мреже), већ могу и да управљају својим производним капацитетима, следећи сличне техноекономске параметре. Стога се слободно може рећи да је балансирање односа производње и потрошње један врло сложен процес, за чије управљање постоје и формирају се нови алати.

Руковођење и управљање профилима напона у чворовима микромрежа, управљање токовима снага и балансирање производње и потрошње могу бити анализирани с техничке, имплементационе и употребне стране, а могу се посматрати и кроз призму оптимизационих метода. Предмет оптимизације могу бити и минимизација трошкова производње енергије, максимизација профита, минимизација трошкова одржавања елемената у микромрежи, размена електричне енергије с мрежом, очување сигурности рада микромреже, рационално коришћење ресурса, односно продужетак животног века елемената, смањење емисије штетних гасова итд. Често су овакве врсте оптимизација важне узимајући у обзир и то да је инвеститорима важно да микромрежа што пре буде оперативна тако да им се инвестиција врати у предвиђеном временском периоду. У циљу спровођења неке специфичне оптимизације, често се врши минимизација или максимизација дефинисане тежинске (енгл. cost) функције која у обзир узима више фактора, односно критеријума. Методе оптимизације се грубо могу груписати у класичне и модерне [60]. Класичне, односно традиционалне методе оптимизације обухватају: линеарно програмирање, програмирање, нелинеарно геометријско програмирање, квадратно програмирање, динамичко програмирање, целобројно програмирање, циљно програмирање, вишекритеријумско програмирање, методу унутрашње тачке, теорију игара, итд. У модерне методе се, између осталих, могу сврстати: генетски алгоритми, симулирано каљење, методе засноване на кретању колоније мрава, роја честица, диференцијалној еволуцији, неуронским мрежама, фази оптимизацијама, итд. Резултати различитих оптимизационих метода су нови управљачки параметри који побољшавају рад микромреже спрам жељеног циља, референце активних и реактивних снага, активациони сигнали за коришћење складишта електричне енергије и сл. Дакле, бројност управљаних величина и аспеката функционисања микромрежа су водили и воде развоју различитих оптимизационих метода, те је и ово значајна истраживачка област када се говори о наступајућим електроенергетским системима.

У складу с темом дисертације, у наставку ће се приложити детаљна анализа актуелног стања у области истраживања која се бави развојем и имплементацијом управљачких структура које управљају напонским профилима у микромрежи и разменом енергије између произвољних чворова мреже. Остали поменути правци истраживања из области микромрежа, мада битни, остаће изван опсега овог рада.

2.2. Актуелно стање у научној области докторске дисертације

Иако ће ова дисертација преиспитати "традиционалан" начин организовања управљачких структура које руководе радом микромрежа, а спрам којег се развијала и структурирала научна грађа, на овом месту ће се актуелно стање у области ипак представити по следу меродавне научне литературе. Разлог за то се крије у жељи да се на једноставан начин предочи историјски развој припадајућих управљачких алгоритама како би се кроз критички осврт тих решења природно отворио пут ка приказу управљачког алгоритма који ова дисертација предлаже. С друге стране, задатак овог поглавља није да се да свеобухватан преглед научне литературе која се уопштено бави управљањем микромрежама. Такав скуп радова није могуће практично приложити с обзиром на обухват те научне грађе. Ипак, анализирани научни радови нуде кључна решења и приступе у реализовању различитих управљачких структура од значаја за управљање микромрежама, те представљају добру полазну основу за даље истраживање. Задатак овог потпоглавља је да се предоче правци развоја у датој области и да се кроз критички осврт решења која се баве нижим управљачким нивоима истакну њихове мањкавости и тиме оправда предмет дисертације, док остали аспекти управљања микромрежама нису у ужем фокусу.

Према архитектури, управљачке стратегије у микромрежама се начелно могу поделити на централизоване, децентрализоване и дистрибуиране. Централизовано управљање је карактеристично за традиционалне мреже и као такво је првобитно и било доминантно коришћено за управљање радом микромрежа [61], [62]. Код оваквог управљања централни контролер је агрегатор свих података и, директно или индиректно, управља меродавним величинама у свим чворовима мреже водећи рачуна о стабилности мреже [63]. Све управљиве компоненте микромреже су међусобно повезане комуникационим везама. Постојање комуникационе мреже је у овом случају неизбежно, што значи да се у случају додавања нових јединица и комуникациона инфраструктура обавезно мора мењати. Посебан проблем представља могуће кашњење у размени података између контролера у микромрежи. Оно мора бити на одговарајући начин усклађено с брзином извршавања контролних функција. Иако су перформансе оваквог система задовољавајуће јер се оптимизациони алгоритми могу извршавати на централном контролеру, недостатак робусности, скалабилности и, што је најважније, немогућност управља системом уколико централни контролер из било ког разлога не врши своју функцију, ипак чине централизовано управљање потенцијално непоузданим. Из овог разлога је најбоље да се евентуална централизација управљања врши само на хијерархијски вишим нивоима управљања и приликом управљања мањим микромрежама (с мањим бројем чворова који су међусобно просторно блиски) [64].

Алтернативе централизованом управљању су децентрализовано и дистрибуирано управљање. Код децентрализованог управљања свака управљива компонента микромреже, које се најчешће своде на дистрибуиране јединице, има свој контролер, а међусобне комуникације, која се односи на временски критичне управљачке функције, између ових контролера нема [65]. Сваки контролер обрађује своја локална мерења и на основу њих одређује даље управљачке акције. Пошто комуникациона мрежа између јединица није потребна, поузданост таквог система се повећава. У овом случају, систем је у потпуности скалабилан, што значи да може да се без последица изврши реконфигурација система, односно прикључење нових јединица (једини ограничавајући, али не и занемарљиви, фактори су димензије и капацитети водова који спајају чворове мреже). С друге стране, пошто се користе само локална мерења, дискутабилно је постизање глобалног оптимума управљања пошто контролери не могу да размењују информације. Узимајући у обзир да се не обрађује велики број информација (због тога што се мерења врше локално), контролери не извршавају исувише комплексне програме који могу да успоре рад система и доведу до ангажовања великих процесорских капацитета, меморије и других ресурса унутар контролера [66].

Као компромис између централизованог и децентрализованог управљања настало је дистрибуирано управљање [67]. И дистрибуирано управљање је у основи децентрализовано, али је карактеристично по томе што су поједини, најчешће суседни, контролери ипак повезани једносмерним или двосмерним комуникационим везама. На овај начин је омогућен проток информација између јединица и самим тим је лакше постићи глобални оптимум (при чему глобални оптимум може бити дефинисан на разне начине). Већина дистрибуираних управљачких алгоритама заснива се на примени теорије вишеагентних система (енгл. multi-agent systems – MAS) [68] и теорије игара [69]. Ово подразумева да сваки контролер, уз припадајући претварач енергетске електронике и осталу опрему, представља интелигентног агента који може да доноси одлуке и сарађује с другим агентима у циљу постизања заједничког циља. Сваки агент је самосталан и има способност да одлучује и дејствује на основу својих локалних информација и локалних и глобалних циљева. С друге стране, акције агената су међусобно координисане и акције једног агента зависе и од акција других агената. Теорија игара нуди бројна решења када је реч о координацији рада агената и решавању могућих конфликата између њих. Игре које агенти играју могу бити некооперативне и кооперативне [70]. Теорија некооперативних игара примењује се када се агенти такмиче за неке ресурсе или када желе да обезбеде што повољнији исход трговинских преговора. У овим случајевима они се понашају независно, с циљем да максимизују своју индивидуалну корист, без активног сарађивања с другим агентима. Код кооперативних игара агенти међусобно сарађују и заједно раде на решавању проблема и постизању заједничких циљева. Дистрибуирано управљање стога обједињује предности централизованог и децентрализованог управљања, али с друге стране може бити нешто захтевније за имплементацију.

Поред вишеагентних система и теорије игара, у напредне управљачке алгоритме може се уврстити и управљање засновано на предиктивним моделима (енгл. model predictive control – MPC) [71]. Ова врста управљања омогућава оптимизацију рада система под одређеним, унапред дефинисаним, ограничењима. Развој предиктивног модела игра кључну улогу када је реч о перформансама управљања. Што је модел тачнији, резултати су бољи, али најчешће је потребно правити компромис између сложености модела и његове тачности. Уз то, код овог типа управљања често се врши минимизација дефинисане тежинске функције и стога је неопходно добро проценити вредност тежинских фактора. Додатно, како је врло захтевна за имплементацију у контролерима са становишта коришћења ресурса, пожељно је увећавање корака дискретног извршавања управљања. Међутим, ово има лош утицај на резултате рада управљања, па је и овде неопходно наћи компромисно решење [72].

Која год да се управљачка стратегија примењује, због великог броја управљачких задатака различитих приоритета (управљање учестаношћу и модулом напона у чворовима микромреже, управљање токовима активне и реактивне снаге, дељење оптерећења између дистрибуираних јединица, размена снаге с главном електричном мрежом у тачки прикључења итд.) и сложености система, управљачке структуре у микромрежама су готово увек организоване хијерархијски [73].

Хијерархијска структура управљања је приказана на слици 4, а састоји се од терцијарног, секундарног, примарног и нултог нивоа управљања. Управљачке структуре које припадају сваком од ових нивоа извршавају се на различитим временским скалама. Управљачке структуре које припадају нултом нивоу управљања извршавају се најбрже – на нивоу микросекунди или милисекунди. Структуре које потпадају под примарно управљање се најчешће извршавају на нивоу милисекунди, док оне које су обухваћене секундарним нивоом управљања на нивоу секунди или минута. Коначно, терцијарно управљање обухвата управљачке структуре које се извршавају најспорије, најчешће на петнаестоминутном интервалу, сату, или чак и дану [74].

Терцијарни ниво управљања

Задатак терцијарног нивоа управљања је да управља разменом енергије између главне мреже и микромреже, затим између више суседних микромрежа повезаних у кластере, тј. мултимикромреже, или унутар једне микромреже [75], [76]. Самим тим, дефинише координацију рада различитих дистрибуираних извора користећи податке о временској прогнози, ценама



Слика 4: Хијерархијски организована структура управљања микромрежама.

електричне енергије и сл., а управљање током енергије се врши на основу економских, техничких и еколошких критеријума, или њиховом комбинацијом. Када се установи какав је ток енергије потребан, референце се даље прослеђују секундарном нивоу управљања. Избор доброг терцијарног управљања доноси највише користи власницима ресурса у микромрежи, као и предузећима која управљају главном електричном мрежом. Често се терцијарно управљање своди на оптимизациони проблем чији је задатак да се минимизује цена производње активне снаге, минимизују губици активне снаге, максимизује размена снаге с главном мрежом итд. [77]. Изводи се централизовано или дистрибуирано.

У [78] аутори су у централизовано терцијарно управљање интегрисали управљање квалитетом електричне енергије. У овом раду оптимизациони метод је тако формулисан да све дистрибуиране јединице у микромрежи доприносе компензацији несиметрије напона. Као оптимизациони метод коришћен је генетски алгоритам. Оптимални ток снага у острвским микромрежама истраживан је у [79]. Аутори сами наглашавају да секундарни ниво управљања нису ни анализирали у свом истраживању, те се референце, односно одређени параметри, директно прослеђују примарном нивоу управљања. Вршена је минимизација губитака активне снаге, а до решења се дошло итеративно, уз употребу Лагранжових множитеља. Анализом добијених резултата може се доћи до закључка да равномерна расподела снага по дистрибуираним јединицама и нема много смисла с аспекта оптималног рада микромреже. Природно је да дистрибуирани генератори ближи потрошачима производе више снаге од оних који су им даљи, како би губици преноса енергије били мањи, (наравно, уколико је такав профил производње могућ). Оптимизациони метод заснован на мешаном целобројном нелинеарном програмирању је примењен у [80] како би се постигла минимизација трошкова рада микромреже (трошка електричне енергије која се повлачи из главне мреже и трошка складиштења електричне енергије), уз коришћење предвиђања оптерећења применом дубоког учења. Овај проблем своди се на проблем решавања оптималног тока снага кроз чворове микромреже. Слична вишекритеријумска линеарна оптимизација је предложена у [81]. Проблем оптималног тока снага је решаван и у [82], [83], [84], [85], [86], а примењена је централизована управљачка парадигма.

Дистрибуирано терцијарно управљање је истраживано у [87], [88]. Вредно је напоменути да су технике појачаног учења (енгл. *reinforcement learning*) добиле примену у овој области, па дистрибуиране јединице – агенти имају способност да уче и бивају награђивани за добре акције како би се подстицали да доносе исправне одлуке у динамичком систему попут микромрежа [89]. Ипак, скалабилност система и припадајућих управљачких структура још увек представља највећу препреку у широј примени ових и њима сличних техника.

Секундарни ниво управљања

Секундарни ниво управљања је подређен терцијарном и од њега добија улазне управљачке величине. Има улогу да учестаност микромреже и вредност напона у чворовима поставља на њихове називне вредности или вредности блиске називним вредностима. Ово је много изазовнији задатак када је микромрежа у острвском режиму рада због мање инерције у микромрежи, мање инсталисане снаге и непредвидљивости производње обновљивих извора енергије. Важно је напоменути да поједини истраживачи проблем одређивања токова снага унутар једне микромреже приписују управо секундарном, а не терцијарном нивоу управљања [71]. У сваком случају, у устаљеном стању, учестаност мора бити називна како би се успешно могао детектовати поремећај који води прелазном одступању учестаности од називне вредности. С друге стране, ако је потребно остварити задату размену снага међу чворовима микромреже, напони у чворовима не могу бити једнаки називној вредности, већ приближни тој вредности [90]. Стога, секундарни ниво управљања мора да руководи напонско-фреквенцијским приликама у појединачним чворовима како би се испунили управљачки захтеви које поставља терцијарни ниво управљања мора да руководи напонско-фреквенцијским приликама у појединачним чворовима како би се испунили управљачки захтеви које поставља терцијарни ниво управљања мора да руководи напонско-фреквенцијским приликама у појединачним чворовима како би се испунили управљачки захтеви које поставља терцијарни ниво управљања. Секундарно или децентрализовано.

Централизовани приступ временом је постао најмање интересантан истраживачима, због већ поменутих недостатака. Централни контролер користи се у [91] и врши вишекритеријумску оптимизацију рада микромреже са становишта жељене вредности напона у чворовима и размене реактивне снаге међу дистрибуираним јединицама. Да би се пронашло оптимално решење, постављена су следећа ограничења: укупна произведена снага мора бити мања од максималног капацитета дистрибуиране јединице, мора се уважити максимални капацитет водова којима су јединице повезане и дефинисати дозвољени опсег учестаности. За решавање оптимизационог метода примењен је примарно-дуални алгоритам унутрашње тачке. Међутим, приметно је да су параметри анализиране мреже такви да је однос *X/R* водова у најбољем случају реда неколико стотина, што није случај чак ни у преносним мрежама. Секундарна управљачка структура која у обзир узима складишта електричне енергије је разматрана у [92]. Излазна снага дистрибуираних јединица је подешавана спрам доступних капацитета складишта. Претпостављено је да свака дистрибуирана јединица има могућност складиштења електричне енергије.

Највише помака, када је реч о секундарном управљачком нивоу, има код примене дистрибуиране архитектуре. Различити робусни приступи дати су у литератури [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99]. Управљање засновано на консензусу између јединица је примењено у [100]. Комбинација дистрибуираног и предиктивног управљања је предложена у [101], [102], [103]. Дистрибуирани управљачки алгоритми захтевају постојање ретке комуникационе мреже, те се поставља питање њихове ефикасности у случају нестанка комуникационе везе или кашњења у размени информација. Стога, анализиран је утицај кашњења у комуникационој мрежи у [93], [95], [104], [105], [106]. Наравно, с већим кашњењима већи су и непожељни ефекти на одзиве, али стабилан рад микромреже се најчешће може очувати. Аутори су у [107] искористили пропорционално-интегрални (ПИ) регулатор за регулацију напона и учестаности у сваком чвору микромреже. Дистрибуирани усредњавајући ПИ регулатор употребљен је у [90] како би се вршило враћање вредности учестаности и напона на називну вредност. Неопходно је да суседне јединице комуницирају како би направиле консензус о вредности примењеног интегралног дејства. На сличан начин аутори су у [108] модификовали ПИ регулатор за секундарно управљање додајући посебан консензус члан на пропорционално-интегрално дејство. Фракциони ПИ контролер је дизајниран у [109] за секундарно управљање учестаношћу, а примењен је и измењени алгоритам црне рупе како би се прорачунали параметри регулатора. Растерећивање комуникационе мреже и тиме поузданији рад се у [110] постиже тако што се секундарни контролер активира само по потреби, у случају неког значајног поремећаја. Код дистрибуираних секундарних управљачких алгоритама је у последњој деценији било највише помака и изнедрила су се разна решења, али са становишта једноставности управљачке структуре и потребних ресурса, децентрализована архитектура има предност.

Децентрализовани управљачки алгоритми унутар секундарног управљачког нивоа су коришћени у [111], [112], [113], [114]. У [111] су аутори применили два различита контролера учестаности (тзв. филтрирани пропорционални и интегрални контролер), који нису истовремено у функцији, а описана је и процедура одабира активног контролера. Након сваког поремећаја у систему одлучује се да ли је потребно променити контролер. На овај начин постигнут је брз прелазни процес у одзиву учестаности. Сложена секундарна управљачка структура која се састоји из три различите подструктуре је предложена у [112]. Свака подструктура је активна у засебном режиму рада микромреже. Разликују се три режима која су временски сукцесивна. У првом режиму рада се одржава тачно дељење снаге између дистрибуираних генератора. Затим се процењује да ли постоји захтев за покривање додатног оптерећења и ажурира се расподела оптерећења између дистрибуираних јединица како би се израчунали нови командни сигнали за секундарно управљање у другом режиму, који се надаље поново ажурирају у трећем режиму да би се уклонила одступања у учестаности и напону од називних вредности у тачки прикључивања. Линеарни квадратни регулатор је коришћен у [113] како би се пронашли параметри адаптивног ПИ регулатора који се користи за управљање учестаношћу. Међутим, ово се ради офлајн, тј. пре почетка самог управљања, тако да контролер губи могућност адаптивне промене параметара. У [114] врши се секундарно управљање учестаношћу и омогућава се дељење реактивне снаге између јединица. Међутим, да би се ово омогућило, захтева се синхронизација рада дистрибуираних јединица. Да би се синхронизација извршила, аутори су предложили коришћење малоталасне (енгл. wavelet) трансформације уместо употребе комуникационе мреже. Како би дистрибуирана јединица повезана у једном чвору могла да процени учестаност, вредност напона, струје, активне и реактивне снаге осталих чворова у микромрежи, коришћени су различити приступи. У [115] је коришћен *sliding mode* естиматор, у [116] дуална композиција, а у [117] је примењен Калманов филтер. Потом су изведени управљачки закони у којима чворови заједно, тј. кооперативно раде на успостављању називне вредности учестаности, као и дељењу реактивне снаге између дистрибуираних јединица. У [115] су за рестаурацију фреквенције и/или напона примењени интегрални регулатори, у [116] решава се оптимизациони проблем применом квадратног програмирања, а у [117] је коришћено предиктивно управљање. Међутим, пошто су управљачки закони изведени тако да свака дистрибуирана јединица користи стања других чворова, поставља се питање поузданости управљања уколико постоји грешка у естимацији стања осталих чворова.

Примарни ниво управљања

Примарни ниво управљања добија управљачке улазе од секундарног нивоа управљања и њему је подређен. Улога примарног нивоа управљања је да задржи стабилност микромреже након неког поремећаја ограничавањем промене учестаности и напона у чворовима. Поједини аутори истичу да је задатак примарног нивоа управљања и да обезбеди тачно дељење активне и реактивне снаге оптерећења спрам називне снаге дистрибуираних јединица у микромрежи.

Централизовано примарно управљање или тзв. концентрисано управљање је одавно напуштено услед потребе за постојањем поуздане комуникационе мреже [118]. Код оваквог типа

управљања обавезно се мере излазна струја и напон сваке дистрибуиране јединице, прорачунавају активна и реактивна снага и централни контролер на основу тога процењује да ли јединице подједнако деле оптерећење и одлучује какве референце да задаје свакој дистрибуираној јединици. Јединице морају да раде синхронизовано, а за потребе синхронизације свака од њих користи фазно-закључану петљу (енгл. *phase-locked loop* – PLL). Колико год учинци централизованог управљања били добри, у случају отказа централног контролера није могуће задржати стабилност микромреже пошто централни контролер више не може да управља учестаношћу и вредношћу напона у чворовима микромреже. Овакав догађај најчешће води ка каскадном искључењу дистрибуираних јединица и потрошачи у микромрежи остају без напајања. Стога, овакав концепт се никако не примењује када је реч о примарном нивоу управљања.

Како би се избегао колапс у раду микромреже уколико дође до квара у једној тачки, као алтернатива класичном централизованом управљању примењено је *master-slave* управљање [119]. Контролер једне дистрибуиране јединице преузима улогу *master* контролера, односно централног контролера, док су остале јединице *slave* типа и подређене су централном контролеру. Оне примају команде од централне јединице. Иако је и за ово управљање потребна поуздана комуникациона мрежа, остварују се и неке предности. Уколико централна јединица не може да врши своју дужност, нека од подређених јединица може да преузме њену улогу. На овај начин увећава се поузданост система. Међутим, у оваквој конфигурацији само централна јединица може да регулише напон микромреже, што аутоматски не даје оптималне резултате. Подређене јединице су задужене за инјектовање активне и реактивне снаге.

Даље унапређење у примарном управљању може се остварити применом дистрибуиране управљачке архитектуре која, за разлику од централизоване, не захтева постојање комуникационих веза између свих, већ само између суседних јединица, односно чворова. Регулација производње активне и реактивне снаге је разматрана у [120], а примењен је нелинеарни контролер заснован на примени линеаризације повратном спрегом и дистрибуираној архитектури. Дистрибуирани управљачки алгоритми примењени су и у [121], [122], [123], [124], [125], [126]. Размењујући међусобно информације, контролери успевају да извршавају различите задатке, попут одржања жељеног профила напона, задате учестаности, расподеле снага оптерећења и сл. Дистрибуирано управљање се често назива и *peer-to-peer* (P2P) управљањем пошто се консензус и размена информација врши од чвора до чвора. Ипак, и овакво управљање захтева постојање комуникационе мреже, а због њене сложености углавном се користи за хијерархијски више управљачке нивое. На тај начин смањује се број радних задатка које извршавају контролери који локално управљају радом једне дистрибуиране јединице.

Децентрализовано друп (енгл. *droop*) управљање је најчешће коришћен тип примарног управљања, усвојен од стране највећег броја истраживача, а засновано је на примени линераних или нелинеарних друп карактеристика. Највећу предност овом управљачком методу дају једноставан коначни облик и елиминација потребе за било каквом комуникацијом између јединица. Пошто управљачки алгоритам развијен у овој дисертацији има поједине сличне карактеристике, децентрализовани друп управљачки алгоритми ће бити засебно и детаљно анализирани у одељку 2.2.1.

Нулти ниво управљања

У микромрежама наизменичних струја, каква се разматра и у овој дисертацији, дистрибуирани извори се на AC сабирницу прикључују користећи индиректне AC/AC или DC/AC претвараче енергетске електронике, у зависности од природе излазног напона који извор производи. Неретко је потребна и каскадна веза више претварача. Свакако најчешће коришћен претварач је трофазни, мосни, транзисторски претварач (инвертор) с два или више нивоа у произведеном излазном напону [118]. Задатак нултог нивоа управљања јесте директно управљање електричним величинама на излазу из инвертора.

Инвертори се могу повезати на микромрежу преко спрежног филтра L, LC, или LCL типа [127]. Данас се превасходно користи LCL филтар због тога што су његови калемови мањих димензија (и цена), у поређењу с калемовима које се користе у L и LC филтрима, и због тога што обезбеђују приближно простопериодичан напон на излазу. С друге стране, због могуће појаве резонанције унутар филтра, потребно је применити неке од стратегија за пасивно или активно пригушење филтра [128]. Уколико је приликом управљања претварачем примењена нека метода за активно пригушење резонанције филтра, и та метода припада нултом нивоу управљања.

Када је реч о управљачкој структури за инверторе коришћене у мрежама, њен неизоставан део је управљачка петља која омогућава контролисано инјектовање струја у електричну мрежу. Код инвертора повезаних на мрежу, референтне вредности струје се одређују на основу жељених напонских прилика у мрежи или на основу жељеног тока активне и реактивне снаге у мрежи. У првом случају, управљачка петља која је надређена струјној петљи управља напоном у тачки прикључења инвертора. Уколико се као излазни филтар инвертора користи LCL филтар, то ће бити напон на оточно повезаном филтарском кондензатору. Дакле, регулатор напона задаје струјне референце, док регулатор струје одређује потребну вредност напона коју инвертор треба да оствари на свом излазу. Ова вредност напона води се у модулатор, управљачку структуру која за задатак има прорачун потребних фактора испуне и генерисање побудних сигнала за полупроводничке прекидачке компоненте у инвертору. Ако је потребно директно управљати током снага, могуће је постићи да активна компонента струје управља током активне снаге, док реактивна компонента струје управља током реактивне снаге.

Како инвертори, поред традиционалних мрежа, налазе примену у микромрежама, тако су истраживачи уводили и нове појмове када је реч о управљању ових претварача енергетске електронике. Тако су се издвојиле три групе инвертора који се користе у микромрежама, односно системима с паралелним радом инвертора [129]:

- инвертори који успостављају мрежу (енгл. grid-forming inverters) успостављајући инвертори,
- инвертори инјектују снагу у мрежу (енгл. grid-feeding inverters) снабдевајући инвертори,
- инверторе који подржавају рад мреже (енгл. grid-supporting inverters) подржавајући инвертори.

Последње две групе се у литератури обједињено називају инверторима који прате рад успостављене мреже (енгл. *grid-following inverters*).

Успостављајући инвертори се управљају тако да се директно контролишу напон и учестаност у тачки прикључења и спрам тога производе одређену снагу. Могу се поједностављено еквивалентирати идеалним напонским изворима. Најчешће се користе у острвском режиму рада микромрежа. Управљају се коришћењем две каскадно везане петље – спољна петља је задужена за управљање напоном, а унутрашња за управљање излазном струјом. Управљање се најчешће изводи у обртном директно-попречном (енгл. *direct-quadrature – dq*) координатном систему. Регулација q компоненте напона на нулту вредност за резултат има да ток активне снаге зависи само од d компоненте струје и ток реактивне снаге зависи само од q компоненте струје.

Снабдевајући инвертори се управљају тако да повлаче из или инјектују у већ побуђену мрежу тачно дефинисану вредност активне и реактивне снаге. Могу се поједностављено еквивалентирати идеалним струјним изворима. Овај тип управљања користи се када је

	Успостављајући инвертори	Снабдевајући инвертори	Подржавајући инвертори
Упрошћени репрезент	идеални напонски извор	идеални струјни извор	напонски извор с редно повезаном импедансом или струјни извор
Тип управљања	Vf управљање	PQ управљање	друп управљање
Излазна импеданса	нулта	бесконачно велика	коначна, ненулта
Излазна учестаност	фиксна	мрежна	одређена друп карактеристикама
Режим рада микромреже	острвски	прикључена на главну мрежу	и острвски режим и режим у коме је микромрежа прикључена на главну мрежу

Табела 1: Особине различитих типова паралелно повезаних инвертора.

микромрежа прикључена на главну мрежу. Ове јединице морају бити синхронизоване на мрежу да би се остварило распрегнуто векторско управљање снагама. У ову сврху се користи PLL синхронизациона јединица. Када се добију тачне референце снага од виших управљачких нивоа, прорачунавају се струјне референце, тако да је за њихово управљање, поред PLL јединице, довољна само струјна управљачка петља.

Подржавајући инвертори обједињују функције претходна два типа и управљају се тако да могу да производе напон одређене учестаности који се дефинише на основу захтеване активне и реактивне снаге. Заправо, друп управљање је у највећем броју случајева интегрисано у управљање подржавајућих инвертора. Овакви инвертори се могу користити и када је микромрежа прикључена на главну мрежу, али и у острвском режиму рада. Управљање ових инвертора је каскадно структуирано – на основу друп карактеристика одређују се потребни напон и учестаност у тачки прикључења, потом се они прослеђују напонској петљи, а напонска петља обезбеђује референце за струјну петљу (као код успостављајућих инвертора). Најважније карактеристике све три групе инвертора у паралелном раду могу се наћи у табели 1.

За струјну и напонску управљачку петљу се најчешће користи ПИ регулатор због своје једноставности и могућности елиминисања грешке у устаљеном стању. Међутим, могуће је по потреби применити и друге управљачке структуре. Оне најчешће подразумевају употребу пропорционално-резонантних регулатора, предиктивног, хистерезисног, фази, *sliding-mode*, *dead-beat* и H_∞ управљања [129], [130].

У следећем одељку ће бити детаљније анализиране децентрализоване управљачке структуре које се извршавају у оквиру примарног нивоа управљања. Како управљачка структура развијена у оквиру ове дисертације потпада у исту групу, наредно потпоглавље би требало да пружи увид у актуелно стање у овом научном пољу.

2.2.1. Примарно децентрализовано управљање микромрежама

Као што је напоменуто, срж ових управљачких алгоритама представља друп управљање које омогућава управљање и учестаношћу и вредношћу напона у тачки прикључења кроз одговарајуће инјектовање активне и реактивне снаге. Иницијална мотивација за употребу оваквог приступа јесте опонашање динамике рада синхроних генератора у мрежама с доминантно обновљивим изворима енергије ради очувања стабилности система. У наставку ће бити изложене технике које се користе, почевши од основног друп управљања.

Pf – QV друп управљање

Основна друп техника назива се Pf - QV друп управљање пошто се темељи на корелацији између промене активне снаге и фреквенције, као и реактивне снаге и напона у чворовима мреже. Активна и реактивна снага коју сваки претварач размењује с трофазном мрежом у симетричном режиму рада чије су импедансе доминантно индуктивне могу бити израчунате као:

$$P = \frac{V \cdot E}{X} \sin \delta, \qquad (2.1)$$

$$Q = \frac{V^2 - V \cdot E \cdot \cos \delta}{X},\tag{2.2}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{d\delta}{dt},\tag{2.3}$$

где је *E* вредност модула фазора линијског напона у тачки прикључења, *V* је модуо фазора линијског напона на излазу из претварача, δ је угао између ова два фазора напона у било ком временском тренутку, ω је угаона учестаност фазора напона (*f* представља учестаност, односно фреквенцију напона) и *X* представља вредност еквивалентне реактансе између претварача и тачке прикључења. Подразумева се да је референтни ток снаге од претварача ка мрежи. Угао δ се назива углом снаге и најчешће узима вредност између 30° и 45° , како би лакше очувала резерва стабилности система и да би се остварили прихватљиви губици снаге. Стога, вредност активне снаге директно зависи од овог угла, док вредност реактивне снаге зависи од напона на излазу претварача (односно од разлике напона на излазу из претварача и напона у тачки прикључења). На основу дефинисане везе између угла снаге и учестаности у (2.3), може се закључити да је протоком активне снаге могуће директно утицати на промену учестаности у систему. Узимајући у обзир сличну динамику која је присутна у традиционалним електроенергетским системима, у којима су главни произвођачи електричне енергије синхрони генератори, могу се записати једначине две друп карактеристике – по учестаности *Pf* (2.4) и по напону *QV* (2.5) [131]:

$$f = f^{ref} - k_P \cdot \left(P - P^{ref}\right) + \Delta f, \tag{2.4}$$

$$V = V^{ref} - k_Q \cdot \left(Q - Q^{ref}\right) + \Delta V. \tag{2.5}$$

У друп једначинама фигуришу следеће величине: f је остварена учестаност, f^{ref} задата учестаност, V остварена вредност напона, V^{ref} задата вредност напона, P и Q представљају излазну активну и реактивну снагу једне дистрибуиране јединице P^{ref} и Q^{ref} су задате вредности активне и реактивне снаге. Коефицијенти који одређују нагиб друп карактеристика носе ознаке k_P и k_Q , $k_P, k_Q \in \mathbb{R}^+$. Опционо, у друп једначинама могу постојати и додатни чланови Δf и ΔV , чија је улога да врше корекцију друп карактеристика кроз њихово вертикално издизање или спуштање. Ове додатне чланове секундарни ниво управљања прослеђује примарном нивоу. На сликама 5а и 56 дат је облик Pf и QV друп карактеристика, редом. Такође, на истим сликама означено је и кретање радне тачке у случају поремећаја.

Радна тачка у којој су задате називне вредности активне и реактивне снаге ($P^{ref} = P_n$ и $Q^{ref} = Q_n$) и називне вредности учестаности и напона ($f^{ref} = f_n$ и $V^{ref} = V_n$), означена је бројем 1 на сликама 5а и 56. Уколико дође до промене у потрошњи, настаје неравнотежа између



Слика 5: Облик Pf (a) и QV (б) друп карактеристика и кретање радне тачке након поремећаја.

произведене и потрошене активне и реактивне снаге, што за мрежу представља поремећај (у овом контексту се не мисли на поремећаје приликом настанка квара).

У наставку ће се анализирати кретање радне тачке на Pf друп карактеристици. На пример, уколико је дошло до повећања потрошње активне снаге са задате вредности P^{ref} на нову вредност P', учестаност ће почети да пада и достићи ће нову вредност f', што се види са слике 5а. Тиме се долази у радну тачку означену бројем 2. Тада мрежа ради на учестаности која није задата, али је промена учестаности након поремећаја заустављена. Овде се задатак примарног нивоа управљања завршава. Пошто мрежа треба да ради на називној учестаности, надаље је потребно активирати секундарни ниво управљања и издићи друп карактеристику за члан Δf . Када се то учини, добија се радна тачна с задатом називном учестаношћу и новом снагом производње P'. Ова радна тачка означена је бројем 3.

Што се тиче QV друп карактеристике, кретање радне тачке приликом поремећаја је следеће. Ако у мрежи дође до, на пример, пада реактивне снаге с референтне вредности Q^{ref} на нову вредност Q', напон пратећи друп карактеристику расте до вредности V' (радна тачка 2 на слици 56). Овим је примарни ниво управљања успешно зауставио промену напона и надаље секундарни ниво управљања врши спуштање друп карактеристике (за члан ΔV) како би се остварила радна тачка 3 с референтним напоном V^{ref} и новом траженом реактивном снагом Q'.

Главни недостатак друп управљања је што, без деловања секундарног нивоа управљања, вредности напона и учестаности могу значајно одступати од називних. Имајући у виду да је време извршавања секундарног нивоа управљања свакако спорије од друп управљања (које припада примарном нивоу), долази се до закључка да ће нека девијација учестаности и вредности напона морати постојати. Такође, могуће је утицати на расподелу снаге потрошње међу јединицама одговарајућим подешавањем нагиба друп карактеристика сваке јединице, тј. одређивањем коефицијента k_P и k_Q . Приближна пропорционална расподела активних и реактивних снага постиже се када су ови коефицијенти обрнуто пропорционални називној активној и реактивној снази јединице [132]. Што су коефицијенти већи, постиже се тачнија расподела активне и реактивне снаге међу јединицама, али и веће одступање у учестаности и напону. Са друге стране, мања вредност ових коефицијента води мањим одступањима, али и мање тачној расподели снага. Треба имати на уму да се коефицијенти k_P и k_Q не могу у потпуности слободно бирати јер имају значајан утицај на стабилност система. Пошто је учестаност микромреже (и мрежа уопште) глобална величина у устаљеном и квазиустаљеном

Табела 2: Уобичајени параметри водова.			
Тип вода	<i>R</i> [Ω/km]	X [Ω/km]	<i>R/X</i> [r.j.]
нисконапонски вод	0,642	0,083	7,7
средњенапонски вод	0,161	0,190	0,85
високонапонски вод	0,06	0,191	0,31

стању, расподелу активне снаге међу јединицама је једноставно постићи. Међутим, расподела реактивне снаге не може бити равномерна. Разлог за ово јесте различита вредност напона у чворовима, односно тачкама прикључења при паралелном раду јединица.

Такође, једначине прорачуна излазне активне и реактивне снаге дате изразима (2.1) и (2.2) важе само за мрежу с доминантно индуктивним импедансама. У том случају је оправдано сматрати да вредност учестаности зависи од тока активне снаге, а вредност напона од тока реактивне снаге, односно да је управљање током активне и реактивне снаге међусобно распрегнуто. У општем случају, у мрежи с произвољним импедансама, ово не мора да важи.

Детаљно извођење израза за прорачун излазне активне и реактивне снаге са мрежу са произвољним импедансама водова дато је у Прилогу, у потпоглављу 7.1. Треба имати на уму да се микромреже најчешће повезују на дистрибутивну мрежу, унутар које водови нису доминантно индуктивне природе, чак напротив – доминантно су отпорни (резистивни). Уобичајен однос резистансе и реактансе у водовима различитих напонских нивоа дат је у табели 2. Стога, изрази (2.1) и (2.2) не важе у дистрибутивним мрежама и управљање током активне и реактивне снаге није распрегнуто. Самим тим, постоји потреба за унапређењем основног друп управљачког алгоритма.

PV – Qf друп управљање

Пошто су импедансе водова у микромрежама доминантно отпорне, поједини аутори су у потпуности занемарили индуктивну природу водова и изменили друп управљачки закон [133], [134], [135]. Активна и реактивна снага коју претварач инјектује у мрежу дате су изразима (2.6) и (2.7), редом. Детаљно извођење ових израза дато је у Прилогу, у потпоглављу 7.1.

$$P = \frac{V^2 - V \cdot E \cdot \cos \delta}{R},\tag{2.6}$$

$$Q = -\frac{V \cdot E}{R} \cdot \sin \delta. \tag{2.7}$$

$$V = V^{ref} + k_p \cdot \left(P - P^{ref}\right) + \Delta V \tag{2.8}$$

$$f = f^{ref} - k_Q \cdot \left(Q - Q^{ref}\right) + \Delta f \tag{2.9}$$

У овим изразима може се уочити веза између тока активне снаге и напона на излазу из претварача, као и веза између тока реактивне снаге и угла снаге, односно учестаности. Спрам тога се врши и измена друп једначина. Измењене PV и Qf друп једначине дате су изразима (2.8) и (2.9) и ове једначине се често називају инверзним друп једначинама. PV друп карактеристика је опадајућа, док је Qf растућа и илустроване су на сликама ба и бб, редом. Принцип кретања радне тачке исти је као и када се у управљању примењују стандардне друп карактеристике, те ће детаљан опис овде бити изостављен.


Слика 6: Облик PV (а) и Qf (б) друп карактеристика и кретање радне тачке након поремећаја.

Предложена друп техника је у овом случају примењива само у (микро)мрежама код којих је X/R однос велик (изнад 10), па се индуктивност водова може занемарити. Међутим, у обзир треба узети и индуктивност излазног филтра инвертора, која је обично већа од индуктивности водова да би се постигао задовољавајући ниво филтрирања. То значи да потпуно занемарење постојања индуктивне природе водова води до лоших резултата рада оваквог друп управљања.

Рб – QV друп управљање

Аутори су у [136], [137] изменили Pf друп једначину тако да у њој више не фигурише учестаност, већ угао снаге δ . Веза између ове две величине дата је изразом (2.3). Овакав приступ позитивно утиче на очување стабилности система у ширем опсегу радних тачака, као и на тачнију расподелу снага међу јединицама. Утврђено је да је применом $P\delta$ друп карактеристике присутно мање одступање учестаности од називне вредности након поремећаја. Како је овај метод изведен из основног друп управљања, динамика прелазних процеса није на високом нивоу. Овај тип друп управљања је нешто захтевнији за имплементацију пошто захтева да све дистрибуиране јединице у микромрежи буду синхронизоване преко GPS сигнала. Такође, погодна је само за мреже с доминантно индуктивним импедансама.

Унапређење спорог одзива у прелазном периоду је разматрано у [138] и остварено додавањем још једне управљачке петље која управља излазним напоном инвертора (тзв. *flatness* контролер), а минимизација одступања учестаности и напона постигнута је додавањем интегралних чланова у друп једначине. Овим је заправо имплементиран и секундарни ниво управљања. Уз то, захтева се комуникациона веза између јединица како би се делиле информације о величинама измереним у тачкама прикључења од стране уређаја намењеним за мерења (*phasor measurement unit*). Слична стратегија је предложена и у [139].

И код ове управљачке технике важи да, што су већи друп коефицијенти, постиже се боља расподела снага, али се и систем примиче граници нестабилности. Због тога је у [140] предложена употреба још једне управљачке петље надређене друп управљању. Ова управљачка петља прилагођава референтни напон за претварач и захтева координисан рад свих дистрибуираних јединица. Да би се одредили параметри ове управљачке петље, примењена је оптимизација роја која у обзир узима параметре микромреже, те стога ово управљање није погодно са становишта скалабилности система пошто би свака дистрибуирана јединица морала имати податке о читавој микромрежи.

Друп управљање засновано на трансформацијама у виртуелне координатне системе

Пошто се у нисконапонским микромрежама не може занемарити отпорност водова, постоји спрега између токова активне и реактивне снаге уколико се примењује основна друп управљачка стратегија. Стога, аутори у [141] предлажу употребу ортогоналне линеарне обртне математичке трансформације којом се од стварних снага P и Q добијају виртуелне снаге P' и Q', које су независне једна од друге. Такве виртуелне снаге онда фигуришу у друп једначинама. Такође, у предложеном друп управљању је могуће виртуелну активну и реактивну снагу заменити виртуелном активном и реактивном компонентом струје. Захтева се бар приближно познавање односа X/R. Аутори тврде да овакав приступ резултује много мањим струјама у водовима, али нема резултата који јасно говоре у прилог овоме. У [142] описано је слично, измењено, друп управљање код ког у обема друп једначинама фигуришу и активна и реактивна снага (ова техника је названа (P - Q)f - (P + Q)V друп управљањем). Међутим, иако се гарантује добра расподела виртуелне активне и реактивне снаге, то не мора да важи и за стварне снаге. Аутори у [143] бирају исти угао трансформације за све дистрибуиране јединице да би се постигла тачнија расподела снага.

У [144] се предлаже трансформација учестаности и напона, уместо снага, тако да се добију виртуелна учестаност f' напон V' и ове величине се уврштавају у друп једначине. Међутим, и овде се поставља питање угла који се користи код обртне трансформације. Уколико се не користи исти угао за све дистрибуиране јединице, добијена виртуелна учестаност неће бити иста за све јединице и самим тим не може да се користи за детекцију поремећаја. Одатле следи да угао трансформације за све јединице мора бити исти. Он би требало да зависи од излазне импедансе претварача, тј. од односа X/R излазне импедансе. Да би се гарантовала стабилност система, аутори су предложили употребу угла од 45°, што одговара X/R = 1. Међутим, узимајући у обзир да на ток активне и реактивне снаге утиче излазна импеданса претварача, која не мора бити иста за све јединице, јасно је да је дискутабилно да ли ће расподела активне и реактивне снаге бити тачна, што важи за све овде описане друп технике.

Pf - Q(dV/dt) друп управљање

Да би се побољшала расподела реактивне снаге међу јединицама, предлаже се и промена *QV* друп једначине тако што се уместо напона користи његов извод [145], [146]. На овај начин промена напона, а не сам напон, утиче на ток реактивне снаге, чиме би требао да се умањи ефекат излазне импедансе претварача на расподелу снаге. Међутим, перформансе овог метода зависе од почетних услова и динамичке карактеристике система су доста лоше због великих временских константи. Уз то, наведене функционалности су потврђене само у мрежама с доминантно индуктивним импедансама.

Pf − *Qψ* друп управљање

Аутори су у [147], [148] предложили замену напона с виртуелним флуксом ψ у друп једначини по напону. Виртуелни флукс се израчунава као интеграл напона у времену. Учестаност зависи од промене угла који представља фазни став излазног напона јединице у друп једначини по учестаности. Овај метод би требало да резултује мањим одступањима учестаности, док је расподела снага слична као и код основне друп методе. Међутим, и код ове методе потпуно се занемарује постојање еквивалентне отпорности у водовима. Уз то, у друп једначинама фигуришу називни фазни став излазног напона и називни флукс чвора. Овакве величине се начелно не дефинишу у (микро)мрежама.

Друп управљање с додатним члановима у управљачком закону

Да би се побољшала динамика система, повећала резерва стабилности или побољшала расподела снага, могуће је увести додатне чланове у друп управљање. Адаптивно друп управљање предложено је у [149] како би се омогућила боља расподела реактивне снаге међу јединицама. У напонску друп једначину додају се чланови који зависе од излазне резистансе, реактансе претварача, активне и реактивне снаге и називног напона у тачки прикључења. Додавањем ових чланова повећава се напон у чвору пропорционално активној и реактивној снази која се из чвора повлачи. Алгоритам је тестиран само у микромрежи са доминантно индуктивним водовима. Динамички одзив је побољшан у [150] тако што су у друп једначинама по учестаности и напону додати изводи по активној и реактивној снази, редом. Слична стратегија је предложена у [133], али се овде користе инверзне (PV - Qf) друп једначине. Уз статичке друп коефицијенте k_P и k_Q овде постоје и додатна два динамичка коефицијента. Међутим, њихов прорачун је сложен и зависи од топологије читаве микромреже. Диференцијални члан (извод активне снаге по времену) додат је у Pf, док је интегрални члан (интеграл реактивне снаге у времену) додат у QV друп једначину. Јединице морају бити повезане комуникационом везом како би им била прослеђена информација о режимима рада, тј. да ли је главна мрежа прикључена или не. Из ових разлога, неке од унапређених друп техника нису погодне за имплементацију у микромрежама.

VI друп управљање

VI друп управљачка техника предложена је у [151], [152] како би се побољшале динамичке карактеристике система. У првој друп једначини фигуришу активне компоненте, док у другој реактивне компоненте излазног напона и струје. Пошто се попречна компонента напона регулише на нулту вредност, проблем дељења снага се поједностављује на проблем дељења струја међу јединицама. Друп карактеристике су дефинисане тако да буду линеарне по деловима, при чему постоји једна преломна тачка. Из тог разлога је потребно прорачунати двоструко више коефицијената како би се пронашли одговарајући нагиби по деловима друп карактеристика. Разлог за овакву измену друп карактеристика јесте превенција превелике излазне струје претварача у условима великог оптерећења (друп карактеристика је стрмија за веће вредности струја). Коефицијенти који одређују нагибе делова друп карактеристика налазе се минимизацијом вишекритеријумске функције у којој фигурише грешка у расподели струја оптерећења између претварача у различитим условима оптерећења. Овај оптимизациони проблем решава се офлајн. Такође, код овог метода неопходна је синхронизација претварача дистрибуираних јединица употребом GPS сигнала, како би се њихово управљање могло имплементирати у *dq* обртном координатном систему заједничком за све јединице.

Додавање виртуелне импедансе у друп управљање

Да би се побољшала неравномерна расподела снаге потрошње између инвертора код друп управљања услед неједнаких излазних импеданси инвертора, предложено је додавање виртуелне импедансе на излазу из инвертора [143], [144]. У суштини, референца напона коју инвертор треба да произведе, а која се добија из друп једначине по напону, се модификује на следећи начин:

$$v^{ref} = v_0^{ref} - Z_v \cdot i_0, \tag{2.10}$$

где v_0^{ref} представља стару референцу напона, z_v виртуелну импедансу и i_0 струју на излазу из инвертора, док је v^{ref} нова задата вредност напона на излазу из претварача. Уз то, додавање виртуелне импедансе може да позитивно утиче на стабилност микромреже пошто уноси додатно

пригушење у систем. Додата виртуелна импеданса постаје доминантна у односу на стварну излазну импедансу инвертора. Пошто је позната, лакше је ускладити управљачка дејства спрам управљачких циљева. На тај начин вештачки се мења однос X/R импеданса у микромрежи. Како би се смањио пад напона на излазу из инвертора, виртуелна импеданса се обично прорачунава тако да износи 3-5% U_N/I_N , где су U_N и I_N ефективне називне вредности напона и струје на излазу из инвертора. Наравно, овај пад напона зависиће од услова рада микромреже, односно од оптерећења. Да би се постигли бољи резултати рада у различитим радним тачкама, адаптивна промена вредности виртуелне импедансе предложена је у [155], [156], [157]. Смислен опсег виртуелне импедансе прорачунава се из модела малих сигнала микромреже у различитим радним условима микромреже у [155], [156]. У [155] аутори су предложили робустан метод за одређивање виртуелне импедансе која има адаптивну вредност само у прелазним процесима, док у устаљеном стању има константну вредност. У [156] се примењује оптимизација ројем честица да би се пронашла вредност виртуелне импедансе. У [157] наизменичан напон мале амплитуде се инјектује у микромрежу од стране сваког претварача, па се вредност виртуелне импедансе (која је овде чисто индуктивна) одређује на основу додатних друп једначина у којима фигурише учестаност инјектованог наизменичног напона и вредност виртуелне индуктивности.

Нелинеарна управљања заснована на друп управљању

Узимајући у обзир да превелико одступање пре свега учестаности, а онда и напона, од називних вредности представља значајнији изазов за рад микромреже него тачна расподела снага потрошње између дистрибуираних јединица, уложен је напор да се осмисле другачији друп закони којима ће се девијација учестаности и/или напона ограничити. Јасно је да примена линеарних друп карактеристика у најбољем случају може да заустави промене ових величина, али ће и даље постојати њихова значајна одступања од називних вредности. Стога, у литератури су предлагани различити нелинеарни друп закони.

Да би се ограничило одступање учестаности, Pf друп карактеристика може бити дефинисана користећи сатурациону аркус тангенс функцију уместо линеарне функције [158]. На овај начин постиже се сатурација промене учестаности, односно њено ограничење. Предложени алгоритам је тестиран једино у микромрежи с чисто индуктивним импедансама водова, у којој постоје само две дистрибуиране јединице. Сходно томе, требало би даље испитивати перформансе алгоритма у сложенијим микромрежама како би се у потпуности сагледали резултати предложеног алгоритма. Такође, ограничење одступања напона није анализирано.

Сличан приступ примењен је у [159], али су у овом раду и Pf и QV карактеристике измењене. Примењена је тзв. S функција – полиномна функција с посебно изабраним коефицијентима таквим да графички облик функције личи на латинично слово S. Тиме је постигнуто ограничење одступања учестаности и ограничење одступања напона. Међутим, узимајући у обзир да је примењена полиномна функција трећег реда, потребно је прорачунати укупно осам управљачких коефицијената – четири за Pf и четири за QV нелинеарну друп карактеристику. Ово је са становишта пројектовања управљања прилично изазован задатак.

Када је реч о нелинеарним друп управљачким законима, у литератури се може наћи и примена експоненцијалне функције у Pf и QV друп карактеристикама [160], [161], [162]. Међутим, како и аутори сами наводе, прорачун управљачких параметара, тј. дефинисање експоненцијалних функција, је доста сложено. Неадекватно одређени коефицијенти у експоненцијалним функцијама могу довести до осцилаторних одзива у учестаности, што може узроковати нестабилан рад микромреже.

2.3. Предмет и циљ истраживања

У претходним поглављима, предочене су могуће класификације микромрежа, изазови у њиховом раду, општи правци истраживања у овом пољу, као и до сада понуђена и најзначајнија решења за различите управљачке структуре које би требало да руководе радом микромрежа. Као што је раније напоменуто, а у складу са разматраним предностима и манама свих топологија, ова дисертација ће се бавити микромрежама наизменичних струја. Даље, узимајући у обзир све инхерентне недостатке централизованих и дистрибуираних управљачких парадигми, искључиво децентрализован приступ у управљању микромрежама ће бити надаље анализиран. Коначно, како би се превазишли идентификовани проблеми примене до сада понуђених децентрализованих управљачких приступа у управљању микромрежама и подржала могућност непосредне P2P размене електричном енергијом, основни циљ истраживања ове докторске дисертације је развој управљачког алгоритма за претвараче енергетске електронике преко којих се дистрибуиране јединице повезују у систем микромреже који омогућава:

- Стабилан рад микромреже, при чему су примарни управљачки циљеви ограничење вредности одступања учестаности и напона од задатих вредности у чворовима микромреже приликом различитих поремећаја у систему,
- Прецизно дефинисање дозвољеног одступања вредности учестаности и напона у складу с правним регулативама и *Grid codes* стандардима,
- Трговину електричном енергијом између чворова микромреже на нивоу купацапроизвођача кроз омогућавање прецизне размене активних снага (што је традиционално био задатак управљачких структура које припадају секундарном нивоу),
- Елиминацију потребе за комуникацијом између дистрибуираних извора у микромрежи у циљу остварења примарних управљачких циљева,
- Скалабилност система, односно могућност прикључења додатних јединица које не угрожава рад микромреже и не захтева никакве измене у структури постојеће микромреже,
- Рад и у острвском режиму рада и у режиму када је микромрежа прикључена на главну мрежу,
- Једноставну интеграцију с другим управљачким структурама, чији су циљеви другачији, попут хијерархијски виших управљачких структура,
- Једноставну имплементацију у стандардним контролерима.

Основна идеја предложеног управљачког алгоритма јесте да се поменути управљачки циљеви постигну дефинисањем одговарајуће функције циља (енгл. goal function) за сваки чвор. Надаље се на основу функције циља изводи управљачки закон за претвараче енергетске електронике, односно инверторе преко којих се купци-произвођачи или дистрибуиране јединице повезују у микромрежу. Притом, управљање вредношћу учестаности и напона у чворовима, као и тачно испоручивање задате активне снаге су критеријуми на основу којих се дефинишу функција циља и управљачки закон. За испуњење ових управљачких циљева довољна су само локална мерења, у чвору на који је свака јединица повезана. Трговина реактивном енергијом није разматрана из разлога што је врло мало практично заступљена у постојећим мрежама и што је најчешћи циљ такве трговине побољшање напонских прилика [163], а које функција циља већ узима у обзир.

Из претходно реченог може се закључити да је у описаном управљачком алгоритму делимично интегрисано и примарно и секундарно управљање, узимајући у обзир успешно извршавање функција оба управљачка нивоа. Уколико се примењује предложени примарни управљачки закон, и без секундарног управљања, може се остварити релативно мала вредност грешке у учестаности, што ће касније и бити показано. Уз то, могуће је тачно дефинисати максимално дозвољену вредност грешке, која не угрожава рад микромреже. С друге стране, често у литератури је досад предлагана готово једнозначно одређена, односно прилично крута, хијерархијска организација управљачких структура у микромрежама по нивоима. Дакле, може се поставити питање смисла тачне расподеле управљачких задатака по хијерархијским организованим нивоима управљања, пошто различити управљачки алгоритми могу бити осмишљени да различито обједињују управљачке циљеве, по различитим нивоима. Наравно, предност би се могла дати једноставнијим управљачким алгоритмима, који пружају што више могућности, а не захтевају примену великог броја хијерархијски устројених управљачких нивоа. У прилог овоме говори чињеница да је за постизање добрих резултата неопходно да хијерархијски организовани управљачки нивои буду међусобно распрегнути, а њихов рад добро усклађен. Сходно томе, њихово пројектовање може да представља изазован задатак.

Поставља се и питање потребе за прецизном расподелом активних и реактивних снага између јединица у микромрежи, а на којој инсистирају многи истраживачи који се баве овом облашћу. Једна од највећих предности употребе друп управљања је равномерна или приближно равномерна расподела активне и реактивне снаге потрошње између дистрибуираних јединица. Код друп управљања, која је усвојена као стандард када је реч о примарном нивоу управљања, овом контролном циљу се чак даје предност у односу на постизање што мањих промена учестаности и напона у чворовима микромреже у прелазним процесима јер се подразумева да ће се тим проблемом бавити хијерархијски виши нивои управљања. Уколико се нови потрошач прикључи на мрежу, сви дистрибуирани генератори ће произвести одговарајућу активну и реактивну снагу како би ту потрошњу покрили. Овакав приступ заснива се на томе да све јединице подједнако подржавају уравнотежавање снаге производње и потрошње и самим тим све заједно доприносе равнотежи снага производње и потрошње уз неназивне вредности учестаности и напона. Међутим, постоји неколико мањкавости у оваквом приступу. Ако се захтева аутономни рад микромреже, поставља се питање да ли би купци-произвођачи уопште хтели да учествују у овом процесу, односно да ли би били вољни да уступе своју производњу за покривање потрошње која се њих не тиче. Притом, у друп управљачком закону они и немају директан утицај на то колику снагу ће инјектовати да би се постигла равнотежа између произведене и потрошене снаге у систему. Купац-произвођач који тренутно троши енергију за сопствену потрошњу или жели да своју енергију ускладишти у батерију за будуће коришћење неће имати интереса да је уступа за потрошњу неког другог. Уколико нека дистрибуирана јединица нема капацитета за производњу енергије (на пример, услед ниске соларне ирадијације), равномерну расподелу снага свакако није могуће извршити. Коначно, са становишта расподеле губитака овакав приступ никако није погодан. Природно је да дистрибуирани генератори физички блиски новоприкљученој потрошњи покривају ту потрошњу како би губици у систему били што мањи.

Из претходно наведених разлога је приликом развоја управљачког алгоритма у оквиру ове дисертације предност дата ограничењу промене учестаности и напона у чворовима у односу на потпуно тачну расподелу активне и реактивне снаге између дистрибуираних јединица. За реализацију ових управљачких циљева није неопходно постојање комуникационе мреже. Међутим, ако се у обзир узме могућност трговине енергијом, дистрибуиране јединице морају комуницирати с хијерархијски вишим нивоом управљања. На овом управљачком нивоу би се извршавали потребни механизми за одржавање платформе за трговину електричном енергијом. Она би омогућавала купцима-произвођачима да се међусобно договарају о куповини и продаји електричне енергије. Ово може укључивати предефинисане договоре или флексибилне аранжмане, у зависности од потреба и могућности купаца-произвођача. Евентуално, купципроизвођачи могу директно размењивати вишак енергије с другим купцима-произвођачима, без посредовања треће стране. У суштини, у микромрежама могу постојати виртуелни маркети енергије у којима се енергија може куповати и продавати под различитим условима и ценама. Сложени механизми који управљају процесом трговине електричном енергијом нису тема ове докторске дисертације, али ће бити подразумевано да се ови механизми извршавају на хијерархијски вишем нивоу управљања и да свака дистрибуирана јединица од овог нивоа добија задату вредност активне снаге коју треба да произведе.

3. Поставка предложеног закона управљања

У овом истраживању разматра се трофазна микромрежа наизменичне струје, произвољне топологије, у чијим чворовима су преко претварача енергетске електронике и излазног филтра повезани купци-произвођачи. Сваки купац-произвођач има могућност производње и складиштења електричне енергије, као и сопствену потрошњу. Чворови микромреже су међусобно повезани надземним водовима или подземним кабловима, који су еквивалентирани комплексном импедансом, чији је реални део резистанса R и имагинарни део реактанса X. Однос X/R је у потпуности произвољан. На слици 7 приказана општа конфигурација разматране микромреже. Спрежни елемент путем кога се купац-произвођач прикључује на мрежу, а који се састоји из одговарајућих уређаја енергетске електронике (инвертора, филтра, итд.) на слици је означен са ЕЕ, а подробније је описан у потпоглављу 3.1.

Сваки купац-произвођач може да потражује активну снагу од других купацапроизвођача или да вишак своје активне снаге понуди другима. Комуникациона мрежа је потребна само ради склапања ових договора (уговора). За потребе управљачког алгоритма који ће бити предложен комуникација није потребна. Уговори које склапају купци-произвођачи су динамички, постојећи уговори се могу мењати, а купци-произвођачи могу склапати и нове



Слика 7: Начелна репрезентација микромреже у чијим чворовима су повезани купци-произвођачи.

међусобне уговоре. Не постоји унапред дефинисано горње ограничење учестаности ажурирања уговора. У пракси ће то ограничење свакако постојати, услед ограничења брзине протока информација у комуникационој мрежи и сложености алгоритама под којима се одвија процес трговине енергијом. Битно је нагласити да се трговином електричне енергије бави хијерархијски виши ниво управљања који није предмет истраживања ове тезе.

Имајући у виду да је у сваком чвору повезан претварач енергетске електронике, сваки чвор је управљив. Сви купци-произвођачи имају информацију о количини активне снаге коју предају другим чворовима или коју потражују од других чворова. У складу с овим, потребно је пројектовати управљачки алгоритам за управљање инверторским претварачем.

Топологија микромреже се може формално приказати графом, тако да се чворови мреже поклапају са чворовима графа, док се непосредне везе између чворова описују гранама. У том смислу, сваком чвору се може доделити индекс из скупа $\mathcal{N} = \{1, 2, ..., n\}$, где је n укупан број чворова. Скуп грана микромреже се може дефинисати као $\mathcal{E} = \mathcal{N} \times \mathcal{N}$. Чворови су суседни ако су повезани граном. Гране су суседне уколико имају заједнички чвор. Такође, тополошка структура микромреже може се приказати коришћењем матрице адмитанси [164]. Сваки проводник између два чвора у микромрежи може се еквивалентирати комплексном импедансом $\hat{Z}_{\ell k}$, а комплексна адмитанса $\hat{Y}_{\ell k}$ представља реципрочну вредност комплексне импедансе. Реални део комплексне импедансе означен је с $R_{\ell k}$ и представља отпорност проводника којим су повезани чворови ℓ и k. Имагинарни део импедансе означен је као $X_{\ell k}$, где је $X_{\ell k}$ еквивалентна реактанса између чворова ℓ и k. Једначина (3.1) даје прорачун адмитансе између било која два суседна чвора ℓ и k.

$$\hat{Y}_{\ell k} = \frac{1}{\hat{Z}_{\ell k}} = \frac{1}{R_{\ell k} + jX_{\ell k}} = \frac{R_{\ell k}}{R_{\ell k}^2 + X_{\ell k}^2} - j\frac{X_{\ell k}}{R_{\ell k}^2 + X_{\ell k}^2} = G_{\ell k} - jB_{\ell k}$$
(3.1)

Аналогно матрици адмитанси, топологија мреже је такође једнозначно одређена двема ретким матрицама G и B које садрже кондуктансе (реалне делове адмитанси) и сусцептансе (имагинарне делове адмитанси), редом. Важно је приметити да су све поменуте матрице симетричне, с обзиром да су електричне карактеристике везе између два чвора независне од тога са које се стране посматрају, задовољавајући услов реципроцитета.

Од интереса за даље анализе биће и прорачун излазне активне и реактивне снаге чвора. Разматра се симетричан простопериодичан режим рада микромреже. За било који чвор $\ell \in \mathcal{N}$, чији је временски променљив фазор напона записан у облику $\hat{v}_{\ell} = v_{\ell}e^{j\theta_{\ell}}$, важи да је укупна излазна привидна снага чвора једнака збиру привидних снага које се предају свим осталим појединачним чворовима $k \in \mathcal{N}$, при чему важи $k \neq \ell$. Разлика фазних ставова напона чворова ℓ и k означена је углом $\delta_{\ell k}$. Детаљан прорачун излазне привидне снаге чвора ℓ дат је у наставку.

$$\hat{S}_{\ell} = P_{\ell} + jQ_{\ell} = \hat{v}_{\ell} \cdot \sum_{k \neq \ell} \hat{\iota}_{\ell k}^* = \sum_{k \neq \ell} \hat{v}_{\ell} \cdot \left[(\hat{v}_{\ell} - \hat{v}_k) \cdot \hat{Y}_{\ell k} \right]^*$$
(3.2)

$$\hat{S}_{\ell} = v_{\ell}^2 \cdot \sum_{k \neq \ell} \hat{Y}_{\ell k}^* - \sum_{k \neq \ell} \hat{v}_{\ell} \cdot \hat{v}_k^* \cdot \hat{Y}_{\ell k}^*$$
(3.3)

$$\hat{S}_{\ell} = v_{\ell}^2 \cdot \sum_{k \neq \ell} G_{\ell k} + j B_{\ell k} - \sum_{k \neq \ell} v_{\ell} e^{j \theta_{\ell}} \cdot v_k e^{-j \theta_k} \cdot (G_{\ell k} + j B_{\ell k})$$
(3.4)

$$\hat{S}_{\ell} = v_{\ell}^{2} \cdot \sum_{k \neq \ell} G_{\ell k} - j B_{\ell k} + \sum_{k \neq \ell} \frac{-[v_{\ell} \cdot v_{k} \cdot G_{\ell k} \cdot \cos(\theta_{\ell} - \theta_{k}) - v_{\ell} \cdot v_{k} \cdot B_{\ell k} \cdot \sin(\theta_{\ell} - \theta_{k})]}{-j[v_{\ell} \cdot v_{k} \cdot G_{\ell k} \cdot \sin(\theta_{\ell} - \theta_{k}) + v_{\ell} \cdot v_{k} \cdot B_{\ell k} \cdot \cos(\theta_{\ell} - \theta_{k})]}$$
(3.5)

$$P_{\ell} = \sum_{k \neq \ell} v_{\ell}^2 \cdot G_{\ell k} - v_{\ell} \cdot v_k \cdot G_{lk} \cdot \cos \delta_{\ell k} + v_{\ell} \cdot v_k \cdot B_{lk} \cdot \sin \delta_{\ell k}$$
(3.6)

$$Q_{\ell} = \sum_{k \neq \ell} v_{\ell}^2 \cdot B_{\ell k} - v_{\ell} \cdot v_k \cdot G_{lk} \cdot \sin \delta_{\ell k} - v_{\ell} \cdot v_k \cdot B_{lk} \cdot \cos \delta_{\ell k}$$
(3.7)

Изрази (3.6) и (3.7) дају прорачун излазне активне и реактивне снаге чвора ℓ , тим редом.

Узимајући у обзир да се сваким чвором независно управља, могуће је управљати модулом фазора напона v и фазним ставом θ напона сваког чвора. Динамика промена ових величина може се записати као:

$$\dot{v}_{\ell} = w_{\ell},\tag{3.8}$$

$$\dot{\theta}_{\ell} = \omega_{\ell},\tag{3.9}$$

где су w_{ℓ} и ω_{ℓ} управљачке променљиве које треба да буду дефинисане одговарајућим управљачким законом.

У потпоглављу 3.1 ће бити описана функција претварача енергетске електронике и његовог излазног филтра. Надаље, детаљно ће бити објашњено и управљање претварачем енергетске електронике, почевши од хијерархијски најнижег до хијерархијски највишег управљачког нивоа. Нулти ниво управљања описан је у потпоглављу 3.2. Главни допринос ове докторске дисертације огледа се у предлогу потпуно новог примарног управљања микромрежама и дат је у потпоглављу 3.3. Како би се управљачка структура употпунила, у потпоглављу 3.4 анализирано је секундарно управљање учестаношћу.

3.1. Хардверска структура претварача енергетске електронике

Дистрибуирани извори енергије (који могу бити у власништву купаца-произвођача) се интегришу у електроенергетски систем преко претварача енергетске електронике. Функције које претварачи врше су вишеструке: прилагођавају карактеристике енергије произведене из обновљивих извора мрежи и управљају њеним током, по потреби је ограничавају, у случају квара могу да пружају подршку мрежи итд. Производни капацитети дистрибуираних извора енергије потичу од примарног извора енергије, било да је то сунце, ветар или неки други извор, и на мрежу се повезују користећи трофазни мосни инвертор с два нивоа у излазном напону, класичне топологије. Инвертор на свом излазу производи наизменичан напон, променљиве амплитуде и учестаности. Да би се постигао одговарајући квалитет излазног напона/струје, на излаз инвертора повезује се филтар.

Трофазни инвертор је сачињен од пуноуправљивих полупроводничких прекидача, транзистора, за чију активацију је неопходно дизајнирати модулатор и имплементирати одговарајућу модулациону технику. Дакле, потребно је осмислити адекватну управљачку структуру која ће ово постићи, а притом у обзир узети управљачке циљеве од интереса. Напоменуто је да хијерархијска организација управљачке структуре подстиче успешно остваривање различитих управљачких циљева, те је баш на овакав начин организован и предложени управљачки алгоритам.



Слика 8: Шема повезивања инвертора на микромрежу.

Пошто претварачи енергетске електронике на свом излазу дају импулсно-ширински модулисан напон, користе се различите врсте филтара како би се постигао приближно простопериодични облик излазног напона. Најчешће примењиван филтар је LCL филтар. На слици 8 приказана је хардверска структура једне дистрибуиране јединице, са сопственом потрошњом, повезана преко LCL филтра у чвор микромреже. Због своје природе, LCL филтар захтева мање вредности индуктивности у поређењу с осталим типовима филтара. Калем са стране претварача је означен с L_{f1} , а његова унутрашња отпорност је означена с R_{f1} , филтарски кондензатор је означен с C_{f1} , а индуктивност и унутрашња отпорност калема са стране мреже означене су као L_{f2} и R_{f2} , редом.

Најзначајнији проблем код употребе овог типа филтра представља могућност појаве резонанције, а која може да узрокује проблеме с нестабилношћу читаве микромреже [165]. Да би се избегли проблеми с резонанцијом, потребно је имплементирати одговарајуће технике пригушења резонанције филтра. Ове технике се начелно деле у две групе: технике пасивног пригушења и технике активног пригушења резонантних појава [166]. Пасивно пригушење најчешће се реализује додавањем отпорности редно или паралелно с кондензатором, а ређе редно с калемом са стране мреже. Да би се примениле технике активног пригушења, потребна је употреба већег броја струјних или напонских сензора. Различите технике захтевају другачија мерења, али најчешће се мере излазна струја претварача, струја према мрежи, струја кондензатора и напон на кондензатору. Активно пригушење филтра може да се врши додавањем виртуелне отпорности, употребом *lead-lag* компензатора или филтра непропусника учестаности (енгл. notch filter). У овом раду биће примењена техника пасивног пригушења резонанције LCL филтра, с додатим отпорником у редној вези с филтарским кондензатором. Иако овај приступ са становишта ефикасности није најбољи (пошто на додатом отпорнику постоје губици активне снаге), дата му је предност јер не захтева никаква додатна мерења, односно додатне сензоре. Ово је посебно погодно и са становишта практичне реализације експерименталних испитивања управљања. Додатно, пасивно пригушење је погодно и са становишта имплементације самог управљања, јер не захтева никакве додатне управљачке структуре.

У наставку биће изложена процедура усвојена за пројектовање LCL филтра коју чине следећи кораци [167]:

- 1) прорачун индуктивности калема са стране претварача на основу максималне дозвољене таласности излазне струје претварача,
- 2) прорачун индуктивности калема са стране мреже на основу вредности индуктивности калема са стране претварача,
- 3) прорачун вредности капацитивности кондензатора на основу прорачунате учестаности резонанције филтра,
- прорачун отпорности отпорника који се користи за пасивно пригушење филтра на основу жељеног фактора пригушења.



Слика 9: Апроксимација излазног напона и струје претварача у делу прекидачке периоде [167].

Притом, апроксимације које се усвајају ради лакше синтезе параметара подразумевају да је напон на кондензатору током једне прекидачке периоде константан и занемарују се унутрашње отпорности калемова. Слика 9 дата је како би се олакшала анализа таласности излазне струје претварача. За таласност струје најкритичнији део прекидачке периоде је када се напон на излазу из претварача мења с вредности $U_{DC}/3$ на вредност $-U_{DC}/3$. Максимална вредност струје постиже се када напон пролази кроз нулу. Део таласности излазне струје, означен као Δi_{Lf1} , може се израчунати као:

$$\Delta i_{Lf1} = \frac{U_{DC} \cdot t_1}{3 \cdot L_{f1}},\tag{3.10}$$

где је U_{DC} напон једносмерног међукола инвертора, а време t_1 (са слике 9) се апроксимира као:

$$t_1 = t_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \cdot m_{max} = \frac{\sqrt{3}m_{max}}{8f_s}.$$
(3.11)

Учестаност прекидања означена је као f_s , а m_{max} представља максимални модулациони индекс који износи 1,15 у случају примене модулатора просторног вектора (енгл. *space vector pulsewidth modulator* – SVPWM). Вредност индуктивности калема са стране претварача бира се на основу вредности таласности струје како би се смањили губици у калему и избегла сатурација магнетског језгра. Ако се претпостави да таласност излазне струје износи од 15% до 25% називне вредности струје, на основу израза (3.10) може се израчунати потребна вредност индуктивности калема са стране инвертора L_{f1} . Пошто калем са стране мреже не мора да филтрира широк опсег учестаности као калем са стране претварача, индуктивност L_{f2} може да буде много мања. Обично се вредност ове индуктивности бира тако да однос индуктивности L_{f2}/L_{f1} износи од 0,1 до 0,25.

Да би се израчунала потребна вредност капацитивности кондензатора, потребно је у обзир узети резонантну учестаност филтра f_{res} . Она се бира тако да буде у опсегу:

$$10 \cdot f_g \ll f_{res} \ll f_s/10.$$
 (3.12)

Учестаност мреже означена је као f_g . На овај начин постиже се распрегнутост напона са стране претварача и напона са стране мреже и смањује вероватноћа нестабилности рада LCL филтра.

Да би се пронашла резонантна учестаност филтра, прво је потребно израчунати еквивалентну индуктивност LCL филтра:

$$L_f = \frac{L_{f1} \cdot L_{f2}}{L_{f1} + L_{f2}}.$$
(3.13)

37

Потом, резонантна учестаност филтра се може израчунати као:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f \cdot Cf}}.$$
(3.14)

На крају, на основу израза (3.14) може се наћи потребна капацитивност кондензатора.

Отпорност отпорника R_{Cf} који се користи за пасивно пригушење рачуна се на основу жељеног фактора пригушења ξ . За добре резултате пригушења овај фактор треба да има вредност између 0,21 и 0,37 [168], а обично се бира вредност 0,3. Из функције преноса која даје однос напона и струје претварача може се извести фактор пригушења као:

$$\xi = \frac{C_f \cdot \omega_{res}}{2} \cdot R_{Cf} = \frac{R_{Cf}}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_f}{L_f}},\tag{3.15}$$

и потом користећи израз (3.15) израчунати потребна отпорност.

Вреди напоменути да предложени приступ прорачуну параметара LCL филтра није једини, али је једноставан и може се просто применити на инверторе различитих снага. Овде се такође могу применити различите методе оптимизација с циљем да цена, димензије или губици филтра буду што мањи, да се обезбеди робустан рад филтра у случају промене параметара и сл. [169], [170], [171].

3.2. Примењени нулти ниво управљања

Нулти ниво управљања има за циљ управљање динамиком рада инвертора, односно прорачун и издавање управљачких сигнала за полупроводничке компоненте у инвертору.

Обавезан елемент управљања инвертора јесте непосредно управљање струјама које се инјектују у мрежу. Генерисане струје треба да буду једнаке задатим вредностима и у корелацији су с производњом активне и реактивне снаге код подржавајућих инвертора. Инвертор као напонски извор генерише на свом излазу одговарајуће струје тако што на свом излазу генерише одговарајући напон, спрам мрежног.

Пошто напон у чворовима микромреже треба да се одржава у унапред дефинисаним границама, поред струјне петље, неопходна је још једна управљачка петља која управља напоном на кондензатору LCL филтра. Напонска петља је надређена струјној петљи. На овај начин постиже се исправан рад LCL филтра и подржава стабилан рад читавог система.

Синтеза неопходних управљачких структура врши се на основу математичког модела кола инвертора повезаног на микромрежу. Да би се извео математички модел, разматра се поједностављено пофазно коло са слике 10 у коме је инвертор еквивалентиран идеалним напонским извором чија амплитуда напона представља амплитуду основног хармоника напона, слично као и напон у чвору микромреже.

Релације којима може да се опише рад овог кола су дате у αβ домену:

$$L_{f1} \cdot \frac{di_{Lf1}^{\alpha\beta}}{dt} + R_{f1} \cdot i_{Lf1}^{\alpha\beta} = v_{inv}^{\alpha\beta} - v_{Cf}^{\alpha\beta}, \qquad (3.16)$$

$$C_f \frac{dv_{Cf}^{\alpha\beta}}{dt} = i_{Lf1}^{\alpha\beta} - i_{Lf2}^{\alpha\beta}, \qquad (3.17)$$

38



Слика 10: Поједностављено електрично коло инвертора повезаног на микромрежу.

$$L_{f2} \cdot \frac{di_{Lf2}^{\alpha\beta}}{dt} + R_{f2} \cdot i_{Lf2}^{\alpha\beta} = v_{Cf}^{\alpha\beta} - v_{mm}^{\alpha\beta}, \qquad (3.18)$$

где су v_{inv} и v_{mm} еквивалентни напон на излазу из инвертора и напон микромреже у тачки прикључења, редом, а v_{Cf} је напон на грани у којој су редно повезани кондензатор и отпорник који се користи за пасивно пригушење. Притом, пад напона на отпорнику R_{Cf} је занемарен, узимајући у обзир да је вредност ове отпорности релативно мала.

Структура и прорачун регулационих параметара за струјну и напонску петљу биће дати у наставку.

3.2.1. Струјна управљачка петља

Струјна управљачка петља има за циљ управљање вредношћу излазне струје инвертора. Постоји више различитих регулационих структура или контролера који се могу користити у циљу регулације струје, али најчешће примењиван је ПИ регулатор [172]. Овај регулатор је једноставан за имплементацију, успешно елиминише грешку у устаљеном стању и има задовољавајуће динамичке карактеристике. ПИ регулатор може да регулише само једносмерне величине, тако да је неопходно управљање струјама вршити у dq координатном систему. Сходно томе, на мерене струје у фазном *abc* домену потребно је применити Кларкину и Паркову трансформацију како би се добили одговарајући репрезенти струје у dq домену [173]. У складу с тим, једначина (3.16) може да се запише у dq домену тако да се добију једначине (3.19) и (3.20).

$$v_{inv}^{d} = R_{f1} \cdot i_{Lf1}^{d} + L_{f1} \cdot \frac{di_{Lf1}^{d}}{dt} - \omega \cdot L_{f1} \cdot i_{Lf1}^{q} + v_{Cf}^{d}$$
(3.19)

$$v_{inv}^{q} = R_{f1} \cdot i_{Lf1}^{q} + L_{f1} \cdot \frac{di_{Lf1}^{q}}{dt} + \omega \cdot L_{f1} \cdot i_{Lf1}^{d} + v_{Cf}^{q}$$
(3.20)

Динамика промене струје биће одређена радом ПИ регулатора. Струјни регулатори диктирају напон на излазу из инвертора како би се задата струја остварила. Уважавајући једначине (3.19) и (3.20), на слици 11 дата је упрошћена регулациона структура струјне петље. Она идентично изгледа и за d и за q осу. Уколико је временска константа струјне петље довољно пута већа од временске константе извршавања модулатора, могуће је функцију преноса модулатора занемарити приликом прорачуна параметара ПИ регулатора. Задате вредности струја за струјне регулаторе по d и q осама добијају се од надређене петље по напону кондензатора LCL филтра.

Еквивалентна функција преноса читавог склопа у отвореној спрези може се одредити на основу функција преноса ПИ регулатора и функције преноса леве стране LCL филтра и дата је изразом (3.21).



Слика 11: Упрошћена струјна петља инвертора.

$$G_{i}(s) = \frac{K_{pi} \cdot s + K_{ii}}{s} \cdot \frac{1}{L_{f1} \cdot s + R_{f1}} = \frac{K_{pi} \cdot \left(s + \frac{K_{ii}}{K_{pi}}\right)}{L_{f1} \cdot s \cdot \left(s + \frac{R_{f1}}{L_{f1}}\right)}$$
(3.21)

Коефицијенти пропорционалног и интегралног дејства ПИ регулатора носе ознаке K_{pi} и K_{ii} , редом. Модулатор је моделован као коло задршке нултог реда. На овај начин се динамика модулатора на учестаностима импулсно-ширинске модулације и вишим занемарује, те се остварује усредњен модел модулатора. Резултујућа функција преноса у отвореној спрези има пол близак координатном почетку у $s = -R_{f1}/L_{f1}$ који диктира динамику одзива струјне петље и пол у нули, који чини систем гранично стабилним. Уколико се параметри регулатора одаберу тако да се поништи пол близу координатног почетка, могуће је побољшати динамичке карактеристике одзива струјне петље. Стога, треба да важи следеће:

$$\frac{K_{ii}}{K_{pi}} = \frac{R_{f1}}{L_{f1}}.$$
(3.22)

Потом, резултујућа функција преноса у затвореној спрези може се записати као:

$$W_{i}(s) = \frac{G_{i}(s)}{1 + G_{i}(s)} = \frac{\frac{K_{pi}}{L_{f1} \cdot s}}{1 + \frac{K_{pi}}{L_{f1} \cdot s}} = \frac{1}{\frac{L_{f1}}{K_{pi}} \cdot s + 1} = \frac{1}{\tau_{i} \cdot s + 1}, \tau_{i} = L_{f1}/K_{pi}.$$
 (3.23)

Временска константа струјне петље τ_i треба да буде бар за ред величине већа од периода прекидања. Пресечна учестаност струјне петље рачуна се као $\omega_{ci} = 1/\tau_i$. У зависности од примене и прекидачке учестаности, временска константа струјне петље обично износи од 0,5 ms до 5 ms [174]. Што је временска константа струјне петље мања, бржи је одзив струје. Дакле, поступак одабира параметара струјног регулатора је следећи:

- 1) одабере се временска константа струјне петље τ_i ,
- 2) нађе се *К*_{рі} из (3.23),
- 3) нађе се *К*_{*ii*} из (3.22).

Исти коефицијенти пропорционалног и интегралног дејства користе се за регулацију струја и по *d* оси и по *q* оси.

На основу (3.19) и (3.20) се може увидети да је потребно да се на излаз регулатора додају још распрежући ($-\omega L_{f1}i_{Lf1}^q$ и $+\omega L_{f1}i_{Lf1}^d$) и тзв. *feed-forward* ($+v_{Cf}^d$ и $+v_{Cf}^q$) елементи. На овај начин постиже се распрезање струјног управљања у dq координатном систему и бржи одзив струјне петље. Када се ови чланови уваже, добија се референтни напон који инвертор треба да на свом излазу оствари. Овај референтни напон води се у модулатор – управљачку структуру



Слика 12: Упрошћена напонска петља инвертора.

чији је задатак задавање управљачких сигнала за прекидачке компоненте у инверторском мосту. У овој дисертацији примењен је модулатор просторног вектора, као једне од бољих техника модулације са становишта хармонијског састава излазног напона, искоришћења напона једносмерног међукола и резултујуће ефикасности рада претварача [175].

3.2.2. Напонска управљачка петља

Напонска управљачка петља има за циљ управљање напоном на кондензатору излазног LCL филтра. Слично као и код струјне петље, и овде постоји много различитих могућности за одабир одговарајућег контролера, али највећу примену има ПИ регулатор. Најчешће се референце за управљачку петљу по напону на кондензатору бирају тако да попречна компонента напона на кондензатору v_{Cf}^q буде једнака нули. У том случају производња активне и реактивне снаге директно зависи од произведених струја у *d* и *q* домену. Када се једначина (3.17) запише у *dq* координатном систему применом Паркове трансформације [174], добијају се следећи изрази:

$$i_{Lf1}^{d} = C_{f} \cdot \frac{dv_{Cf}^{d}}{dt} - \omega \cdot C_{f} \cdot v_{Cf}^{q} + i_{Lf2}^{d}, \qquad (3.24)$$

$$i_{Lf1}^{q} = C_{f} \cdot \frac{dv_{Cf}^{q}}{dt} + \omega \cdot C_{f} \cdot v_{Cf}^{d} + i_{Lf2}^{q}.$$
(3.25)

Напонски ПИ регулатори одређују референтну вредност струје на излазу из претварача како би се остварио задати напон на кондензатору. Уважавајући једначине (3.24) и (3.25), на слици 12 дата је упрошћена регулациона структура напонске петље.

Функција преноса склопа у отвореној спрези биће једнака:

$$G_{\nu}(s) = \frac{K_{p\nu} \cdot s + K_{i\nu}}{s} \cdot \frac{1}{\tau_i \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{C_f \cdot s} = \frac{K_{p\nu} \cdot \left(s + \frac{K_{i\nu}}{K_{p\nu}}\right)}{C_f \cdot \tau_i \cdot s^2 \cdot \left(s + \frac{1}{\tau_i}\right)}.$$
(3.26)

Пропорционални и интегрални коефицијенти ПИ регулатора у напонској петљи означени су као K_{pv} и K_{iv} , редом. Резултујућа функција преноса има двоструки пол у нули и један реални пол у $s = -\frac{1}{\tau_i}$. Како би се пронашли параметри регулатора, примениће се метода симетричног оптимума која у овом случају погодна због постојања астатизма другог реда. Ради лакше анализе, на слици 13 дати су Бодеови дијаграми за функцију преноса дату у (3.26). Због двоструког пола у нули, на нижим учестаностима фазни померај износи приближно –180°.

Уколико је $K_{iv}/K_{pv} < 1/\tau_i$, фазни померај прво расте све док не досегне максимални угао δ_m на учестаности ω_m . Потом, за учестаности веће од ω_m , фазни померај ће опадати и асимптотски се приближавати вредности од -180° . Угао δ_m и учестаност ω_m могу се израчунати као [174]:



Слика 13: Амплитудна и фазна карактеристика за функцију преноса у отвореној спрези.

$$\delta_m = \sin^{-1} \left(\frac{1 - \tau_i \cdot \frac{K_{iv}}{K_{pv}}}{1 + \tau_i \cdot \frac{K_{iv}}{K_{pv}}} \right), \tag{3.27}$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_{i\nu}}{K_{p\nu}} \cdot \frac{1}{\tau_i}}.$$
(3.28)

Уколико се пресечна учестаност напонске петље ω_{cv} изабере тако да буде једнака ω_m , претек фазе биће једнак углу δ_m . Претек фазе се одређује приликом дизајна регулатора и обично се бира да буде између 30° и 75°. Притом, појачање које ПИ регулатор уноси мора задовољити следећу једначину:

$$|G_{\nu}(j\omega_{c\nu})| = |G_{\nu}(j\omega_{m})| = 1.$$
(3.29)

Уважавајући (3.27) и (3.29), може се израчунати коефицијент пропорционалног дејства.

$$\left|\frac{K_{pv}\cdot\left(j\omega_{cv}+\frac{K_{iv}}{K_{pv}}\right)}{C_f\cdot\tau_i\cdot(j\omega_{cv})^2\cdot\left(j\omega_{cv}+\frac{1}{\tau_i}\right)}\right| = 1$$
(3.30)

$$\frac{K_{pv}}{C_f \cdot \tau_i \cdot \omega_{cv}^2} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{K_{iv}}{K_{pv}}\right)^2 + \omega_{cv}^2}{\left(\frac{1}{\tau_i}\right)^2 + \omega_{cv}^2}} = 1$$
(3.31)

Ако се нађе количник K_{iv}/K_{pv} из израза (3.28) и уврсти у (3.31), добија се:

$$\frac{K_{pv}}{C_f \cdot \tau_i \cdot \omega_{cv}^2} \cdot \sqrt{\frac{\omega_{cv}^4 \cdot \tau_i^2 + \omega_{cv}^2}{\left(\frac{1}{\tau_i}\right)^2 + \omega_{cv}^2}} = 1,$$
(3.32)

$$\frac{K_{pv}}{C_f \cdot \tau_i \cdot \omega_{cv}^2} \cdot \sqrt{\frac{\omega_{cv}^2 \cdot (\omega_{cv}^2 \cdot \tau_i^2 + 1)}{\left(\frac{1}{\tau_i}\right)^2 \cdot (1 + \omega_{cv}^2 \cdot \tau_i^2)}} = 1,$$
(3.33)

$$\frac{K_{pv}}{C_f \cdot \tau_i \cdot \omega_{cv}^2} \cdot \sqrt{\omega_{cv}^2 \cdot \tau_i^2} = 1, \qquad (3.34)$$

одакле коначно следи:

$$K_{pv} = C_f \cdot \omega_{cv}, \tag{3.35}$$

$$K_{i\nu} = K_{p\nu} \cdot \tau_i \cdot \omega_{c\nu}. \tag{3.36}$$

Када се примени метод симетричног оптимума, функција преноса у затвореној спрези биће трећег реда. Такав систем за овако одабране параметре има један реалан пол у $s = -\omega_{cv}$ и два комплексно конјугована пола смештена на обиму круга чији је пречник једнак ω_{cv} .

Стога, да би се пронашли параметри ПИ регулатора у напонској петљи, потребно је:

- 1) дефинисати фазну маргину δ_m ,
- дефинисати пресечну учестаност напонске петље ω_{cv} (треба да буде бар 3-5 пута мања од пресечне учестаности струјне петље),
- 3) нађе се *К*_р из (3.35),
- 4) нађе се *К*_{*iv*} из (3.36).

Слично као код струјног регулатора, и код напонског регулатора је потребно да се на излаз регулатора додају још распрежући ($-\omega C_f v_{Cf}^q$ за d осу и $\omega C_f v_{Cf}^d$ за q осу) и feed-forward ($+i_{Lf2}^d$ за d осу и $+i_{Lf2}^q$ за q осу) чланови, што се види на основу израза (3.24) и (3.25). На овај начин постиже се распрегнуто управљање напоном кондензатора по d и q осама. Излаз регулатора напона, с додатим распрежућим и feed-forward члановима представља референцу за струјну петљу. Нулти ниво управљања ће добијати референтне вредности напона на кондензатору од хијерархијски надређеног управљачког нивоа – примарног управљања.

Коначно, на слици 14 дата је комплетна шема напонског и струјног регулатора, односно структура нултог нивоа управљања инвертора.



Слика 14: Структура унутрашње напонске и струјне петље код инвертора повезаног на микромрежу.

3.2.3. Виртуелна импеданса

Као и код друп управљања, могуће је емулирати постојање виртуелне импедансе на излазу из претварача. Виртуелна импеданса уноси пригушење у систем и тиме позитивно утиче на стабилност. Референтне вредности напона на кондензатору се могу кориговати на следећи начин:

$$v_{Cf}^{d \ ref} = v_{Cf0}^{d \ ref} - R_{vi} \cdot i_{Lf2}^{d} + \omega L_{vi} \cdot i_{Lf2}^{q}, \qquad (3.37)$$

$$v_{Cf}^{q \ ref} = 0 - R_{vi} \cdot i_{Lf2}^{q} - \omega L_{vi} \cdot i_{Lf2}^{d}, \qquad (3.38)$$

где $v_{Cf}^{q \ ref}$ представља кориговану референцу напона која се добија тако што се од почетне референце $v_{Cf0}^{d \ ref}$ одузме пад напона на виртуелној импеданси.

Избор вредности виртуелне отпорности и виртуелне индуктивности није једноставан задатак. Погрешно одабране вредности могу да доведу до нестабилности система. Стога, или се вредност ових параметара одређује неком оптимизационом методом или се бирају тако да пад напона на виртуелној отпорности не прелази 5%, а на индуктивности 3% [134]. Виртуелна индуктивност доприноси бољој расподели снага између јединица, док виртуелна отпорност пригушује одзив [176]. Приликом имплементације алгоритма у овој дисертацији, коришћена је виртуелна отпорност.

3.3. Предложено примарно управљање засновано на функцији циља

Док је нулти ниво управљања задужен само за рад једне дистрибуиране јединице, виши нивои управљања задужени су за усклађен рад више јединица. Основна идеја предложеног примарног управљања је да свака јединица контролише максимално одступање учестаности и напона у чворовима од задатих вредности. Пошто су одступања учестаности и напона два кључна показатеља стабилног рада микромреже, примарна контрола би за основни задатак требало да има управљање овим величинама.

Поред ова два примарна управљачка циља, изузетно је важно омогућити жељену размену активне снаге између дистрибуираних јединица, односно купаца-произвођача. Због непредвидивог рада дистрибуираних извора у микромрежама, размена активних снага између чворова је од великог значаја за рад микромреже. Осим тога, у духу дерегулације и либерализације тржишта електричне енергије јесте да купци-произвођачи могу самостално да тргују електричном енергијом, радећи како у свом интересу, тако и у интересу оператера микромреже. Погодном разменом снаге између чворова могуће је смањити укупне губитке у микромрежи, омогућити сигурно и поуздано напајање потрошачима, смањити трошкове рада микромреже, повећати ефикасност искоришћења енергије итд. Овде врло битну улогу играју и складишта електричне енергије, која потпомажу флексибилнији рад микромреже.

Са становишта архитектуре примарног управљања, напоменуто је да децентрализовано управљање има предност у односу на централизовано и дистрибуирано пошто не захтева постојање комуникационе мреже, чиме се повећава поузданост рада и скалабилност читаве микромреже. То значи да управљачки закон који управља радом сваке јединице за реализацију захтева искључиво локална мерења и да нема потребе за комуникацијом с другим јединицама.

Друп управљање, које је широко усвојено као најједноставније, а притом задовољавајуће ефикасна примарна управљачка стратегија, омогућава постизање нове стабилне радне тачке након поремећаја, али с присутним одступањем учестаности и вредности напона од називних вредности. Различита унапређења друп управљања су предлагана у литератури с различитим циљевима: смањење девијације учестаности и напона, омогућавање бољих динамичких карактеристика система, примена у мрежама с различитим *X/R* односима итд. Међутим, иницијално једноставно друп управљање с различитим надоградњама може да постане захтевније са становишта имплементације, подложније нестабилности и осетљивије на промену параметара. Стога, циљ ове дисертације јесте да се развије управљачки алгоритам који ће представљати алтернативу друп управљању, а притом решити неке од проблема који постоје код друп управљања.

Пошто постоји више управљачких циљева, који су међусобно супротстављени (попут постизања жељене размене снага и номиналне вредности учестаности и напона), основна идеја јесте да се постављени циљеви квантификују јединственом функцијом коју називамо функцијом циља (енгл. *goal function*). Вредност ове функције биће једнака нули само ако су сви циљеви идеално задовољени. Њена вредност ће бити тим већа што је одступање од појединих циљева веће, узимајући у обзир релативну важност појединачних циљева. Овакав приступ у управљању је интересантан за све области у којима је потребно вршити вишекритеријумску оптимизацију, а највећу примену је нашао код вишеагентних система, роботици, аутономној вожњи итд. [177].

За сваки чвор $\ell \in \mathcal{N}$ предлаже се функција циља V_{ℓ} у следећем облику:

$$V_{\ell} = \alpha \left(P_{\ell} - P_{\ell}^{ref} \right) + \beta \left(v_{\ell} - v^{ref} \right). \tag{3.39}$$

Функцијом циља се дефинише релативни значај одступања активне снаге $\Delta P_{\ell} = P_{\ell} - P_{\ell}^{ref}$ и напона чвора $\Delta v_{\ell} = v_{\ell} - v^{ref}$ од жељених вредности. Укупна излазна активна снага чвора означена је симболом P_{ℓ} . Подразумева се да чворови могу добијати различите референтне вредности активне снаге P_{ℓ}^{ref} , али да је референтна вредност напона v^{ref} иста за све чворове и једнака називној вредности напона. Претпоставља се да су напонски нивои унутар микромреже исти или да су сведени на исти ниво.

Интересантно је приметити да се у дефиницији функције циља непосредно појављују активна снага и напон, али не и учестаност чвора. Одабиром ове функције ограничава се одступање напона чвора од називне вредности, те кажњава свако одступање размењене од уговорене активне снаге. Одступање учестаности од називне вредности биће ограничено погодним избором закона управљања, о чему ће бити речи у наставку.

Тежинске функције α и β , које одређују релативни значај одступања активне снаге и напона, представљају начелно произвољне симетричне, конвексне функције како би се подједнако уважавала одступања и позитивног и негативног предзнака. Ако се усвоји да је приоритетније остварити жељену вредност модула фазора напона у односу на жељену вредност активне снаге, тежинске функције треба бирати у складу с тим. Предлог функција α и β дат је у наставку:

$$\alpha(\Delta P_{\ell}) = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{\ell}^{2}, \qquad (3.40)$$

$$\beta(\Delta v_{\ell}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta v_{\ell}^{2}}{\Delta v_{max}^{2} - \Delta v_{\ell}^{2}},$$
(3.41)

где је Δv_{max} максимално дозвољено одступање напона од задате (називне) вредности, а имплицитно је претпостављено да је домен дефинисаности функције $\beta: \Delta v_{\ell} < \Delta v_{max}$. Функције α и β су приказане на слици 15. Јасно је да је вредност функције циља, дате изразом (3.39), мања што су вредности функција α и β мање, односно што су мања одступања активне снаге и напона



Слика 15: Графички приказ функција ограничења α и β у Декартовом координатном систему.

од задатих вредности. Сходно томе, управљачки закон имаће за задатак да управљачким дејствима минимизује вредност функције циља.

Функција α је квадратна и важи да $\alpha: \mathbb{R} \to \mathbb{R}^+$, а њен допринос вредности функције циља је увек ограничен због тога што су ограничене и задата и остварена активна снага. С друге стране, функција β је ограничавајућа (баријерна) функција. Када одступање напона Δv_ℓ расте и ближи се максимално дозвољеној вредности Δv_{max} , вредност функције β тежи бесконачности. То значи да ће управљачка дејства брзо бити усмерена ка томе да се радна тачка помери у област у којој је одступање мање, чак и по цену да постоји одступање активне снаге од задате вредности. Притом, важно је напоменути да би радна тачка увек требало да се налази у области за коју важи $|\Delta v| < \Delta v_{max}$. Када то није случај, сав управљачки напор треба усмерити ка успостављању прихватљивих вредности напона, без обзира на тренутну грешку размене активне снаге. Тек када се чвор врати у прихватљиви радни режим, закон управљања сме део својих напора усмерити и на успостављање жељеног режима размене снага.

Наравно, ово није једини могући избор тежинских функција α и β . Њиховим погодним одабиром може се вршити приоритизација различитих управљачких циљева, подешавати дозвољена вредност одступања спрам захтева које налаже *Grid codes*, утицати на динамичко понашање система итд. Управљачки закон треба да буде осмишљен тако да управљачка дејства буду усмерена ка томе да се вредност функције циља минимизује. Пошто функција најбрже опада у правцу негативног градијента, за поставку закона управљања користи се градијентни метод [178], [179]. Градијент функције је вектор који показује у ком правцу и колико брзо се функција мења. Сходно томе, минимизација функције се може постићи праћењем градијента. Код примене градијентног метода, радна тачка се креће од неког почетног положаја и итеративно помера у смеру супротном од градијента, на основу информација о брзини промене функције. Овај процес се понавља док се не достигне одређени услов заустављања, као што је дефинисани број итерација или довољно мала промена између корака. У складу с тим, управљачки закон за чвор ℓ записан у општем облику једначинама (3.8) и (3.9) бира се:

$$\dot{v}_{\ell} = w_{\ell} = -k_{v_{\ell}} \cdot \frac{\partial V_{\ell}}{\partial v_{\ell}},\tag{3.42}$$

$$\dot{\theta}_{\ell} = \omega_{\ell} = -\eta \left(k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} \right) + \omega^{ref}.$$
(3.43)

У закон управљања уведени су и позитивни реални параметри k_v и k_{θ} којима се подешава динамика промене напона и учестаности, а последично и осталих величина. Ови параметри начелно не морају бити исти за све чворове. Мање вредности параметра k_{θ} одговарају



Слика 16: Графички приказ сатурационе функције η.

већој осетљивости управљачког алгоритма на промену угла, тј. учестаности и обрнуто. Референтна угаона учестаност система означена је као ω^{ref} , одступање учестаности од задате вредности одређено је чланом $\eta \left(k_{\theta_\ell} \cdot \frac{\partial V_\ell}{\partial \theta_\ell}\right)$ у (3.43). Ово одступање ограничено је увођењем још једне функције која носи ознаку η . Пошто је учестаност система неопходно одржавати у тачно дефинисаним границама, добар избор је ограничавајућа функција:

$$\eta(x) = \Delta \omega_{max} \cdot \tanh x, \tag{3.44}$$

где је $\Delta \omega_{max}$ максимално дозвољено одступање учестаности од задате вредности. У изразу (2.44) аргумент функције η , обележен ознаком x, узима вредност $k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}}$.

Задата вредност учестаности би требало да буде називна. Функција η је монотоно растућа и важи да $\eta: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$. Уз то, има следеће важне особине: $x \cdot \eta(x) > 0, \forall x \in \mathbb{R}$ и $|\eta(x)| < \Delta \omega_{max}$. Графичка репрезентација ове функције дата је на слици 16.

Да би се дошло до коначног облика управљачког закона, потребно је даље проширити изразе (3.42) и (3.43). Уколико се пође од (3.42), добијају се следеће једначине.

$$w_{\ell} = -k_{v_{\ell}} \cdot \frac{\partial}{\partial v_{\ell}} [\alpha(\Delta P_{\ell}) + \beta(\Delta v_{\ell})]$$
(3.45)

$$w_{\ell} = -k_{\nu_{\ell}} \cdot \left[\alpha'(\Delta P_{\ell}) \cdot \frac{\partial P_{\ell}}{\partial \nu_{\ell}} + \beta'(\Delta \nu_{\ell}) \right]$$
(3.46)

Ознакама α' и β' су дати први изводи функција α и β по аргументима ΔP_{ℓ} и Δv_{ℓ} , редом.

Излазна активна снага чвора P_{ℓ} дата је једначином (3.6). Парцијални извод активне снаге по напону чвора биће једнак:

$$\frac{\partial P_{\ell}}{\partial v_{\ell}} = \sum_{k \neq \ell} [2v_{\ell} \cdot G_{\ell k} - v_{k} \cdot G_{\ell k} \cdot \cos \delta_{\ell k} + v_{k} \cdot B_{\ell k} \cdot \sin \delta_{\ell k}].$$
(3.47)

У претходној једначини фигуришу чланови који представљају суму свих оточних кондуктанси и сусцептанси чвора ℓ , па се могу компактније записати на следећи начин:

$$G_{\ell} = \sum_{k \neq \ell} G_{\ell k}, \tag{3.48}$$

$$B_{\ell} = \sum_{k \neq \ell} B_{\ell k}.$$
(3.49)

47

Из (3.47) следи једнакост:

$$P_{\ell} = \frac{\partial P_{\ell}}{\partial v_{\ell}} \cdot v_{\ell} - v_{\ell}^2 \cdot G_{\ell}, \qquad (3.50)$$

па се парцијални извод активне снаге по напону може записати као:

$$\frac{\partial P_{\ell}}{\partial v_{\ell}} = \frac{P_{\ell} + v_{\ell}^2 \cdot G_{\ell}}{v_{\ell}} = \frac{P_{\ell}}{v_{\ell}} + v_{\ell} \cdot G_{\ell}, \qquad (3.51)$$

и потом уврстити у (3.46) тако да се добије:

$$w_{\ell} = -k_{\nu_{\ell}} \cdot \left[\alpha'(\Delta P_{\ell}) \cdot \left(\frac{P_{\ell}}{\nu_{\ell}} + \nu_{\ell} \cdot G_{\ell} \right) + \beta'(\Delta \nu_{\ell}) \right].$$
(3.52)

Сличан поступак се може поновити и ако се пође од једначине (3.43) како би се дефинисала учестаност чвора.

$$\omega_{\ell} = -\eta \left[k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_{\ell}} \left(\alpha(\Delta P_{\ell}) + \beta(\Delta v_{\ell}) \right) \right] + \omega^{ref}$$
(3.53)

$$\omega_{\ell} = -\eta \left[k_{\theta_{\ell}} \cdot \alpha' (\Delta P_{\ell}) \cdot \frac{\partial P_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} \right] + \omega^{ref}$$
(3.54)

Парцијални извод активне снаге по углу напона чвора биће једнак:

$$\frac{\partial P_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} = \sum_{k \neq \ell} [v_{\ell} \cdot v_k \cdot G_{\ell k} \cdot \sin \delta_{\ell k} + v_{\ell} \cdot v_k \cdot B_{\ell k} \cdot \cos \delta_{\ell k}].$$
(3.55)

Могуће је наћи везу између излазне реактивне снаге чвора Q_{ℓ} дате изразом (3.7) и израза (3.55):

$$Q_{\ell} = -\frac{\partial P_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} + v_{\ell}^2 \cdot B_{\ell}, \qquad (3.56)$$

па се парцијални извод активне снаге по углу може записати као:

$$\frac{\partial P_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} = -Q_{\ell} + v_{\ell}^2 \cdot B_{\ell}, \qquad (3.57)$$

и вратити у једначину (3.54), чиме се добија:

$$\omega_{\ell} = -\eta \left[k_{\theta_{\ell}} \cdot \alpha' (\Delta P_{\ell}) \cdot \left(-Q_{\ell} + v_{\ell}^2 \cdot B_{\ell} \right) \right] + \omega^{ref}$$
(3.58)

Коначан облик предложеног закона управљања дат је једначинама (3.52) и (3.58).

$$\dot{v}_{\ell} = w_{\ell} = -k_{\nu_{\ell}} \cdot \left[\alpha'(\Delta P_{\ell}) \cdot \left(\frac{P_{\ell}}{\nu_{\ell}} + \nu_{\ell} \cdot G_{\ell} \right) + \beta'(\Delta \nu_{\ell}) \right]$$
(3.52)

$$\dot{\theta}_{\ell} = \omega_{\ell} = -\eta \left[k_{\theta_{\ell}} \cdot \alpha' (\Delta P_{\ell}) \cdot \left(-Q_{\ell} + v_{\ell}^2 \cdot B_{\ell} \right) \right] + \omega^{ref}$$
(3.58)

Предложени закон управљања дефинише како треба да изгледа фазор напона у сваком чвору да би се постигли раније дефинисани управљачки циљеви.

Пошто нулти ниво управљања контролише напон на кондензатору LCL филтра, референца за овај напон добијаће се из предложеног примарног управљачког алгоритма. Узимајући у обзир да је пад напона на калему са стране мреже мали, може се сматрати да су напон на кондензатору и напон у чвору приближно једнаки.

Информацију о излазној активној и реактивној снази је могуће добити мерењем, а исто важи и за модуо фазора напона чвора. Такође, излазна кондуктанса и сусцептанса чвора могу да

се естимирају користећи неке од познатих техника за естимацију излазне импедансе [180], [181] или информацију о њима може проследити оператер микромреже. У овој дисертацији излазна активна и реактивна снага било ког чвора су рачунате на основу мерених вредности напона на кондензатору и излазне струје LCL филтра на основу израза (3.59) и (3.60). Разлог за овакав приступ је смањење броја потребних мерења.

$$P = u_{Cf}^{a} \cdot i_{Lf2}^{a} + u_{Cf}^{b} \cdot i_{Lf2}^{b} + u_{Cf}^{c} \cdot i_{Lf2}^{c}$$
(3.59)

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[\left(u_{Cf}^{a} - u_{Cf}^{b} \right) \cdot i_{Lf2}^{c} + \left(u_{Cf}^{b} - u_{Cf}^{c} \right) \cdot i_{Lf2}^{a} + \left(u_{Cf}^{c} - u_{Cf}^{a} \right) \cdot i_{Lf2}^{b} \right]$$
(3.60)

Одступања учестаности и напона у предложеном управљачком закону одређена су параметрима $\Delta \omega_{max}$ и Δv_{max} . Ова одступања су јасно дефинисана у оквиру *Grid codes*. Стога, предложени закон управљања може имати инхерентно уграђене захтеве *Grid codes*. Границе одступања се могу мењати и у току рада микромреже, уколико је то неопходно. Уобичајено дозвољено одступање учестаности од називне вредности је ±1%, а напона ±10%. Интуитивно се да наслутити да, уколико се задају већа одступања, управљачки алгоритам има више флексибилности да пронађе нову тачку и самим тим ће одзив бити бржи. Уколико се дефинишу врло мала дозвољена одступања учестаности и напона, кретање радне тачке ће бити спорије. Пошто се оваквим управљачким законом одступања директно контролишу, предложени управљачки закон има инхерентно уграђен механизам стабилизације рада микромреже.

На основу (3.52) и (3.58) јасно је да је предложени закон управљања у потпуности децентрализован пошто се користе само локалне величине, односно величине које се мере или естимирају у чвору ℓ. Чворови не морају да комуницирају међусобно како би се учестаност и напон одржавали у жељеном опсегу. Међутим, чворови би требало да добијају од хијерархијски вишег управљачког нивоа задату вредност активне снаге коју треба да произведу на основу дефинисаних уговора о трговини енергијом. Притом, уколико се занемаре губици водова, треба да важи следеће:

$$P_{\ell k}^{ref} = -P_{k\ell}^{ref}, \tag{3.61}$$

односно референце размењене снаге између нека два чвора ℓ и k ($\ell, k \in \mathcal{N}$) треба да буду исте апсолутне вредности, само снага чвора који снагу предаје има позитиван предзнак, док снага чвора који снагу узима има негативан предзнак. Укупна излазна снага чвора дефинише се као:

$$P_{\ell}^{ref} = \sum_{k \neq \ell} P_{\ell k}^{ref}.$$
(3.62)

Начелно, функција циља не мора бити исто дефинисана за све чворове. Она се може разликовати код неких чворова који имају специјалне функције, чворова на посебним позицијама, чворова који су често преоптерећени, који имају велике капацитете за складиштење електричне енергије итд.

У предложеној функцији циља се од чворова (прецизније, дистрибуираних јединица које су у чворовима повезане) не захтева прецизна производња реактивне снаге. Разлог за ово је чињеница да је иначе трговина реактивном енергијом врло мало заступљена у мрежама. Инјектовање реактивне снаге најчешће се врши како би се у чворовима мреже побољшале напонске прилике, а предложена функција циља је већ осмишљена тако да се за све радне тачке постигну повољне напонске прилике. Наравно, и прецизна размена реактивне снаге се може узети као управљачки циљ и уврстити у функцију циља. Тиме би се добио нешто сложенији управљачки закон. Међутим, и динамика система би била спорија пошто би истовремено било потребно задовољити већи број управљачких циљева. Тренутно, производња реактивне снаге није управљана, али њена слободна производња потпомаже испуњење осталих управљачких циљева – прецизно управљање девијацијама учестаности и напона, као и тачну размену активних снага између чворова. Како производња реактивне снаге није директно управљана, тренутно је начелно могуће постићи радну тачку у којој се остварује називна жељена вредност активне снаге, али и потенцијално велика вредност реактивне снаге. Другим речима, излазна струја инвертора може да надмаши називну вредност. Овај проблем се једноставно решава тако што се у управљачку структуру уврсти и ограничење струја. Пошто је управљање излазном струјом инвертора имплементирано у управљачки алгоритам, једноставно је придодати и механизам за ограничење струја.

3.3.1. Анализа устаљеног стања система

Ако се математички модел неке микромреже запише у простору стања, вектор стања садржи модуле фазора напона и фазне ставове свих напона чворова. У устаљеном стању нема промене вектора стања, односно његов први извод једнак је нули.

$$\dot{\nu}_{\ell} = 0, \tag{3.63}$$

$$\dot{\theta}_{\ell} = 0 \Rightarrow \omega_{\ell} = \overline{\omega} = const.$$
 (3.64)

Из (3.64) следи да учестаност свих чворова у устаљеном стању има вредност $\overline{\omega}$. Ако се вредности и осталих величина у устаљеном стању запишу надвученим симболима и уврсте у коначан облик предложеног закона управљања, важи да је:

$$\alpha'(\Delta P_{\ell}) \cdot \left(\frac{\bar{P}_{\ell}}{\bar{\nu}_{\ell}} + \bar{\nu}_{\ell} \cdot G_{\ell}\right) + \beta'(\Delta \nu_{\ell}) = 0, \qquad (3.65)$$

$$\Delta \omega = \overline{\omega} - \omega^{ref} = -\eta \left[k_{\theta_{\ell}} \cdot \alpha' (\Delta P_{\ell}) \cdot \left(-\overline{Q}_{\ell} + \overline{v}_{\ell}^2 \cdot B_{\ell} \right) \right].$$
(3.66)

Пошто је функција η изабрана тако да је обострано једнозначна (бијективна), следи да је:

$$\alpha'(\Delta P_{\ell}) \cdot \left(\frac{\bar{P}_{\ell}}{\bar{\nu}_{\ell}} + \bar{\nu}_{\ell} \cdot G_{\ell}\right) = -\beta'(\Delta \nu_{\ell}), \qquad (3.67)$$

$$\frac{\alpha'(\Delta P_{\ell})}{\alpha'(\Delta P_{k})} = \frac{\Delta P_{\ell}}{\Delta P_{k}} = \frac{k_{\theta_{k}} \cdot \left(-\bar{Q}_{k} + \bar{v}_{k}^{2} \cdot B_{k}\right)}{k_{\theta_{\ell}} \cdot \left(-\bar{Q}_{\ell} + \bar{v}_{\ell}^{2} \cdot B_{\ell}\right)}.$$
(3.68)

Једначина (3.67) даје везу између грешке у напону и снази, док једначина (3.68) важи за било која два чвора ℓ и k у устаљеном стању. Из последње једначине се види да параметром k_{θ} може да се утиче на прерасподелу активне снаге између јединица. Што је овај параметар већи, тежиће се тачнијој расподели активних снага међу јединицама.

3.3.2. Стабилност предложеног закона управљања

Питање стабилности микромреже може се свести на питање да ли је могуће остварити радну тачку у којој ће одступања учестаности и напона чворова микромреже бити ограничена. Добрим избором поставке управљачког закона датим изразом (3.43) и функције η из (3.44), јасно је да ће одступање учестаности бити ограничено. Вредност произведене активне снаге је свакако ограничена, па самим тим и њено одступање. Стога, потребно је показати и да ће увек важити да је одступање вредности напона мање од Δv_{max} . Да би се ово показало, прво се може дефинисати глобална функција циља V, која у обзир узима функције циља свих чворова из (3.39).

$$V = \sum_{\ell=1}^{n} V_{\ell} \tag{3.69}$$

На основу израза (3.39) и због природе промена функција α и β , јасно је да је функција β та која може да буде неограничена и да је њен допринос вредности функције циља доминантан. Из тог разлога, функција циља је ограничена само ако је одступање напона мање од дефинисане границе Δv_{max} .

Уколико важи да је први извод глобалне функције циља *V* из (3.69) увек негативан, следи да је функција *V* опадајућа, односно да ће њена вредност да се смањује. То значи да су учестаност и модуо напона ближи називним вредностима, тј. да је микромрежа стабилна. Први извод функције циља добија се као:

$$\dot{V} = \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial \nu_{\ell}} \cdot \dot{\nu}_{\ell} + \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} \cdot \dot{\theta}_{\ell}.$$
(3.70)

Парцијални изводи глобалне функције циља по модулу и углу напона могу да се нађу као:

$$\frac{\partial V}{\partial v_{\ell}} = \frac{\partial}{\partial v_{\ell}} \sum_{k=1}^{n} V_{k} = \frac{\partial V_{\ell}}{\partial v_{\ell}} + \sum_{k \neq \ell} \frac{\partial V_{k}}{\partial v_{\ell}} = \frac{\partial V_{\ell}}{\partial v_{\ell}} + d_{\ell}^{v}, \qquad (3.71)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} = \frac{\partial}{\partial \theta_{\ell}} \sum_{k=1}^{n} V_{k} = \frac{\partial V_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} + \sum_{k \neq \ell} \frac{\partial V_{k}}{\partial \theta_{\ell}} = \frac{\partial V_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} + d_{\ell}^{\theta}.$$
(3.72)

Чланови d_{ℓ}^{ν} и d_{ℓ}^{θ} представљају разлику у парцијалним изводима глобалне и локалне функције циља по модулу фазора напона и углу напона, редом. За потребе даље анализе стабилности, ови чланови посматраће се као поремећај у систему зато што се не могу знати на основу локалних информација у чвору ℓ . С обзиром да је циљ био пројектовање децентрализованог закона управљања, ови чланови морају се сматрати непознатима, а стабилност се мора гарантовати упркос њима. На основу израза:

$$d_{\ell}^{\nu} = \sum_{k \neq \ell} \frac{\partial V_k}{\partial \nu_{\ell}} = \sum_{k \neq \ell} \alpha' (\Delta P_k) \cdot \frac{\partial P_k}{\partial \nu_{\ell}}, \qquad (3.73)$$

$$d_{\ell}^{\theta} = \sum_{k \neq \ell} \alpha'(\Delta P_k) \cdot \frac{\partial P_k}{\partial \theta_{\ell}}, \qquad (3.74)$$

јасно је да су чланови d_{ℓ}^{v} и d_{ℓ}^{θ} ограничени пошто су и вредности задате и остварене активне снаге ограничене, као и извод функције α .

Како из (3.71) и (3.72) следи:

$$\frac{\partial V_{\ell}}{\partial v_{\ell}} = \frac{\partial V}{\partial v_{\ell}} - d_{\ell}^{v}, \qquad (3.75)$$

$$\frac{\partial V_{\ell}}{\partial \theta_{\ell}} = \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} - d_{\ell}^{\theta}, \qquad (3.76)$$

управљачки закон дат једначинама (3.42) и (3.43) се може записати користећи глобалне функције циља уместо локалних:

$$\dot{v}_{\ell} = w_{\ell} = -k_{v_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial v_{\ell}} + k_{v_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{v}, \qquad (3.77)$$

$$\dot{\theta}_{\ell} = \omega_{\ell} = -\eta \left(k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} - k_{\theta_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{\theta} \right) + \omega^{ref}.$$
(3.78)

Уврштавајући (3.77) и (3.78) у (3.70), извод глобалне функције циља се даље може записати као:

$$\dot{V} = \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial v_{\ell}} \cdot \left[-k_{v_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial v_{\ell}} + k_{v_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{v} \right] + \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} \cdot \left[-\eta \left(k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} - k_{\theta_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{\theta} \right) + \omega^{ref} \right].$$
(3.79)

Пошто је функција η диференцијабилна над читавим доменом, из Лангражове теореме о средњој вредности [182] следи да $\forall x, \Delta x \in \mathbb{R}$ важи:

$$\eta(x + \Delta x) = \eta(x) + \eta'(\xi) \cdot \Delta x, \qquad (3.80)$$

за неко ξ из интервала ($x, x + \Delta x$). Имајући у виду да је извод функције η ограничен, може се закључити да се увек може наћи реалан број c_{ℓ} такав да:

$$\eta \left(k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} - k_{\theta_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{\theta} \right) = \eta \left(k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} \right) - c_{\ell} \cdot k_{\theta_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{\theta}.$$
(3.81)

Даље, пошто су вредности функције η , као и парцијални извод $\partial V / \partial \theta_{\ell}$ ограничени, може се наћи и b_{ℓ} коначне вредности такво да је:

$$\eta \left(k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} \right) = k_{\theta_{\ell}} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} + b_{\ell} \right). \tag{3.82}$$

Овим изразом се успоставља коначна разлика између вредности израза $k_{\theta_{\ell}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}}$ пре и после примене ограничавајуће функције η . Сходно томе, извод глобалне функције циља једнак је:

$$\dot{V} = \sum_{\ell=1}^{n} \underbrace{-k_{\nu_{\ell}} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial \nu_{\ell}}\right)^{2}}_{<0} \underbrace{-k_{\theta_{\ell}} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}}\right)^{2}}_{<0} + \sum_{\ell=1}^{n} k_{\nu_{\ell}} \cdot d_{\ell}^{\nu} \cdot \frac{\partial V}{\partial \nu_{\ell}} - k_{\theta_{\ell}} \cdot \left(b_{\ell} - c_{\ell} \cdot d_{\ell}^{\theta}\right) \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} + \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} \cdot \omega^{ref}.$$
(3.83)

Очигледно је да су прва два члана с десне стране једнакости претходног израза негативне вредности. Даље ћемо испитати знак суме парцијалних извода глобалне функције циља по углу напона:

$$\sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} = \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial}{\partial \theta_{\ell}} \cdot \sum_{k=1}^{n} V_{k} = \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial}{\partial \theta_{\ell}} \cdot \sum_{k=1}^{n} \alpha \left(P_{k} - P_{k}^{ref} \right) + \beta \left(v_{k} - v^{ref} \right).$$
(3.84)

Пошто функција β не зависи од угла, парцијални извод једнак је нули, па следи:

$$\sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} = \sum_{\ell=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \alpha' \left(P_{k} - P_{k}^{ref} \right) \cdot \frac{\partial P_{k}}{\partial \theta_{\ell}}, \tag{3.85}$$

52

$$\sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} = \sum_{k=1}^{n} \alpha' \left(P_{k} - P_{k}^{ref} \right) \cdot \underbrace{\sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial P_{k}}{\partial \theta_{\ell}}}_{\Delta}.$$
(3.86)

Може се показати да је последњи члан, обележен с Д, из (3.86) једнак нули:

$$\Delta = \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_\ell} = \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial}{\partial \theta_\ell} \sum_{\ell \neq k} P_{k\ell} = \sum_{\ell=1}^{n} \sum_{\ell \neq k} \left(\frac{\partial P_{k\ell}}{\partial \theta_k} + \frac{\partial P_{k\ell}}{\partial \theta_\ell} \right), \tag{3.87}$$

пошто из (3.6) и чињенице да је $\partial \delta_{k\ell} / \partial \theta_k = 1$ и $\partial \delta_{k\ell} / \partial \theta_\ell = -1$, важи да је:

$$\frac{\partial P_{k\ell}}{\partial \theta_{\ell}} = + v_k \cdot v_{\ell} \cdot G_{k\ell} \cdot \sin \delta_{k\ell} - v_k \cdot v_l \cdot B_{k\ell} \cdot \cos \delta_{k\ell}, \qquad (3.88)$$

$$\frac{\partial P_{k\ell}}{\partial \theta_k} = -v_k \cdot v_\ell \cdot G_{k\ell} \cdot \sin \delta_{k\ell} + v_k \cdot v_\ell \cdot B_{k\ell} \cdot \cos \delta_{k\ell}, \qquad (3.89)$$

односно

$$\frac{\partial P_{k\ell}}{\partial \theta_{\ell}} = -\frac{\partial P_{k\ell}}{\partial \theta_k},\tag{3.90}$$

и последично

$$\sum_{\ell=1}^{n} \frac{\partial V}{\partial \theta_{\ell}} = 0.$$
(3.91)

Надаље, треба испитати још утицај друга два члана. Да би се то учинило, као помоћ, увешће се следећа векторска нотација:

$$\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{v}} = \begin{bmatrix} \sqrt{k_{v_1}} \cdot \frac{\partial V}{\partial v_1} & \sqrt{k_{v_2}} \cdot \frac{\partial V}{\partial v_2} & \dots & \sqrt{k_{v_n}} \cdot \frac{\partial V}{\partial v_n} \end{bmatrix},$$
(3.92)

$$\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \sqrt{k_{\theta_1}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_1} & \sqrt{k_{\theta_2}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_2} & \dots & \sqrt{k_{\theta_n}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta_n} \end{bmatrix},$$
(3.93)

$$\boldsymbol{S} = [\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{\nu}} \quad \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{\theta}}]^T, \tag{3.94}$$

$$\boldsymbol{d}_{\boldsymbol{\nu}} = \begin{bmatrix} \sqrt{k_{\nu_1}} \cdot d_1^{\boldsymbol{\nu}} & \sqrt{k_{\nu_2}} \cdot d_2^{\boldsymbol{\nu}} & \dots & \sqrt{k_{\nu_n}} \cdot d_n^{\boldsymbol{\nu}} \end{bmatrix},$$
(3.95)

$$\boldsymbol{d}_{\boldsymbol{\theta}} = \left[\sqrt{k_{\theta_1}} \cdot \left(b_1 - c_1 \cdot d_1^{\boldsymbol{\theta}} \right) \quad \sqrt{k_{\theta_2}} \cdot \left(b_2 - c_2 \cdot d_2^{\boldsymbol{\theta}} \right) \quad \dots \quad \sqrt{k_{\theta_n}} \cdot \left(b_n - c_n \cdot d_n^{\boldsymbol{\theta}} \right) \right], \quad (3.96)$$

$$\boldsymbol{d} = [\boldsymbol{d}_{\boldsymbol{\nu}} \quad \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{\theta}}]^T, \tag{3.97}$$

па се (3.83) може записати као:

$$\dot{V} = -\mathbf{S}^T \cdot (\mathbf{S} + \mathbf{d}). \tag{3.98}$$

Пошто треба показати ограниченост глобалне функције циља V, треба видети да ли важи да је $\dot{V} < 0$ у критичном случају када вредност функције β порасте услед приближавања напона било ког од чворова вредности $v^{ref} \pm \Delta v_{max}$. Узимајући у обзир (3.98), најнеповољнији случај присутан је ако су вектори **d** и **S** антипаралелни (видети слику 17), односно важи да је:

$$\boldsymbol{d} = -\|\boldsymbol{d}\| \cdot \frac{\boldsymbol{S}}{\|\boldsymbol{S}\|}.$$
(3.99)

53



Слика 17: Положај вектора S и d.

У том случају следи:

$$\dot{V} = -\mathbf{S}^T \cdot \left(\mathbf{S}^T - \frac{\|\mathbf{d}\|}{\|\mathbf{S}\|} \cdot \mathbf{S}\right) = -\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S} \cdot \left(\mathbf{1} - \frac{\|\mathbf{d}\|}{\|\mathbf{S}\|}\right).$$
(3.100)

Самим тим, јасно је да ће $\dot{V} < 0$, односно V ће бити опадајућа функција уколико важи:

$$\|d\| < \|S\|. \tag{3.101}$$

Јасно је да су елементи вектора **d** ограничени. Нека горња граница ||d|| носи ознаку D > 0, тако да важи ||d|| < D. Даље, може се дефинисати критично одступање напона Δv_{lim} из опсега $0 < \Delta v_{lim} < \Delta v_{max}$, за које ||S|| постаје веће од D. Уколико се нађе V_{lim} такво да важи:

$$V_{lim} = \max_{\max_{\ell} |\Delta v_{\ell}| \le \Delta v_{max}} V, \qquad (3.102)$$

извод глобалне функције циља ће постати негативан и њена вредност ће почети да опада кад год вредност глобалне функције циља V досегне V_{lim} . То значи да ће глобална функција циља увек бити ограничена и самим тим одступање напона увек гарантовано бити мање од Δv_{max} . Ако се посматра слика 17, то значи да ће вектори S и S + d заклапати оштар угао, па ће њихов скаларни производ бити позитиван. На слици 17 осе правоуглог координатног система нису означене пошто је на слици дат дводимензионални приказ геометријске ситуације у вишедимензионалном простору.

Врло важна особина предложеног управљачког закона је робусност на процену и промену излазне кондуктансе G_{ℓ} и сусцептансе B_{ℓ} било ког чвора ℓ . Уколико ове величине нису познате или постоји грешка у њиховој естимацији, ефекат непознавања излазне адмитансе биће видљив у ограниченим променљивама d_{ℓ}^{ν} и d_{ℓ}^{θ} , које означавају поремећај. Доказано је да ће, и поред постојања ових чланова, глобална функција V имати коначну вредност и одступање напона мање од максималне дозвољене вредности.

3.4. Предложено секундарно управљање учестаношћу

Примарни ниво управљања предложен у овој дисертацији утицаће на то да учестаност и напон чворова микромреже увек буду у унапред дефинисаним границама. Уколико су границе промене усклађене с *Grid codes*, улога секундарног управљања сведена је на минимум. Како је учестаност глобална величина у микромрежи у устаљеном стању, њена промена утиче на рад свих чворова. Највећи утицај промене учестаности одражава се на електричне машине, које су врло често заступљене као потрошачи. Вредност учестаности утиче на брзину обртања и снагу

губитака у машинама. Такође, вредност реактансе проводника зависи од учестаности. С друге стране, вредност напона утиче на промену особина изолационих материјала. За разлику од учестаности, напон је локална величина и није исти за све чворове због пада напона на импедансама између чворова. Стога, пошто се предложеним примарним управљачким законом постиже мало жељено одступање напона чворова, тиме су већ донекле уграђени механизми секундарног нивоа управљања у примарни ниво управљања. Стога, секундарно управљање модулом напона неће бити разматрано.

Ако се користи предложени примарни закон управљања, у устаљеном стању је могуће постојање одступања учестаности од називне вредности. Иако се оно може ограничити на довољно малу вредност, на пример мању од 1%, ипак је пожељно да учестаност буде једнака називној вредности. На тај начин постиже се оптималан рад свих уређаја и генератора у микромрежи, омогућава се лакша синхронизација с главном мрежом, као и задовољавајући квалитет електричне енергије којом се напајају потрошачи.

Реализације промене договора размене активне снаге између чворова непрекидно уносе поремећај у рад микромреже. Стога чворови су непрекидно принуђени да реагују променом своје учестаности и напона. У том смислу, не може се говорити о учестаности као глобалној величини на уобичајен начин.

Најважнији приступи у литератури којима се секундарни ниво управљања остварује већ су разматрани у уводу. Децентрализованој архитектури секундарног нивоа управљања се поново може дати предност. Предложена решења се ослањају на примену *leaky* интегратора [183], [184], [185] или стандардног ПИ регулатора [113]. Код свих ових метода подразумева се да је примењено друп управљање у оквиру примарног управљачког нивоа.

У овој дисертацији предлаже се решење које подразумева употребу напредније верзије ПИ регулатора, односно употребу тзв. *super-twisting* ПИ регулатора. Овакав систем аутоматског управљања је веома робустан и мање осетљив на поремећаје и промене параметара у систему у поређењу с класичним ПИ регулатором [186].

Излаз *super-twisting* регулатора u(t) рачуна се као:

$$u(t) = K_{ps} \cdot \operatorname{sgn}(e(t)) \cdot \sqrt{|e|} + K_{is} \cdot \int_{0}^{t} \operatorname{sgn}(e(\tau)) d\tau, \qquad (3.103)$$

где су K_{ps} и K_{is} коефицијенти пропорционалног и интегралног дејства, редом, а e(t) представља сигнал грешке, односно разлику између задате и остварене вредности коју регулатор регулише (у овом случају, учестаност).

Секундарни ниво управљања ће за циљ имати остваривање називне учестаности кроз корекцију референце активне снаге која долази из хијерархијски вишег управљачког нивоа. Излаз регулатора u(t) додаје се на задату вредност снаге, чиме се добија нова, коригована вредност која се прослеђује примарном управљачком нивоу, што је приказано на слици 18. Пропусни опсег секундарног нивоа управљања је мањи од пропусног опсега примарног нивоа, те се извршава на споријем такту.



Слика 18: Примена *super-twisting* ПИ регулатора у секундарном управљању.

3.5. Детаљна структура предложеног управљачког алгоритма

На основу претходно описаних управљачких механизама, овде ће бити изложена детаљна структура управљачког програма, која је приказана на слици 19. Управљачки алгоритам осмишљен је тако да се састоји из три прекидне рутине, које имају различита времена извршавања.

Прва прекидна рутина извршава се најбрже, с учестаношћу и периодом извршавања f_s и T_s , редом. У оквиру ове прекидне рутине обрађују се све мерне величине у *abc* домену (i_{Lf1}^{abc} , u_{Cf}^{abc} , i_{Lf2}^{abc}) и применом Кларкине (инваријантне по амплитуди) и Паркове трансформације врши се прорачун величина у dq координатном систему $(i_{Lf1}^{dq}, u_{Cf}^{dq}, i_{Lf2}^{dq})$. Угао Паркове трансформације добија се интеграцијом референтне вредности учестаности f^{ref} коју одређује предложени примарни закон управљања. Активна и реактивна снага, означене као Р и Q, рачунају се користећи директно величине у *abc* домену, и то мерени напон на кондензатору и излазне струје чвора, тј. струје LCL филтра са стране микромреже. Ове снаге се надаље филтрирају применом нископропусног филтра (low-pass filter – LPF) с пресечном учестаношћу ω_c , те се добијају филтриране снаге P_f и Q_f . У оквиру прве прекидне рутине извршава се и струјна петља која за задатак има управљање излазном струјом инвертора i_{Lf1} . У струјну петљу се као feed-forward елементи воде напони на кондензатору у dq домену u_{Cf}^{dq} . Уз то, овде је имплементиран и модулатор просторног вектора који одређује потребне факторе испуне за све три гране инвертора, односно управљачке сигнале за транзисторе у инвертору (напонски gate сигнали код IGBT прекидача). Модулатор за прорачун користи задату вредност напона коју инвертор треба да оствари на свом излазу u_{inv}^{ref} , а који даје струјна петља. На слици 19 су сви блокови који се извршавају унутар ове прекидне рутине означени љубичастом бојом.

У оквиру друге прекидне рутине, која је спорија од прве и има учестаност и период извршавања f_v и T_v , извршава се предложени закон управљања који потпада под примарно



Слика 19: Детаљна структура управљачког програма.

управљање, као и напонска петља која управља напоном на филтарском кондензатору и спада у нулти ниво управљања. Предложени закон управљања, на основу мереног напона на кондензатору, филтриране активне и реактивне снаге P_f и Q_f и референтне снаге коју чвор треба да произведе P^{ref} , прорачунава нови референтни напон на кондензатору $u_{Cf}^{dq^{ref}}$. Остали параметри који су неопходни за закон управљања су излазна кондуктанса и сусцептанса чвора G и B, максимална дозвољена одступања напона и учестаности Δv_{max} и $\Delta \omega_{max}$, као и параметри за фино подешавање карактеристика одзива k_v и k_{θ} . Напонска петља потом регулише напон на кондензатору и прорачунава референтну вредност струје на излазу из инвертора i_{Lf1}^{dq} ref која ће утицати на овај напон. Као *feed-forward* елемент у напонску петљу се води излазна струја LCL филтра у dq домену i_{Lf2}^{dq} . Сви блокови који се извршавају унутар ове прекидне рутине су на слици 19 означени зеленом бојом.

Трећа прекидна рутина задужена је за извршавање секундарног управљања и извршава се најспорије с учестаношћу и периодом извршавања f_{sec} и T_{sec} , редом. Ова прекидна рутина не мора нужно бити активна и приликом валидације управљачког алгоритма није активна у свим тестовима, баш како би се најпре показала ефикасност рада предложеног примарног нивоа управљања. Њен задатак је да врши регулацију учестаности микромреже чија је вредност резултат рада предложеног примарног управљачког закона f^{ref} , тако што коригује иницијалну референцу снаге за чвор P_0^{ref} . На слици 19 плавом бојом означени су сви блокови који се извршавају унутар ове прекидне рутине.

4. Потврда исправности рада предложеног закона управљања

Потврда исправности рада предложеног управљачког алгоритма вршена је у више корака. Прво је вршена симулација у којој су анализирана остварена одступања учестаности, напона и активне снаге у устаљеном стању за широк опсег могућих радних тачака микромреже. Следећи корак је био тестирање програмског кода у ком је имплементиран предложени закон управљања, а микромрежа моделована користећи поједностављени математички модел. Трећи корак у процесу потврде био је креирање прекидачког модела микромреже и тестирање предложеног управљања користећи *hardware-in-the-loop* (HIL) концепт. У наставку ће бити објашњени сви типови симулација који су спроведени како би се управљачки алгоритам тестирао, као и добијени резултати тестирања.

За тестирање рада управљачког алгоритма примењене су микромреже различитих топологија. Конкретно, коришћене су микромреже које имају 4, 13 и 123 чвора. Микромрежа која се састоји од 4 чвора има електричне водове који се могу еквивалентирати доминантно отпорним импедансама и ради на ниском напону (0,4 kV). Микромреже које имају 13 и 123 чвора су уравнотежене IEEE тест мреже које раде на напонском нивоу од 4,16 kV и садрже и подземне и надземне електричне водове и параметри ових мрежа се могу наћи у [187]. Ове топологије се већ традиционално користе за анализу рада мрежа, управљање, њихово планирање, процене оперативног стања итд. Топологије ових мрежа дате су на слици 20. Преузета је оригинална нумерација чворова за IEEE тест мреже које имају 13 и 123 чвора.



Слика 20: Топологије анализираних микромрежа: a) нисконапонска мрежа с 4 чвора, б) уравнотежена IEEE тест мрежа с 13 чворова и в) уравнотежена IEEE тест мрежа с 123 чвора.

4.1. Статичка симулација

Да би се проценио рад управљачког закона у устаљеном стању, изведена је симулација у MATLAB програмском алату, а у којој се користи MATLAB уграђена функција *fsolve*. Пошто се добијени резултати односе искључиво на устаљено стање, ова симулација названа је статичком. Функција *fsolve* користи се за решавање система нелинеарних једначина, тј. за прорачунавање вектора стања за одређене улазне податке. У овој симулацији се као улаз користи вектор задатих вредности производње активне снаге за чворове у микромрежи (при чему се вредности снага мењају у задатом опсегу), као и задата вредност модула фазора напона чворова, која је иста за све чворове. Решаван је систем нелинеарних једначина који важи у устаљеном стању и који је дат у одељку 3.3.1. Добијени вектор стања обједињује модуле и углове фазора напона, на основу којих су прорачунате вредности активне и реактивне снаге, као и одступања учестаности и модула фазора напона чворова од задатих вредности. Решење нелинеарног система се добија итеративним поступком, почевши од претпостављеног вектора стања, у коме су сви модули фазора напона једнаки 1 г.ј. и сви фазни ставови фазора напона једнаки 0,1 гаd. Коришћена је уравнотежена IEEE 13 тест мрежа. Резултати ове симулације приказани су на слици 21.

Приказане величине су, редом, модуо фазора напона у свим чворовима, угао фазора напона, задата и остварена активна снага (испрекиданим и пуним линијама, редом), реактивна снага, као и одступање активне снаге и модула фазора напона од задатих вредности. Њихов прорачун је вршен за 200 различитих радних тачака у којима се задата активна снага између чворова 650 и 646 мења у опсегу од –1 до 1 г.ј., чворови 632 и 611 размењују снагу у опсегу од –0,5 до 0,5 г.ј., а чворови 675 и 652 размењују активну снагу у опсегу од –0,2 до 0,2 г.ј.



Слика 21: Резултати добијени извршавањем статичке симулације за мрежу од 13 чворова.

Позитивна задата вредност снаге чвора означава да тај чвор снагу предаје. Задата вредност напона је 1 г.ј., а максимално дозвољено одступање напона износи ±10%.

С графика се види да је напон у свим радним тачкама унутар дозвољених граница. Углови напона у чворовима мењају се како би могла да се оствари задата вредност активне снаге. Остварено је врло добро поклапање између ове задате и остварене вредности активне снаге, а одступања постоје само када је задата вредност снаге по апсолутној вредности близу 1 г.ј. У суштини, грешка у активној снази присутна је због тога што у систему постоје губици активне снаге јер еквивалентне импедансе водова у микромрежи имају отпорни део. Природно, што је већа еквивалентна отпорност водова између чворова који размењују снагу, биће већи и губици активне снаге, а самим тим неће до чвора потрошача стићи целокупна снага коју је чвор произвођач издао. Када су чворови физички близу један другом, одступање ће бити мање. У овом тесту намерно су изабрани чворови који нису суседни један другом, управо да би се указало на одступање активне снаге услед губитака.

Реактивна снага није управљана и претпоставка је да свака јединица може да оствари потребну вредност реактивне снаге како би се успоставила нова стабилна радна тачка. Међутим, извесно је да може доћи до струјног преоптерећења неких инвертора. Стога, или је потребно предимензионисати генераторе или ограничити производњу струја. Ради једноставности, овде је претпостављено да генератор може да безбедно испоручи захтевану снагу. Посматрајући приказане резултате, може се уочити да је код чвора 646 присутан најгори могући случај – када су и активна и реактивна снага близу 1 г.ј. То значи да би овај чвор издавао привидну снагу око 40% већу од називне. Начелно, вредност остварене реактивне снаге може да се регулише променом виртуелне импедансе на излазу из инвертора.

4.2. Динамичке симулације с поједностављеним математичким моделом

Након што је утврђено да је могуће остварити жељено понашање система у устаљеном стању, још један сет симулација је изведен с циљем да се једноставно провери скалабилност микромреже. Осмишљен је МАТLАВ програмски ко̂д чијим извршавањем је могуће добити увид у како статичко, тако и у динамичко понашање система у случају када је примењен предложен примарни ниво управљања (ове симулације називаће се брзим симулацијама). Секундарни ниво управљања (ове симулације називаће се брзим симулацијама). Секундарни ниво управљања (ове симулације називаће се брзим симулацијама). Секундарни ниво управљања није активиран. Предност коришћења МАТLАВ скрипти у симулирању јесте брзо извршавање симулације, што је од великог значаја када се тестирају мреже с великим бројем чворова. Динамика чвора је моделована употребом тзв. *swing* једначина [188], [189]. Ове једначине се често користе за описивање динамике рада чвора у системима у којима нема великих обртних маса, а која је слична динамици чворова у којима су повезани синхрони генератори. Веродостојност добијених резултата потврђена је тако што је код микромрежа које се састоје од 4 и 13 чворова паралелно изведена и динамичка симулација с прекидачким моделом (ове симулације називаће се спорим симулацијама). Због своје сложености и дужине трајања, симулација с прекидачким моделом за мрежу од 123 чвора није извршена, већ само динамичка симулација с поједностављеним математичким моделом.

Претпостављено је да је почетна радна тачка у динамичким симулацијама с поједностављеним математичким моделом таква да су напони у чворовима или називни или одступају од називних у опсегу од $\pm 5\%$. Микромрежа ради у острвском режиму рада, што је са становишта одржања стабилности најкритичније. Корак симулације је изабран тако да се оствари компромис између дужине трајања и прецизности симулације и износи 10 µs код

симулације с поједностављеним математичким моделом. Код симулације с прекидачким моделом корак симулације износи 1 µs како би се постигло брже извршавање, а учестаност прекидања је 10 kHz.

4.2.1. Тест с микромрежом од 4 чвора

У првом тесту претпостављено је да је X/R однос свих водова једнак 0,9, а да су импедансе између чворова микромреже различите. Отпорности водова износе 0,12 Ω , 0,225 Ω и 0,15 Ω . Параметри k_v и k_θ имају вредности 30 и 0,001, редом. Дозвољено одступање напона је $\pm 10\%$, а учестаности је $\pm 1\%$. Размена активне снаге се одвија на следећи начин: чвор 1 предаје чвору 2 активну снагу од 0,3 г.j. од t = 0,3 s, од истог временског тренутка чвор 4 добија задатак да чвору 3 предаје активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,3 г.j. и потом чвор 4 предаје чвору 2 активну снагу у износу од 0,6 г.j. у t = 0,6 s. Базна вредност снаге је 50 kVA. Резултати овог теста приказани су на слици 22.

Приказани су модули фазора напона, учестаност, као и излазна активна и реактивна снага чвора, добијени у симулацији с поједностављеним математичким моделом (први и трећи ред графика), као и у симулацији с прекидачким моделом (други и четврти ред графика). Добијени



Слика 22: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичким моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врста) за мрежу од 4 чвора.
одзиви сведоче да се резултати добијени у брзим симулацијама с поједностављеним математичким моделом микромреже доста добро поклапају с резултатима добијеним у спорим симулацијама с прекидачким моделом. Вредности у устаљеном стању су врло сличне. Јасно је да се напони и учестаност крећу у унапред дефинисаним границама, што потврђује да предложено примарно управљање успешно испуњава задате управљачке циљеве. Уз то, размена активне снаге је таква да су одступања остварене активне снаге од задате вредности минимална. Међутим, могу се уочити и одређене разлике у добијеним одзивима, а оне су сумиране у наставку.

– Брзина прелазних процеса није иста.

Узрок овоме лежи у сложености симулираног система. У спорој симулацији није моделован LCL филтар, прекидачке компоненте у инвертору и сл., те је и динамика која карактерише рад ових система занемарена. Стога, дужина трајања прелазних процеса је врло мала.

- Вредности остварене реактивне снаге значајно одступају.

Узрок за одступање вредности реактивне снаге у ова два типа симулација поново се тиче (не)моделовања пасивних компоненти унутар LCL филтра, а које утичу на ток реактивне снаге у симулацији с поједностављеним математичким моделом.

 Само код прекидачких симулација се у одзивима може уочити присуство поремећаја у тренутку t = 0,2 s.

У прекидачкој симулацији се све јединице прикључују на микромрежу баш у тренутку t = 0,2 s. Тада и микромрежа прелази у острвски режим рада, док је у спорој симулацији микромрежа одмах оперативна, тј. дистрибуиране јединице су одмах прикључене.

– Само код прекидачких симулација имплементирана је PLL синхронизациона јединица.

Улога PLL јединице је искључиво естимација напона и учестаности свих повезаних дистрибуираних јединица, а за реализацију предложеног управљачког алгоритма синхронизациона јединица није неопходна.

У табели 3 су приказане вредности очитаних величина од интереса у устаљеном стању на завршетку симулације, када је t = 1,2 s, добијене у динамичкој симулацији с поједностављеним математичким моделом.

4.2.2. Тест с микромрежом од 13 чворова

У другом тесту, у којем је испитивано предложено примарно управљање на уравнотеженој IEEE 13 тест мрежи, однос X/R водова мења се у опсегу од 0,4 до 3,2. Параметри k_v и k_θ имају вредности 50 и 0,001. Дозвољено одступање напона и учестаности од називних вредности је исто као и у симулацији рада мреже с 4 чвора. Чвор 650 предаје 0,6 г.ј. активне снаге чвору 646, чвор 684 предаје 0,3 г.ј. активне снаге чвору 671, чвор 692 предаје чвору 680 0,4 г.ј.,

Чвор	<i>v</i> [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	P [r.j.]	Q [r.j.]
1	0,9498	0,9991	0,3000	0,3221	0,3065
2	0,9272	0,9966	-0,6000	-0,5430	-0,5252
3	0,9586	0,9993	-0,6000	-0,58830	-0,6472
4	1,0345	1,0004	0,9000	0,8880	0,9526

Табела 3: Очитани резултати у последњој радној тачки у устаљеном стању за мрежу од 4 чвора.

чвор 611 предаје 0,1 г.ј. чвору 652, чвор 632 прима 0,2 г.ј. од чвора 634 и коначно чвор 645 предаје 0,8 г.ј. активне снаге чвору 633. Базна вредност снаге је у овом случају 15 MVA (дефинисана спрам параметара IEEE 13 тест мреже). Добијени резултати су приказани на слици 23.

Слично као и у претходном тесту, приказани су модули напона, учестаност, као и излазна активна и реактивна снага чвора, добијени у симулацији с поједностављеним математичким моделом (први и трећи ред графика), као и у симулацији с прекидачким моделом (други и четврти ред графика). Поређењем резултата симулација уочава се задовољавајуће поклапање добијених вредности. Добијени резултати у брзим и мање прецизним симулацијама су чак неповољнији од резултата добијених у симулацијама с прекидачким моделом. Ове неповољности огледају се у следећем:

- Одступања напона су нешто већа у споријим симулацијама, али су поново у дозвољеним границама.
- Могу се уочити мањи скокови учестаности у прелазним режимима у споријим симулацијама.



Слика 23: Поређење резултата добијених у динамичкој симулацији с поједностављеним математичким моделом (прва и трећа врста) и динамичкој симулацији с прекидачким моделом (друга и четврта врста) за мрежу од 13 чворова.



Слика 24: Учестаност добијена применом извода (а) и применом нископропусног филтра (б) на фазне углове напона у чворовима IEEE 13 тест мреже.

Пошто је у симулацијама с поједностављеним математичким моделом система учестаност рачуната као извод угла напона у чворовима, добијају се скокови у учестаности који су последица наглих промена у фазном ставу напона. Уколико се примени нископропусни филтар првог реда пресечне учестаности 100 Hz, уместо извода, добијају се мањи скокови у учестаности током прелазних режима, што је приказано на слици 24. У оба случаја су, чак и у прелазним режимима, одступања учестаности била мања од максимално дозвољене вредности. Узимајући у обзир да се у симулацијама с прекидачким моделом учестаност естимира употребом PLL синхронизационе јединице, такви скокови нису видљиви.

 Брзина прелазних процеса се у ова два типа симулација разликује из истих разлога као и у тесту с мрежом од 4 чвора.

У табели 4 приказане су вредности најважнијих величина у устаљеном стању, добијене у брзој симулацији.

Чвор	<i>v</i> [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	P [r.j.]	Q [r.j.]
650	1,0026	1,0000	0,6000	0,5994	1,8973
646	0,9212	0,9995	-0,6000	-0,5828	-0,4794
645	0,9297	0,9998	0,8000	0,8052	0,6837
632	0,9242	0,9994	-0,2000	-0,1907	-1,1402
633	0,9113	0,9976	-0,8000	-0,7014	-0,9521
634	0,9715	0,9999	0,2000	0,2179	0,3861
611	0,9205	0,9995	0,1000	0,1102	0,0967
684	0,9195	0,9996	0,3000	0,3052	0,1929
671	0,9147	0,9985	-0,3000	-0,2730	-0,3545
692	1,0960	1,0058	0,4000	0,1650	-0,1165
675	1,0953	1,0043	0	-0,1647	0,1166
652	0,9184	0,9997	-0,1000	-0,0793	-0,0373
680	0,9118	0,9951	-0,4000	-0,1353	-0,1018

Табела 4: Очитани резултати у последњој радној тачки у устаљеном стању за IEEE тест мрежу од 13 чворова.

4.2.3. Тест с микромрежом од 123 чвора

Задовољавајуће поклапање резултата добијених у брзим симулацијама с поједностављеним моделом микромреже и спорим симулацијама с прекидачким моделом микромреже доводи до закључка да су споре симулације довољно прецизне како би се проценило понашање микромрежа с већим бројем чворова уколико би се применио предложени примарни управљачки закон. Стога је извршена још једна симулација у циљу провере предложеног управљачког алгоритма на IEEE тест мрежи која се састоји од 123 чвора.

Однос *X*/*R* водова у овој мрежи мења се у опсегу од 1 до 3. Корак симулације је у тесту морао бити повећан на 0,002 s, како би се скратило време трајања симулације с тако великим бројем чворова. Параметри k_v и k_θ су подешени на вредност 1. Задате снаге размене су следеће: чвор 35 добија 0,6 г.ј. активне снаге од чвора 47, чвор 160 предаје чвору 71 0,3 г.ј., чвор 18 предаје 0,9 г.ј. чвору 23, чвор 108 чвору 114 0,4 г.ј., чвор 53 предаје чвору 6 активну снагу у износу од 0,5 г.ј., чвор 49 чвору 51 снагу од 0,1 г.ј., чвор 35 чвору 20 снагу од 0,2 г.ј., чвор 450 предаје чвору 66 1 г.ј., чвор 35 чвору 37 0,7 г.ј. и на крају чвор 20 чвору 24 треба да преда 0,8 г.ј. активне снаге. Задата излазна снага чвора се потом рачуна као сума снага које се предају и имају позитиван предзнак и снага које су инјектоване у чвор и имају негативан предзнак. На примеру чвора 20, који издаје снагу од 0,8 г.ј. и прима снагу од 0,2 г.ј., ефективна задата производња активне снаге износиће 0,6 г.ј. Базна вредност снаге износи 100 MVA (у складу са дефинисаним параметрима IEEE 123 тест мреже). Добијени резултати у радној тачки у устаљеном стању су приказани у табели 7, која је, због своје дужине, дата у прилогу 7.2.

И у овом тесту добијене вредности напона у чворовима и учестаности се налазе у дозвољеним границама одступања. Остварене снаге се врло мало разликују од задатих вредности и разлог овоме су губици активне снаге који постоје у микромрежи. Што је већа еквивалентна отпорност водова између два чвора, веће је и одступање активне снаге од задате вредности. Чак и чворови чија је задата снага производње једнака нули производе неку релативно малу количину активне снаге, што значи да сви чворови учествују у покривању губитака у микромрежи. Овај тест показује да предложени управљачки алгоритам даје добре резултате и у мрежама с великим бројем чворова, те је коначно потврђена његова скалабилност.

4.3. HIL симулације

Након што је утврђено да је предложени закон управљања скалабилан, односно примењив на микромреже с произвољним бројем чворова, произвољном топологијом и произвољним параметрима, тј. X/R односом водова, приступило се испитивању динамичког понашања система извршавањем НІL симулација. НIL симулације су карактеристичне по томе што се енергетски део система, чији рад треба испитати, симулира користећи посебан уређај – емулатор, односно симулатор у стварном времену. Управљачки део система имплементира се користећи микроконтролер који извршава задати програмски кôд. Микроконтролер даје управљачке сигнале емулатору, које прослеђује на дигиталне улазе емулатора. Емулатор, на основу моделованог енергетског дела система, преко својих аналогних излаза, микроконтролеру прослеђује мерене величине од интереса. На тај начин је остварена безбедна интеракција управљачког и енергетског подсистема.

На слици 25 приказана је експериментална поставка која је коришћена приликом извршавања HIL симулација. Енергетски подсистем моделован је користећи програмски пакет *Typhoon HIL Control Center* и *Typhoon HIL 602+* емулатор (1). Управљачки алгоритам је имплементиран у микроконтролеру *Texas Instruments TMS320F28379D* (2). Микроконтролери су



Слика 25: Експериментална поставка коришћена за извршавање HIL симулација. На слици су означени емулатор (1), микроконтролер (2), прилагодна картица (3), персонални рачунар (4).

повезани на емулатор и комуницирају с њим преко прилагодне картице (3). Пошто су сви наведени софтвери инсталирани на персоналном рачунару (4), емулатор и микроконтролер су повезани на рачунар користећи USB, односно J-TAG комуникационе везе, редом.

Унутар емулатора моделована је радијална микромрежа с 4 чвора (приказана на слици 20а), а у сваком чвору је повезана једна дистрибуирана јединица преко трофазног инвертора. Дистрибуиране јединице повезане су на микромрежу преко LCL филтра (као на слици 8). Микромрежа је повезана на круту мрежу бесконачне снаге само у појединим тестовима, пошто је нагласак стављен на симулације у којима је микромрежа у острвском режиму рада, који је изазовнији са становишта очувања стабилности. На слици 26 приказан је модел креиран у софтверском алату Schematic Editor који се користи у оквиру програмског пакета *Турhoon HIL Control Center*.

Унутар модела налазе се четири дистрибуиране јединице (на слици означене бројем 1), представљене инверторским претварачима, у чијем је једносмерном колу извор бесконачне снаге, и излазним LCL филтром (који се налази унутар подсистема који носи ознаку 2 и детаљно је приказан на слици 27), као и оточно повезан RL потрошач (налази се унутар подсистема који носи ознаку 3, а у овом подсистему је смештен и контактор који прикључује и искључује еквивалентну потрошњу по потреби). Дистрибуиране јединице су међусобно повезане водовима (на слици 26 електрични водови су означени бројем 4). Крута мрежа је (у неким од тестова) преко контактора повезана између треће и четврте јединице (означена је бројем 5). Због своје сложености, да би модел био успешно компајлиран и похрањен у емулатор, моделовани електрични систем мора да се подели на подсистеме који ће бити похрањени у посебна процесорска језгра емулатора. У ову сврху користи се посебан блок под називом *Core Coupling*, илити спрежни елемент (означен бројем 6). Свака дистрибуирана јединица се емулира у



Слика 26: Емулациони модел микромреже с 4 чвора тестиране у HIL симулацијама.



Слика 27: Подсистем у коме је имплементиран LCL филтар и пратећа мерења.

засебном језгру. Када је модел похрањен у емулатор, рад система се може надзирати користећи *HIL Scada* софтверски алат. Такође, могуће је задавање одређених команди попут отварања/затварања контактора и дефинисања референци активне снаге за сваку од јединица.

На слици 27 приказан је подсистем у коме је смештен LCL филтар (1), мерења струје и напона (2), као и блокови у којима је имплементиран прорачун активне и реактивне снаге (3) и PLL јединица чија је улога искључиво естимација учестаности ради визуелног приказа (4).

Управљачки програм реализован је употребом МАТLAВ Simulink програмског алата и преведен у С програмски ко̂д коришћењем посебног функционалног додатка названог C2000 Microcontroller Blockset. Овај додатак садржи Simulink блокове којима се подешава рад микроконтролерских периферија попут аналогно-дигиталног конвертора, периферије задужене за импулсно-ширинску модулацију (ИШМ) итд. Уз то, омогућава превођење направљеног модела у програмски код. Аутоматски генерисан С програмски код се у микроконтролер похрањује користећи *Code Composer Studio* софтверски пакет. На овај начин се управљачки код генерише и учитава у микроконтролер на једноставан, брз и ефикасан начин. *Simulink* модел у коме је развијен управљачки алгоритам приказан је на слици 28.

Структура развијеног *Simulink* модела у потпуности одговара структури управљачког програма приказаној на слици 19. Могу се уочити три подсистема у оквиру којих се извршавају три прекидне рутине на различитим учестаностима (слева надесно опада учестаност извршавања).

У оквиру најбрже, ИШМ прекидне рутине (означене с 1), аналогно-дигитални конвертор микроконтролера прихвата сигнале који долазе с аналогних излаза емулатора: две фазне струје на излазу из инвертора, два линијска напона на кондензатору у LCL филтру и напон једносмерног међукола инвертора. Емулатор има ограничен број аналогних излаза, па су из тог разлога прослеђени две струје и два напона, уместо три. Пошто је разматран симетричан трофазни систем, недостајућа струја и напон су једноставно реконструисани. Како се прослеђују излазна струја инвертора и напон на кондензатору, а прорачунавају снаге у тачки прикључења, на основу мерених величина су реконструисани струја и напон у тачки прикључења, користећи изразе (3.17) и (3.18). Уз то, неопходно је било извршити калибрацију аналогних улаза микроконтролера како би се сигнали исправно очитавали. Због ограничене прецизности аналогно-дигиталног конвертора, чак и мање грешке приликом поступка калибрације (грешке у отклону, појачању сигнала, као и нелинеарност конверзије) могу резултовати лошијим резултатима рада управљачког алгоритма, чак и када је он добро осмишљен и исправно реализован. У овој прекидној рутини се врши и Кларкина и Паркова трансформација свих очитаних аналогних наизменичних величина, управљање излазном струјом инвертора и модулација просторног вектора.

Унутар спорије прекидне рутине (означене бројем 2) се извршава управљање напоном на кондензатору и предложени примарни закон управљања.

Најспорија прекидна рутина (носи ознаку 3) користи се за извршавање секундарног нивоа управљања и активира се произвољно. У једном броју симулација секундарни ниво управљања неће бити активиран, како би се анализирао рад примарног управљачког закона, који



Слика 28: Структура развијеног Simulink модела у коме је имплементиран управљачки алгоритам.

представља окосницу ове докторске дисертације. Потом, активираће се и секундарни управљачки закон и анализирати и његов утицај на одзиве у систему.

Вреди напоменути да су два микроконтролера коришћена за управљање четири дистрибуиране јединице повезане у микромрежу – један контролер истовремено производи управљачке сигнале за две дистрибуиране јединице, односно побудне сигнале за транзисторе у инверторима.

Параметри коришћени у емулационом моделу микромреже и параметри неопходни за реализацију предложеног управљања су дати у табели 5.

4.3.1. Потврда рада примарног закона управљања

Рад предложеног примарног закона управљања испитан је у различитим условима рада микромреже с 4 чвора. У наставку ће бити графички приказани мерени резултати, уз кратку анализу добијених резултата и извођење битних закључака о раду алгоритма.

Приказане величине од интереса су напони чворова, учестаност напона чворова, као и излазна активна и реактивна снага сваког чвора, а представљене су у релативним јединицама. Поред наведених величина, у појединим тестовима приказани су и мерени линијски напони на кондензатору LCL филтра v_{Labc} и мерене излазне струје инвертора i_{abc} за прву дистрибуирану јединицу. Слични одзиви напона и струја су добијени и код осталих дистрибуираних јединица, па стога нису приказани. Дозвољени опсег одступања напона и учестаности је означен сивим испрекиданим линијама. Референтна вредност излазне активне снаге чвора приказана је испрекиданим линијама, док је остварена снага чвора приказана пуним линијама.

Параметри емул	ационог модела	Управљачки параметри		
параметри мреже	и базне величине	параметри струјног управљања		
$U_{ln} = 400 \text{ V}$	$U_B = 326,6051 \text{ V}$	$ au_i = 500 \ \mu s$	$K_{pi} = 1,1785$	
$f_n = 50 \text{ Hz}$	$f_B = 50 \text{ Hz}$	$T_s = T_i = 100 \ \mu s$	$K_{ii} = 2$	
$S_n = 20 \text{ kVA}$	$S_B = 20 \text{ kVA}$	параметри напонског управљања		
$I_B = 61.2360 \text{ A}$	$Z_B = 5.3335 \ \Omega$	$\delta_m = 53^{\circ}$	$K_{pv} = 0,1528$	
отпорност и инду	ктивност водова	$\omega_{cv} = 400 \text{ rad/s}$	$K_{iv} = 34,2233$	
$R_{12} = 0,4000 \ \Omega$	$L_{12} = 0,1654 \text{ mH}$	$T_v = 200 \ \mu s$		
$R_{23} = 0,3000 \ \Omega$	$L_{23} = 0,1240 \text{ mH}$	параметри прим	арног управљања	
$R_{34} = 0,4000 \ \Omega$	$L_{34} = 0,0827 \text{ mH}$	$\Delta v_{max} = 0,1$ r. j.	$\Delta \omega_{max} = 0,01$ r. j.	
LCL ф	илтар	$k_v = 0,05 \text{ r. j.}$	$k_{ heta} = 1$ r. j.	
$R_{f1} = R_{f2} = 0,0053 \ \Omega$	$L_{f1} = 3,1000 \text{ mH}$	параметри секундарног управљања		
$C_f = 7,6435 \mu F$	$L_{f2} = 0,7857 \text{ mH}$	$T_{sec} = 0.0015 \text{ s}$	$K_{ps} = 102,5$	
$R_{Cf} = 1.7772 \ \Omega$	$f_{res} = 750 \text{ Hz}$		$K_{is} = 0,005$	
задате вредности на	юна и учестаности	виртуелна импеданса	нископропусни филтар	
$v^{ref} = 1$ r. j.	$f^{ref} = 1$ r. j.	$R_v = 0.5333 \ \Omega$	$\omega_c = 40 \text{ rad/s}$	

Табела 5: Параметри коришћени у моделу микромреже и управљачки параметри.

У појединим тестовима је испитивано како се микромрежа понаша када је повезана с крутом мрежом. У овим тестовима је крута мрежа моделована као симетричан трофазни извор напона називне амплитуде и називне учестаности. Мрежа је повезана између чворова 2 и 3.

Т1 – основни тест

У основном тесту напон у чворовима микромреже је успостављен и у t = 1 s започиње се с разменом снага између чворова према унапред дефинисаним уговорима. Снаге се размењују на следећи начин: чвор 1 предаје 0,3 r.j. чвору 2 и 0,6 r.j. чвору 3, у t = 2 s чвор 4 предаје 0,6 r.j. чвору 3 и на крају у t = 3 s чвор 4 предаје 0,3 r.j. чвору 2. Овај тест назван је основним пошто ће се добијени одзиви поредити с одзивима у осталим тестовима. На слици 29 су приказани добијени резултати.

У почетној радној тачки напон и учестаност мреже су приближно константни и једнаки називним вредностима. Након тога, ове величине се мењају како би могла да се оствари жељена размена активне снаге, али увек остају у унапред задатим границама, које су означене сивим испрекиданим линијама. Природа и брзина прелазних процеса достизања тражене активне снаге је веома добра — за мање од једне секунде се достиже задата вредност, с приближно апериодичним одзивом. Реактивна снага није управљана и има тако остварену вредност да омогућава управљачком закону да што пре достигне стабилну радну тачку.

Т2 – "црни старт" микромреже

У другом тесту је испитано понашање микромреже у случају "црног старта" (енгл. *black start*). Под црним стартом микромреже подразумева се способност самосталног успостављања микромреже у случају потпуног нестанка напајања. Напон у чворовима микромреже треба да се успостави независно од главне мреже, само уз одговарајуће управљање дистрибуираним јединицама у микромрежи. Омогућавање "црног старта" микромреже је изузетно важно у



Слика 29: Резултати основног теста, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.



Слика 30: Резултати теста у коме је испитан "црни старт", добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.

случају када се напајају критични потрошачи попут болница, информационих центара, финансијских институција итд. Одзиви добијени у овом тесту приказани су на слици 30.

У овом тесту је у тренутку t = 1 s започет "црни старт" микромреже. Дистрибуиране јединице су имале задатак да произведу називни напон и учестаност на својима крајевима, крећући из безнапонског стања, тако да су генерисале потребне вредности активне и реактивне снаге како би се ово постигло. Излазна струја претварача прве дистрибуиране јединице је полако расла све док се систем није нашао у жељеној радној тачки.

ТЗ – Испитивање рада микромреже када је прикључена на главну мрежу

У трећем тесту анализиран је рад микромреже у режиму када је она прикључена на круту мрежу. У t = 1 s је започета размена снага с истим задатим вредностима као у T1. Крута мрежа је током трајања теста све време била повезана. Добијени резултати су приказани на слици 31.

Може се уочити да су одступања напона и нарочито учестаности нешто мања него у T1, што је и очекивано. Сваки чвор производи активне снаге колико му је и задато. Остварена реактивна снага је већа него у T1 из разлога што присуство круте мреже диктира напонске услове који су другачији од напонских услова који су потребни како би се задата размена снага испунила. Отуда повећана производња реактивне снаге, као последица разлике у амплитудама напона чворова микромреже и напона круте мреже. Трофазни мерени напони су у потпуности симетрични, што је очекивано узимајући у обзир присуство круте мреже. С друге стране, код струја се може уочити блага несиметрија. Ова несиметрија је највероватније последица мањкавости калибрације аналогно-дигиталног конвертора који је прихватао сигнале послате од стране емулатора. Уз то, током тестирања утврђено је да мерење све три излазне струје инвертора и сва три напона на кондензатору, уместо два, даје још бољи резултат. Ово је учињено у моделу с мањим бројем дистрибуираних јединица, пошто је број аналогних канала којима се мерене величине шаљу од стране емулатора ка контролеру ограничен.



Слика 31: Резултати теста у коме је микромрежа повезана на круту мрежу, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.

Т4 – Испитивање рада микромреже у случају изненадног искључења круте мреже

У четвртом тесту је испитивано како управљачки алгоритам реагује у случају изненадног преласка у острвски режим рада, када се искључи крута мрежа. Ово може бити последица нестанка напајања у тачки прикључења микромреже на главну мрежу, узрокована кваром. Добијени резултати су приказани на слици 32.

Тренутак искључења круте мреже је t = 1 s. Пре тога је микромрежа радила у стабилној радној тачки. Након искључења главне мреже микромрежа је успела да самостално ради и да задржи исту размену активних снага. Напон и учестаност напона у чворовима се нису значајно променили и блиски су називним вредностима. Једина већа промена огледа се у другачијој вредности излазних реактивних снага чворова. Слично као и у претходним случајевима, присуство круте мреже узрокује другачији ток реактивне снаге због крутог напона у тачки прикључења микромреже.

Т5 Испитивање рада микромреже у случају изненадног искључења једне дистрибуиране јединице

Непланирана искључења дистрибуираних јединица представљају озбиљније поремећаје у раду микромрежа и обично су последица квара. Уз то, приликом искључења једне дистрибуиране јединице може доћи и до каскадних искључења других дистрибуираних јединица у микромрежи, што доводи до колапса и остављања бројних потрошача без напајања. Из тог разлога је било интересантно тестирати рад предложеног управљачког алгоритма у овим околностима. Слика 33 приказује одзиве теста.

Прва дистрибуирана јединица се искључује у t = 1 s. Пре тога су дистрибуиране јединице размењивале активне снаге према унапред дефинисаним договорима. Прва дистрибуирана



Слика 32: Резултати теста у коме је микромрежа изненада искључена од круте мреже, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.



Слика 33: Резултати теста у коме је прва дистрибуирана јединица изненада искључује са микромреже, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.

јединица је такође предавала активну снагу, а затим се искључује без знања осталих дистрибуираних јединица. Њена и активна и реактивна снага падају на нулу након искључења.

На слици 33 активне снаге су филтриране, па отуд пад није моменталан, већ траје кратак период. Услед мањка снаге коју је требала да производи прва јединица, остале дистрибуиране јединице су биле принуђене да повећају своју производњу, односно еквивалентна потрошња у одређеним чворовима је морала бити смањена како би се дошло до нове стабилне радне тачке. Слично важи и за реактивне снаге. Међутим, управљачки алгоритам, и поред овако озбиљног поремећаја, успева да задржи промену учестаности и напона у унапред дефинисаним границама. Уколико би било неопходно да се било која дистрибуирана јединица планирано искључи од микромреже и уколико би планирани тренутак искључења био познат осталим дистрибуираним јединицама, у смислу да размена снаге с јединицом која ће се искључити не буде договорена, прелазак у ново стање остварио би се уз још повољнији прелазни процес.

Т6 Испитивање утицаја промене дозвољене вредности одступања учестаности и модула фазора напона на динамичке карактеристике одзива система

Предложени управљачки алгоритам за особину има могућност промене дозвољеног одступања учестаности и модула фазора напона. Како су границе одступања ових величина углавном законски регулисане, наведена особина омогућава лаку интеграцију законских регулатива у управљање микромрежом. Интуитивно је очекивати да врло мале дозвољене промене "отежавају" радне услове, односно да ће прелазак у стабилну радну тачку након неког поремећаја бити спорији. С друге стране, веће дозвољене границе одступања пружиће извесну дозу флексибилности управљачком алгоритму и прелазни процеси ће бити бржи. Да би се ово потврдило, у следећем тесту је испитиван утицај промена дозвољених вредности одступања на карактеристике одзива. Добијени резултати су приказани на слици 34.

Приказани су одзиви за три различита скупа дозвољених одступања (означених као тест 1, тест 2 и тест 3) за чвор у коме је повезана прва дистрибуирана јединица. У првом тесту је дозвољено одступање учестаности износило 0,5%, док је дозвољено одступање вредности напона износило 5%. У другом тесту су ова одступања редом износила 1,5% и 15% и у трећем тесту 2% и 20%.

Када су дозвољена одступања врло мала, прелазни процес траје дуже. Како дозвољена одступања расту, и трајање прелазног процеса се скраћује. Самим тим, у трећем тесту прелазни процес је најкраћи, док је у првом тесту најдужи. Остварене вредности учестаности и модула фазора напона су такви да врло мало одступају од жељених вредности. Изабрани управљачки параметри, као и погодан одабир функција α , β , и η , утичу на то да је радна тачка увек врло



Слика 34: Резултати теста у коме се мењају дозвољене вредности одступања учестаности и модула фазора напона, добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.

блиска радној тачки с називним вредностима учестаности и модула фазора напона. Одабир вредности одступања учестаности и модула фазора напона утиче и на вредност реактивне снаге у устаљеном стању, што је последица различитих вредности вектора стања у различитим тестовима.

Т7 – Испитивање утицаја промене управљачких параметара на карактеристике одзива система

У коначној форми управљачког закона фигуришу два параметра, k_v и k_θ , којима се подешава динамика промене и угла фазора напона сваког чвора. Одабир параметра k_v посредно има утицај на брзину раста функција α и β , односно на ширину параболе дефинисане овим функцијама у областима у којима радна тачка може да се нађе. Параметар k_θ посредно утиче на ограничења дефинисана функцијом η , тако што мења нагиб линеарне апроксимације функције око нуле (тангенте функције у координатном почетку). Ово ће имати утицај на динамику промене учестаности. Одабир ових параметара није у потпуности слободан. Како расте вредност ових параметра, тако опада брзина промене одговарајућих функција и обрнуто. Последично, грешка у оствареној вредности напона и активној снази се мења у зависности од ових параметара. Самим тим, потребно је пронаћи компромисно решење.

Да би се испитао утицај промене параметара, посматрани су одзиви за више различитих скупова параметара k_v и k_θ , који су, ради једноставности, били исти за све чворове (иако начелно могу бити различити). У табели 6 дати су коришћени скупови параметара. Добијени резултати приказани су на слици 35. Резултати су приказани за чвор у коме је повезана прва дистрибуирана јединица.

Резултати показују да се за малу вредност параметара k_v и k_θ добија веома спор апериодични одзив (тест 1). У овом случају је брзина промена функција α , β , и η веома мала, па самим тим су управљачка дејства спора. За већу вредност параметара k_v и k_θ добија се знатно бржи одзив, али долази и до појаве осцилација у оствареним активним и реактивним снагама (тест 4). Притом, поредећи одзиве приказане на сликама 35а и 35б, може се закључити да је остварена активна снага мања од захтеване што су ови управљачки параметри већи. Иако су у тесту 2 и тесту 3 задате међусобно различите вредности параметара k_v и k_θ , добијени одзиви су врло слични. Међутим, приметно је да је за већу вредност параметра k_θ одступање фреквенције од називне вредности мање, и обрнуто. Слично, за веће вредности параметра k_v добија се нешто веће одступање напона од називне вредности, и обрнуто. У свим случајевима је одступање вредности учестаности и модула фазора напона било у дозвољеним границама.

	Слика 35а		Слика 35б		
	k_v	$k_{ heta}$	k_v	$k_{ heta}$	
Тест 1	0,1	0,1	0,005	0,005	
Тест 2	0,1	1	0,005	5	
Тест 3	1	0,1	5	0,005	
Тест 4	1	1	5	5	

Табела 6:	Параметри	коришћени	y	T7.
-----------	-----------	-----------	---	-----



Слика 35: Резултати теста у коме се мењају управљачки параметри k_v и k_{θ} , добијени у HIL симулацији за микромрежу од 4 чвора.

4.3.2. Потврда рада секундарног закона управљања

Секундарни закон управљања контролише учестаност микромреже користећи *supertwisting* ПИ регулатор, чија је структура описана у 3.4. Пошто примарни закон управљања дозвољава мало одступање учестаности (чија максимална вредност може да се прецизно дефинише), а од интереса је остварити баш називну учестаност микромреже, извршен је тест у коме је активирано секундарно управљање учестаношћу. Резултати су дати на сликама 36 и 37. Притом, иницирана је иста размена активних снага као у T1.

Слика 36 приказује остварене учестаности чворова без и са активираним секундарним управљањем. У оба случаја одступања учестаности су врло мала, али је приметно да се мања девијација од називне вредности остварује када је активирано секундарно управљање учестаношћу. Нешто веће одступање настаје од t = 1 s, када се иницира размена снага између чворова. Чим се задата размена снага оствари (након t = 3 s) и постигне устаљено стање, девијација учестаности износи мање од 0,2%.

Слика 37 приказује естимирану учестаност чвора 1 у два случаја – када је секундарни ниво управљања активирано и када није активирано. На примеру овог чвора се јасно види да је у случају активираног секундарног управљања одступање учестаности мање и да се може рећи да је остварна називна учестаност микромреже, те да је основна функција овог нивоа управљања испуњена.



Слика 36: Естимиране учестаности чворова без активираног секундарног управљања (лево) и с активираним секундарним управљањем (десно).



Слика 37: Естимирана учестаност чвора 1.

5. Закључак

Све већа интеграција дистрибуираних извора електричне енергије у постојеће енергетске системе, најчешће близу потрошача, доноси бројне предности: смањење употребе фосилних горива за производњу електричне енергије, смањење снага размене с преносном мрежом и самим тим смањење снага губитака и унапређење квалитета напајања крајњих потрошача. Двосмерни ток енергије до кога последично долази отежава подешавање заштитних уређаја, али и растерећује водове у периодима високог оптерећења и пружа могућности бржег поновног успостављања напајања након кварова. Микромреже представљају делове електроенергетског система у коме су дистрибуиране јединице и потрошачи управљани тако да могу да раде самостално. Ово са собом носи одређене изазове, попут одржања равнотеже између понуде и потражње енергије, као и одржања вредности учестаности и модула напона у чворовима микромреже. Сходно томе, тема ове докторске дисертације је управљање претварачима енергетске електронике, прецизније инверторима преко којих су дистрибуиране јединице повезане у чворове микромреже како би се омогућио задовољавајући рад микромреже у различитим условима.

Прво су идентификовани примарни изазови у раду микромрежа и анализирани правци истраживања у области микромрежа. Децентрализовано управљање радом микромрежа, без подршке диспечера, је најизазовније са становишта очувања стабилности микромреже, те је тежња ове докторске дисертације да понуди решење у овом домену. Један од начина да се превазиђе проблем интермитетности обновљивих извора електричне енергије и уравнотежавања понуде и потражње електричне енергије јесте да се тежи планирању потрошње енергије и да се у што већој мери користе системи за складиштење електричне енергије. Рационално планирање потрошње електричне енергије представља темеље и за планирање будуће размене снаге између чворова микромреже. Стога, управљачка структура развијана у овом истраживању тежи да подржи тачну размену активних снага између чворова микромреже према унапред дефинисаним уговорима, уз претпоставку да дистрибуиране јединице имају довољно капацитета да произведу снагу коју су уговориле. Поред тога, решава задатке примарног нивоа управљања у микромрежама, односно очување вредности учестаности и напона у чворовима блиске називним.

Предложени примарни управљачки закон, заснован на примени функције циља дефинисане за сваки чвор, је детаљно изведен и анализиране су његове особине. Како је предложени управљачки алгоритам децентрализован, односно не постоји потреба за комуникационом везом између дистрибуираних јединица да би се постигао стабилан рад микромреже, подржана је скалабилност микромреже, односно постигнута је једноставна проширивост микромреже. Управљачка структура осмишљена је тако да се могу тачно дефинисати дозвољена одступања учестаности и напона од називних вредности. Како су ова одступања од изузетног значаја за очување стабилног рада микромреже, најчешће су и дефинисана у законским регулативама држава. Следствено, законске одредбе су инхерентно уграђене у предложени управљачки закон. Надаље, дискутоване су карактеристике управљачког закона у устаљеном стању. Показано је да је адекватним подешавањем управљачких параметара

могуће остварити жељену расподелу активне снаге између дистрибуираних јединица. Такође, испитивана је и стабилност микромреже с произвољним бројем чворова са становишта дозвољеног одступања учестаности и модула фазора напона чворова. Доказано је да је глобална функција циља, која у обзир узима функције циља свих чворова, ограничена, што значи да ће предложено управљање утицати на то да се оствари радна тачка система у којој је одступања учестаности и модула фазора напона чворова, ограничена, што значи да ће предложено управљање утицати на то да се оствари радна тачка система у којој је одступање учестаности и модула фазора напона мање или једнако од максимално дозвољеног одступања. Узимајући у обзир да одступање учестаности у устаљеном стању у електроенергетским системима није пожељно, предложено је и секундарно управљање учестаношћу засновано на *super-twisting* регулатору, чиме је употпуњен управљачки алгоритам.

Провера успешног рада предложеног управљачког алгоритма спроведена је кроз велики број симулација у којима су симулирани различити услови рада микромреже, попут рада са прикљученом и неприкљученом електричном мрежом, "црног старта" микромреже, искључења неке од дистрибуираних јединица, промене управљачких параметара итд. У статичким симулацијама је коришћен математички модел микромреже у устаљеном стању и посматрано је како ће се мењати вектор стања за различите задате вредности активних снага. Потом, анализиране су динамичке симулације с поједностављеним математичким моделом у којима се брзо могло доћи до увида у понашање управљачког закона и које су биле погодне за тестирање мрежа и с већим бројем чворова. Поређењем резултата добијених у оваквим симулацијама и у детаљним симулацијама с прекидачким моделом микромреже, показано је да су добијени резултати веродостојни, па самим тим и закључци изведених из њих. На крају, вршене су и симулације користећи концепт хардвера закључаног у петљи (HIL симулације), које пружају потпунији увид у рад управљачког алгоритма. У овим симулацијама су коришћени прекидачки модели претварача енергетске електронике у микромрежи, а управљачки код се извршавао у правом микроконтролеру. Резултати добијени у овим симулацијама потврђују успешан рад управљачког алгоритма. У свим тестовима су одступања учестаности и напона од називних вредности била у дозвољеним границама. Поред тога, остварена је и задата размена активних снага с великом тачношћу. Устаљено стање је достигнуто чак и након озбиљних поремећаја у микромрежи попут искључења једне дистрибуиране јединице или преласка у острвски режим рада. Симулацијама су биле обухваћене мреже које се састоје од 4, 13 и 123 чвора, а ове мреже сачињавају електрични водови с различитим односима X/R параметара водова. Сходно томе, закључак је да је предложени управљачки алгоритам погодан је за примену у микромрежама с произвољном топологијом, али и у микромрежама с доминантно индуктивним и с доминантно отпорним (резистивним) импедансама водова.

Како је приликом пројектовања управљачког алгоритма предност дата што мањим девијацијама учестаности и напона чворова мреже (погодним одабиром ограничења дефинисаних функцијом η и тежинских функција β), у односу на потпуно тачну размену активних снага, у одређеним ситуацијама могу се запазити мања одступања активне снаге од задате вредности. Ова одступања су последица губитака активне снаге услед постојања отпорности водова кроз које се снага предаје. Што су удаљенији чворови између којих се снага размењује, то ће ово одступање бити веће. Стога, приликом дефинисања договора о размени активне снаге, требало би тежити размени снага између суседних или просторно блиских чворова. Ово је задатак хијерархијски виших управљачких структура и није био предмет истраживања ове докторске дисертације. Тачна размена реактивних снага није разматрана, како би резултујући управљачки закон у крајњем облику био једноставнији и бржи. Уз то, договорена размена реактивне снаге између чворова микромреже још увек није функционалност која се активно користи у мрежама, иако је пожељна. Анализирајући стабилност микромреже, односно ограниченост глобалне функције циља, показано је и да је предложени управљачки закон

робустан када је реч о променама параметара импеданси унутар микромреже. Стога, прецизна естимација мрежних параметара није од круцијалног значаја за добар рад предложеног управљачког алгоритма.

Истраживање током рада на овој дисертацији понудило је одговоре на актуелна питања и проблеме у управљању радом микромрежа. Као што је уобичајено у истраживачким процесима, нека питања остају неодговорена и неки проблеми нерешени. Наравно, увек треба тежити унапређењу и усавршавању предложених решења. Када је реч о изложеном истраживању, једно од побољшања могло би да буде налажење аналитичког приступа за прорачун управљачких параметара k_v и k_{θ} . Аналитичко извођење овог прорачуна је изузетно сложено за микромрежу произвољне топологије. Иако се, користећи моделе малих сигнала за најједноставније микромреже, може доћи до неких закључака о вредности ових параметара, ови закључци важе само у одређеним случајевима, односно за мали број могућих радних стања. Стога, извођење нешто општијих закључака о пожељном кретању параметара k_v и k_{θ} биће предмет будућих истраживања. Уз то, управљачки закон може бити проширен тако да добије нове функционалности попут унапређења квалитета електричне енергије, кроз елиминисање виших хармоника унутар микромреже.

6. Литература

- I. Isakov, M. Vekić, M. Rapaić, I. Todorović, and S. Grabić, 'Decentralized self-stabilizing primary control of microgrids', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 155, p. 109477, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109477.
- [2] I. Todorovic, I. Isakov, D. Reljic, D. G. Jerkan, and D. Dujic, 'Mitigation of Voltage and Frequency Excursions in Low-Inertia Microgrids', *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9351–9367, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238869.
- [3] S. Grabić, M. Vekić, M. Rapaić, I. Isakov, and V. Porobić, 'Peer-to-Peer-Based Power Flow Control in Microgrids With Limited Voltage Harmonic Distortion', *IEEE Access*, vol. 11, pp. 130627–130643, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3331567.
- [4] M. Vekić, I. Isakov, M. Rapaić, S. Grabić, I. Todorović, and V. Porobić, 'Decentralized microgrid control "beyond droop", in 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Oct. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960392.
- [5] I. Isakov, M. Rapaić, M. Vekić, and I. Todorović, 'Decentralized Goal Function-Based Control of DGSs in Microgrid Applications', in 2023 IEEE Belgrade PowerTech, Belgrade, Serbia: IEEE, Jun. 2023, pp. 01–06. doi: 10.1109/PowerTech55446.2023.10202962.
- [6] M. Vekić, I. Isakov, M. Rapaić, I. Todorović, S. Grabić, and M. Bašić, 'Secondary and Primary Goal-Function-Based Control in Inverter-Interfaced Microgrids', in 2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia: IEEE, Oct. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/Ee59906.2023.10346112.
- [7] I. Isakov, M. Rapaić, M. Vekić, S. Grabić, and I. Todorović, 'Simulator of Decentralized Control Strategies in Electrical Grids', in 2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), Mar. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/INFOTEH51037.2021.9400668.
- [8] Energy Institute, '72nd edition of the Statistical Review of World Energy', ISSN 2976-7857, Jun. 2023. [Online]. Available: https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PDF_single_3 .pdf
- [9] C. Breyer *et al.*, 'On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78176–78218, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193402.
- [10] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance. 2022. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2022-06-07/eng
- [11] H. J. Mai, 'Energy experts share how the U.S. can reach Biden's renewable energy goals', NPR, Feb. 02, 2023. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.npr.org/2023/02/02/1148370220/biden-renewable-energy-goals
- [12] C. Renwei, 'On the Road to Carbon Neutrality Green Investment Needs in China.pdf—'. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20221104/On-the-Road-to-Carbon-Neutrality-Green-Investment-Needs-in-China.pdf
- [13] 'Microgrid: History, Definition, & Uses', Bridgestone Associates. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: https://brdgstn.com/microgrid/

- [14] B. Lasseter, 'Microgrids [distributed power generation]', in 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA: IEEE, 2001, pp. 146–149. doi: 10.1109/PESW.2001.917020.
- [15] Matt Grimley and John Farrell, 'Mighty Microgrids', Institute for Local Self-Reliance, Mar. 2016.
- [16] Conseil international des grands réseaux électriques, Ed., Microgrids 1, engineering, economics and experience. Paris: CIGRÉ, 2015.
- [17] C.-C. Liu et al., 'Microgrid Building Blocks: Concept and Feasibility', IEEE Open Access J. Power Energy, vol. 10, pp. 463–476, 2023, doi: 10.1109/OAJPE.2023.3282188.
- [18] S. Howell, Y. Rezgui, J.-L. Hippolyte, B. Jayan, and H. Li, 'Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 193–214, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.107.
- [19] Grand View Research, 'Microgrid Market Size, Share & Trends Analysis Report By Power Source (CHP, Fuel Cell), By Product (Grid Connected, Hybrid), By Application (Education, Government), By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030', GVR-1-68038-527-4.
- [20] International Renewable Energy Agency (IRENA), 'RE-organising Power Systems for the Transition', Abu Dhabi, ISBN: 978-92-9260-450-9, 2022. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jun/IRENA_Organising_Power_Systems_2022.p df
- [21] International Energy Agency (IEA), 'Power Systems in Transition', France, Oct. 2020. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/cd69028a-da78-4b47-b1bf-7520cdb20d70/Power_systems_in_transition.pdf
- [22] S. Massoud Amin and B. F. Wollenberg, 'Toward a smart grid: power delivery for the 21st century', *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 3, no. 5, pp. 34–41, Sep. 2005, doi: 10.1109/MPAE.2005.1507024.
- [23] 'Microgrid Deployment Tracker 1Q20'. Accessed: Feb. 13, 2020. [Online]. Available: https://www.navigantresearch.com/reports/microgrid-deployment-tracker-1q20
- [24] J. Behrendt, 'Microgrids and EU law: Three Microgrid models to solve one regulatory puzzle', *Energy Policy*, vol. 177, p. 113483, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2023.113483.
- [25] V. K. Sood and H. Abdelgawad, 'Microgrids architectures', in *Distributed Energy Resources in Microgrids*, Elsevier, 2019, pp. 1–31. doi: 10.1016/B978-0-12-817774-7.00001-6.
- [26] V. F. Pires, A. Pires, and A. Cordeiro, 'DC Microgrids: Benefits, Architectures, Perspectives and Challenges', *Energies*, vol. 16, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16031217.
- [27] S. D'silva, M. Shadmand, S. Bayhan, and H. Abu-Rub, 'Towards Grid of Microgrids: Seamless Transition between Grid-Connected and Islanded Modes of Operation', *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, pp. 66–81, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2988618.
- [28] Paul Denholm, Trieu Mai, Rick Wallace Kenyon, Ben Kroposki, and Mark O'Malley, 'Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin', National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6120-73856, 2020. [Online]. Available: https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/73856.pdf
- [29] B. Kroposki *et al.*, 'Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy', *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 15, no. 2, pp. 61–73, Mar. 2017, doi: 10.1109/MPE.2016.2637122.
- [30] M. Ahmed, L. Meegahapola, A. Vahidnia, and M. Datta, 'Analyzing the Effect of X/R ratio on Dynamic Performance of Microgrids', in 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Sep. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905556.
- [31] S. N. Singh, N. Jain, U. Agarwal, and M. Kumawat, Eds., Optimal Planning and Operation of Distributed Energy Resources. in Energy Systems in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature, 2023. doi: 10.1007/978-981-99-2800-2.

- [32] M. W. Altaf, M. T. Arif, S. N. Islam, and Md. E. Haque, 'Microgrid Protection Challenges and Mitigation Approaches–A Comprehensive Review', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 38895–38922, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165011.
- [33] Иван Тодоровић, 'Управљање претварачем којим се остварује подршка дистрибутивној мрежи током поремећаја', Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2018. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_nardus_10446
- [34] N. N. A. Bakar, M. Y. Hassan, M. F. Sulaima, M. N. Mohd Nasir, and A. Khamis, 'Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, pp. 161–169, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.049.
- [35] M. Gržanić, T. Capuder, N. Zhang, and W. Huang, 'Prosumers as active market participants: A systematic review of evolution of opportunities, models and challenges', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, p. 111859, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111859.
- [36] D. Jin *et al.*, 'Toward a Cyber Resilient and Secure Microgrid Using Software-Defined Networking', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2494–2504, Sep. 2017, doi: 10.1109/TSG.2017.2703911.
- [37] S. Hossain-McKenzie, M. Reno, R. Bent, and A. Chavez, 'Cybersecurity of Networked Microgrids: Challenges Potential Solutions and Future Directions', SAND--2020-13723, 1738879, 692990, Dec. 2020. doi: 10.2172/1738879.
- [38] Redakcija, 'Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača', PROPISI.NET | Svi propisi Republike Srbije online. Accessed: Aug. 21, 2023. [Online]. Available: https://www.propisi.net/uredbu-o-kriterijumima-uslovima-inacinu-obracuna-potrazivanja-i-obaveza-izmedju-kupca-proizvodjaca-i-snabdevaca/
- [39] W. Tushar, C. Yuen, H. Mohsenian-Rad, T. Saha, H. V. Poor, and K. L. Wood, 'Transforming Energy Networks via Peer-to-Peer Energy Trading: The Potential of Game-Theoretic Approaches', *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 35, no. 4, pp. 90–111, Jul. 2018, doi: 10.1109/MSP.2018.2818327.
- [40] A. Cagnano, E. De Tuglie, and P. Mancarella, 'Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation', *Appl. Energy*, vol. 258, p. 114039, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114039.
- [41] Robert Broderick, Brooke Marshall Garcia, Samantha E. Horn, Matthew S. Lave, 'Microgrid Conceptual Design Guidebook', Sandia National Laboratories, 2022. [Online]. Available: https://energy.sandia.gov/wpcontent/uploads/2022/05/ETI_SNL_Microgrid_Guidebook_2022_SAND2022-4842-R_FINAL.pdf
- [42] Oveis Asgari Gashteroodkhani, 'Intelligent Protection Schemes for Smart Grids', University of Nevada, Reno, 2020. [Online]. Available: https://scholarworks.unr.edu/bitstream/handle/11714/7655/AsgariGashteroodkhani_unr_0139D_1 3310.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [43] M. Uzair, L. Li, M. Eskandari, J. Hossain, and J. G. Zhu, 'Challenges, advances and future trends in AC microgrid protection: With a focus on intelligent learning methods', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 178, p. 113228, May 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113228.
- [44] V. Venkataramanan, A. K. Srivastava, A. Hahn, and S. Zonouz, 'Measuring and Enhancing Microgrid Resiliency Against Cyber Threats', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 6, pp. 6303– 6312, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2928495.
- [45] Q. Zhou, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, 'A Cyber-Attack Resilient Distributed Control Strategy in Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 3690–3701, Sep. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2979160.
- [46] S. Sen and V. Kumar, 'Microgrid modelling: A comprehensive survey', Annu. Rev. Control, vol. 46, pp. 216–250, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.arcontrol.2018.10.010.

- [47] R. Majumder, 'Some Aspects of Stability in Microgrids', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3243–3252, Aug. 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2234146.
- [48] M. Kabalan, P. Singh, and D. Niebur, 'Large Signal Lyapunov-Based Stability Studies in Microgrids: A Review', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2287–2295, Sep. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2521652.
- [49] I. Todorović and I. Isakov, 'Advances and Prospects in Distributed Generation Sources Digital Twins Design', in *Smart Grids Technology and Applications [Working Title]*, IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.102703, https://www.intechopen.com/online-first/80842.
- [50] N. Bazmohammadi *et al.*, 'Microgrid Digital Twins: Concepts, Applications, and Future Trends', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 2284–2302, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138990.
- [51] B. Alghamdi and C. A. Cañizares, 'Frequency Regulation in Isolated Microgrids Through Optimal Droop Gain and Voltage Control', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 988–998, Mar. 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3028472.
- [52] X. Wu, C. Shen, and R. Iravani, 'A Distributed, Cooperative Frequency and Voltage Control for Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2764–2776, Jul. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2619486.
- [53] D. O. Amoateng, M. Al Hosani, M. S. Elmoursi, K. Turitsyn, and J. L. Kirtley, 'Adaptive Voltage and Frequency Control of Islanded Multi-Microgrids', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4454–4465, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2780986.
- [54] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, 'Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597.
- [55] D. Kanavaros, G. Oriti, and A. L. Julian, 'Novel Implementation and Comparison of Active and Reactive Power Flow Control Methods in a Single Phase Grid-Connected Microgrid', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 2, pp. 1631–1639, Mar. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2965080.
- [56] M. Naderi, Y. Khayat, Q. Shafiee, T. Dragičević, F. Blaabjerg, and H. Bevrani, 'An Emergency Active and Reactive Power Exchange Solution for Interconnected Microgrids', *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 5206–5218, Oct. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2954113.
- [57] S. Tiwari, R. Sabzehgar, and M. Rasouli, 'Load balancing in a microgrid with uncertain renewable resources and loads', in 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Apr. 2017, pp. 1–8. doi: 10.1109/PEDG.2017.7972505.
- [58] Y. Astriani, G. Shafiullah, and F. Shahnia, 'Incentive determination of a demand response program for microgrids', *Appl. Energy*, vol. 292, p. 116624, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116624.
- [59] C. Wang, H. Yu, L. Chai, H. Liu, and B. Zhu, 'Emergency Load Shedding Strategy for Microgrids Based on Dueling Deep Q-Learning', *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19707–19715, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3055401.
- [60] S. S. Rao, *Engineering Optimization Theory and Practice*, 1st ed. Wiley, 2019. doi: 10.1002/9781119454816.
- [61] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, 'A Centralized Energy Management System for Isolated Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1864–1875, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2294187.
- [62] K. T. Tan, X. Y. Peng, P. L. So, Y. C. Chu, and M. Z. Q. Chen, 'Centralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters in Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1977–1987, Dec. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2205952.

- [63] A. Kaur, J. Kaushal, and P. Basak, 'A review on microgrid central controller', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 338–345, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.141.
- [64] E. Unamuno and J. A. Barrena, 'Hybrid ac/dc microgrids—Part II: Review and classification of control strategies', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1123–1134, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.186.
- [65] M. Shirkhani *et al.*, 'A review on microgrid decentralized energy/voltage control structures and methods', *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 368–380, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.06.022.
- [66] K. Zuo and L. Wu, 'A review of decentralized and distributed control approaches for islanded microgrids: Novel designs, current trends, and emerging challenges', *Electr. J.*, vol. 35, no. 5, p. 107138, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.tej.2022.107138.
- [67] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cárdenas-Dobson, M. Martínez-Gómez, and D. Sáez, 'Distributed Control Strategies for Microgrids: An Overview', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193412– 193448, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032378.
- [68] F. H. Malik and M. Lehtonen, 'A review: Agents in smart grids', *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 131, pp. 71–79, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.004.
- [69] W. Saad, Z. Han, H. V. Poor, and T. Basar, 'Game-Theoretic Methods for the Smart Grid: An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications', *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 5, pp. 86–105, Sep. 2012, doi: 10.1109/MSP.2012.2186410.
- [70] O. Abdel-Raouf, M. A., and E. F., 'A Survey of Game Theory Applications in Electrical Power Micro-Grid Systems', Int. J. Comput. Appl., vol. 177, no. 37, pp. 25–34, Feb. 2020, doi: 10.5120/ijca2020919871.
- [71] A. Vasilakis, I. Zafeiratou, D. T. Lagos, and N. D. Hatziargyriou, 'The Evolution of Research in Microgrids Control', *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 7, pp. 331–343, 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.3030348.
- [72] J. Hu, Y. Shan, J. M. Guerrero, A. Ioinovici, K. W. Chan, and J. Rodriguez, 'Model predictive control of microgrids – An overview', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 136, p. 110422, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110422.
- [73] A. Bidram and A. Davoudi, 'Hierarchical Structure of Microgrids Control System', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, Dec. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2197425.
- [74] 'Comprehensive review of trends in microgrid control', *Renew. Energy Focus*, vol. 38, pp. 84–96, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ref.2021.07.003.
- [75] J. A. P. Lopes, A. Madureira, N. Gil, and F. Resende, 'Operation of Multi-Microgrids', in *Microgrids*, N. Hatziargyriou, Ed., Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2013, pp. 165–205. doi: 10.1002/9781118720677.ch05.
- [76] W. Huang, W. Zheng, and D. J. Hill, 'Distributionally Robust Optimal Power Flow in Multi-Microgrids With Decomposition and Guaranteed Convergence', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 43–55, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3012025.
- [77] D. Zheng et al., 'Tertiary control of microgrid', in *Microgrid Protection and Control*, Elsevier, 2021, pp. 255–295. doi: 10.1016/b978-0-12-821189-2.00001-2.
- [78] L. Meng, F. Tang, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, 'Tertiary Control of Voltage Unbalance Compensation for Optimal Power Quality in Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 802–815, Dec. 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2363687.
- [79] E. Riva Sanseverino, N. Nguyen Quang, M. L. Di Silvestre, J. M. Guerrero, and C. Li, 'Optimal power flow in three-phase islanded microgrids with inverter interfaced units', *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 123, pp. 48–56, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.01.020.

- [80] J. Arkhangelski, M. Abdou-Tankari, and G. Lefebvre, 'Day-Ahead Optimal Power Flow for Efficient Energy Management of Urban Microgrid', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 2, pp. 1285–1293, Mar. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3049117.
- [81] G. Liu, M. Starke, X. Zhang, and K. Tomsovic, 'A MILP-based distribution optimal power flow model for microgrid operation', in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Jul. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741704.
- [82] E. Grover-Silva, M. Heleno, S. Mashayekh, G. Cardoso, R. Girard, and G. Kariniotakis, 'A stochastic optimal power flow for scheduling flexible resources in microgrids operation', *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 201–208, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.114.
- [83] G. Agundis-Tinajero *et al.*, 'Extended-Optimal-Power-Flow-Based Hierarchical Control for Islanded AC Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 1, pp. 840–848, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2813980.
- [84] J. Jithendranath, D. Das, and J. M. Guerrero, 'Probabilistic optimal power flow in islanded microgrids with load, wind and solar uncertainties including intermittent generation spatial correlation', *Energy*, vol. 222, p. 119847, May 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.119847.
- [85] T. G. Paul, S. J. Hossain, S. Ghosh, P. Mandal, and S. Kamalasadan, 'A Quadratic Programming Based Optimal Power and Battery Dispatch for Grid-Connected Microgrid', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1793–1805, Mar. 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2782671.
- [86] S. Singh, M. Singh, and S. C. Kaushik, 'Optimal power scheduling of renewable energy systems in microgrids using distributed energy storage system', *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 9, pp. 1328–1339, Oct. 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0552.
- [87] T. Morstyn, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, 'Network Topology Independent Multi-Agent Dynamic Optimal Power Flow for Microgrids With Distributed Energy Storage Systems', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3419–3429, Jul. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2631600.
- [88] Y. Liu, Z. Qu, H. Xin, and D. Gan, 'Distributed Real-Time Optimal Power Flow Control in Smart Grid', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3403–3414, Sep. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2635683.
- [89] E. O. Arwa and K. A. Folly, 'Reinforcement Learning Techniques for Optimal Power Control in Grid-Connected Microgrids: A Comprehensive Review', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208992–209007, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038735.
- [90] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dorfler, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, and F. Bullo, 'Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 7025–7038, Nov. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2436879.
- [91] X. Yang, Y. Du, J. Su, L. Chang, Y. Shi, and J. Lai, 'An Optimal Secondary Voltage Control Strategy for an Islanded Multibus Microgrid', *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 1236–1246, Dec. 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2602367.
- [92] Y. Guan, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, 'Coordinated Secondary Control for Balanced Discharge Rate of Energy Storage System in Islanded AC Microgrids', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 5019–5028, Nov. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2598724.
- [93] Q. Shafiee, Č. Stefanović, T. Dragičević, P. Popovski, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, 'Robust Networked Control Scheme for Distributed Secondary Control of Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5363–5374, Oct. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2293711.
- [94] X. Li, J. He, X. Li, and C. Wen, 'Robust Distributed Secondary Control for AC Microgrids With Time-Varying Delay', *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 31, no. 2, pp. 937–944, Mar. 2023, doi: 10.1109/TCST.2022.3195037.

- [95] C. Zhao, W. Sun, J. Wang, Q. Li, D. Mu, and X. Xu, 'Distributed Cooperative Secondary Control for Islanded Microgrid With Markov Time-Varying Delays', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2235–2247, Dec. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2935501.
- [96] F. Guo, C. Wen, J. Mao, and Y.-D. Song, 'Distributed Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Droop-Controlled Inverter-Based Microgrids', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4355–4364, Jul. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2379211.
- [97] G. Lou, W. Gu, J. Wang, W. Sheng, and L. Sun, 'Optimal Design for Distributed Secondary Voltage Control in Islanded Microgrids: Communication Topology and Controller', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 968–981, Mar. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2870058.
- [98] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, 'Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 1018–1031, Feb. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2259506.
- [99] F. Guo, C. Wen, J. Mao, J. Chen, and Y.-D. Song, 'Distributed Cooperative Secondary Control for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Microgrid', *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 11, no. 5, pp. 1078–1088, Oct. 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2462773.
- [100]S. Deng, L. Chen, X. Lu, T. Zheng, and S. Mei, 'Distributed Finite-Time Secondary Frequency Control of Islanded Microgrids With Enhanced Operational Flexibility', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 3, pp. 1733–1742, Sep. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3054780.
- [101] A. Navas-Fonseca *et al.*, 'Distributed Predictive Secondary Control for Imbalance Sharing in AC Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 13, no. 1, pp. 20–37, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSG.2021.3108677.
- [102] G. Lou, W. Gu, Y. Xu, M. Cheng, and W. Liu, 'Distributed MPC-Based Secondary Voltage Control Scheme for Autonomous Droop-Controlled Microgrids', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 792–804, Apr. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2620283.
- [103] R. Heydari, T. Dragicevic, and F. Blaabjerg, 'High-Bandwidth Secondary Voltage and Frequency Control of VSC-Based AC Microgrid', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 11, pp. 11320– 11331, Nov. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2896955.
- [104] P. Martí, M. Velasco, E. X. Martín, L. García de Vicuña, J. Miret, and M. Castilla, 'Performance Evaluation of Secondary Control Policies With Respect to Digital Communications Properties in Inverter-Based Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2192–2202, May 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2608323.
- [105]G. Lou, W. Gu, Y. Xu, W. Jin, and X. Du, 'Stability Robustness for Secondary Voltage Control in Autonomous Microgrids With Consideration of Communication Delays', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4164–4178, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2782243.
- [106] A. Krishna, J. Schiffer, and J. Raisch, 'Distributed secondary frequency control in microgrids: Robustness and steady-state performance in the presence of clock drifts', *Eur. J. Control*, vol. 51, pp. 135–145, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ejcon.2019.08.003.
- [107] Y. Han, P. Shen, X. Zhao, and J. M. Guerrero, 'An Enhanced Power Sharing Scheme for Voltage Unbalance and Harmonics Compensation in an Islanded AC Microgrid', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 3, pp. 1037–1050, Sep. 2016, doi: 10.1109/TEC.2016.2552497.
- [108] Y. Zhang, A. M. Shotorbani, L. Wang, and B. Mohammadi-Ivatloo, 'Distributed Secondary Control of a Microgrid With A Generalized PI Finite-Time Controller', *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 8, pp. 57–67, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3056507.
- [109] M.-H. Khooban, T. Niknam, M. Shasadeghi, T. Dragicevic, and F. Blaabjerg, 'Load Frequency Control in Microgrids Based on a Stochastic Noninteger Controller', *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 853–861, Apr. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2763607.

- [110] Y. Wang, T. L. Nguyen, Y. Xu, Z. Li, Q.-T. Tran, and R. Caire, 'Cyber-Physical Design and Implementation of Distributed Event-Triggered Secondary Control in Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 6, pp. 5631–5642, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2936179.
- [111] J. M. Rey, P. Martí, M. Velasco, J. Miret, and M. Castilla, 'Secondary Switched Control With no Communications for Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 11, pp. 8534– 8545, Nov. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2703669.
- [112] J. Wang, Z. Liu, J. Liu, and T. Wu, 'A Mode Switching-Based Decentralized Secondary Control for Microgrids With Hybrid Droop and Master-Slave Structure', *IEEE Open J. Power Electron.*, vol. 3, pp. 334–347, 2022, doi: 10.1109/OJPEL.2022.3176023.
- [113] Y. Khayat et al., 'Decentralized Optimal Frequency Control in Autonomous Microgrids', IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 3, pp. 2345–2353, May 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2889671.
- [114]M. Kosari and S. H. Hosseinian, 'Decentralized Reactive Power Sharing and Frequency Restoration in Islanded Microgrid', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2901–2912, Jul. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2621033.
- [115]G. Lou, W. Gu, L. Wang, B. Xu, M. Wu, and W. Sheng, 'Decentralised secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrid based on adaptive state estimator', *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 15, pp. 3683–3693, Oct. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1910.
- [116] N. Xia, H. B. Gooi, S. Chen, and W. Hu, 'Decentralized State Estimation for Hybrid AC/DC Microgrids', *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 434–443, Mar. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2016.2615428.
- [117] A. Morattab, O. Akhrif, and M. Saad, 'Decentralised coordinated secondary voltage control of multi-area power grids using model predictive control', *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 18, pp. 4546–4555, Dec. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.2054.
- [118] J. Hu, Y. Shan, K. W. Cheng, and S. Islam, 'Overview of Power Converter Control in Microgrids— Challenges, Advances, and Future Trends', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 8, pp. 9907– 9922, Aug. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3159828.
- [119]Z. Cheng, J. Duan, and M.-Y. Chow, 'To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems', *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 12, no. 1, pp. 6–24, Mar. 2018, doi: 10.1109/MIE.2018.2789926.
- [120] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, H. R. Pota, and A. M. T. Oo, 'Robust Nonlinear Distributed Controller Design for Active and Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 893–903, Dec. 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2362763.
- [121]H. Xin, L. Zhang, Z. Wang, D. Gan, and K. P. Wong, 'Control of Island AC Microgrids Using a Fully Distributed Approach', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 943–945, Mar. 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2378694.
- [122] V. Nasirian, Q. Shafiee, J. M. Guerrero, F. L. Lewis, and A. Davoudi, 'Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1600–1617, Feb. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2414457.
- [123]S. M. Mohiuddin and J. Qi, 'Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids With Precisely Regulated Voltage Variance and Admissible Voltage Profile Guarantees', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 1956–1967, 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2945691.
- [124] J. M. Rey, P. P. Vergara, M. Castilla, A. Camacho, M. Velasco, and P. Martí, 'Droop-free hierarchical control strategy for inverter-based AC microgrids', *IET Power Electron.*, vol. 13, no. 7, pp. 1403–1415, May 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0705.
- [125]Z. Wang, W. Wu, and B. Zhang, 'A Distributed Quasi-Newton Method for Droop-Free Primary Frequency Control in Autonomous Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2214– 2223, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2609422.

- [126] C. X. Rosero, M. Velasco, P. Martí, A. Camacho, J. Miret, and M. Castilla, 'Active Power Sharing and Frequency Regulation in Droop-Free Control for Islanded Microgrids Under Electrical and Communication Failures', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 8, pp. 6461–6472, Aug. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2939959.
- [127] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, and C. L. Bak, 'A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters', *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 54–69, Mar. 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2507203.
- [128] J. Xu and S. Xie, 'LCL-resonance damping strategies for grid-connected inverters with LCL filters: a comprehensive review', *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 292–305, Mar. 2018, doi: 10.1007/s40565-017-0319-7.
- [129] A. M. Bouzid, J. M. Guerrero, A. Cheriti, M. Bouhamida, P. Sicard, and M. Benghanem, 'A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 751–766, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.016.
- [130] P. Monica and M. Kowsalya, 'Control strategies of parallel operated inverters in renewable energy application: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 885–901, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.075.
- [131]J. C. Vasquez, R. A. Mastromauro, J. M. Guerrero, and M. Liserre, 'Voltage Support Provided by a Droop-Controlled Multifunctional Inverter', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4510–4519, Nov. 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2015357.
- [132] C. Raj D, D. N. Gaonkar, and J. M. Guerrero, 'Improved P-f/Q-V and P-V/Q-f droop controllers for parallel distributed generation inverters in AC microgrid', *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, pp. 421– 442, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.026.
- [133]J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, 'Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 994–1004, Apr. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.892621.
- [134]X. Yu, A. M. Khambadkone, H. Wang, and S. T. S. Terence, 'Control of Parallel-Connected Power Converters for Low-Voltage Microgrid—Part I: A Hybrid Control Architecture', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 2962–2970, Dec. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2087393.
- [135]Q.-C. Zhong, 'Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing Among Inverters Operated in Parallel', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1281–1290, Apr. 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2146221.
- [136] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, 'Angle droop versus frequency droop in a voltage source converter based autonomous microgrid', in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Jul. 2009, pp. 1–8. doi: 10.1109/PES.2009.5275987.
- [137]B. John, A. Ghosh, and F. Zare, 'Load Sharing in Medium Voltage Islanded Microgrids With Advanced Angle Droop Control', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6461–6469, Nov. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2713452.
- [138] H. Moussa, A. Shahin, J.-P. Martin, S. Pierfederici, and N. Moubayed, 'Optimal Angle Droop for Power Sharing Enhancement With Stability Improvement in Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5014–5026, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2678686.
- [139] R. R. Kolluri, I. Mareels, T. Alpcan, M. Brazil, J. de Hoog, and D. A. Thomas, 'Power Sharing in Angle Droop Controlled Microgrids', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4743–4751, Nov. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2672569.
- [140] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, and F. Zare, 'Improvement of Stability and Load Sharing in an Autonomous Microgrid Using Supplementary Droop Control Loop', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 796–808, May 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2032049.

- [141]K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, 'A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, Jul. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.900456.
- [142] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z.-M. Qian, 'Design and Analysis of the Droop Control Method for Parallel Inverters Considering the Impact of the Complex Impedance on the Power Sharing', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 576–588, Feb. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2046001.
- [143] T. Wu, Z. Liu, J. Liu, S. Wang, and Z. You, 'A Unified Virtual Power Decoupling Method for Droop-Controlled Parallel Inverters in Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 8, pp. 5587–5603, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2497972.
- [144] Y. Li and Y. W. Li, 'Power Management of Inverter Interfaced Autonomous Microgrid Based on Virtual Frequency-Voltage Frame', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 30–40, Mar. 2011, doi: 10.1109/TSG.2010.2095046.
- [145]C.-T. Lee, C.-C. Chu, and P.-T. Cheng, 'A New Droop Control Method for the Autonomous Operation of Distributed Energy Resource Interface Converters', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1980–1993, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2205944.
- [146]J. Zhou and P.-T. Cheng, 'A Modified Q-\dotV Droop Control for Accurate Reactive Power Sharing in Distributed Generation Microgrid', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 4, pp. 4100– 4109, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2903093.
- [147] J. Hu, J. Zhu, D. G. Dorrell, and J. M. Guerrero, 'Virtual Flux Droop Method—A New Control Strategy of Inverters in Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4704–4711, Sep. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2286159.
- [148] A. Wang and J. Zhang, 'An accurate reactive power control study in virtual flux droop control', *Open Phys.*, vol. 15, no. 1, pp. 948–953, Dec. 2017, doi: 10.1515/phys-2017-0116.
- [149] E. Rokrok and M. E. H. Golshan, 'Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid', *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 5, p. 562, 2010, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0146.
- [150] Y. A.-R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, 'Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 2806–2816, Nov. 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.2005100.
- [151]M. S. Golsorkhi and D. D. C. Lu, 'A Control Method for Inverter-Based Islanded Microgrids Based on V-I Droop Characteristics', *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1196–1204, Jun. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357471.
- [152]S. K. Jha, D. Kumar, and M. Lehtonen, 'Modified V-I Droop Based Adaptive Vector Control Scheme for Demand Side Management in a Stand-alone Microgrid', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 130, p. 106950, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106950.
- [153] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, 'Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1126–1135, Aug. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.851634.
- [154]J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, 'Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 2845–2859, Aug. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.924173.
- [155]J. He and Y. W. Li, 'Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 6, pp. 2525– 2538, Nov. 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2168592.
- [156]X. Wu, C. Shen, and R. Iravani, 'Feasible Range and Optimal Value of the Virtual Impedance for Droop-Based Control of Microgrids', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 3, pp. 1242–1251, May 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2519454.

- [157]B. Liu, Z. Liu, J. Liu, R. An, H. Zheng, and Y. Shi, 'An Adaptive Virtual Impedance Control Scheme Based on Small-AC-Signal Injection for Unbalanced and Harmonic Power Sharing in Islanded Microgrids', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 12, pp. 12333–12355, Dec. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2905588.
- [158]C. N. Rowe, T. J. Summers, R. E. Betz, D. J. Cornforth, and T. G. Moore, 'Arctan Power– Frequency Droop for Improved Microgrid Stability', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3747–3759, Aug. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2230190.
- [159] J. Li, F. Li, X. Li, H. Liu, F. Chen, and B. Liu, 'S-shaped droop control method with secondary frequency characteristics for inverters in microgrid', *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 13, pp. 3385–3392, Oct. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0673.
- [160] R. Wang, Q. Sun, Y. Gui, and D. Ma, 'Exponential-function-based droop control for islanded microgrids', J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 7, no. 4, pp. 899–912, Jul. 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0544-3.
- [161]M. Biglarahmadi, A. Ketabi, H. Reza Baghaee, and J. M. Guerrero, 'Integrated Nonlinear Hierarchical Control and Management of Hybrid AC/DC Microgrids', *IEEE Syst. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 902–913, Mar. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3050334.
- [162] R. W. Kenyon, A. Sajadi, and B.-M. Hodge, 'Droop-e: Exponential Droop as a Function of Power Output for Grid-Forming Inverters with Autonomous Power Sharing', 2022, doi: 10.48550/ARXIV.2207.03564.
- [163] T. Wolgast, S. Ferenz, and A. Nieße, 'Reactive Power Markets: A Review', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 28397–28410, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3141235.
- [164] Strezoski, V. C., Osnovi proračuni elektroenergetskih sistema, Tom I elementi. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [165] R. Peña-Alzola and F. Blaabjerg, 'Design and Control of Voltage Source Converters With LCL -Filters', in *Control of Power Electronic Converters and Systems*, Elsevier, 2018, pp. 207–242. doi: 10.1016/B978-0-12-805245-7.00008-1.
- [166]C. Zhang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, 'Resonance damping techniques for grid-connected voltage source converters with LCL filters — A review', in 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), May 2014, pp. 169–176. doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850424.
- [167] A. Gkountaras, *Modeling techniques and control strategies for inverter dominated microgrids*. in Elektrische Energietechnik an der TU Berlin, no. 2. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2017.
- [168] A. A. Rockhill, M. Liserre, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, 'Grid-Filter Design for a Multimegawatt Medium-Voltage Voltage-Source Inverter', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1205–1217, Apr. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2087293.
- [169]Z. Wu and M. Aldeen, 'Optimal design method of passive LCL filters for grid-connected inverters', in 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Oct. 2016, pp. 237–242. doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779504.
- [170]S. Jayalath and M. Hanif, 'An LCL-Filter Design With Optimum Total Inductance and Capacitance', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 8, pp. 6687–6698, Aug. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2754100.
- [171] Y. Liu, H. A. Mantooth, J. Carlos Balda, and C. Farnell, 'A Variable Inductor Based LCL Filter for Large-Scale Microgrid Application', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 9, pp. 7338–7348, Sep. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2764483.
- [172] M. P. Kaźmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Eds., *Control in power electronics: selected problems*. in Academic Press series in engineering. Amsterdam; New York: Academic Press, 2002.

- [173]C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, and J. L. Kirtley, 'A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park', *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2070–2083, Dec. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [174] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. Hoboken, N.J: IEEE Press/John Wiley, 2010.
- [175] N. Vázquez and J. V. López, 'Inverters', in *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2018, pp. 289– 338. doi: 10.1016/B978-0-12-811407-0.00011-8.
- [176] S. Eberlein and K. Rudion, 'Small-signal stability modelling, sensitivity analysis and optimization of droop controlled inverters in LV microgrids', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 125, p. 106404, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106404.
- [177] D. Panagou, D. M. Stipanovic, and P. G. Voulgaris, 'Distributed Coordination Control for Multi-Robot Networks Using Lyapunov-Like Barrier Functions', *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 61, no. 3, pp. 617–632, Mar. 2016, doi: 10.1109/TAC.2015.2444131.
- [178] J. Nocedal and S. J. Wright, *Numerical optimization*, 2nd ed. in Springer series in operations research and financial engineering. New York: Springer, 2006.
- [179]E. K. P. Chong and S. H. Żak, *An Introduction to Optimization*, 1st ed. Wiley, 2008. doi: 10.1002/9781118033340.
- [180] L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, and U. Borup, 'A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 6, pp. 1480–1490, Nov. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.857506.
- [181]K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, 'A decentralized impedance-based adaptive droop method for power loss reduction in a converter-dominated islanded microgrid', *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol. 5, pp. 39–49, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.segan.2015.11.003.
- [182] T. Tao, Analysis II, vol. 38. in Texts and Readings in Mathematics, vol. 38. Singapore: Springer Nature, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-7284-3.
- [183]E. Weitenberg, Y. Jiang, C. Zhao, E. Mallada, C. De Persis, and F. Dörfler, 'Robust Decentralized Secondary Frequency Control in Power Systems: Merits and Tradeoffs', *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 64, no. 10, pp. 3967–3982, Oct. 2019, doi: 10.1109/TAC.2018.2884650.
- [184]L. Zhijie, C. Wen, F. Guo, P. Lin, and Q. Wu, 'Decentralized Secondary Control for Frequency Restoration and Power Allocation in Islanded Ac Microgrids', SSRN Electron. J., 2022, doi: 10.2139/ssrn.4124034.
- [185]Z. Lian, C. Wen, F. Guo, P. Lin, and Q. Wu, 'Decentralized secondary control for frequency restoration and power allocation in islanded AC microgrids', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 148, p. 108927, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108927.
- [186] J. Rivera, L. Garcia, C. Mora, J. J., and S. Orteg, 'Super-Twisting Sliding Mode in Motion Control Systems', in *Sliding Mode Control*, A. Bartoszewicz, Ed., InTech, 2011. doi: 10.5772/14532.
- [187] 'Resources IEEE PES Test Feeder'. Accessed: Sep. 11, 2023. [Online]. Available: https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/
- [188] N. Soni, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, 'Inertia Design Methods for Islanded Microgrids Having Static and Rotating Energy Sources', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 5165–5174, Nov. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2597281.
- [189] P. Unruh, M. Nuschke, P. Strauß, and F. Welck, 'Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods', *Energies*, vol. 13, no. 10, 2020, doi: 10.3390/en13102589.

7. Прилози

7.1. Прорачун излазне активне и реактивне снаге дистрибуиране јединице повезане на мрежу

Ако се разматра поједностављено електрично коло са слике 38, која приказује претварач енергетске електронике повезан на електричну мрежу преко комплексне импедансе $Z \angle \theta$, могуће је прорачунати активну и реактивну снагу предату мрежи.

Напон који генерише претварач означен је као $V \angle \delta$, док је напон у тачки прикључења на мрежу означен као $E \angle 0$. Полазећи од израза за прорачун комплексне привидне снаге, прорачун активне и реактивне снаге је дат у наставку.

$$\hat{S} = \hat{V}^* \cdot \hat{I} = P - jQ \tag{7.1}$$

$$P - jQ = V^* \cdot \frac{\hat{V} - \hat{E}}{\hat{Z}} = V \cdot e^{-j\delta} \cdot \frac{V \cdot e^{j\delta} - E}{Z \cdot e^{j\theta}} = \frac{V^2}{Z} \cdot e^{-j\theta} - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot e^{-j(\delta + \theta)}$$
(7.2)

$$P = Re\{\hat{S}\} = \frac{V^2}{Z} \cdot \cos\theta - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \cos(\delta + \theta)$$
(7.3)

$$Q = -Im\{\hat{S}\} = \frac{V^2}{Z} \cdot \sin\theta - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \sin(\delta + \theta)$$
(7.4)

Применом адиционих формула за косинус, односно синус збира углова, добија се:

$$P = \frac{V^2}{Z} \cdot \cos\theta - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \cos\delta \cdot \cos\theta + \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \sin\delta \cdot \sin\theta, \tag{7.5}$$

$$Q = \frac{V^2}{Z} \cdot \sin\theta - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \sin\delta \cdot \cos\theta - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \cos\delta \cdot \sin\theta.$$
(7.6)

Груписањем појединих чланова добија се нешто компактнији запис:

$$P = \frac{V^2 - V \cdot E \cdot \cos \delta}{Z} \cdot \cos \theta + \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \sin \delta \cdot \sin \theta, \qquad (7.7)$$

$$Q = \frac{V^2 - V \cdot E \cdot \cos \delta}{Z} \cdot \sin \theta - \frac{V \cdot E}{Z} \cdot \sin \delta \cdot \cos \theta.$$
(7.8)



Слика 38: Поједностављено коло претварача повезаног на електричну мрежу.

Добијени изрази важе за општи случај – када импеданса између претварача и мреже има и отпорни и индуктивни део. Међутим, могу се разматрати и одређени специјални случајеви.

і) Импеданса између претварача и мреже је чисто индуктивна.

Ова претпоставка се врло често користи у анализи рада електричних мрежа пошто је оправдана у преносним мрежама. Тада угао износи $\theta = 90^{\circ}$, а Z = X. Самим тим, изрази за прорачун активне и реактивне снаге (7.7) и (7.8) се могу поједноставити на следећи начин:

$$P = \frac{V \cdot E}{X} \cdot \sin \delta, \tag{7.9}$$

$$Q = \frac{V^2 - V \cdot E \cdot \cos \delta}{X}.$$
(7.10)

Добијени изрази у потпуности су еквивалентни изразима (2.1) и (2.2). Претпостављајући да је угао δ врло мали, тј. да важи sin $\delta \approx \delta$ и cos $\delta \approx 1$, добија се:

$$P \approx \frac{V \cdot E}{X} \cdot \delta, \tag{7.11}$$

$$Q \approx \frac{V}{X} \cdot (V - E). \tag{7.12}$$

Дате зависности су темељ друп управљања, које је описано у одељку 2.2.1.

іі) Импеданса између претварача и мреже је чисто отпорна.

Уколико је еквивалентна отпорност водова много већа од индуктивности (па се индуктивност водова може занемарити), важи да је угао $\theta = 0^{\circ}$, а Z = R. Активна и реактивна снага се тада могу израчунати као:

$$P = \frac{V^2 - V \cdot E \cdot \cos \delta}{R},\tag{7.13}$$

$$Q = -\frac{V \cdot E}{R} \cdot \sin \delta. \tag{7.14}$$

Уз исте претпоставке у вези с углом снаге δ, следи да је у овом случају активна снага сразмерна разлици у модулима напона, а реактивна снага промени угла снаге.

7.2. Резултати динамичке симулације с поједностављеним математичким моделом за IEEE 123 тест мрежу

У табели 7 дати су резултати добијени приликом тестирања предложеног примарног закона управљања на IEEE 123 тест мрежи. Овај тест описан је у одељку 4.2.3.

Чвор	v [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	P [r.j.]	Q [r.j.]
1	0,9982	0,9977	0	0,0129	-0,1643
2	0,9977	0,9977	0	0,0370	-0,0423
3	0,9977	0,9977	0	0,0177	0,1051
4	0,9977	0,9977	0	0,0419	-0,0408
5	0,9977	0,9977	0	0,0301	0,0901
	-				

Табела 7: Очитани резултати у последњој радној тачки у устаљеном стању за IEEE тест мрежу од 123 чвора.

Чвор	v [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	P [r.j.]	Q [r.j.]
6	0,9977	0,9977	-0,5000	-0,4409	0,4836
7	0,9988	0,9977	0	0,0227	0,0387
8	0,9982	0,9976	0	0,0119	0,1260
9	0,9976	0,9977	0	0,0316	-0,0271
10	0,9977	0,9977	0	0,0519	-0,0505
11	0,9977	0,9977	0	0,0519	-0,0505
12	0,9976	0,9976	0	0,0484	-0,0530
13	0,9981	0,9976	0	0,0192	0,0954
14	0,9977	0,9977	0	0,0204	-0,0134
15	0,9976	0,9976	0	0,0143	-0,0078
16	0,9976	0,9976	0	0,0805	-0,0772
17	0,9976	0,9976	0	0,0755	-0,0726
18	0,9977	0,9972	0,9000	0,9284	0,1486
19	0,9971	0,9972	0	0,0371	0,1414
20	0,9971	0,9972	0,6000	0,6720	-0,5517
21	0,9982	0,9971	0	0,0274	0,5372
22	0,9971	0,9971	0	0,1332	-0,1280
23	0,9984	0,9971	-0,9000	-0,8728	0,5037
24	0,9965	0,9970	-0,8000	-0,5513	0,7535
25	0,9985	0,9970	0	0,0205	0,0196
26	0,9981	0,9970	0	0,0219	0,0793
27	0,9981	0,9970	0	0,0423	0,0662
28	0,9985	0,9970	0	0,0290	-0,0104
29	0,9985	0,9970	0	0,0391	-0,0161
30	0,9985	0,9970	0	0,0309	-0,0137
31	0,9970	0,9970	0	0,0356	-0,0409
32	0,9970	0,9970	0	0,0818	-0,0790
33	0,9970	0,9970	0	0,1318	-0,1275
34	0,9976	0,9976	0	0,0134	-0,0141
35	0,9995	0,9990	0,3000	0,3095	0,1283
36	0,9991	0,9989	0	0,0106	-0,0844
37	0,9989	0,9989	-0,7000	-0,6615	0,7962
38	0,9989	0,9989	0	0,0142	-0,0144
39	0,9989	0,9989	0	0,0328	-0,0321
40	0,9994	0,9991	0	0,0071	0,0902

Чвор	v [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	P [r.j.]	Q [r.j.]
41	0,9991	0,9991	0	0,0275	-0,0292
42	0,9995	0,9991	0	0,0066	0,0868
43	0,9991	0,9991	0	0,0384	-0,0387
44	0,9994	0,9991	0	0,0051	0,0794
45	0,9992	0,9991	0	0,0092	-0,0119
46	0,9992	0,9992	0	0,0226	-0,0221
47	0,9996	0,9992	0,6000	0,6044	-0,2590
48	0,9996	0,9992	0	0,0099	-0,0046
49	0,9996	0,9992	0,1000	0,1079	-0,0485
50	0,9996	0,9992	0	0,0078	0,0037
51	0,9996	0,9992	-0,1000	-0,0898	0,0495
52	0,9975	0,9953	0	0,0532	-0,0163
53	0,9973	0,9952	0,5000	0,5313	-0,2261
54	0,9974	0,9951	0	0,0294	0,1523
55	0,9975	0,9953	0	0,0560	-0,0217
56	0,9975	0,9954	0	0,1085	-0,0514
57	0,9955	0,9947	0	0,0640	0,5212
58	0,9944	0,9949	0	0,0642	-0,0631
59	0,9945	0,9950	0	0,1233	-0,1174
60	0,9944	0,9937	0	0,0890	-0,0119
61	0,9958	0,9939	0	0,2960	-0,1181
62	0,9919	0,9934	0	0,0768	0,2759
63	0,9916	0,9933	0	0,0902	0,2668
64	0,9909	0,9930	0	0,1594	0,2901
65	0,9907	0,9929	0	0,1563	0,2323
66	0,9907	0,9928	-1	-0,6484	0,7972
67	1,0005	1,0008	0	-0,0040	-0,2031
68	1,0007	1,0008	0	-0,0079	0,0986
69	1,0007	1,0007	0	-0,0102	0,0971
70	1,0007	1,0007	0	-0,0101	0,0786
71	1,0007	1,0007	-0,3000	-0,3202	0,3430
72	1,0004	1,0007	0	-0,0046	-0,0120
73	1,0007	1,0007	0	-0,0096	0,0124
74	1,0007	1,0007	0	-0,0116	0,0121
75	1,0007	1,0007	0	-0,0251	0,0249

Чвор	v [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	P [r.j.]	Q [r.j.]
76	1,0003	1,0006	0	-0,0059	0,0215
77	1,0002	1,0006	0	-0,0042	0,0028
78	1,0002	1,0006	0	-0,0031	0,0023
79	1,0002	1,0006	0	-0,0116	0,0039
80	1,0002	1,0005	0	-0,0111	0,0051
81	1,0002	1,0005	0	-0,0056	-0,0163
82	1,0002	1,0005	0	-0,0052	0,0015
83	1,0002	1,0005	0	-0,0104	0,0035
84	1,0004	1,0004	0	-0,0109	0,0121
85	1,0004	1,0004	0	-0,0177	0,0175
86	1,0002	1,0006	0	-0,0130	0,0198
87	1,0003	1,0005	0	-0,0039	-0,0039
88	1,0005	1,0005	0	-0,0079	0,0099
89	1,0003	1,0005	0	-0,0034	-0,0065
90	1,0005	1,0005	0	-0,0095	0,0114
91	1,0002	1,0005	0	-0,0033	-0,0083
92	1,0004	1,0004	0	-0,0121	0,0135
93	1,0002	1,0004	0	-0,0035	-0,0076
94	1,0004	1,0004	0	-0,0108	0,0122
95	1,0003	1,0004	0	-0,0047	-0,0044
96	1,0004	1,0004	0	-0,0078	0,0089
97	1,0004	1,0008	0	-0,0085	0,0677
98	1,0004	1,0009	0	-0,0130	0,1335
99	1,0005	1,0010	0	-0,0164	0,1626
100	1,0006	1,0011	0	-0,0207	0,3471
101	0,9997	0,9995	0	0,0034	0,0115
102	0,9996	0,9996	0	0,0052	-0,0064
103	0,9997	0,9997	0	0,0069	-0,0065
104	0,9998	0,9998	0	0,0125	-0,0117
105	0,9996	0,9994	0	0,0043	0,0164
106	0,9995	0,9995	0	0,0079	-0,0090
107	0,9995	0,9995	0	0,0241	-0,0232
108	0,9995	0,9993	0,4000	0,4091	-0,3704
109	0,9991	0,9991	0	0,0153	0,1506
110	0,9990	0,9990	0	0,0070	0,0756
Чвор	<i>v</i> [r.j.]	<i>f</i> [r.j.]	P ^{ref} [r.j.]	<i>P</i> [r.j.]	Q [r.j.]
------	-----------------	-----------------	-------------------------	-----------------	-----------------
111	0,9990	0,9990	0	0,0526	-0,0506
112	0,9990	0,9990	0	0,0095	0,1023
113	0,9989	0,9989	0	0,0204	0,1090
114	0,9989	0,9989	-0,4000	-0,3626	0,4004
135	0,9995	0,9990	0	0,0295	-0,0142
149	0,9988	0,9977	0	0,0733	-0,0323
152	0,9975	0,9955	0	0,1490	-0,0686
160	1,0003	1,0008	0,3000	0,2769	-0,0798
197	0,9998	0,9995	0	0,0096	-0,0041
151	0,9996	0,9993	0	0,0195	-0,0025
350	1,0000	1,0000	0	0	0
250	0,9985	0,9970	0	0,0484	-0,0235
450	1,0014	1,0014	1	0,9183	-0,1718

План третмана података

Назив пројекта/истраживања

Примарна регулација и стабилизација микромрежа са претварачима енергетске електронике у условима непосредне размене електричне енергије

Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање

Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду

Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање

Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Енергетика, електроника и телекомуникације.

1. Опис података

1.1 Врста студије

Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају

У овој студији нису прикупљани подаци.

1.2 Врсте података

- а) квантитативни
- б) квалитативни

1.3. Начин прикупљања података

а) анкете, упитници, тестови

б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи

в) генотипови: навести врсту

г) административни подаци: навести врсту _____

д) узорци ткива: навести врсту_____

ђ) снимци, фотографије: навести врсту_____

е) текст, навести врсту _____

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Ехсеl фајл, датотека
b) SPSS фајл, датотека
с) PDF фајл, датотека
d) Текст фајл, датотека
e) JPG фајл, датотека
f) Остало, датотека
1.3.2. Број записа (код квантитативних података)
а) број варијабли
б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.)
1.3.3. Поновљена мерења
а) да
б) не
Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:
а) временски размак измедју поновљених мера је
б) варијабле које се више пута мере односе се на
в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као
Напомене:
Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?
<i>а)</i> Да
б) Не
Ако је одговор не, образложити
2. Прикупљање полатака
2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података?

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

3. Третман података и пратећа документација
3.1. Третман и чување података
3.1.1. Подаци ће бити депоновани у репозиторијум.
3.1.2. URL adpeca
3.1.3. DOI
3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?
а) Да
б) Да, али после ембарга који ће трајати до
в) He
Ако је одговор не, навести разлог
3.1.5. Подаии неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.
Образложење
o op a stolker oe
2 2 Metapologiu u Jorganoutounia polotoro
3.2 1. Voiu erouver a constant a forma $\frac{1}{2}$ o forma $\frac{1}{2}$ o formation of 2
5.2.1. Који стандард за метаподатке пе бити примењен?
3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

5.5 Стратегија и стандарди за чување података
3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму?
3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не
3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не
3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?
Да Не
Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (<u>https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html</u>) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

a)	Подаци	нису у	отво	реном	присту	πу
						,

- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима