



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ



Александар Селаков

**ОПТИМАЛНО УПРАВЉАЊЕ МИКРО  
МРЕЖАМА У КАРАКТЕРИСТИЧНИМ  
РАДНИМ РЕЖИМИМА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2017.

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Александар Селаков
Ментор, <b>МН:</b>	Проф. др Андрија Сарић
Наслов рада, <b>НР:</b>	Оптимално управљање микро мрежама у карактеристичним радним режимима
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски
Земља публикавања, <b>ЗП:</b>	Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	АП Војводина, Нови Сад
Година, <b>ГО:</b>	2017.
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА:</b>	ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/90/106/3/19/0/0
Научна област, <b>НО:</b>	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Електротехника
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Микро мреже/контролер/софтверски агент/оптимизација/мешовито целобројно квадратно програмирање
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека ФТН-а, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	У дисертацији је дат концепт микро мрежа и описане постојеће методе у управљању и оптимизацији рада микро мрежа. Предложен је нови централизован контролер микро мреже заснован на технологији више-агентног система, који омогућава координацију три режима рада (повезани, острвски и хаваријски) и обезбеђује једноставну конфигурацију и комбинацију оптимизационих критеријума, уз уважавање широког скупа ограничења. Предложени модел примењен је на релевантни тест систем и резултати су приказани уз одговарајућу анализу резултата.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	.....
Датум одбране, <b>ДО:</b>	.....
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: Ред. проф. др Владимир Стрезоски
	Члан: Ред. проф. др Душко Бекут
	Члан: Ред. проф. др Драган Поповић
	Члан: Доц. др Предраг Стефанов
	Члан, ментор: Ред. проф. др Андрија Сарић
	Потпис ментора

Accession number, <b>ANO</b> :												
Identification number, <b>INO</b> :												
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication											
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed document											
Contents code, <b>CC</b> :	PhD thesis											
Author, <b>AU</b> :	Aleksandar Selakov											
Mentor, <b>MN</b> :	Professor PhD Andrija Sarić											
Title, <b>TI</b> :	Optimal Control of Microgrids in Different Operation Conditions											
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian											
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian											
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia											
Locality of publication, <b>LP</b> :	Autonomous Province of Vojvodina, Novi Sad											
Publication year, <b>PY</b> :	2017.											
Publisher, <b>PB</b> :	Authors reprint											
Publication place, <b>PP</b> :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad											
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8/90/106/3/19/0/0											
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical and computing engineering											
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Power Engineering											
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Microgrid/controller/software agent/optimization/mixed integer quadratic programming											
<b>UC</b>												
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad											
Note, <b>N</b> :												
Abstract, <b>AB</b> :	Dissertation provides the microgrids concept and describes existing methods for control and optimization of microgrid operation. This paper proposes a novel, centralized, multi-agent-based, microgrid controller architecture, which provides the coordination of all three operation modes (grid-connected, island and emergency) and enables the easy configuration/combination of optimization goals that are subject to a given set of operational constraints. The simulation results are presented for a typical microgrid test example.											
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	.....											
Defended on, <b>DE</b> :	.....											
Defended Board, <b>DB</b> :	<table border="1"> <tr> <td>President:</td> <td>Professor PhD Vladimir Strezoski</td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Menthor's sign</td> </tr> <tr> <td>Member:</td> <td>Professor PhD Duško Bekut</td> </tr> <tr> <td>Member:</td> <td>Professor PhD Dragan Popović</td> </tr> <tr> <td>Member:</td> <td>Assistant Professor PhD Predrag Stefanov</td> </tr> <tr> <td>Member, Mentor:</td> <td>Professor PhD Andrija Sarić</td> </tr> </table>	President:	Professor PhD Vladimir Strezoski	Menthor's sign	Member:	Professor PhD Duško Bekut	Member:	Professor PhD Dragan Popović	Member:	Assistant Professor PhD Predrag Stefanov	Member, Mentor:	Professor PhD Andrija Sarić
President:	Professor PhD Vladimir Strezoski	Menthor's sign										
Member:	Professor PhD Duško Bekut											
Member:	Professor PhD Dragan Popović											
Member:	Assistant Professor PhD Predrag Stefanov											
Member, Mentor:	Professor PhD Andrija Sarić											

*Стефану и Теодори*

*Посебну захвалност дугујем својим менторима, проф. др Андрији Сарићу и проф. др Душку Бекуту за њихов немерљив допринос и подршку током представљеног истраживања и писања ове докторске дисертације.*

# Резиме

Ова докторска дисертација се бави анализом рада микро мрежа у три типична оперативна режима рада. Први, повезани режим у којем је микро мрежа повезана на главну дистрибутивну мрежу, при чему је основни циљ рада оптимизација рада микро мреже у погледу економије, емисије CO<sub>2</sub> и/или стабилности рада. Други, острвски режим рада при чему је основни циљ стабилни прелазак из повезаног у острвски режим без потреса, уз одржавање учестаности и напона у оквиру техничких граница. Трећи, хаваријски режим који се догађа приликом непланираног преласка у острвски режим рада, при чему је основни циљ одржавање напајања критичних потрошача. Критеријуми рада и оперативне стратегије различите су у сва три радна режима.

Предложен је нови централизован контролер заснован на технологији више-агентног система, који омогућава координацију сва три режима рада и обезбеђује једноставну конфигурацију и комбинацију оптимizacionих критеријума, уз уважавање широког скупа ограничења. Предложени контролер микро мреже састоји се од агента реалног времена задуженог за управљање у затвореној петљи и одржавање учестаности, агента оперативног планирања задуженог за оптимизацију рада и агента стања задуженог за свеобухватно надгледање рада, прикупљање података и координацију. Контролер микро мреже са предложеним агентима развијен је и тестиран на типичном примеру микро мреже. Резултати, симулације и њихова анализа су приказани у раду.

# Summary

This dissertation presents an analysis of three typical microgrid operation modes. First is the analysis of the grid-connected mode, in which the main goal is to optimize the microgrid operation (in terms of economics, carbon emissions and/or reliability) when it is connected with the main grid. Second is the analysis of the planned island mode, in which the main goal is to provide a stable and smooth transition from grid-connected to island mode while keeping both the frequency and the voltages within the required limits. Finally, the paper presents the analysis of the emergency island mode, which occurs after sudden islanding, in which the main goal is to maintain the energization of critical customers. The objectives and the operation strategies of microgrid management are different in each operation mode.

This paper proposes a novel, centralized, multi-agent-based, microgrid controller architecture, which provides the coordination of all three operation modes and enables the easy configuration/combination of optimization goals that are subject to a given set of operational constraints. The microgrid controller consists of a real-time agent (responsible for closed loop control and maintenance of the system's frequency), an operation planning agent [responsible for optimization], and a state agent (responsible for overall monitoring, management and coordination of the other two agents). A microgrid controller with the aforementioned agents has been developed and tested. The simulation results are presented for a typical microgrid test example.

# Списак слика

- Слика 1. Типичан пример структуре микро мреже
- Слика 2. Архитектура управљања микро мрежом
- Слика 3. Шематски приказ горивне ћелије
- Слика 4. Полиномна представа (најчешће квадратна) функције трошкова рада (горива) агрегата (где може постојати више сегмената који су различито дефинисани)
- Слика 5. Циклус пражњења и пуњења батерије – електрохемијски процес
- Слика 6. Хијерархијски нивои управљања микро мрежом
- Слика 7. Процес иницијализације рада КММ
- Слика 8. Шематски приказ координације агената
- Слика 9. Шематски приказ модула за прогнозе
- Слика 10. Шематски приказ тест система
- Слика 11. Криве потрошње и производње обновљивих извора
- Слика 12. Цене енергије у посматраном периоду
- Слика 13. Симулациони систем
- Слика 14. Распоред рада за посматрани период без ограничења на емисије
- Слика 15. Распоред рада за посматрани период са ограничењем на емисије
- Слика 16. Учестаност у микро мрежи приликом преласка у острвски режим рада
- Слика 17. Распоред рада за острвски режим
- Слика 18. Распоред рада и управљачке команде
- Слика 19. Управљање учестаношћу у острвском режиму рада

# Списак табела

Табела 1. Основне функционалности реализоване одговарајућим енергетичарским функцијама КММ

Табела 2. Параметри опреме у тест систему

Табела 3. Табела искључивања потрошње



# Садржај

Резиме .....	1
Summary.....	2
Списак слика .....	3
Списак табела .....	4
Садржај .....	5
Листа скраћеница .....	7
1. Увод.....	9
2. Концепт микро мреже .....	12
2.1 Типови микро мрежа.....	14
2.2 Мотивација за увођење микро мрежа.....	15
2.3 Предности микро мрежа .....	16
2.4 Изазови развоја микро мрежа .....	17
3. Преглед стања у области .....	19
3.1 Оптимизација рада микро мрежа.....	19
3.2 Управљање и регулација радом микро мрежа .....	22
3.3 Доприноси докторске дисертације .....	25
4. Дистрибуирани енергетски ресурси .....	26
4.1 Микро турбине .....	26
4.2 Горивне ћелије .....	27
4.3 Ветро генератори.....	28
4.4 Фотонапонски генератори .....	29
4.5 Дизел генератори .....	30
4.6 Батерије (акумулатори).....	32
4.7 Претварачи енергетске електронике .....	33
4.8 Остали типови дистрибуираних енергетских ресурса.....	34

5.	Проблем управљања микро мрежом.....	35
5.1	Управљачке функције .....	37
5.1.1	Регулација.....	38
5.1.2	Оптимизација .....	39
5.1.3	Поузданост рада.....	39
5.1.4	Менаџмент.....	40
5.2	Централизовано и децентрализовано управљање.....	40
5.2.1	Централизовано управљање .....	40
5.2.2	Децентрализовано управљање.....	41
5.2.3	Избор централизованог или децентрализованог управљања .....	41
5.3	Теорија Вишеагентног система .....	43
6.	Модел контролера микро мреже.....	44
6.1	Реализација Контролера микро мреже .....	46
6.2	Функционални модел КММ.....	52
6.2.1	АОП базирана $P-f$ регулациона контура.....	52
6.2.2	АРВ базирана $P-f$ регулациона контура .....	58
6.2.3	АРВ базирана $Q-V$ регулациона контура .....	63
6.2.4	Прогнозе .....	65
7.	Примена .....	68
7.1	Тест систем.....	68
7.2	Комуникација међу агентима .....	72
7.3	Повезани режим рада .....	73
7.4	Хаваријски режим рада.....	75
7.5	Острвски режим рада .....	77
8.	Закључак .....	79
	Литература.....	81

# Листа скраћеница

ADMS	– систем за менаџмент дистрибутивних мрежа (енгл. <i>Advanced Distribution Management System</i> )
AGC	– аутоматска регулација генератора (енгл. <i>Automatic Generation Control</i> )
ACE	– регулациона грешка области (енгл. <i>Area Control Error</i> )
CHP	– когенерациона електрана (енгл. <i>Combined Heat and Power</i> )
VVM	– менаџмент напона и реактивне снаге (енгл. <i>Volt/VAr management</i> )
ED	– економски диспечинг (енгл. <i>Economic Dispatching</i> )
ITS	– менаџер трансакција (енгл. <i>Interchange Transaction Scheduler</i> )
MAPE	– средња апсолутна процентуална грешка (енгл. <i>Mean Absolute Percentage Error</i> )
MAS	– вишеагентни системи (енгл. <i>Multi-Agent System</i> )
NRLF	– прогноза скорашње потрошње (енгл. <i>Near Term Load Forecast</i> )
NTRGF	– прогноза скорашње производње обновљивих извора енергије (енгл. <i>Near Term Renewable Generation Forecast</i> )
RTU	– јединица за удаљено прикупљање података (енгл. <i>Remote Terminal Unit</i> )
PSO	– метода оптимизације базирана на ројевима честица (енгл. <i>Particle Swarm Optimization</i> )
SVM	– метода потпорних вектора (енгл. <i>Support Vector Machine</i> )
SCADA	– систем за надгледање и прикупљање података (енгл. <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> )
STLF	– краткорочна прогноза потрошње (енгл. <i>Short Term Load Forecast</i> )
STRGF	– краткорочна прогноза производње обновљивих извора енергије (енгл. <i>Short Term Renewable Generation Forecast</i> )
FS	– брзо искључивање (енгл. <i>Fast Shedding</i> )

UC – прорачун оптималне ангажованости агрегата (енгл. *Unit Commitment*)

CHP – когенерациона електрана (енгл. *Combined Heat and Power*)

АРВ – агент реалног времена

АОП – агент оперативног планирања

АС – агент стања

ДГ – дистрибуирани генератор

ИП – интернет протокол

ЛПП – јединица за пре процесирање

КБ – кондензаторска батерија

КММ – контролер микро мреже

# 1. Увод

Модерно друштво све више зависи од сигурног напајања електричном енергијом. Електричне мреже будућности морају да иду у корак са променама у технологији, друштвеним вредностима и законима као и трендовима у напретку у очувању животне средине. Према томе, сигурност и поузданост система, заштита животне средине, квалитет електричне енергије, као и цена напајања и ефикасност се морају прилагођавати у односу на промене на слободном тржишту електричне енергије.

Предмет истраживања у овој докторској дисертацији је поступак и избор модела система за управљање модерним, малим електроенергетским системом, за који је уобичајени назив „микро мрежа“ (енгл. *microgrid*).

У последњих двадесет година дешава се значајна трансформације у начину на који се електрична енергија производи, преноси и дистрибуира. Од настанка електроенергетских система па до краја двадесетог века, велики део електричне енергије производио се у великим и централизованим електранама, одакле је она преношена и дистрибуирана крајњим потрошачима. Током последње две деценије различити дистрибуирани извори енергије (енгл. *Distributed Energy Resource*) све више су се прикључивали на све напонске нивое електроенергетског система, почевши од преносне, па до дистрибутивне мреже. Ови извори укључују различите типове дистрибуираних генератора, као што су когенерационе електране, ветрогенератори, соларни генератори, микро хидро јединице и други, као и друге видове дистрибуираних извора енергије као, на пример, управљиву потрошњу или системе за складиштење енергије. Ове значајне промене у сектору производње узрокују промене и у експлоатацији и управљању преносном и дистрибутивном мрежом [1].

Напредни системи за менаџмент дистрибутивних мрежа (енгл. *Advanced Distribution Management System - ADMS*) могу обезбедити подршку за управљање читавим дистрибутивним мрежама. Међутим, данас је све чешће потребно обезбедити и управљање подсистемима дистрибуиране производње у оквиру дистрибутивних мрежа па постоје захтеви и да се поједини дистрибуирани генератори заједно са другим дистрибуираним изворима енергије и потрошњом организују у функционалне микро мреже, које могу радити у повезаном режиму са главном дистрибутивном мрежом, као и у привремено или трајно изолованим режимима [2]. Експлоатација оваквих микро мрежа мора се усагласити са

стратегијом рада главне мреже, уз уважавање додатних циљева микро мрежа, као што су повећање поузданости напајања критичних потрошача и омогућавање наставка напајања кроз аутономни острвски рад у случајевима великих поремећаја у главној мрежи. Додатно, технике експлоатације микро мрежа могу се применити и за експлоатацију малих електроенергетских система, као што су географска острва, руралне насеобине или индустријска постројења.

Циљ и основна идеја ове докторске дисертације је креирање савремене (уважавајући тренутно стање рачунарских и управљачких ресурса) архитектуре система за управљање микро мрежама. Оптимизација управљања вршиће се у различитим режимима рада (повезаном, острвском и хаваријском), како за рад у реалном времену, тако и за оперативно планирање. Контролер микро мреже дефинисан у овој дисертацији базиран је на софтверским агентима и укључује детаљну оптимизациону функцију и регулацију у реалном времену.

Унапређење квалитета рада микро мреже огледа се у повећању робусности мреже на интерне и екстерне поремећаје, повећању поузданости напајања за критичне потрошаче, повећању ефикасности рада и смањењу трошкова, смањењу емисије угљен диоксида, као и подршци за транзицију са мрежног у острвски рад. Дефинисани контролер микро мреже одржава стабилност учестаности у изолованом раду. Такође, одржава и токове снага преко повезног вода са дистрибутивном мрежом на жељеним нивоима, у току рада у ком је микро мрежа повезана на њу. Даље, одржава напонске прилике у предефинисаним тачкама у оквиру техничких граница и пружа оператору детаљан увид у рад система и стања микро мреже.

Представљени модел је генеричке (универзалне) архитектуре, што га чини применљивим у свим типовима микро мрежа, укључујући различите технологије и географска тржишта. Модел је скалабилан и модуларан и као такав може бити применљив на различите структуре и величине микро мрежа, од малих (као што су кампуси, велике комерцијалне зграде или блокови зграда), преко средњих (као што су рурална насеља или индустријски комплекси) до великих микро мрежа (као што су градови).

Такође, овакво решење представља темељ будућег рада ADMS-а у управљању модерним и паметним дистрибутивним мрежама. Паметне мреже ће у будућности имати прикључен велики број дистрибуираних извора енергије и повећане захтеве за флексибилност система у различитим оперативним условима, уз смањење оперативних трошкова и ограничења у емисији CO<sub>2</sub>.

Докторска дисертација је организована на следећи начин: у другој глави дат је концепт микро мреже. Референтни радови и преглед стања у области дати су у

трећој глави. Глава 4 даје приказ дистрибуираних енергетских ресурса. Проблеми управљања микро мрежом објашњени су у петој глави. У глави 6 приказан је предложени модел контролера микро мреже, док је у глави 7 дата примена са резултатима симулација. Глава 8 даје закључна разматрања.

## 2. Концепт микро мреже

Конвенционални извори енергије широм света сусрећу се са проблемима смањења резерви фосилних горива, мале енергетске ефикасности, као и са загађењем животне средине. Ови проблеми довели су до промена у начину производње електричне енергије и она се све чешће производи на средњем или ниском напону, док се при томе користе нове технологије, као што су ветрогенератори, фотонапонске ћелије, горивне ћелије, когенерационе електране, системи за складиштење електричне или термалне енергије и друге. Овакав начин производње назива се дистрибуирана производња, а овакви генератори носе назив дистрибуирани генератори. Термин „дистрибуирани генератор“ (ДГ) је осмишљен да би се направила разлика између оваквог типа производње и великих и централизованих јединица [3].

Постоје многе дефиниције ДГ-а које се разликују од државе до државе, али све оне имају неколико заједничких карактеристика:

1. ДГ није централизовано планиран или управљан од стране електропривреде.
2. типично је мањег капацитета од 50 MW.
3. обично је прикључен директно на дистрибутивни систем, на напонске нивое од 230/450 V до 145 kV.

ДГ-и постављени близу потрошача смањују токове снага у дистрибутивним водовима, што доводи до смањења снага губитака и побољшања квалитета напајања крајњих потрошача. Постојање двостраног напајања растеређује водове у периодима високих оптерећења и пружа могућности бржег поновног успостављања напајања после кварова.

Утицај ДГ-а на биланс снага и учестаност у систему такође расте, па управљање постаје кључно за њихову интеграцију у електроенергетски систем. Један од начина за искоришћење њиховог потенцијала јесте да се делови мреже са дистрибуираним генераторима и потрошачима у њиховој непосредној близини посматрају као једна потцелина система која се назива микро мрежа.

Микро мрежу чини нисконапонски и/или средњенапонски дистрибутивни систем, са дистрибуираним изворима енергије (микротурбине, горивне ћелије, соларни панели, ветрогенератори итд.) заједно са уређајима за складиштење енергије



(замајац, енергетски кондензатори и батерије), одговарајући трансформатори за повезивање микро мреже са окружењем и флексибилна потрошња. Такав систем може да буде у несамосталном погону (повезани режим рада) уколико је повезан са главном мрежом, или у аутономном погону (острвски режим рада) уколико није повезан са главном мрежом [4].

Микро мрежа се може схватити и као један природан наставак развоја једноставних дистрибутивних система са великим бројем микро извора, јер води ка даљој децентрализацији и аутономији при доношењу одлука и то уводећи и потрошаче на тржиште енергијом. На овом месту потребно је споменути и такозване паметне мреже (енгл. Smart Grid), које представљају следећи корак у развоју система и односе се на концепт који треба применити на цео систем. Такав један систем би био пројектован тако да су у оквиру њега интегрисани сви чиниоци, и то на такав начин да интелигентно комуницирају у циљу обезбеђења ефикасне, одрживе, економичне и сигурне испоруке електричне енергије. Чак и данас, могло би се рећи да је преносна мрежа једна врста паметне мреже, док дистрибутивни систем пролази кроз фазу развоја која треба да га тек учини „паметнијим” у будућности. Свакако да би микро мрежа могла да представља један логичан корак у том процесу развијања дистрибутивног система, и може се сматрати „каменом темељцем паметне мреже”. Једноставније речено, дистрибутивна мрежа прелази пут од пасивне ка активној [2].

Треба истаћи следеће:

1. Микро мрежа представља платформу за сједињавање микро производње, јединица за складиштење енергије и потрошача који се налазе у локалној дистрибутивној мрежи.
2. Микро мрежа мора да буде оспособљена да ради у нормалном погону (повезана на преносну или дистрибутивну мрежу) и у острвском (хаваријском или планираном) погону. Идеја је да већина микро мрежа у будућности већи део времена буде у повезаном режиму, из кога би се добиле највеће користи самог концепта микро мреже, али она мора да задовољава високе захтеве по питању капацитета у случају повећаних захтева за потрошњом у острвском погону.
3. Разлика између микро мреже и пасивне мреже (садашња пракса) на коју су прикључени микро извори је у обиму регулације и координације који поседује микро мрежа над расположивим ресурсима. Затим, у односу на остале мреже, микро мрежа има изузетну предност у решавању сукоба интереса различитих власника, и то са решењем које доводи до погона са глобалним оптимумом који задовољава сва техничка ограничења.

4. Микро мрежа може да буде сачињена само од уређаја електричне енергије, али може да буде и више-енергетска, односно да интегрише више типова енергија и других система у свој дистрибутивни систем, као што су гас, топлотна енергија, или водовод.

На слици 1 дат је типичан пример структуре микро мреже.



Слика 1. Типичан пример структуре микро мреже

## 2.1 Типови микро мрежа

Постоје различити типови микро мрежа у зависности од експлоатационих захтева, управљачких режима и оптимизационих критеријума. Тренутно се у свету могу идентификовати следећи типови микро мрежа:

1. Кампуси – Могу бити универзитетски или болнички.
2. Приватни пословни објекти – Могу бити комерцијални или индустријски.
3. Војне базе – Обезбеђивање рада критичних потрошача.
4. Делови дистрибутивне мреже – У власништву или управљани од стране дистрибутивног оператора.

5. Заједнице – Представљају скуп крајњих корисника у стамбеном делу дистрибутивне мреже.
6. Удаљени – Представљају трајно изоловане делове мреже.
7. Нано мреже – веома мали системи (мање од 100 kW) који опслужују једну стамбену јединицу.

## 2.2 Мотивација за увођење микро мрежа

У области електроенергетике може се идентификовати више потенцијални проблема и области за унапређење рада који представљају мотивацију за увођење микро мрежа у експлоатацију:

1. Повећање поузданости напајања – Повећање поузданости напајања крајњих потрошача и/или посебно критичних потрошача током екстремних временских услова је примарни циљ процеса модернизације електроенергетских система. Процењује се да би локални контролери микро мрежа допринели повећању флексибилности рада дистрибутивне мреже у екстремним временским условима, као што су олује, урагани и слично. Дистрибутивна мрежа унапређена на овај начин подржала би напоре држава да се припреме за утицаје надлазеће промене климе (на пример, у САД – „Building stronger and safer communities and infrastructure” у складу са “President’s Climate Action Plan”) [5]. Екстремне временске непогоде могу значајно утицати на снабдевање електричном енергијом крајњих потрошача. На пример, током урагана Катрина 2,6 милиона корисника остало је без напајања [6]. Током урагана Сенди осам милиона домаћинстава остало је без напајања, 1,3 милиона позива упућено је електродистрибуцијама и 25 милијарди долара је процењена штета коју су претрпели пословни корисници због прекинуте пословне активности. Овакве ситуације су неприхватљиве за модерно друштво у којем су људи и њихова делатност све више зависни од стабилног снабдевања електричном енергијом. То се види и у податку да је чак 10.000 позива са намером куповине малих (аутономних) генератора примила једна фирма која продаје генераторе у округу Њу Џерсија пар дана пред удар урагана Сенди [7].
2. Екологија – Електродистрибуције и електропреносни оператори се сусрећу са све већим притиском регулаторних агенција у којима се захтева смањење емисије штетних гасова због ефекта стаклене баште. Крајњи циљ у овом процесу би била производња која је у потпуности без емисије угљен-диоксида.
3. Могућности повећања прихода – Локална производња, обновљиви извори енергије, системи за складиштење електричне енергије и управљива

потрошња представљају значајне могућности за примену модерних технологија помоћу којих крајњи корисници и електродистрибуције могу повећати приходе.

4. Претње тероризма – Традиционалне електроенергетске мреже представљају релативно лаке мете за терористичке нападе (како физичке тако и виртуелне), јер имају мали број тачака од којих зависи стабилност целог система и чијим онеспособљавањем велики број корисника може остати без напајања, а привреда без електричне енергије.
5. Нове вредности модерних технологија – Цене модерних технологија у електроенергетици константно падају, али традиционалне електродистрибуције не проналазе начине да их оптимално искористе. Крајњи корисници се сусрећу, са једне стране, са константним падом цена соларних панела и батерија, као и повећањем броја инсталација когенерационих електрана, а са друге стране са повећаним ценама електричне енергије које наплаћују електродистрибуције без испоруке додатних погодности.
6. Повећање аутономије рада – Крајњи корисници, поготово они захтевни, као што су војне базе, болнички и универзитетски кампуси или велики индустријски погони, желе све већу аутономију у управљању својим делом дистрибутивне мреже, а у светлу све већег улагања у дистрибуиране изворе енергије.
7. Старење опреме и високи капитални трошкови инвестиција – Електродистрибуције се сусрећу са једне стране са повећаном потражњом за електричном енергијом и поузданошћу напајања, а са друге стране са старењем опреме и великим инвестиционим трошковима повећања капацитета.

### 2.3 Предности микро мрежа

Микро мреже интегришући производну страну и страну потрошње, и уводећи модерне концепте у регулацију и управљање, доносе низ предности електроенергетским системима:

1. Повећање поузданости напајања – Микро мреже уз помоћ локалних генератора, система за складиштење електричне или термалне енергије, управљиве потрошње и могућности за рад у изолованом режиму могу значајно повећати поузданост напајања током екстремних временских услова. Пример за ову тврдњу је случај микро мреже Tohoku Fukushi универзитета из Јапана, чија је микро мрежа успешно снабдевала своје потрошаче током разарајућег земљотреса и цунамија 2011 године [8].

2. Повећање диверзитета извора електричне енергије – Микро мреже су важне за повећање диверзитета извора електричне енергије, што се огледа у повећаној подршци за повезивање и управљање локалним обновљивим изворима енергије, као што су соларна енергија или ветро системи.
3. Економија и профит – Микро мреже могу се искористити за смањење цене напајања крајњих корисника преко производње локалних генератора, као и за повећање профита крајњих корисника и оператора микро мреже путем продавања електричне енергије или других сервиса у вршним периодима.
4. Стабилност главне мреже – Микро мреже могу се искористити за пружање услуга главној мрежи (преносној или дистрибутивној), што може повећати укупну стабилност, робусност и поузданост система и омогућити додатни профит операторима микро мреже. Сервиси које микро мрежа може да пружа могу бити подршка одржавању учестаности, управљању напона и реактивне снаге.
5. Екологија – Како будућност вероватно доноси плаћање додатних трошкова због емисије угљен диоксида, тако ће микро мреже са обновљивим изворима енергије представљати важан чинилац у овом погледу и помоћи ће свеобухватном смањењу емисије угљен диоксида.
6. Рурална подручја – Веома важан допринос микро мрежа биће и у такозваном руралном подручју, где потрошачи немају приступ националним дистрибутивним мрежама, већ се уместо тога напајају изолованим генераторима, често напајаним дизел горивом. Процењује се да у оваквим подручјима живи преко милијарду људи на свету [9]. Очекује се да микро мреже у овим подручјима могу значајно допринети ширем економском развоју, као што су приступ прихватљивом стамбеном простору, развојем школства, здравствене заштите и локалних радних места.
7. Капиталне инвестиције – Микро мреже укључујући велики број дистрибуираних извора енергије у регулацију и имплементирајући контролне и оптимизационе алгоритме могу одложити капиталне инвестиције у дистрибутивним и преносним мрежама.

#### 2.4 Изазови развоја микро мрежа

Као релативно млад концепт, микро мреже се сусрећу са низом техничких и нетехничких изазова [3]:

1. Обновљиви дистрибуирани извори електричне енергије су скупи – Треба напоменути да прелазак са дистрибутивног система са већ постојећим дистрибуираним изворима није тако тежак и скуп задатак. Ипак, цена

извора, односно изградња микро мреже јесте захтеван посао за који је потребно знатно инвестирање. Могуће решење представљају субвенције од стране државе, које би се могле добијати на основу тежње да се повећа капацитет дистрибутивне мреже и смањи емисија штетних гасова.

2. Техничке потешкоће – Микро мреже су једна од најкомплексних форми електроенергетских система. Овај проблем постоји пре свега зато што је идеја о микро мрежама релативно нова, односно не може се рећи да постоји довољно искусног особља и прописаних процедура који би се бавили изградњом ових мрежа и који добро познају све проблеме на које би се ту могло наићи. Осим тога, потребно је изградити сложу комуникациону мрежу, координисано управљати микро изворима и пројектовати заштиту, што су све такође изазови са којима је мало стручњака имало прилику да се сретне. Иако би овакве мреже у руралним подручјима биле идеално решење, ограничавајући фактор ту представљају недостатак инфраструктуре, потреба за даљинским управљањем и адаптивном заштитом.
3. Прописани стандарди – Можда би бољи термин у ствари био непрописани стандарди, јер још увек не постоје јасно дефинисана ограничења и препоруке по питању заштите, регулације, квалитета енергије и других аспеката.
4. Административне и законске баријере – У већини земаља не постоје комплетне законске регулативе које се односе на погон микро мрежа, мада се мора рећи да у неким земљама владе ипак подстичу законе и прописе по том питању.
5. Монопол на тржишту – Пошто микро мреже имају способност да наставе са радом чак и када услед непредвиђених околности дође до испада главног система, питање је како ће тада бити регулисана цена електричне енергије која се испоручује потрошачима у оквиру мреже. Постоји ризик да онај ко управља мрежом искористи ту могућност за продају по веома високој цени. Зато је потребно да се јасно дефинише тржишна инфраструктура да би се микро мрежа учинила одрживим решењем.

# 3. Преглед стања у области

Министарство енергетике Сједињених Америчких Држава дефинише микро мрежу као групу повезаних потрошача и дистрибуираних извора електричне енергије са јасно дефинисаним електричним границама, који се понаша као јединствен контролабилни ентитет у односу на главну мрежу и који се може повезати или одвојити од главне мреже и тиме обезбедити рад у повезаном и острвском режиму рада [10].

Концепт микро мреже датира још из 1882. године, када је Томас Едисон саградио своју прву електрану. Тих година његова компаније саградила је и пустила у погон 50 једносмерних микро мрежа. У то време централизована главна мрежа није постојала.

Убрзо затим са појавом централизованих, великих електрана, које су нижом ценом производње наметнуле принцип изградње централизовано регулисаних система, број микро мрежа се значајно смањио до нивоа да су престале да постоје.

Последњих година нови талас у електроенергетици потпомогнут је бројним изазовима у електроенергетским системима и многим предностима микро мрежа враћа поново микро мреже у фокус развоја.

Област микро мрежа привукла је значајну пажњу стручне јавности, па се истраживање и развој одвијају у више праваца, о чему ће бити више речи у наставку.

## 3.1 Оптимизација рада микро мрежа

Проблеми оптимизације рада микро мрежа, економског диспечинга и прорачуна оптималног ангажовања агрегата важне су теме из области експлоатације микро мрежа. У процесу оптимизације прорачунавају се оптималне радне тачке и режим рада дистрибуираних генератора и система за складиштење енергије, емисије угљен диоксида, потрошње, увоз или извоз електричне енергије из главне мреже, број манипулација опремом, трошкови рада и тако даље. Радови из ове области

предлажу унапређења постојећих алгоритама и предлажу нове методе прорачуна користећи стохастичке методе вештачке интелигенције, као што су генетски алгоритми или оптимизација ројевима честица, као и детерминистичке методе линеарне, квадратне и целобројне оптимизације.

Критеријуми оптимизације могу бити различити:

1. Економски критеријуми.
2. Технички критеријуми.
3. Критеријуми везани са очување животне средине.
4. Комбинације претходних критеријума.

У [11] аутори се баве проблемом управљања дистрибуираним генераторима у циљу оптималне експлоатације микро мреже. Циљ оптимизације је минимизација потрошње горива током режима рада повезаног са дистрибутивном мрежом, уз обезбеђивање стабилног наставка рада приликом преласка у острвски режим. Аутори су формулисали проблем економског диспечинга са припадајућим ограничењима, а то су: захтевана ротациона резерва због варијација у потрошњи и производњи дистрибуираних извора енергије, границе токова снага и резерва за стабилан острвски рад.

Аутори у [12] предлажу оптималну управљачку стратегију ради координисања рада дизел генератора и система за складиштење енергије, а у циљу максимизације времена рада ветрогенератора, уз одржавање оптималних трошкова производње у систему и обезбеђивање стабилних перформанси рада. Проблем је формулисан као оптимизациони са више критеријума: минимизација трошкова горива и промена снаге дизел генератора, минимизација трошкова због смањења животног века система за складиштење енергије и одржања биланса активне снаге у реалном времену.

У раду [13] аутори представљају идеју о паметном систему за управљање у циљу оптимизације рада микро мреже. Систем се састоји од модула за прогнозу, модула за рад са системима за складиштење енергије и оптимизационог модула. Аутори су анализирали карактеристике соларних генератора у различитим временским условима и предложили су решење за прогнозу производње за један дан унапред. Предложен је модул за оптимизацију рада система за складиштење енергије у посматраном временском опсегу. Формулисани проблем решен је коришћењем генетског алгорита.

Рад [14] представља робусни оптимизациони алгоритам за прорачун оптималног ангажовања агрегата са додатним циљем максимизације друштвеног задовољства крајњих корисника у случајевима најгорих сценарија рада ветрогенератора и



потрошње. Проблем је формулисан као вишекорачни робусни мешовито целобројни.

У раду [15] аутори се баве новом формулацијом економског диспечинга генератора. Овај проблем формулисан је са ограничењима стохастичке природе и за решење предложеног проблема аутори су користили унапређену технологију оптимизације ројевима честица.

Аутори у [16] баве се новим системом за управљање електроенергетским системима заснованом на стратегији померајућег прозора, која се може применити на микро мреже базиране на обновљивим изворима енергије. У првом кораку предложеног модела решава се мешовити целобројни оптимизациони проблем, заснован на моделу за прогнозу потрошње и производње обновљивих извора енергије. Систем прорачунава радне тачке за све дистрибуиране генераторе, као и сигнале за управљање потрошњом. Предложени систем имплементиран је у микро мрежи састављеној од соларних панела, две ветротурбине, дизел генератора и система за складиштење енергије. Резултати добијени у различитим оперативним условима показују значај, теоријски и практични допринос и робусност предложеног модела.

У [17] аутори представљају нову методологију за прорачун оптималног рада дистрибуираних генератора који користе обновљиве изворе енергије. Први корак у предложеном решењу је постављање проблема оптималног ангажовања агрегата. Други корак је решавање предложеног проблема и оптимизација координисаног рада турбо генератора и обновљивих извора електричне енергије. За решавање предложеног проблема аутори су користили различите методе, као што су Лагранжова релаксација, генетски алгоритми, као и хибридни алгоритам који комбинује Лагранжову релаксацију и генетски алгоритам.

У раду [18] анализирани су фактори за раст потрошње током зиме и лета у електроенергетском систему Шпаније. Овај раст доводи до значајне употребе скувих електрана које се користе само при високим потрошњама. Иако Шпанија има велике количине електричне енергије која се добија из обновљивих извора, поготово ветра, њихова експлоатација је смањена због различитих техничких ограничења, као и недостатка великих система за складиштење енергије. У овом раду моделује се прорачун оптималног ангажовања агрегата у микро мрежама са великом пенетрацијом ветрогенератора. Предложена методологија приказује уштеде у раду оваквих система.

У раду [19] анализиран је дистрибуирани модел економског диспечинга, намењен микро мрежама са високом пенетрацијом обновљивих извора електричне енергије, као и систем за регулацију потрошње. У сврху подршке стохастичкој природи

обновљивих извора енергије, предложен је нови приступ прорачуну распореда активних снага јединица у микро мрежи. Поменути приступ укључује измерену активну снагу дистрибуираних генератора и снагу размене са главном мрежом на такав начин да се одржи биланс активне снаге. Метод за прорачун оптималног ангажовања агрегата минимизује трошкове микро мреже, укључујући трошкове дистрибуираних генератора, система за складиштење енергије, трошкове потрошње и уважавајући најгори сценарио рада обновљивих извора енергије.

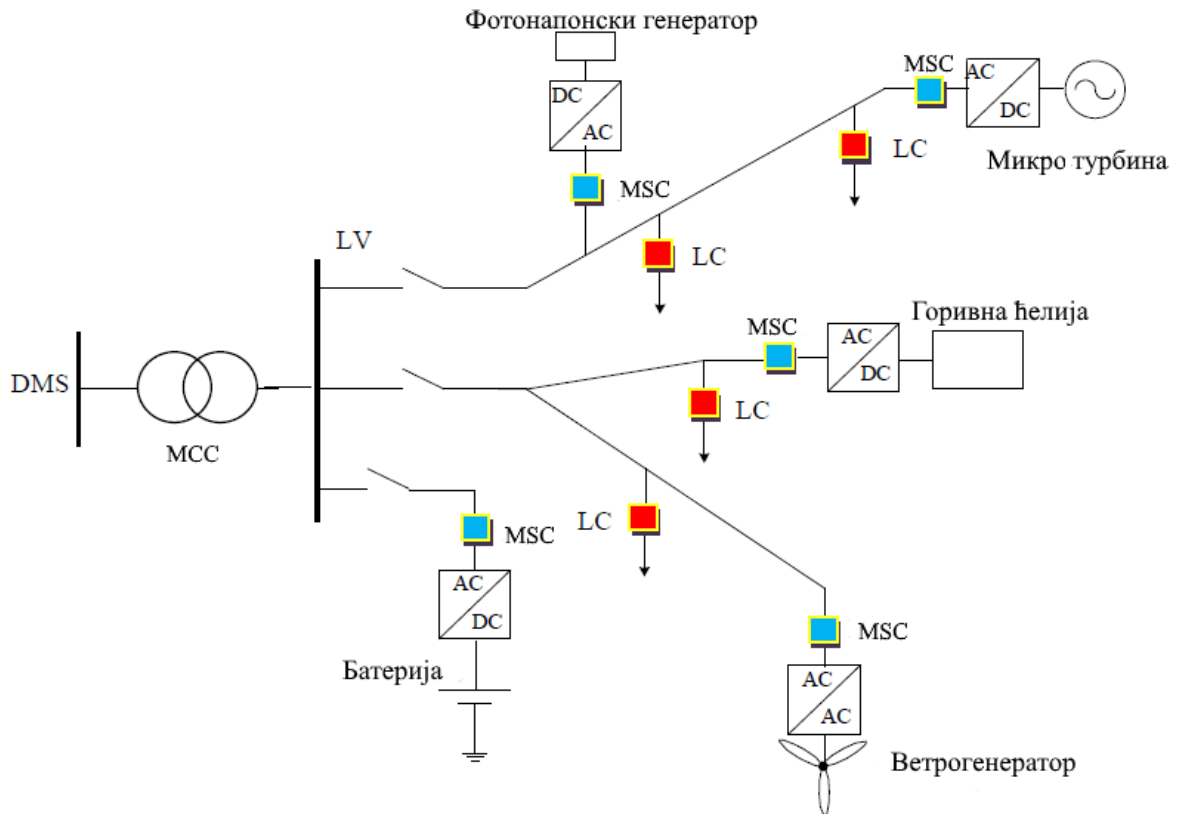
Оптимално планирање рада генератора са ограничењем на услове преласка у острвски режим рада представљено је у [20]. Критеријум оптимизације је минимизација укупних трошкова рада микро мреже, који се састоје од трошкова производње локалних јединица и трошкова увоза електричне енергије од главне мреже. Предложени проблем раздвојен је на два потпроблема: 1) потпроблем рада у повезаном режиму и 2) потпроблем рада у острвском режиму. Целобројно решење главног проблема проверено је у односу на могућности рада у изолованом режиму.

Рад [21] бави се стохастичком вишекритеријумском оптимизацијом планирања рада микро мреже уважавајући стохастичка ограничења. Циљ предложеног модела је да симултано минимизује укупне трошкове рада и пронађе минималну емисију угљен диоксида уважавајући неизвесности временских услова и потрошње у систему.

### 3.2 Управљање и регулација радом микро мрежа

Радови из области управљања микро мрежама баве се унапређењима постојећих алгоритама управљања и предлагањем нових, користећи неке од постојећих метода, као што су управљање методом статичких карактеристика *одата активна снага – учестаност*, аутоматска регулација генератора (енгл. *Automatic Generation Control – AGC*), регулација напона и активне снаге и тако даље.

Концепт управљања у микро мрежама представљен је на слици 2 [1], [22].



Слика 2. Архитектура управљања микро мрежом

и укључује:

1. Контролере микро извора (енгл. Micro Source Controller – MSC).
2. Локалне контролере (енгл. Local Controller – LC).
  - а. Централни контролер микро мреже (енгл. Microgrid Central Controller – MCC).
3. Систем за менаџмент дистрибутивних мрежа (енгл. Distribution Management System – DMS).

Са хијерархијске тачке гледишта управљање у микро мрежама може бити примарно, секундарно и терцијално [23]. Критеријуми управљања у различитим хијерархијским нивоима су следећи:

1. Терцијално управљање:
  - а. Оптималан рад у повезаном и острвском режиму рада.
  - б. Регулација токова снага.
2. Секундарно управљање:
  - а. Управљање учестаношћу.
  - б. Регулација напона.
3. Примарно управљање:
  - а. Управљање напоном.
  - б. Управљање учестаношћу на локалном нивоу.

4. Обезбеђивање „прикључи и ради“ (енгл. Plug and Play) могућности за дистрибуиране изворе енергије.

Нови приступ секундарној регулацији активне снаге у микро мрежама представљен је у [24]. Предложено решење намењено је како управљању учестаношћу и напонима у микро мрежи, тако и обезбеђивању правилне расподеле реактивне снаге. Дистрибуирана секундарна регулација не заснива се на централном контролеру, већ је организована као дистрибуирани контролер. У раду је такође анализирано кашњење и губитак података у комуникационим системима.

Централни систем за управљање потрошњом у циљу регулације учестаности приказан је у [25]. У раду се показује како предложено решење успешно обезбеђује стабилну регулацију учестаности и напона, уз минимизацију искључивања потрошње.

У раду [26] истражује се хијерархијска стратегија аутоматске регулације генератора (енгл. *Automatic Generation Control* – AGC) за изоловане микро мреже, укључујући снагу добијену од соларних јединица, ветротурбина, микро хидро генератора и система за складиштење енергије. Главни AGC користи се за централно управљање. Локални AGC користи се за оптимизацију фактора значајних за минимизацију потрошње енергије. У раду су представљена три оваква модела AGC-а базирана на методама вештачке интелигенције. Динамички модели генератора и потрошње укључени су у симулацију.

У раду [27] аутори представљају анализу и систематизацију AGC-а у дистрибутивним мрежама са високом пенетрацијом обновљивих извора електричне енергије. Предложена методологија обезбеђује дизајн AGC сервиса на дистрибутивном нивоу, као и оптимизациони модел за унапређење економског потенцијала AGC-а.

Аутори рада [28] приказују децентрализовану управљачку архитектуру намењену микро мрежама. Предложена архитектура имплементирана је уз коришћење технологије софтверских агената. У раду се приказују значајне користи добијене коришћењем софтверских агената у управљачким системима и илуструју се њихови потенцијали за остварење циљева паметних мрежа.

Нови координисани приступ управљању у микро мрежама базиран на два слоја, односно слоју за прорачун распореда производње дистрибуираних генератора и слоју за управљање дистрибуираним генераторима, представљен је у [29]. Слој за прорачун распореда прорачунава економски диспечинг користећи резултате прогноза потрошње и производње обновљивих извора енергије, док слој за управљање прорачунава радне тачке за контролабилне ресурсе у микро мрежи

користећи податке у реалном времену. Грешке добијене у прогнози компензују се правилном употребом ротационе резерве.

У раду [30] предлаже се метод за координисану процену капацитета система за складиштење енергије и дизел генератора у изолованим микро мрежама који је заснован на методи Фуријеове трансформације. Координисана управљачка стратегија прорачунава биланс између две компоненте кроз учестаност-време трансформацију.

У раду [31] представљена је математичка формулација проблема регулације активне снаге у микро мрежама, као и његова имплементација у централизованом систем за управљање електроенергетским системима изолованих микро мрежа. Представљено решење прорачунава оптималну регулацију микро мреже коришћењем управљачке технике која уважава прогнозе потрошње и производње обновљивих извора енергије у микро мрежи. Основни проблем управљања раздвојен је на прорачун оптималног ангажовања агрегата и на проблем оптималних токова снага.

### 3.3 Доприноси докторске дисертације

И поред широке лепезе наведених модела и процедура, стандардан модел управљања микро мрежама још увек не постоји. Може се приметити како се сви поменути радови баве појединачним проблемима управљања микро мрежама, али не постоји решење које обухвата целокупну функционалност управљања и оптимизације погона микро мреже. Истовремено, њихова интеграција у ADMS и увођење концепта паметних мрежа, као и њихова практична верификација, су ограничени у досадашњој литератури [32].

Основни доприноси ове докторске дисертације су следећи:

1. Представљени нови контролер микро мреже управља и оптимизује рад микро мреже у три оперативна режима рада (повезаном, острвском и хаваријском, који је углавном занемарен у претходно објављеним радовима), како за рад у реалном времену, тако и за оперативно планирање.
2. Контролер може бити примењен за оптимизацију рада микро мреже по различитим критеријумима, користећи комплексну и флексибилну оптимизациону функцију са тежинским факторима.

Приказани контролер микро мреже је модуларне и скалабилне архитектуре и то га чини примењивим на различите типове и величине микро мрежа.

# 4. Дистрибуирани енергетски ресурси

Концепт микро мрежа интегрише више технологија производње електричне енергије, у светлу све веће регулације производње користећи фосилна горива и поспешивања обновљивих извора енергије. У овој глави биће приказане неке од основних извора за производњу и чувања електричне енергије.

## 4.1 Микро турбине

Микро турбине су гасне турбине малих снага (25 kW до 500 kW), које раде сагоревајући гасна или течна горива и користе се, како за производњу електричне енергије, тако и за когенерационе потребе. Принцип рада микро турбина је исти као и принцип рада конвенционалних гасних турбина и заснива се на Брајтоновом циклусу [33]. Постоји више врста микро турбина и оне се принципијелно разликују по конструкцији и изведби вратила [34].

Једноосовинске микро турбине (енгл. *Single Shaft Microturbines*) су најчешће примењивана врста. Састоје се компресора, турбине и електричног генератора који су на истој осовини која се окреће великом брзином (чак и преко 100.000 о/мин), а која је променљива како би могла да се прилагоди променљивом оптерећењу, одржавајући висок коефицијент искористивости и поузданости. Генератор у оквиру микро турбине је обично синхрони са сталним магнетима, чија се произведена наизменична струја мења у наизменичну струју учестаности мреже користећи се уређајима енергетске електронике. Када се стартује турбина, генератор ради као мотор и окреће вратило компресора док се не постигне довољна брзина да би процес сагоревања могао да се одржи.

Када микро мрежа ради изолована од остатка главне мреже, јединице за складиштење енергије, као на пример батерије кондензатора, морају се користити у процесу стартовања генератора [3], [4].

Основне предности микро турбина у примени у микро мрежама су:

1. Једноставна инсталација и ниски трошкови одржавања.

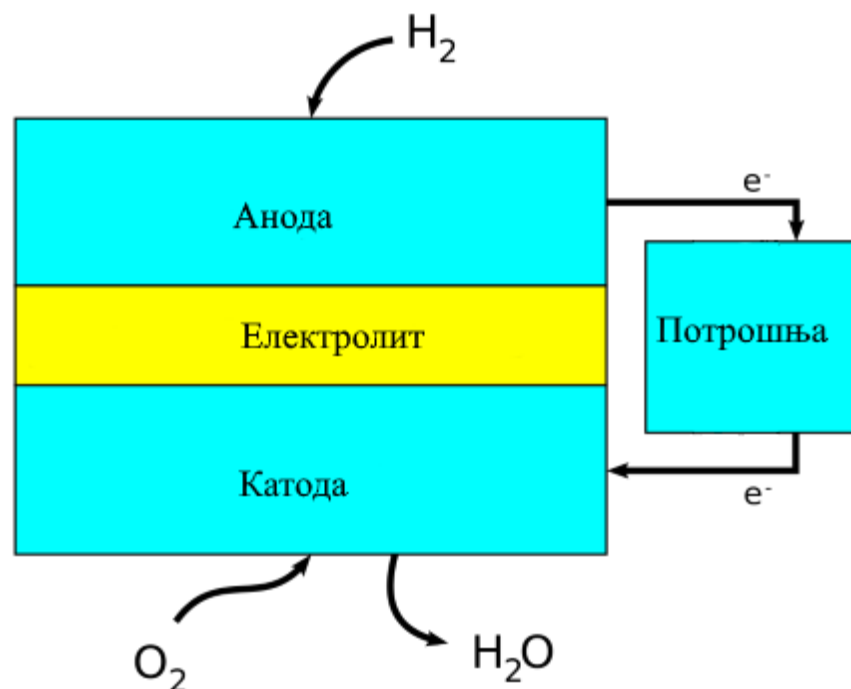
2. Могућност рада користећи различита горива.
3. Висока ефикасност рада (25% - 30%).
4. Могућност рада у когенерационом моду.

Блок дијаграм система једноосовинске микро турбине може се пронаћи у [35] и [36], док се генерички модел може пронаћи у [37].

#### 4.2 Горивне ћелије

Горивне ћелије представљају електрохемијски уређај који хемијску енергију горива претвара директно у електричну. Ова конверзија је веома ефикасна и оставља само воду као и топлоту као нуспроизвод, што је и основна мотивација повећаног интереса за ову технологију. Самим тим горивне ћелије имају мању емисију гасова који изазивају ефекат стаклене баште од дизел генератора, али им је примена скупља [38].

Основни елемент је једна ћелија која се састоји од катоде и аноде и слоја електролита. Анода представља спону између горива и електролита, односно она је катализатор је за хемијску реакцију и представља пут за слободне електроне који се крећу ка спољном колу и оптерећењу. Хемијска реакција одвија се у две фазе: оксидација на аноди и редукција на катода. Слика 3 приказује шематски приказ горивне ћелије.



Слика 3. Шематски приказ горивне ћелије

Тренутно на тржишту постоји пет врста горивних ћелија од којих свака има различит електролит и карактеристичну температуру на којој ради [38].

Како је област горивних ћелија још увек у развоју, тешко је формирати опште ставове о радним карактеристикама. Ипак, одређени број карактеристика горивних ћелија у примени у микро мрежама може се изразити као:

1. Предности горивних ћелија:
  - a. Повећање ефикасности система.
  - b. Смањење емисије гасова који изазивају ефекат стаклене баште.
  - c. Могућност когенерационог рада.
  - d. Једноставност инсталације.
  - e. Модуларност.
  - f. Веома тих рад (нема покретних делова).
2. Мане горивних ћелија:
  - a. Веома висока цена.
  - b. Непотврђена и промењива дужина животног циклуса.
  - c. Потребно је извесно време како би се постигла висока радна температура, као и да се реагује на промену излазне снаге. Време потребно за старт је од 30 до 50 минута.
3. Примена горивних ћелија у микро мрежама:
  - a. Код микро мрежа најчешћа примена су горивне ћелије са чврстим оксидом, јер могу да издржи високе температуре, што их чини погодном и за примену комбиноване производње електричне и топлотне енергије.

Детаљни модел и опис компоненти горивних ћелија може се пронаћи у [39].

### 4.3 Ветро генератори

Енергија ветра је један од истакнутих извора електричне енергије у светлу бриге за очување животне средине. Ветро генератори су системи који се састоје из ветро турбине, редуктора, генератора и система енергетске електронике за усклађивање учестаности и напона излазне струје ка главној мрежи.

Принцип рада је следећи: ротор преузима кинетичку енергију ветра и преко вратила трансформише је у механички моменат. Брзина обртања ветро турбине је најчешће неколико десетина обртаја у минути и потребно ју је прилагодити жељеној брзини обртања генератора. То се ради користећи механички редуктор. Генераторски систем трансформише механички моменат у електричну енергију. Генераторски систем може бити сачињен од било ког типа трофазног генератора (синхроног или индукционог) [40]. Најчешћи типови генератора су следећи [40]:



1. Индукциони кавезни генератор.
2. Индукциони генератор са намотаним ротором.
3. Двоструко напајани индукциони генератор.
4. Синхрони генератор са перманентним магнетима.

У погледу регулације брзине обртања ветро генератора, и самим тим регулације излазне снаге, могу се детектовати три различита начина [41]:

1. Конструкција лопатица (енгл. Stall control) – Ово је пасивни начин регулације ког одликују једноставност изградње и ниска цена. При овом начину регулације, лопатице су тако конструисане да при великим брзинама ветра нападни угао ветра постаје релативно велики, што доводи до слабења силе узгона.
2. Закретање лопатица (енгл. Pitch control) – Код овог начина регулације хидраулични серво мотор закреће лопатице ветро турбине, чиме мења нападни угао ветра, а самим тим и силу узгона, тј. излазну снагу ветро генератора. Предност овог начина регулације је контролабилност, а мане су комплексност и висока цена.
3. Закретањем и конструкцијом лопатица (енгл. Active Stall control) – овај начин регулације представља комбинацију претходна два начина регулације.

Један од највећих изазова приликом интеграције ветро генератора у микро мреже (и друге електроенергетске системе) је што тачнија прогноза производње ветро генератора. Испрекиданост рада и стохастичка природа снаге ветра велике су препреке за тачну прогнозу [42]. Значај тачне прогнозе све више долази до значаја са повећањем инсталисане снаге ветро генератора, као и повећањем процента учешћа ветра као извора електричне енергије у укупној производњи једног система.

Детаљни модели ветро генератора могу се пронаћи у више радова, као на пример [40], [43] - [45].

#### 4.4 Фотонапонски генератори

Соларна енергије је једна од најважнијих обновљивих извора енергије у будућим паметним мрежама. Последње деценије донеле су значајно повећање инсталисане снаге ових извора електричне енергије широм света, због својих основних предности, као што [46]:

1. Једноставност дизајна, инсталације и пуштања у погон.
2. Модуларна структура.

3. Дуг животни век, ниска цена одржавања и тих рад због непостојања покретних делова.

Фотонапонски генератор се састоји од мреже фотонапонских ћелија, организованих у низове који могу бити везани редно или паралелно. Постоје различити типови ћелија и детаљни приказ се може пронаћи у [47]. Користећи фотонапонски ефекат, енергија сунчеве светлости конвертује се у једносмерну струју. Излазна једносмерна струја конвертује се у наизменичну помоћу инвертора.

Детаљан модел рада фотонапонских ћелија може се пронаћи у [48].

Посматрано са становишта примене у микро мрежама, фотонапонски генератори су често неконтролабилни извор електричне енергије, са релативно стохастичком вредношћу излазне снаге од нулте до максималне, у зависности од стохастичке вредности временских услова. Али, у последње време користећи паметне инверторе фотонапонски генератори све чешће постају контролабилни ресурс који може да учествује у управљању учестаношћу или напоном. Аналогија између управљања инвертором и синхроним генератором у изолованим микро мрежама може бити пронађена у [49], док се примери имплементације за регулацију напона и/или учестаности могу пронаћи у [50] - [53].

Успешна примена фотонапонских генератора у управљању и регулацији микро мрежа такође зависи и од тачне прогнозе производње. Производња активне снаге фотонапонских генератора варира на детерминистички и стохастички начин. Детерминистички део варијације одређен је нападним углом сунчеве светлости у односу на дан у години и време у дану, док је стохастички део одређен кретањем облака и променама температуре. Нетачна прогноза може довести до погрешне процене резерви, погрешног прорачуна оптималног ангажовања агрегата или погрешног договора увоза или извоза енергије из главне мреже.

#### 4.5 Дизел генератори

Дизел машине су пронађене пре више од 100 година и због своје поузданости и ефикасности рада пронашле су широку примену у многим секторима индустрије, од машина малих снага у транспорту, до машина великих снага у производњи електричне енергије.

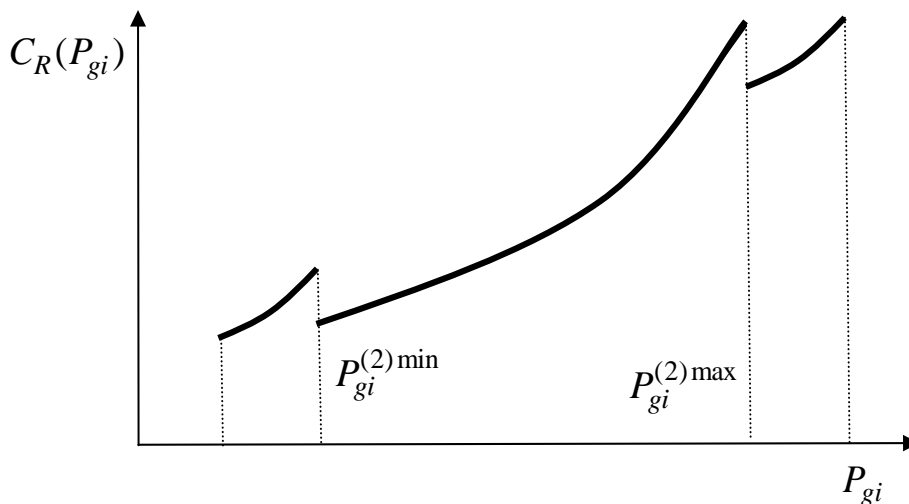
Дизел генератор је нелинеаран систем због нелинеарног, временски промењивог периода између убризгавања горива и производње механичког момента. У литератури се може пронаћи више прихваћених модела дизел генератора, као што су [54] - [56].

Са становишта регулације активне снаге дизел генератора, он се може посматрати као систем са затвореном повратном спрегом преко брзине. Пошто контролни систем зада жељену радну тачку кроз подешавање локалног контролног система, разлика између остварене и жељене брзине одредиће отвореност серво вентила за довод горива у машину.

Са становишта експлоатације микро мрежа дизел генератори утичу на укупне трошкове рада система и на укупну емисију угљен диоксида система, те је оптимизација рада веома важна. У зависности од режима рада контролера микро мрежа и детаљности оптимизационог алгорита следећи параметри морају бити узети у обзир:

1. производни капацитет активне и реактивне снаге (одређено називном снагом агрегата).
2. Цена покретања.
3. Цена одржавања рада.
4. Ограничење емисије штетних гасова.
5. Дозвољена брзина промене оптерећења.
6. Број дневних покретања и заустављања.
7. Ограничење ротационе резерве.
8. Прописано време рада и мировања генератора.

Цена одржавања рада директно утиче на укупне трошкове система и на резултате функције за економски диспечинг. Та цена се огледа преко функције трошкова горива  $C_R(P_{gi})$ , где су  $C_R$  трошкови а  $P_{gi}$  остварена активна снага генератора, која се у пракси може представити на начин приказан на слици 4:



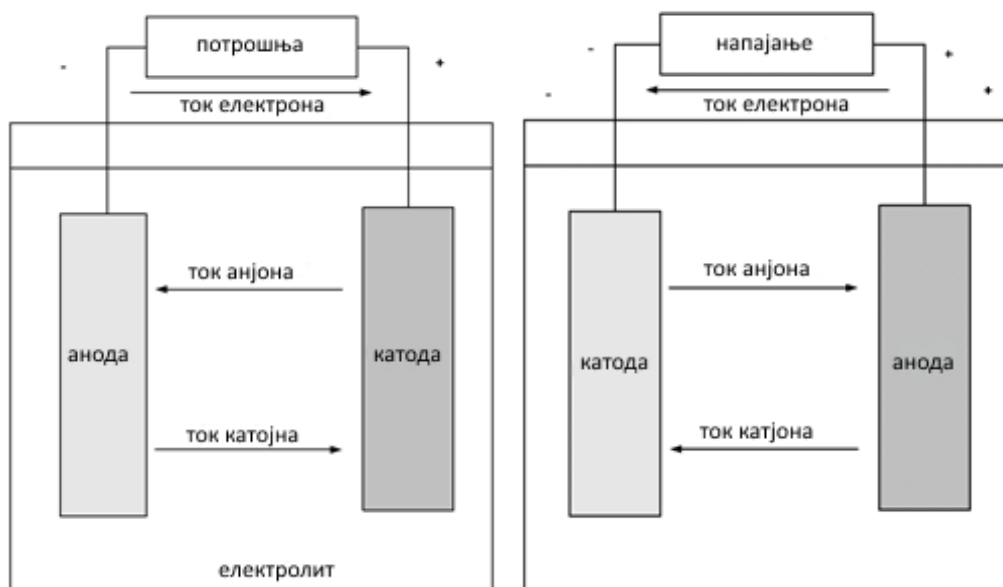
Слика 4. Полиномна представа (најчешће квадратна) функције трошкова рада (горива) агрегата (где може постојати више сегмената који су различито дефинисани)

#### 4.6 Батерије (акумулатори)

Батерије су основни и најчешћи уређаји за складиштење електричне енергије. Батерија се састоји од једне или више електрохемијских ћелија повезаних редно, паралелно или редно-паралелно у зависности од жељеног капацитета. Батерија је уређај који хемијску енергију садржану у својим активним елементима претвара директно у електричну путем електрохемијске оксидо-редукционе реакције [57], [58].

Батерија се састоји из:

1. аноде или негативне електроде која отпушта електроне у коло и на њој се одвија процес оксидације,
2. катоде или позитивне електроде која прима електроне из кола и на њој се одвија процес редукције,
3. електролита који представља медијум за пренос електрона (јона) између аноде и катоде.



Слика 5. Циклус пражњења (лево) и пуњења (десно) батерије – електрохемијски процес

Када је на батерију повезано оптерећење, тада је ток електрона од аноде ка спољашњем оптерећењу, па ка катода. Електрично коло се затвара кроз електролит преко тока анјона ка аноди и катјона ка катода (Слика 5 лево). Када се батерија пуни, ток је супротног смера и оксидација се врши на катода, а редукција на аноди (Слика 5 десно).

Са становишта експлоатације микро мрежа правилно руковање батеријама је веома важно и могу се посматрати као уређаји за средњорочно чување енергије (између система за краткорочно чување енергије као што су замајци, или

дугорочно као што су водене акумулације). Неке од важних особина које морају да се узму у обзир приликом пројектовања контролера микро мреже.

1. Номинални капацитет представља укупно наелектрисање које може да се складишти и изражава се у Ah.
2. Брзина пражњења и пуњења представља време потребно да се батерија потпуно испразни или напуни при константној струји.
3. Број циклуса који батерија може да изврши током животног века један је од битнијих фактора који се узимају у обзир при избору исте. Батерије током периода коришћења значајно погоршавају своје карактеристике због сталних циклуса пражњења и пуњења, а због чињенице да хемијска реакција пуњења није у потпуности реверзибилна у односу на пражњење, па долази до тога да електролит губи своје карактеристике, оштећују се електроде итд. Такође, животног век батерије се брже скраћује ако су циклуси током којих се батерија потпуно испразни и пуни учестали. Нарочито лоше утичу непотпуни циклуси пражњења или пуњења [59].

#### 4.7 Претварачи енергетске електронике

Иако су микро извори способни да значајно допринесу укупној производњи електричне енергије, уређаји енергетске електронике морају се користити не само да прилагоде тако произведену енергију потрошачима, него и да интегришу изворе у оквиру микро мреже. Са друге стране, такви уређаји су скупи, компликовани и захтевни, када је у питању њихова имплементација у електроенергетски систем. Ипак, у новије време претварачи се праве са циљем да буду и економски исплативи, издржљиви, поуздани и лако применљиви. Штавише, у циљу развоја технологија лако применљивих и у микро мрежама, све више се улаже у развој модуларне архитектуре која доводи до употребе серијски произведених компоненти спремних за уградњу у систем [3].

Инвертори су уређаји енергетске електронике који претварају једносмерни напон или струју у наизменични напон или струју. Према улазној променљивој деле се на напонске (енгл. Voltage Source Inverter, VSI) и струјне (енгл. Current Source Inverter, CSI).

Са становишта управљања и регулације у микро мрежама важно је дефинисати два типа регулације инверторима [60]:

1.  $PQ$  регулација инвертором: инвертор се користи у циљу обезбеђења задате радне тачке активне и реактивне снаге које се могу прорачунати локално или задати даљински;

2.  $V_f$  регулација инвертором: инвертор у овом случају симулира понашање синхроне машине и се користи у циљу обезбеђења напајања потрошача са задатим вредностима напона и учестаности. У зависности од оптерећења дефинишу се излазна активна и реактивна снага и тада је инвертор тај који обезбеђује потребни напонски профил и учестаност.

#### 4.8 Остали типови дистрибуираних енергетских ресурса

Поред поменутих типова дистрибуираних енергетских ресурса постоје и друге технологије за производњу и складиштење електричне енергије, као што су:

1. Механички системи за складиштење енергије:
  - а. Реверзибилне хидро електране.
  - б. Систем за складиштење енергије користећи компримовани ваздух.
  - с. Замајци.
2. Електрични системи за складиштење енергије:
  - а. Суперкондензатори.
  - б. Системи за складиштење термалне енергије.
3. Виртуелни системи за складиштење енергије:
  - а. Потрошња условљена тражњом.
4. Микро хидро генератори.
5. Системи за преузимање енергије плиме, осеке и таласа.
6. Генератори на био масу.

# 5. Проблем управљања микро мрежом

Управљање је један од кључних аспеката у области микро мрежа. У ствари, оно што разликује микро мреже од дистрибутивног система са дистрибуираним изворима електричне енергије је управо способност њиховог управљања и регулације, и то тако да их главна мрежа види као координисано управљиву јединицу.

Координисано управљање великог броја дистрибуираних извора електричне енергије може се спровести коришћењем различитих техника, почевши од централизованог контролера, па до потпуно дистрибуираног управљачког система.

Са становишта контролабилности дистрибуираних извора електричне енергије може се направити подела на контролабилне и неконтролабилне изворе. Док се код контролабилних извора радна тачка може подешавати од стране надзорно-управљачког система, неконтролабилни ресурси, као што су на пример ветро или соларни генератори, најчешће раде по принципу максималне производње, како би микро мрежи испоручили максималну количину „зелене“ енергије без емисије штетних гасова.

Са становишта хијерархије нивоа управљања, може се дефинисати примарно, секундарно и терцијално управљање, као што је приказано на слици 6. У групу примарног управљања спада регулација напона и учестаности користећи методе статичких карактеристика јединица. У групи секундарног управљања налази се регулација активне и реактивне снаге и напона, и то на такав начин да се регулише грешка у устаљеном стању и да се учестаност и напони доведу у оквиру техничких граница. Терцијално управљање састоји се од функција и технологија економске оптимизације рада микро мреже.



Слика 6. Хијерархијски нивои управљања микро мрежом

Контролер микро мреже има задатак да обезбеди следеће [63]:

1. Да микро извори раде на предефинисаној радној тачки поштујући техничка ограничења.
2. Да токови активне и реактивне снаге буду такви да испуне баланс између потрошње и производње, техничка ограничења водова и уговорне обавезе између микро и главне мреже.
3. Прелазак у острвски рад и повезивање назад на главну мрежу.
4. Непрекидно напајање за критичне потрошаче.
5. Поновни старт система после делимичног или потпуног испада дела или целог електродистрибутивног система.

Укључивање микро мрежа у погон електродистрибутивног система има утицај на више сфера рада других система. Могу се издвојити следећи утицаји [3]:

1. Утицај на квалитет електричне енергије – Користећи локалне ресурсе, микро мреже могу бити употребљене да регулишу квалитет електричне енергије према захтевима потрошача. Дистрибутивна мрежа није дизајнирана да се води рачуна о посебним захтевима за квалитет електричне енергије појединачног потрошача. Она обично омогућује само једнообразни ниво квалитета и услуга свим потрошачима у датој области и није могуће лако да се раздвоје њихове појединачне потребе. У случају микро мрежа, где су потрошачи прикључени на локалне изворе и контролер(е), они долазе у много бољу позицију да имају повећан квалитет електричне енергије, без плаћања додатних тарифа.
2. Утицај на цену електричне енергије – Микро мреже имају значајну улогу у смањивању цене проширења система главне мреже, одлажући тренутне потребе за повећањем преносних капацитета постојећих водова и/или постављања нових преносних водова. Поред трошкова проширења главне мреже, микро мреже утичу на смањење цене електричне енергије, тако што помажу да се смањи оптерећење преносне мреже преузимањем дела



потрошње. Микро мреже користећи локалне ресурсе могу се показати као решење за смањење загушења и преоптерећења преносних водова, те се капиталне инвестиције могу одложити [64] [65].

3. Утицај на животну средину – Микро мреже могу ефикасно смањити загађивање животне средине повећавајући учешће обновљивих извора енергије у укупној потрошњи. Да би се имплементирала експлоатација микро мреже која узима у обзир еколошка ограничења, контролер микро мреже мора бити подешен да доноси управљачке одлуке засноване на оптималним укупним емисијама угљен диоксида. Контролер би потенцирао електричну енергију произведену у локалним изворима сагласно са смањењем укупних емисија. Емисиона тарифа може бити дефинисана на нивоу државе или регије и структурирана као функција времена, сезоне и локације, тако да би у времену и месту највећег загађења тарифа била најповољнија.
4. Утицај на стабилност главне мреже – Микро мреже могу да продају помоћне услуге главној мрежи и тиме повећају њену стабилност и робусност. Помоћне услуге могу бити помоћ при регулацији учестаности, напона, пружање дефинисане ротационе резерве или хаваријско гашење потрошње.
5. Утицај на поновно стартовање система – Поновно стартовање система је дефинисано као способност система да рестартује своје генераторе након тоталног колапса система, без увоза енергије. Ова акција враћа критични део енергетског система у нормалан рад без спољне помоћи. Микро мреже помоћу својих микро извора могу иницирати процедуру поновног старта и тиме помоћи главној мрежи да успостави напајање после колапса.
6. Утицај на ефикасност система – Ефикасност микро мреже може се повећати и до 90% ако се у микро мрежу дода когенерациона електрана како би снабдевала потрошаче топлотном енергијом [66].

### 5.1 Управљачке функције

Контролер микро мреже мора имати широк спектар функција које покривају све захтеве и комплетан животни циклус једне микро мреже. Основне функције микро мреже могу се поделити на следеће групе:

## Регулација

- Регулација напона и реактивне снаге
- Регулација учестаности и снага размене
- Поновни старт система
- Ресинхронизација

## Оптимизација

- Економски диспечинг
- Прорачун оптималног ангажовања агрегата

## Поузданост рада

- Искључивање потрошње
- Искључивање производње
- Аутоматски прелазак у острвски режим

## Менаџмент

- Прогноза потрошње
- Прогноза производње
- Прогноза цена електричне енергије
- Планирање трансакција
- Прорачун резерви

### 5.1.1 Регулација

Регулација у микро мрежи дели се на:

- Регулација напона и реактивне снаге – функција је задужена за регулацију напонских прилика и реактивне снаге у микро мрежи путем регулације генератора, кондензаторских батерија и других дистрибуираних извора енергије са инверторима који се налазе у моду регулације напона и учестаности (енгл. *Voltage Source Inverter*) [67], [68].
- Регулација учестаности и снага размене – функција је задужена за одржавање учестаности на жељеном нивоу током острвског рада микро мреже путем регулације активне снаге генератора, система за складиштење енергије и других дистрибуираних извора електричне енергије. Такође, функција је задужена са одржавање активне снаге размене између микро мреже и главне мреже на предефинисаном нивоу током повезаног режима рада. Имплементирана је као управљање методом статичких карактеристика *одама активна снага – учестаност* или аутоматска регулација генератора (енгл. *Automatic Generation Control – AGC*) [67] - [71].

- Поновни старт система – функција је задужена за поновно успостављање напајања микро мреже после потпуног престанка рада, путем регулације генератора, система за складиштење електричне енергије, кондензаторских батерија и прекидача. Функција предлаже оптималну секвенцу укључивања потрошача и система за производњу електричне енергије и проверава је у односу на техничка ограничења микро мреже [72], [73].
- Ресинхронизација – функција је задужена за поновно успостављање повезаног рада после преласка у острвски режим [74], [75].

### 5.1.2 Оптимизација

Циљ оптимизационих функција је смањење трошкова рада производних јединица и повећање профита микро мреже. Област оптимизација микро мрежа дели се на две основне функције:

- Економски диспечинг – Циљ оптимизације је минимизација трошкова производње током режима рада повезаног са дистрибутивном мрежом или острвског режима рада, уз додатна техничка ограничења која могу бити обезбеђивање стабилног наставка рада приликом преласка у острвски режим или обезбеђивање жељеног нивоа ротационе резерве [11], [15].
- Прорачун оптималног ангажовања агрегата – циљ функције је одређивање режима рада (укључен или искључен) производних јединица као и јединица за складиштење енергије у режиму наредних 7 дана. Алгоритам узима у обзир варијабилну потрошњу и варијабилну производњу обновљивих извора електричне енергије [14], [17], [18].

### 5.1.3 Поузданост рада

Микро мрежа као један од основних циљева рада има повећање поузданости напајања критичних потрошача. Могу се дефинисати три основне функције из ове области:

- Искључивање потрошње – у случајевима смањене учестаности функција искључује потрошњу са циљем одржања стабилности учестаности [76], [77].
- Искључивање производње – у случајевима повећане учестаности функција искључује или смањује производњу са циљем одржања стабилности учестаности.
- Аутоматски прелазак у острвски режим – у случајевима унапред дефинисаних догађаја функција спроводи аутоматски прелазак у острвски режим рада [75].

Важно је нагласити да се процеси ресинхронизације и преласка у острвски режим одвијају на тачки заједничког спајања (енгл. *Point of Common Coupling* – PCC) која је јединствена тачка повезивања микро и главне мреже. На овој тачки микро мрежа мора задовољити захтеве дефинисане 1547 скупом IEEE (енгл. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) стандарда [78] - [83].

#### 5.1.4 Менаџмент

Група менаџмент функција бави се различитим прогнозама и планирањем рада микро мреже. Могу се дефинисати следеће функције из ове групе:

- Прогноза потрошње – задатак функције је прорачун прогнозиране потрошње микро мреже у наредном дефинисаном периоду [84] - [86] (до 7 дана за резолуцијом од 5 минута до 1 часа).
- Прогноза производње – задатак функције је прорачун производње обновљивих извора електричне енергије (соларни и ветро) у наредном дефинисаном периоду (до 7 дана за резолуцијом од 5 минута до 1 часа).
- Прогноза цена електричне енергије – задатак функције је прорачун цене електричне енергије на тржишту електричне енергије у наредном дефинисаном периоду.
- Планирање трансакција – задатак функције је вођење трансакција за куповину и продају електричне енергије између микро мреже и главне мреже.
- Прорачун резерви – задатак функције је прорачун резерви, како генератора, тако и система за складиштење електричне енергије у микро мрежи.

## 5.2 Централизовано и децентрализовано управљање

Микро мрежама може се управљати на централизовани или децентрализовани начин, у зависности од расположивости опреме и одговорности различитих управљачких ентитета [87].

### 5.2.1 Централизовано управљање

Концепт централизованог управљања у електроенергетским системима традиционално се користи за управљање учестаношћу у великим преносним системима [88], а последњих година се користи и у микро мрежама за управљање учестаношћу и регулацију напона [61], [89].

У централизованом управљању главну одговорност за максимизацију користи микро мреже и оптимизацију њеног рада има контролер микро мреже (КММ).

Користећи се тржишним ценама електричне енергије и горива, емисионим карактеристикама јединица и на основу сигурносних захтева мреже и потражњом помоћних сервиса од стране главне дистрибутивне мреже, КММ одређује колико би снаге микро мрежа требало да увезе из дистрибутивног или преносног система, оптимизујући локалну производњу, системе за складиштење електричне енергије или капацитет потрошње. Дефинисани оптимизовани оперативни сценарио је реализован управљањем микро изворима и регулисаним потрошачима унутар микро мреже слањем управљачких сигнала ка контролним системима у пољу. У овом начину рада, некритични, флексибилни потрошачи могу бити искључени када је то профитабилно, а да нису нарушене неке друге обавезе или ограничења [1], [3], [87].

### 5.2.2 Децентрализовано управљање

Децентрализовано управљање решава основни недостатак централизованог контролера, а то је смањена поузданост рада, јер се прекидом рада централизованог контролера у потпуности губи регулација и управљање целог система [24].

У потпуно децентрализованом приступу главна одговорност дата је контролерима микро извора који се такмиче или сарађују у оптимизацији своје критеријумске функције (нпр. максимизација производње у циљу задовољавања потраживања и уз максимални могући извоз ка мрежи, узимајући у прорачун ограничења (нпр. тренутне цене на тржишту и ограничења емисије штетних гасова)). Овај приступ је одговарајући за случајеве различитих власника дистрибуираних извора енергије, где би неке одлуке требало донети локално, дисквалификујући централизовано управљање. Поред главних задатака и карактеристика регулисане микро мреже, избор између централизованог и децентрализованог приступа управљању микро мрежа зависи и од ресурса, особља и опреме који су на располагању [1], [3], [87].

### 5.2.3 Избор централизованог или децентрализованог управљања

Кључни атрибути који утичу на перформансе управљачких алгоритама за микро мреже и који утичу на извор централизованог или децентрализованог типа контролера су следећи [1], [3], [87]:

- **Број дистрибуираних извора енергије у систему:** Број дистрибуираних извора енергије критично утиче на комплексност проблема и време прорачуна. Дистрибуирана архитектура контролера омогућује и дистрибуиране прорачуне који би растеретили централни управљачки систем.

- **Број размена порука:** Дистрибуирана производња и потрошња у микро мрежама су обично расуте и комуникациони системи на ниском напону обично имају ограничени пропусни опсег. У неким случајевима број порука неопходних да се изврши задатак је од кључног значаја. Децентрализовано управљање смањује број порука, јер се само мали део информација прослеђује на више нивое управљачке хијерархије.
- **Одржавање система:** Централизовани менаџмент микро мрежа омогућује лако уједначавање ресурса за рад (софтвера и хардвера), њихову компатибилност, као и административних и пословних процедура, што поједностављује одржавање система.
- **Поузданост рада:** Код централизованих система поузданост рада зависи од поузданости рада централног контролера, па тако у случају његовог отказа губи и престаје рад целог система, док у случају децентрализованог управљања, минимум оперативног рада може се остварити и приликом прекида рада појединачних некритичних елемената.

Избор између централизованог и децентрализованог приступа за управљање микро мрежа зависи од главних задатака и специфичних карактеристика микро мреже, као и доступности и приступачности ресурса, односно особља и опреме.

Централизовано управљање је применљивије ако корисници микро мреже имају заједничке циљеве или заједничко радно окружење, па теже координацији зарад остваривања сопствених циљева. Такав пример би била индустријска или војна микро мрежа, где један власник може имати пуну контролу над свим својим енергетским изворима и потрошачима, као и могућност да их континуирано надгледа са циљем да управља системом на оптималан начин (економски или са становишта поузданости).

Још један битан фактор је отвореност система. Дистрибуирана рачунарска технологија дозвољава произвођачима дистрибуираних генератора и потрошачима да обезбеде „прикључи и ради“ (енгл. *Plug and Play*) компоненте уграђивањем управљачких агената у своје уређаје. У овом случају контролер микро мреже надгледа процес и прати поштовање одговарајућих прописа и стандарда. Распоживост особља одговорног за инсталацију и одржавање система, највероватније у централизованом систему, може релаксирати ове потребе до неке мере. У овом случају, особље може вршити надгледање процеса и интервенисати само у хитним случајевима.

Општи закључак је да је централизовани приступ погодан за систем са једним специфичним циљем, а децентрализовани за системе са више циљева.

### 5.3 Теорија Вишеагентног система

Вишеагентни системи могу понудити добру алтернативу традиционалним централизованим и децентрализованим управљачким системима комбинујући њихове добре стране. Вишеагентни систем може се извести као децентрализовани систем са једним специфичним циљем.

Не постоји званична дефиниција агента, али у литератури је дата следећа дефиниција [90]: Агент је ентитет (софтвер или хардвер) који је смештен у неком окружењу и који може самостално да реагује на промене окружења. Напредни агенти су интелигентни агенти које одликују следеће три основне карактеристике [90]:

1. **Могућност реакције** – интелигентни агент може да реагује на промене у свом окружењу у одговарајућем временском опсегу и може предузети акције засноване на тим променама и циљем свог рада.
2. **Проактивност** – интелигентни агент испољава понашање засновано на циљу. То значи да ће агент динамички мењати своје понашање како би био на одговарајући начин спреман за испуњавање задатих задатака.
3. **Социјалне вештине** – интелигентни агент може комуницирати са другим интелигентним агентима. Ова карактеристика означава много више од обичне размене података коју изводе традиционални системи; она означава способност преговарања и комуникације у кооперативном режиму, односно режиму који води испуњавању појединачних циљева.

Вишеагентни систем је систем који садржи два или више агената или интелигентних агената. По дефиницији не постоји заједнички циљ система, већ само појединачни циљеви агената, али се конкретном изведбом може поставити заједнички циљ свим агентима као један од појединачних.

Модел контролера представљен у овој докторској дисертацији је модел дистрибуираног, вишеагентног система са јединственим циљем.

# 6. Модел контролера микро мреже

На основу свега наведеног у претходним поглављима може се закључити да не постоји јединствено решење за контролер микро мреже (КММ) којим се могу подржати сви оперативни режими рада микро мреже, како за управљање у реалном времену, тако и за оперативно планирање.

Модел контролера микро мреже представљен у овој дисертацији базиран је на софтверским агентима и укључује детаљну оптимизациону функцију и управљање у реалном времену. Контролер је способан да оптимизује рад микро мреже у сва три режима рада (повезани, острвски и хаваријски), како за управљање у реалном времену, тако и за оперативно планирање. Висок ниво генералности постигнут је додавањем тежинских фактора у оптимизациону функцију. Тежински фактори се користе да пенализирају оперативне трошкове, трошкове одржавања и губитке.

Главне предности предложеног решења у односу на претходно набројана [10 – 31] су :

1. Повећана поузданост напајања (смањење времена испада) за критичне потрошаче.
2. Унапређена економија рада.
3. Смањење емисије угљен диоксида.
4. Регулација преласка из паралелног у острвски рад (током планираног и хаваријског преласка) без потреса.
5. Одржавање напонских прилика у предефинисаним техничким границама.
6. Одржавање тока снаге кроз тачку спајања са мрежом и системске учестаности у оквиру задатих техничких граница.
7. Пружање детаљних увида оператеру система у рад микро мреже.

Идеја је да КММ нормално ради у затвореној петљи без потребе за акцијама оператера, али је такође и обезбеђена могућност за оператера да препише, стопира и промени рад и резултате КММ.

Основни циљеви КММ у три различита оперативна режима су следећи:

- I. Повезани режим:



Одржавање снаге размене за главном дистрибутивном мрежом и одржавање напонских прилика у оквиру дефинисаних техничких граница, уз максимизацију профита од производних јединица кроз оптимизацију њихове производње и емисије угљен диоксида. Главна мрежа обезбеђује стабилност учестаности, обезбеђујући довољно ротационе резерве њених генераторских јединица.

## II. Острвски режим:

У овом режиму одвајање микро мреже од главне мреже спроводи се тако да се прво снага размене спушта до нуле и затим се отвара прекидач на повезном воду. КММ мора обезбедити биланс потрошње и производње у овако изолованој мрежи. После планског преласка у острвски режим, главни задатак КММ је да одржи стабилност учестаности и напонских прилика у оквиру предефинисаних техничких граница. Овакав начин управљања је такође применљив на изоловане електроенергетске системе, као што су географска острва, изоловани рудници, индустријски центри и други системи који нису повезани на дистрибутивне или преносне мреже.

## III. Хаваријски режим:

Често је пракса да микро мрежа током нормалног рада увози одређени проценат енергије из главне мреже. Хаваријски режим рада означава моменат када се прекидач између главне мреже и микро мреже отвара изненада и неплански током значајног увоза или извоза енергије. Тада се микро мрежа суочава са значајним дебалансима снаге, напона и учестаности, који могу да доведу до прекида рада микро мреже, те је задатак КММ да обезбеди њихову стабилност. После успостављања стабилности микро мреже, КММ преводи микро мрежу у острвски режим рада.

Предложени задаци и циљеви КММ употпуњени су коришћењем софтверских агената укључених у архитектуру контролера. Одлука да се КММ базира на софтверским агентима инспирисана је истраживањем објављеним у [90]. У овом раду који је део истраживања IEEE Power Engineering Society's Multi-Agent Systems (MASs) радне групе утврђено је да је коришћење софтверских агената правилан приступ конструисању робусног, флексибилног и проширеног управљачког система. Предности овог приступа су следеће:

1. Аутономија и енкапсулација агената.
2. Отворена архитектура.
3. Напредна платформа за дистрибуиране системе.
4. Адекватна отпорност на грешке.

У овом раду се, такође, констатује и да коришћење софтверских агената даје могућност значајно другачијег приступа дизајнирању система за управљање електроенергетским системима. Софтверски агенти су успешно коришћени за сличне задатке у многим радовима, као на пример [91] [92].

## 6.1 Реализација Контролера микро мреже

КММ садржи три софтверска агента који подржавају три оперативна режима рада микро мреже: Агент Реалног Времена (АРВ), Агент Оперативног Планирања (АОП) и Агент Стања (АС).

АС се обезбеђује свеобухватно надгледање и координација рада АРВ и АОП. Током процедуре почетка рада КММ, АРВ и АОП обавештавају АС о њиховом присуству користећи Интернет протокол (енгл. *Internet Protocol – IP*) адресу, порт и договорени формат поруке, како је приказано на слици 7, кораци 1 – 4.

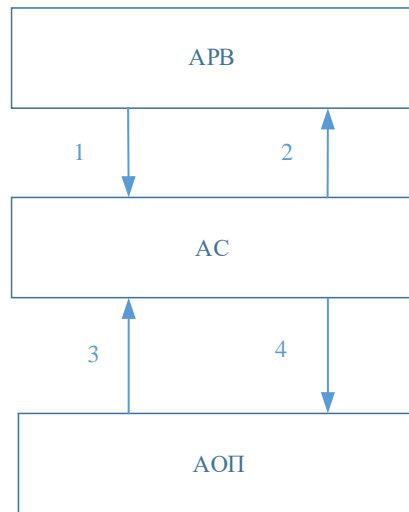
КММ ради у затвореној петљи која је приказана на слици 8. На почетку сваког циклуса АС чита податке са поља, што је обележено као „оперативно стање микро мреже“ на слици 8, укључујући мерење повезаности опреме и аналогног мерења рада (корак 5). У следећем кораку АС чита податке из екстерних система коришћењем одговарајућих интеграција, што је обележено као „интеграциони системи“, слици 8. Ови подаци укључују временску прогнозу, захтеве за сервисима од главне мреже, који могу да буду захтеви за енергијом, подршком за управљањем реактивне снаге и напона, регулацију учестаности, подршка ротационом резервом као и управљањем (управљивом) потрошњом (корак 6). У трећем кораку АС доставља податке од значаја ка АРВ и АОП (кораци 1 до 4 на слици 7 тј. кораци 7 и 8 на слици 8). Током ових корака АРВ и АОП извршавају прорачуне користећи различите енергетичарске функције објашњене у Табели 1 (кораци 9 и 10). АРВ шаље команде ка опреми у пољу што је приказано у кораку 11. У финалним корацима (12 и 13) АРВ и АОП шаљу информације АС о њиховом стању рада (успешно или не), као и о расположивости за следећи циклус.

Табела 1. Основне функционалности реализоване одговарајућим енергетичарским функцијама КММ

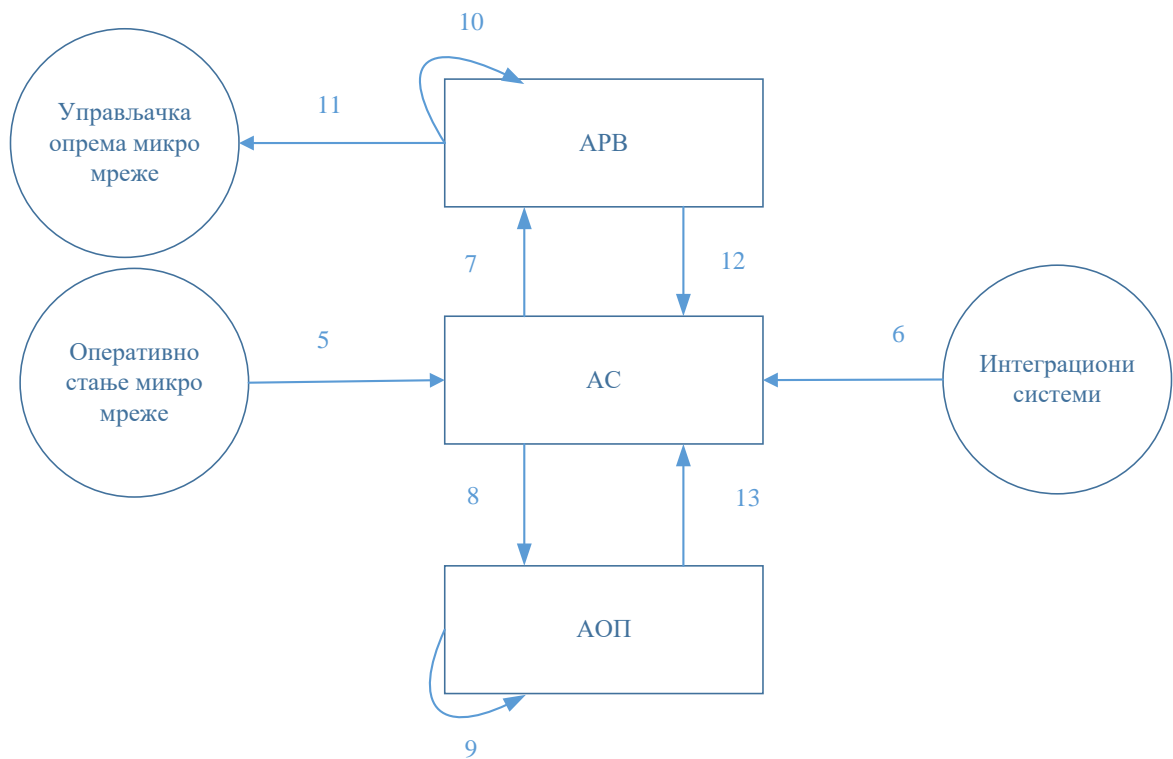
	Агент реалног времена (АРВ)	Агент оперативног планирања (АОП)	Агент стања (АС)
Повезани режим	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>Прорачун регулационе грешке области.</p> <p>Слање управљачких команди генераторским јединицама.</p> <p>Слање управљачких команди системима за складиштење електричне енергије.</p> <p>Комуникација са уређајима у пољу.</p> <p>Слање команди за брзо искључивање потрошње.</p> <p>Слање команди кондензаторским батеријама.</p> <p><b>Енергетичарске функције:</b></p> <p>Аутоматска регулација генератора (AGC).</p> <p>Економски диспечинг (ED).</p> <p>Менаџмент напона и реактивне снаге (VVM).</p> <p>Брзо искључивање (FS).</p>	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>Прорачун прогнозе потрошње и производње јединица обновљиве енергије.</p> <p>Извршавање прорачуна вишекорачне оптимизације</p> <p>Обезбеђивање оптималног планирања рада прорачуном када ће која генераторска јединица бити стартована или заустављена и када ће се који систем за складиштење енергије празнити или пунити, уважавајући прогнозирану потрошњу и производњу јединица обновљиве енергије.</p> <p>Управљање трансакцијама куповине и продаје енергије са главном мрежом.</p> <p><b>Енергетичарске функције:</b></p> <p>Прогноза скорашње потрошње (NTLF).</p> <p>Краткорочна прогноза потрошње (STLF).</p> <p>Прогноза скорашње производње обновљивих извора енергије (NTRGF).</p> <p>Краткорочна прогноза производње обновљивих извора енергије (STRGF).</p> <p>Прорачун оптималне ангажованости агрегата (UC).</p> <p>Менаџер трансакција (ITS).</p>	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>Одговоран за укупан рад и надгледање микро мреже као и прикупљање свих релевантних информација о тренутним условима рада, расположивим ресурсима и комуникација са другим системима, као што су SCADA систем, систем за временску прогнозу и систем за прогнозу цене енергије.</p> <p>Одговоран за координацију рада АРВ и АОП у затвореној петљи.</p> <p>Надгледање статуса прекидача на споју са главном мрежом и надгледање потенцијалних</p>

Острвски режим	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>Обезбеђивање довољног капацитета производних јединица за острвски режим рада и редуција снаге размене са главном мрежом на нулу.</p> <p>После преласка у острвски режим, управљање производним јединицама у циљу одржавања учестаности и напонских прилика у дефинисаним техничким границама.</p> <p><b>Енергетичарске функције:</b></p> <p>Аутоматска регулација генератора (AGC).</p> <p>Економски диспечинг (ED).</p> <p>Менаџмент напона и реактивне снаге (VVM).</p> <p>Регулација управљиве потрошње.</p> <p>Брзо искључивање (FS).</p>	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>Извршавање краткорочне оптимизације производних јединица са новим циљем одрживог рада у острвском режиму.</p> <p>АОП извршава прорачун за следећих седам дана са резолуцијом од једног сата и за следећих 24 сата са резолуцијом од 5 до 30 минута. Прорачун се извршава са другачијим скупом тежинских фактора и другачијим скупом ресурса. Ово значи да главна мрежа не постоји у скупу ресурса и да су тежински фактори за коришћење система за складиштење енергије, управљиве потрошње и брзог искључивања потрошње смањени.</p> <p><b>Енергетичарске функције:</b></p> <p>Прогноза скорашње потрошње (NTLF).</p> <p>Краткорочна прогноза потрошње (STLF).</p> <p>Прогноза скорашње производње обновљивих извора енергије (NTRGF).</p> <p>Краткорочна прогноза производње обновљивих извора енергије (STRGF).</p> <p>Прорачун оптималне ангажованости агрегата (UC).</p>	<p>испада опреме/или делова мреже у микро мрежи.</p>
----------------	---	---	--

Хаваријски режим	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>Управљање једино производним и јединицама за складиштење електричне енергије у циљу одржавања напајања критичних потрошача.</p> <p>Пружање подршке стабилности учестаности микро мреже током хаваријских услова рада.</p> <p><b>Енергетичарске функције:</b></p> <p>Аутоматска регулација генератора (AGC).</p> <p>Економски диспечинг (ED).</p> <p>Брзо искључивање (FS).</p>	<p><b>Основне функционалности:</b></p> <p>АОП је неактиван, јер је једино важно одржати напајање критичних потрошача и обезбедити стабилан прелазак у острвски режим рада.</p>	
------------------	--	--	--



Слика 7. Процес иницијализације рада КММ



Слика 8. Шематски приказ координације агената

АРВ се извршава на два нивоа: ниво система за надзор и прикупљање података (SCADA ниво) и ниво програмабилних логичких контролера (RTU ниво).

Оптимизациони процес приказан је у поглављу 6.2.1 и базира се на принципу временски померајућег прозора, што значи да се оптимизација увек извршава за унапред дефинисани временски период и приказује резултате за дефинисани број сати или минута унапред.

Листу улазних параметара у оптимизациони модел чине:

1. Краткорочна прогноза потрошње, STLF, (наредних седам дана са резолуцијом од 1 сата).
2. Прогноза скорашње потрошње, NTLF, (наредних 24 сата са резолуцијом од 5 минута).
3. Краткорочна прогноза производње обновљивих извора енергије, STRGF, (наредних 7 дана са резолуцијом од 1 сата).
4. Прогноза скорашње производње обновљивих извора енергије, NTRGF, (наредних 24 сата са резолуцијом од 5 минута).
5. Краткорочна прогноза цена енергије (наредних 7 дана са резолуцијом од 1 сата).
6. Распоред трансакција за куповину и продају електричне енергије.
7. Имена и потрошње критичних потрошача.

АОП прорачунава такозвану криву праћења потрошње; која је представљена резултатима прорачуна функције оптималног ангажовања агрегата и економског диспечинга за наредних 7 дана уз резолуцију од 1 сата, као и за наредних 24 сата уз резолуцију од 5 минута. Резултати ове оптимизације су:

1. План укључења и искључења генератора.
2. Базне снаге конвенционалних<sup>1</sup> генератора.
3. План искључивања контролабилне потрошње.
4. План пуњења и пражњења система за складиштење енергије.
5. Распоред рада потрошње условљене тражњом.

АРВ прорачунава у реалном времену радне тачке генератора, партиципационе факторе генератора, команде за управљање ресурсима и команде за управљање системима за складиштење енергије.

---

<sup>1</sup> Генератори на фосилна горива

Када се микро мрежа налази у острвском режиму рада, АОП и АРВ извршавају исти алгоритам уз измењену критеријумску функцију и списак расположивих ресурса. У острвском режиму рада главна мрежа не постоји као оптимизациони ресурс и не постоје захтеви за сервисима од главне мреже. Уз то, у острвском режиму постоје захтеви за брзим искључивањем потрошње који не постоје у повезаном режиму.

У хаваријском режиму само су АРВ и АС активни и додатно користе функцију за брзо искључивање потрошње како би одржали напајање критичних потрошача и обезбедили стабилан прелазак микро мреже у острвски режим рада.

## 6.2 Функционални модел КММ

КММ садржи три агента који раде у две оперативне контуре:

1. Активна снага-учестаност ( $P-f$ ) регулациона контура је имплементирана у АРВ и АОП на следећи начин:
  - a. У АОП ( $P-f$ ) регулациона контура је имплементирана у оквиру UC, NTLF, STLF, NTRGF, STRGF и ITS функција.
  - b. У АРВ регулационој контури имплементирана је у оквиру AGC, ED и FS функција.
2. Реактивна снага – напон ( $Q-V$ ) регулациона контура имплементирана је у АРВ у оквиру VVM функције.

Детаљан опис КММ функционалности дат је у Табели 1.

### 6.2.1 АОП базирана $P-f$ регулациона контура

Задатак  $P-f$  регулационе контуре имплементиране у АОП је да минимизује укупне трошкове одређене производним трошковима генератора, трошковима укључења и искључења генератора, оперативним трошковима коришћења система за складиштење енергије (пенализацијом честе промена режима рада (пражњење – пуњење)), трошковима искључивања контролабилне потрошње, трошковима брзог искључивања потрошње и трошковима ротационе резерве.

Циљ критеријумске функције је максимизација профита микро мреже у интервалу времена  $T$  (где је  $t$  посматрани моменат).

Према томе, критеријумска функција се може изразити као:

$$\max\{\text{ПММ}\} = \max\{(\text{Приходи потрошње}) - (\text{Трошкови снабдевања})\}(1)$$



где ПММ означава профит микро мреже,

што се може даље изразити као:

$$\max_{P_d(t), P_g(t), x_g(t), u_g(t), P_r(t), P_e(t), P_s^c(t), P_s^d(t), P_l(t)} \{PMM\} = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & w_1 \sum_{d=1}^D C_d(P_d(t)) - w_2 \sum_{g=1}^G [C_g(P_g(t)) + S_g(x_g(t), u_g(t))] - \\ & - w_3 \sum_{g=1}^G C_g^e(P_g(t)) - w_4 \sum_{r=1}^R C_r(P_r(t)) - w_5 C_e^i(P_e^i(t)) + \\ & + w_6 C_e^e(P_e^e(t)) - w_7 \sum_{s=1}^S [C_s^c(P_s^c(t)) + C_s^d(P_s^d(t))] - \\ & - w_8 \sum_{l=1}^L C_l(P_l(t)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где су:

$P_d(t)$ ,  $P_g(t)$ ,  $x_g(t)$ ,  $u_g(t)$ ,  $P_r(t)$ ,  $P_e(t)$ ,  $P_s^c(t)$ ,  $P_s^d(t)$ ,  $P_l(t)$  – променљиве у тренутку  $t$ ; ове променљиве су појашњене у наставку;

$w_1 \sum_{d=1}^D C_d(P_d(t))$  – део критеријумске функције који означава потрошњу;

$D$  – број некритичних потрошача;

$C_d$  – цена потрошње  $d$ -тог некритичног потрошача;

$P_d(t)$  – мерење активне снаге потрошње  $d$ -тог некритичног потрошача у тренутку  $t$ ;

$-w_2 \sum_{g=1}^G [C_g(P_g(t)) + S_g(x_g(t), u_g(t))] - w_3 \sum_{g=1}^G C_g^e(P_g(t)) - w_4 \sum_{r=1}^R C_r(P_r(t))$  – део критеријумске функције који означава контролабилне генераторе;

$G$  – укупан број контролабилних генератора (под AGC-ом);

$R$  – укупан број генератора који припадају ротационој резерви;

$C_g$  – трошкови рада  $g$ -тог генератора;

$S_g$  – цена укључења  $g$ -тог генератора;

$C_g^e$  – цена емисије  $g$ -тог генератора;

- $C_r$  – цена ротационе резерве  $r$ -тог генератора;
- $P_g(t)$  – активна снага  $g$ -тог генератора у тренутку  $t$ ;
- $x_g(t)$  – број сати од задње промене стања  $g$ -тог генератора у тренутку  $t$ ;
- $u_g(t)$  – стање  $g$ -тог генератора у моменту  $t - 1$  (0 – изван рада, 1 – у раду);
- $P_r(t)$  – неискоришћена снага (резерва)  $r$ -тог генератора који припада ротационој резерви у тренутку  $t$ ;

$-w_5 C_e^i(P_e^i(t)) + w_6 C_e^e(P_e^e(t))$  – увоз/извоз део критеријумске функције;

$C_e^i, C_e^e$  – трошак увоза и цена извоза, респективно;

$P_e^i(t), P_e^e(t)$  – активна снага увоза и извоза у тренутку  $t$ , респективно;

$-w_7 \sum_{s=1}^S [C_s^c(P_s^c(t)) + C_s^d(P_s^d(t))]$  – део критеријумске функције придружен системима за складиштење енергије;

$S$  – број система за складиштење енергије;

$C_s^c, C_s^d$  – цена снага пуњења и пражњења  $s$ -тог система за складиштење енергије<sup>2</sup>, респективно;

$P_s^c(t), P_s^d(t)$  – активна снага пуњења и пражњења  $s$ -тог система за складиштење енергије, респективно;

---

<sup>2</sup> Цена рада система за складиштење енергије је дата у функцији мода рада и мерењу активне снаге

$-w_8 \sum_{l=1}^L C_l(P_l(t))$  – део критеријумске функције који се односи на искључивање потрошње;

$L$  – укупан број контролабилних потрошача;

$C_l$  – цена искључивања  $l$ -тог потрошача;

$P_l(t)$  – активна снага  $l$ -тог потрошача у тренутку  $t$ ;

$w_1, \dots, w_8$  – тежински фактори.

**Ограничења:** Интелигентним КММ се прорачунава оптимално решење једначине (2), са уважавањем следећих ограничења:

1. Биланс активне снаге (производња = потрошња):

$$\sum_{g=1}^G P_g(t) + P_e^i(t) + \sum_{s=1}^S P_s^d(t) + \sum_{m=1}^M P_m(t) = \sum_{d=1}^D P_d(t) + \sum_{n=1}^N P_n(t) + P_{losses}(t) - \sum_{l=1}^L P_l(t) + \sum_{s=1}^S P_s^c(t) + P_e^e(t) \quad (3)$$

2. Жељена системска резерва:

$$\sum_{r=1}^R P_r(t) + \sum_{s=1}^S R_s(t) + \sum_{l=1}^L R_l(t) \geq P_{Required\ reserve} \quad (4)$$

3. Техничка ограничења минималне и максималне активне снаге генератора:

$$P_g^{min} \leq P_g(t) + P_r(t) \leq P_g^{max}, \quad g = 1, 2, \dots, G. \quad (5)$$

4. Техничка ограничења минималне и максималне активне снаге система за складиштење енергије:

$$P_s^{min} \leq P_s(t) \leq P_s^{max}, \quad s = 1, 2, \dots, S. \quad (6)$$

5. Дозвољена брзина промене активне снаге:

$$\left\{ \sum_{g=1}^G P_g(t) + \sum_{s=1}^S P_s^d(t) + \sum_{d=1}^D P_d(t) \right\} - \left\{ \sum_{g=1}^G P_g(t+1) + \sum_{s=1}^S P_s^d(t+1) + \sum_{d=1}^D P_d(t+1) \right\} \geq P_{demand}(t+1) - P_{demand}(t), \quad (9)$$

где је:

$$P_{demand}(t) = \sum_{d=1}^D P_d(t) + \sum_{n=1}^N P_n(t) + P_{losses} + \sum_{s=1}^S P_s^c(t). \quad (10)$$

6. Минимално време генератора изван и у погону:

$$u_g(t) = 0 \wedge u_g(t-1) = 1 \text{ if } x_g(t-1) \geq \tau_{down}; \quad (11)$$

$$u_g(t) = 1 \wedge u_g(t-1) = 0 \text{ if } x_g(t-1) \geq \tau_{up}. \quad (12)$$

7. Минимална и максимална снага размене (увоз/извоз):

$$P_e^e(t) \leq P_{max}^e; \quad (13)$$

$$P_e^i(t) \leq P_{max}^i. \quad (14)$$

8. Ограничења на емисију гасова који изазивају ефекат стаклене баште:

$$\sum_{t=1}^T [\sum_{g=1}^G C_g^e(P_g(t)) + \sum_{m=1}^M C_m^e(P_m(t))] \leq \varepsilon_{max}, \quad (15)$$

где су:

$M$  – број неконтролабилних ресурса;

$N$  – број критичних потрошача;

$P_m(t)$  – неконтролабилна активна снага (активна снага добијена из соларних, ветро и конвенционалних али неконтролабилних генератора) у тренутку  $t$ ;

$P_n(t)$  – активна снага критичних потрошача у тренутку  $t$ ;

$P_{losses}(t)$  – губици активне снаге у микро мрежи у тренутку  $t$ , приказани коришћењем  $B$ -кофицијент формуле  $P_{losses}(t) = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \mathbf{P}(t)$  (квадратни члан  $\mathbf{P}(t)^T \mathbf{B}_2 \mathbf{P}(t)$  је занемарен, да би се избегла компликованија конвексна оптимизација), где је  $\mathbf{P}(t)$  вектор инјектоване активне снаге у систем и  $\mathbf{B}_0$ ,  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  су коефицијенти губитака [93];

$R_s(t)$  – резерва активне снаге  $s$ -тог систем за складиштење енергије у моменту  $t$ ;

$R_l(t)$  – резерва  $l$ -тог система за контролабилну потрошњу у тренутку  $t$ ;

$P_{Required\ reserve}$  – жељена резерва активне снаге израчуната од стране АОП, где се различите вредности користе за повезани и острвски режим рада:

- i. у повезаном моду рада је једнака количини критичне потрошње.
- ii. у изолованом моду рада је једнака просечној грешки функције за прорачун прогнозе системског оптерећења и производње обновљивих извора енергије за прошла три сата.
- iii. такође може бити ручно подешена од стране оператора КММ.

$\tau_{up}, \tau_{down}$  – техничка ограничења минималног рада у погону и изван погона, респективно;

$P_{max}^i, P_{max}^e$  – технички или договорени увоз и извоз, респективно;

$\varepsilon_{max}$  – највећа дозвољена емисија угљен диоксида;

$C_m^e$  – цена емисије  $m$ -тог неконтролабилног генератора.

Излази из КММ [оптимизоване променљиве из (2)] су: распореди рада система за управљиву потрошњу [ $P_d(t)$ ], генератора [ $P_g(t)$  и  $P_r(t)$ ], распореди увоза и извоза [ $P_e(t)$ , или  $P_e^i(t)$  и  $P_e^e(t)$ ], система за складиштење енергије [ $P_s(t)$ , или  $P_s^c(t)$  и  $P_s^d(t)$ ] и искључивање потрошње [ $P_l(t)$ ] за наредних седам дана са изабраном временском резолуцијом (од пет минута до једног сата) [32].

- Цена је моделована као функција времена ( $t$ ), или уопштено,  $C(P(t))$  – видети једначину (2).
- Трошкови производње генератора ( $C_g$ ), као и цене емисије угљеника ( $C_m^e$ ), моделовани су као квадратне функције  $C(P(t)) = \alpha + \beta P(t) + \gamma P(t)^2$  у [ММВту/МВ] и [CO<sub>2</sub>/МВ] јединицама, респективно. Множећи [ММВту/МВ] криву ценом горива, добија се крива у формату [\$/МВ].
- Цена искључивања потрошње ( $C_l$ ) моделована је као [\$/МВ] крива, која се користи за пенализацију искључивања потрошње.
- Цена смањивања управљиве потрошње ( $C_d$ ) моделована је као [\$/МВ] крива, која се користи за пенализацију смањивања потрошње.
- Трошковне криве система за складиштење енергије ( $C_s^c, C_s^d$ ) моделоване су као линеарне једначине облика [\$/МВ]. Ове криве се поред моделовања трошкова коришћења система за складиштење енергије користе и за

пенализацију броја манипулација опремом, тј. пребацивања мода рада пуњење/пражњење, што смањује радни век опреме.

- Цене енергије увоза из главне дистрибутивне мреже ( $C_e^i, C_e^e$ ) у (2) моделоване су као низови од 168 вредности цене, што представља сатне вредности наредних седам дана.

Предложена метода оптимизације користи се за оба мода рада (повезани и острвски) само са различитим скуповима тежинских фактора. Такође, временски опсег ( $T$ ) и временска резолуција ( $\Delta t$ ) могу се мењати сходно моду рада и подешавањима оператора.

Узимајући у обзир прогнозу потрошње, прогнозу производње обновљивих извора енергије, распоред оптималног ангажовања ресурса, распоред увоза и извоза, распоред пуњења и пражњења система за складиштење електричне енергије, КММ се оптимизује рад микро мреже како за временски садашњи тренутак, тако и за период у будућности.

За ову оптимизацију користи се Microsoft Solver Foundation [94] C# библиотека за решавање мешовито целобројног квадратног проблема (енгл. *Mixed Integer Quadratic Programming* – MIQP), који се користи уместо чешће коришћеног мешовито целобројног линеарног проблема (енгл. *Mixed Integer Linear Programming* – MILP), како би се избегла линеаризација трошкова која може довести до локалних минимума решења уместо глобалног минимума.

АС обезбеђује иницијалне тежинске факторе који су дефинисани од стране оператора. Ово значи да је могуће водити микро мрежу помоћу једног скупа циљева оптимизационих критеријума током тзв. „нормалног“ режима рада (повезани и острвски), као и помоћу потпуно других током хаваријских услова рада.

### 6.2.2 АРВ базирана $P$ - $f$ регулациона контура

АРВ базирана  $P$ - $f$  регулациона контура подељена је на два модула:

1. модул на SCADA нивоу задужен за AGC.
2. модул на RTU нивоу за брзо искључивање потрошње.

#### 6.2.2.1 SCADA ниво

Циљеви модула на SCADA нивоу, који је реализован као  $P$ - $f$  управљање у затвореној петљи названо AGC, јесу:

1. Одржавање биланса производње и потрошње у микро мрежи (овај проблем се своди на одржавање учестаности и/или снаге размене са главном мрежом на жељеном нивоу).
2. Одржавање економски оптималног режима рада, уколико је то могуће, прорачунавајући и користећи оптималне радне тачке производних јединица.

Традиционални модел AGC-а објашњен је и документован у бројним референцама (као на пример [95]). Иако је модел AGC-а који ће бити коришћен за микро мреже базиран на традиционалном моделу који се користи за преносне мреже, ипак постоје одређене специфичности у моделовању. Утицај дистрибуираних извора енергије на одзив система у прелазним процесима и устаљеном стању већи је у микро мрежама у односу на преносне мреже, првенствено због већег процента дистрибуираних генератора у оквиру укупне производње. Утицај дистрибуираних извора енергије одражава се на другачији одзив учестаности микро мреже. Инерција система има велики утицај на учестаност система, и игра значајну улогу у стабилности електроенергетског система. Мала инерција доводи до смањене стабилности учестаности, највише због бржих промена биланса производња – потрошња [95].

Варијабилности дистрибуираних извора енергије уноси два додатна задатка за APВ и АОП:

1. Потребно је уравнотежити производњу и потрошњу у оквиру задатих техничких ограничења, да би се покрила варијабилна потрошња, као и варијабилна производња дистрибуираних извора електричне енергије и да би се испунили тренутни задаци дефинисани оперативним радом микро мреже.
2. Потребно је управљати производњом и потрошњом у оквиру ограничења за максималном дозвољеном променом снаге система на доле и на горе, како би се покрила брзина промене потрошње и производње дистрибуираних извора енергије.

Традиционално, регулациона грешка области (енгл. *Area Control Error* – ACE) дефинисана је као сума пондерисаних дебаланса учестаности и активне снаге размене [95]:

$$ACE = B\Delta f + \Delta P_{interconnection} \quad (16)$$

где су:

$B$  – тежински фактор учестаности;

$\Delta f$  – дебаланс учестаности;

$\Delta P_{interconnection}$  – дебаланс размене активне снаге (разлика између измерене и задате снаге размене) кроз ( $n$ ) водова једне регулационе области:

$$\Delta P_{interconnection} = \sum_{i=1}^n (P_i^{actual} - P_i^{scheduled}) \quad (17)$$

АРВ се прорачунавају у реалном времену (сваке две до четири секунде) радне тачке генератора (класичних и дистрибуираних), као и система за складиштење енергије. Радне тачке се прорачунавају на следећи начин:

$$P_i(t) = P_i(t-1) + \alpha_i ACE - \varepsilon_i, \quad (18)$$

где су:

$P_i(t-1)$  – активна снага  $i$ -тог генератора у претходном временском тренутку;

$\alpha_i$  – коефицијент учешћа  $i$ -тог генератора;

$\varepsilon_i$  – разлика између актуелне радне тачке и оптималне радне тачке генератора.

У повезаном режиму рада АРВ регулише снагу размене са главном мрежом, док учестаношћу управља главна мрежа (коефицијент учешћа учестаности је нула). У острвском режиму АРВ управља само учестаношћу.

#### 6.2.2.2 Ниво RTU-a

$P-f$  регулациона контура на RTU нивоу имплементирана је коришћењем функције за брзо искључивање потрошње (FS). Ова функција се користи за оспособљавање за рад RTU-ова намењених аутоматском искључивању потрошње/делова мреже. До искључивања потрошње и искључивања делова мреже долази у хаваријским условима, како би се одржао интегритет система и минимизовало укупно време испада критичних потрошача (максимизовало време нападања критичних потрошача).

FS функција се аутоматски извршава на следеће типове критичних догађаја:

1. Аутоматски прелазак у острвски режим рада приликом увоза енергије.
2. Испад генератора у острвском режиму рада.
3. Пропад учестаности испод дефинисаног нивоа.
4. Аутоматски прелазак у острвски режим рада приликом извоза енергије.
5. Испад великог потрошача.



б. Пораст учестаности преко дефинисаног нивоа.

Сваких пет минута АС анализира повезаност свих елемената у микро мрежи и ове податке шаље АРВ-у у циљу дефинисања листе критичних догађаја (набројаних изнад). На пример, догађај број 2 (испад генератора) требало би да буде анализиран за све генераторе који су у погону. За сваки критични догађај из листе критичних догађаја биће дефинисана листа прекидача који ће бити отворени на тај догађај. Ово значи да за сваки критични догађај постоји листа корективних управљачких акција одређена преко листе прекидача који ће бити отворени. Ове две листе (листа критичних догађаја и листа акција) дефинишу табелу са подацима који ће бити послати на RTU.

У сваком реду табеле искључивања садржане су информације о критичном догађају, опис критичног догађаја, величина дебаланса активне снаге која је креирана овим догађајем, као и листа прекидача који ће бити отворени како би се искључила производња/потрошња (видети пример Табеле 3). Прекидачи су представљени својим јединственим кодовима (јединствени идентификатор опреме у микро мрежи).

Сваки потрошач или генератор који могу бити искључени као корективне управљачке акције на критичан догађај имају додељен приоритет. Оптимизациони алгоритам у оквиру FS функције прорачунава оптималну листу уређаја који ће бити искључени, како би се сачувала стабилност система и покрио дебаланс активне снаге. Циљ оптимизације је пронаћи најмањи број уређаја са најмањим приоритетом који ће бити искључени. Због овог захтева уводи се пенализација цене искључивања од 1 посто за сваки наредни генератор или потрошач који се искључују. Вредност од 1% добијана је током детаљног тестирања алгоритма. Превелика вредност пенализације може довести до искључивања мањег броја генератора са вишим приоритетом, док мања вредност пенала дозвољава велики број искључивања. Један посто представља емпиријски добијен баланс.

У случају критичних догађаја типова 1 до 3, FS мора да гаси потрошаче како би се одржала стабилност система, док у случајевима 4 до 6 генератори морају бити искључени. Иако су случајеви 2 и 3, као и 5 и 6 слични, разлика је у томе што случајеви 3 и 6 могу бити изазвани догађајима изван микро мреже.

Оптимизациони алгоритам базиран је на методи оптимизације ројева (енгл. *Particle Swarm Optimization* – PSO).

PSO је стохастичка метода оптимизације базирана на ројевима честица. Први пут су је предложили научници Кенеди и Еберхарт (Kennedy, Eberhart) [96]. Инспирацију за ову оптимизациону процедуру пронашли су у понашању јата птица и риба. PSO тражи

оптимално решење у простору решења користећи популацију јединки. Свака јединка представља једну комбинацију прекидача и разматра се као решење оптимизационог проблема. Јединка са најмањом грешком на крају оптимизационе процедуре означава се као решење. Предложени алгоритам претражује простор решења тражећи комбинацију прекидача потрошача или генератора који треба да буду искључени. Простор решења има онолико димензија колико је потенцијалних прекидача разматрано као решење проблема.

Алгоритам имплементиран у овој докторској дисертацији има 50 јединки које претражују простор решења и критеријум за прекид претраживања је да јединке у два узастопна претраживања не направе напредак у односу на оптимизациони критеријум, или да се достигне максимално дефинисан број итерација. Број јединки одређен је током детаљног и интензивног тестирања и представља баланс између брзине конвергенције и потребних хардверских ресурса. Јединке које се крећу кроз димензије могу имати вредности 0 за отворени прекидач или 1 за затворени.

Предложени оптимизациони проблем дефинисан је као:

$$\min_{u_n, u_m} \{Cost\} = \sum_{n=1}^N \alpha_n C_n(u_n(P_n(t))) \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n C_n(u_n(P_n(t)))}{100} N + \sum_{m=1}^M \alpha_m C_m(u_m(P_m(t))) \frac{\sum_{m=1}^M \alpha_m C_m(u_m(P_m(t)))}{100} M \quad (19)$$

Уз уважавање ограничења:

$$\beta \left[ \sum_{n=1}^N P_n(t) + \sum_{m=1}^M P_m(t) \right] = P_{shed}, \quad (20)$$

где су:

$\sum_{n=1}^N \alpha_n C_n(u_n(P_n(t)))$  – цена искључивања генератора;

$N$  – број искључених генератора;

$\alpha_n$  – приоритет  $n$ -тог генератора;

$C_n(u_n(P_n(t)))$  – цена искључивања  $n$ -тог генератора;

- $\frac{\sum_{n=1}^N \alpha_n C_n(u_n(P_n(t)))}{100} N$  – пенализациони фактор за искључивање генератора, где сваки додатни генератор повећава трошак за 1 %;
- $\sum_{m=1}^M \alpha_m C_m(u_m(P_m(t)))$  – цена искључивања некритичних потрошача;
- $M$  – број искључених потрошача;
- $C_m(u_m(P_m(t)))$  – цена искључивања  $n$ -тог потрошача;
- $\alpha_m$  – приоритет  $n$ -тог потрошача;
- $\frac{\sum_{m=1}^M \alpha_m C_m(u_m(P_m(t)))}{100} M$  – пенализациони фактор за искључивање потрошача, где сваки додатни потрошач повећава трошак за 1 посто;
- $P_{shed}$  – укупна активна снага која треба бити искључена;
- $P_n$  – активна снага  $n$ -тог генератора који ће бити искључен;
- $P_m$  – активна снага  $m$ -тог потрошача који ће бити искључен;
- $\beta$  – корективни фактор (користи се за скалирање циљане потрошње која треба бити искључена, како би се осигурала стабилност система после искључивања).

Прорачунато решење шаље се на RTU сваких пет минута, тако да када се критичан догађај деси, једина комуникација која је потребна јесте она од опреме у пољу до RTU-а и на крају до прекидача. Нема потребе за додатном комуникацијом са споријом SCADA-ом. Овако је осигуран брз одговор, типично до 200 милисекунди, који може обезбедити стабилност учестаности у микро мрежи.

### 6.2.3 APV базирана $Q$ - $V$ регулациона контура

$P$ - $f$  регулациона контура служи за регулацију системске учестаности и размене активне снаге и ова контура је први задатак КММ. Пошто је прорачунао управљање за ову регулацију, наредни задатак КММ је одржавање напона на чворовима у оквиру техничких граница. Стога КММ надгледа напоне у предефинисаним стратешки важним чворовима у микро мрежи. Ако КММ детектује нарушавање граница,

активира се VVM функција, чији је задатак одржавање напона у оквиру граница користећи ресурсе за управљање из формуле (21). Приоритет VVM функције је нижи од  $P$ - $f$  регулације, тако да се VVM функција извршава тек пошто је учестаност враћена у дозвољене оквире.

Критеријум оптимизације  $Q$ - $V$  регулационе контуре у тренутку  $t$  дат је као MIQR проблем:

$$\min_{\Delta Q_g(t), \Delta Q_c(t), \Delta a_t(t)} \sum_{i=1}^N \Delta V_i^n(t)^2, \quad (21)$$

Уз уважавање ограничења:

1. Биланс реактивне снаге (производња = потрошња):

$$\sum_{g=1}^G Q_g(t) + Q_e^i(t) + \sum_{c=1}^C Q_c(t) + \sum_{m=1}^M Q_m(t) = \sum_{d=1}^D Q_d(t) + \sum_{n=1}^N Q_n(t) + Q_{losses}(t) + Q_e^e(t), \quad (22)$$

2. Доње и горње границе напона:

$$V_i^{\min} \leq V_i(t) = V_i^o(t) + \Delta V_i(t) \leq V_i^{\max}; \quad i = 1, 2, \dots, N_V; \quad (23)$$

3. Минимални и максимални ток реактивне снаге из ресурса:

$$Q_g^{\min} \leq Q_g^o(t) + \Delta Q_g(t) \leq Q_g^{\max}; \quad g = 1, 2, \dots, G; \quad (24)$$

$$Q_c^{\min} \leq Q_c^o(t) + \Delta Q_c(t) \leq Q_c^{\max}; \quad \Delta Q_c(t) = t_c(t) \Delta Q_c^{step}, \quad t_c(t) = 1, 2, \dots, t_c^{\max}; \quad (25)$$

4. Минимална и максимална позиција регулационе склопке на трансформаторима:

$$a_t^{\min} \leq a_t^o(t) + \Delta a_t(t) \leq a_t^{\max}; \quad \Delta a_t(t) = t_t(t) \Delta a_t^{step}, \quad t_t(t) = 1, 2, \dots, t_t^{\max}, \quad (26)$$

где је (део нотације дат после једначине. (3)):

$\Delta V_i^n(t) = V_i^n - V_i(t)$  – одступање напона  $i$ -тог чвора у односу на задати напон ( $V_i^n$ );

$C$  – укупан број кондензатора;

$Q_{losses}(t)$  – губици реактивне снаге у микро мрежи у тренутку  $t$ , одређени  $B$ -коэффицијент формулом за реактивне губитке [слично губицима активне снаге дато у једначини (3)];

$V_i^o(t)$  – базна тачка напона  $i$ -те чвора у моменту  $t$ ;

$N_V$  – број чворова са ограниченим напонима;

- $Q_g^o(t)$  – базна тачка реактивне снаге  $g$ -тог генератора у моменту  $t$ ;
- $Q_c^o(t)$  – базна тачка реактивне снаге  $c$ -тог кондензатора у моменту  $t$ ;
- $a_t^o(t)$  – базна тачка позиције регулационе склопке  $t$ -тог трансформатора у моменту  $t$ ;
- $\Delta Q_c^{step}$  – корак промене  $c$ -тог кондензатора;
- $\Delta a_t^{step}$  – корак промене позиције регулационе склопке  $t$ -тог трансформатора;
- $t_c^{\max}$  – максимална број позиција  $c$ -тог кондензатора;
- $t_t^{\max}$  – максималан број позиција регулационе склопке  $t$ -тог трансформатора.

Осетљивости су добијене из линеаризоване једначине токова снага [28]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta a \end{bmatrix}, \quad (27)$$

или за  $\Delta P = 0$  (одвојено решење за  $P$ - $\theta$  и  $Q$ - $V$  потпроблеме):

$$\Delta Q = \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial a} \end{bmatrix} - \frac{\partial Q}{\partial \theta} \left( \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial a} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta a \end{bmatrix}. \quad (28)$$

#### 6.2.4 Прогнозе

KMM поседује четири одвојене функције задужене за прорачуне прогноза. То су NTLF, STLF, NTRGF и STRGF које прорачунавају прогнозу потрошње и производње обновљивих извора енергије на различитим временским скалама, како је објашњено у поглављу 6.1. Све четири функције прогнозе базиране су на истој технологији која се назива Метода потпорних вектора (енгл. *Support Vector Machine* – SVM) [97].

Функције за прогнозе састоје се од три модула:



распрострањена међу методама за прогнозу потрошње и производње обновљивих извора. MAPE се дефинише као

$$MAPE = \left( \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \right) \times 100, \quad (29)$$

где је

$x_i$  – остварена вредност и

$y_i$  – прогнозирана вредност у одређеном тренутку.

# 7. Примена

Примена приказаног контролера приказана је на тест систему и симулацијама различитих услова рада микро мреже.

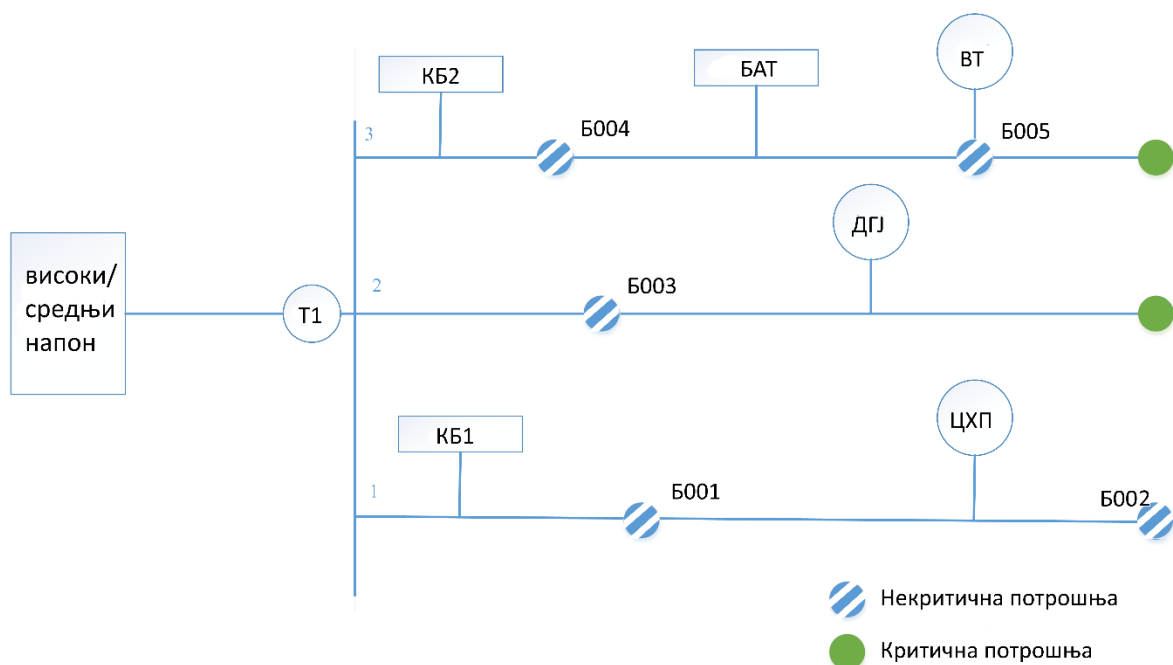
## 7.1 Тест систем

Тест систем микро мреже који је коришћен у симулацијама састоји се од три радијална извода из трансформаторске станице, како је приказано на слици 10. На изводима се налазе следећи уређаји:

1. Извод 1: кондензаторске батерије 2 (КБ1), когенерациона електрана (енгл. *Combined Heat and Power – CHP*) и контролабилна (некритична) потрошња.
2. Извод 2: дизел генераторска јединица (ДГЈ), контролабилна и неконтролабилна (критична) потрошња.
3. Извод 3: кондензаторске батерије 1 (КБ2), систем за складиштење енергије (БАТ), ветротурбина (ВТ), контролабилна и неконтролабилна потрошња.

Тест систем садржи једну тачку за повезивање са главном мрежом (Т1). Када се прекидач на тој тачки отвори, микро мрежа прелази у острвски режим рада.





Слика 10. Шематски приказ тест система

Производне јединице могу се класификовати у две групе:

1. Контролабилне, којима се може послати команда са радном тачком (СНР, батерија и дизел генераторска јединица).
2. Неконтролабилне (ветрогенератор).

Потрошачи се такође могу класификовати у две групе:

1. Неконтролабилна потрошња (критични потрошачи).
2. Контролабилна потрошња (некритични потрошачи).

Критични потрошачи су они потрошачи чије напајање представља приоритет рада КММ и не смеју се искључити са мреже. Некритични потрошачи имају придружен приоритет (од 1 до 20, где је 1 највиши приоритет), који се узима у обзир приликом прорачуна плана искључивања потрошача.

Списак компоненти са одговарајућим функционалним карактеристикама дат је у Табели 2. Вредности за улазно-излазне криве су теоријске вредности преузете из [98], где су цене горива преузете из [93]. Улазно-излазне криве, заједно са ценама горива, формирају ценовне криве производње приказане у Табели 2. Цене енергије из увоза и криве емисије CO<sub>2</sub> преузете су из [98]. Криве производње ветрогенератора, брзина ветра и криве потрошње добијене су љубазношћу електродистрибуције Burbank Water and Power из града Бурбанк, Калифорнија, САД [84].

Табела 2. Параметри опреме у тест систему

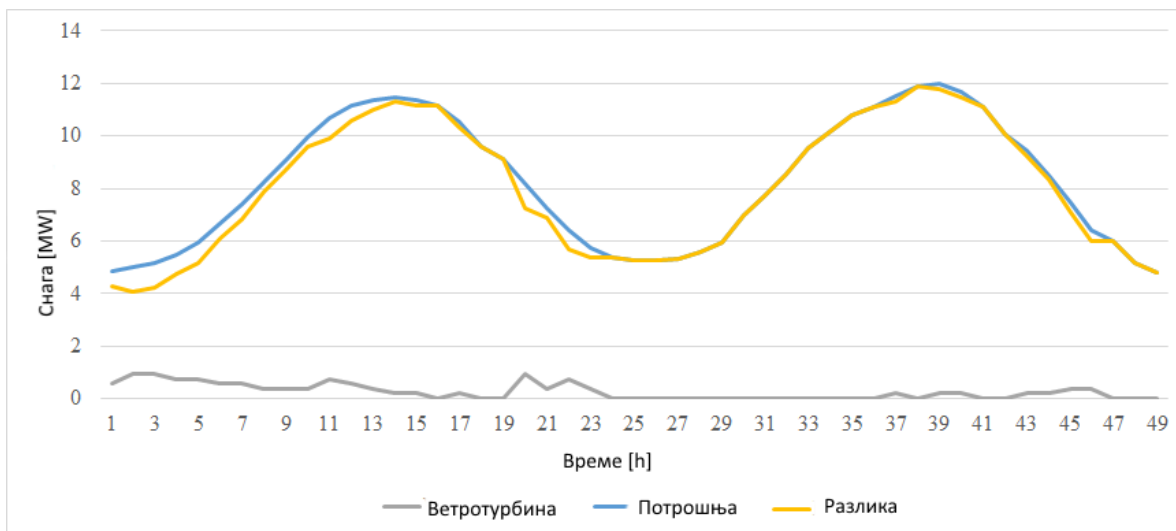
Јединица	Минимална снага [MW]	Максимална снага [MW]	Максимална дозвољена промена снаге на горе [MW/мин]	Максимална дозвољена промена снаге на доле [MW/мин]	Ценовна крива, [\$, \$/MW, \$/MW <sup>2</sup> ]	Коефицијент емисије [кг CO <sub>2</sub> /MWh]
СНР	3	7	2.5	2.5	444, 45.35, 0.027233	553
Дизел генераторска јединица	0.5	2	2	2	1216, 121.62, 0.0735532	821
Ветрогенератор	0	1.5	није применљиво	није применљиво	није применљиво	0
Систем за складиштење енергије	0	0.4	0.4	0.4	1, 0.2, 0.015	0
Главна мрежа	0	20	20	20	није применљиво	0

Систем микро мреже коришћен за симулације моделован је у софтверском алату Matlab/Simulink, уз коришћење Simpowersystems библиотеке [99].

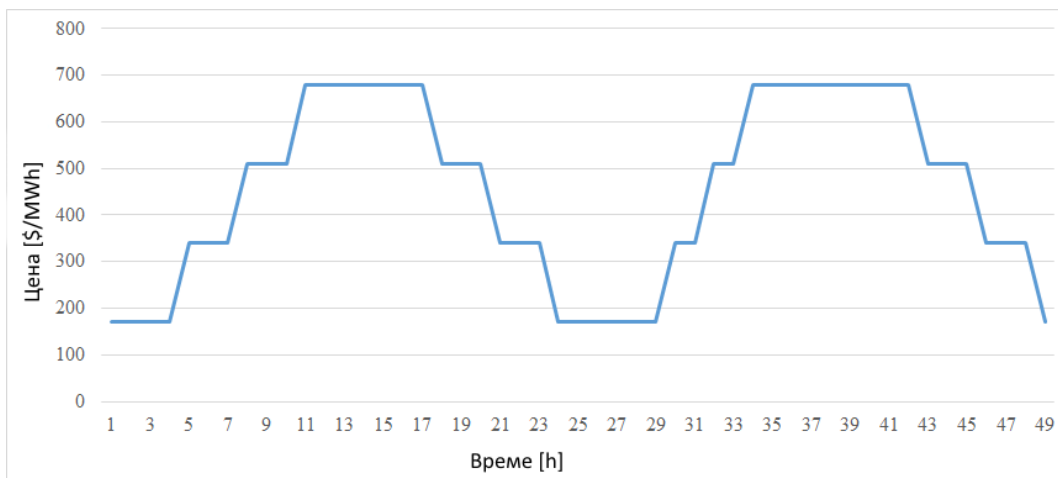
Рад микро мреже подељен је на повезани, острвски и хаваријски режим рада са различитим оперативним захтевима. Функционалност КММ у поменути три мода рада тестирана је током једног временског периода. У току предложеног временског периода који траје два дана, микро мрежа пролази сва три радна стања. Током првог дана микро мрежа ради у повезаном режиму, а затим се током другог дана симулирају проблеми због којих прелази у хаваријски режим рада, одакле на крају другог дана прелази у острвски режим рада.

Ова непрекидна линија времена приказује комплетан животно циклус микро мреже и одговарајуће понашање КММ.

Посматрани период је приказана на слици 11, где су приказане крива потрошње, крива захтева за снабдевањем (разлика између потрошње и неконтролабилне производње) и крива прогнозе рада обновљивих извора енергије. Цене увоза енергије приказане су на слици 12.



Слика 11. Криве потрошње и производње обновљивих извора



Слика 12. Цене енергије у посматраном периоду

## 7.2 Комуникација међу агентима

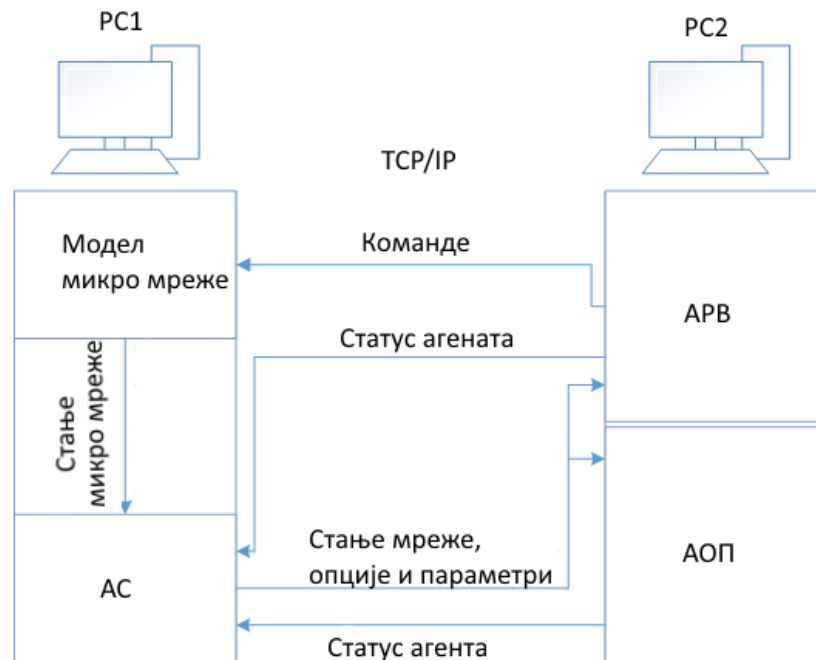
Први корак у иницијализацији комуникационог система је дефинисање речника који ће бити коришћен од стране агената у току њихове комуникације. Речник се састоји од чињеница о систему које су:

1. Мерења и константе система.
2. Параметри који се састоје од системских опција, типова података и регионалних подешавања.
3. Уобичајених вредности (користе се ако неке некритичне вредности нису доступне).

Комуникација између агената је изграђена кроз Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) [100] у форми web сервиса, уз коришћење Simple Object Access Protocol (SOAP) [101] отвореног стандарда за web сервисе. Сваки агент објављује скуп апликативних метода које могу бити коришћене за достављање или прикупљање порука од стране других агената. Web сервиси су имплементирани уз употребу Microsoft .NET WCF технологије [102].

Комуникациони систем је организован на начин да су симулациони модел микро мреже и АС инсталирани на једном рачунару (PC1) док су АРВ и АОП инсталирани на другом (PC2), као што је приказано на слици 13.

Функционална комуникација између агената објашњена је у Табели 1.



Слика 13. Симулациони систем

Предности овакве архитектуре КММ је да агенти могу да се извршавају на дистрибуираним рачунарима и да микро мрежа може бити управљана са удаљених рачунара.

### 7.3 Повезани режим рада

У моменту  $t = 0$  прелиминарни распоред рада микро мреже се формира следећим корацама:

Током првог корака АС одређује оперативне услове рада и повезаност уређаја (видети слике 7 и 8). Кључни параметри који се одређују у овом процесу су следећи:

1. Режим рада микро мреже (повезани или острвски).
2. Сигнали са поља који могу окинути команду за прелазак у хаваријски режим рада.
3. Повезаност уређаја.

Ове информације се комуницирају са RTU.

Током другог корака обавља се интеграција са удаљеним системима (видети слику 8). Ову интеграцију обавља АС и током овог процеса добавља се временска прогноза и цене енергије на тржишту. Ове информације се шаљу ка АОП.

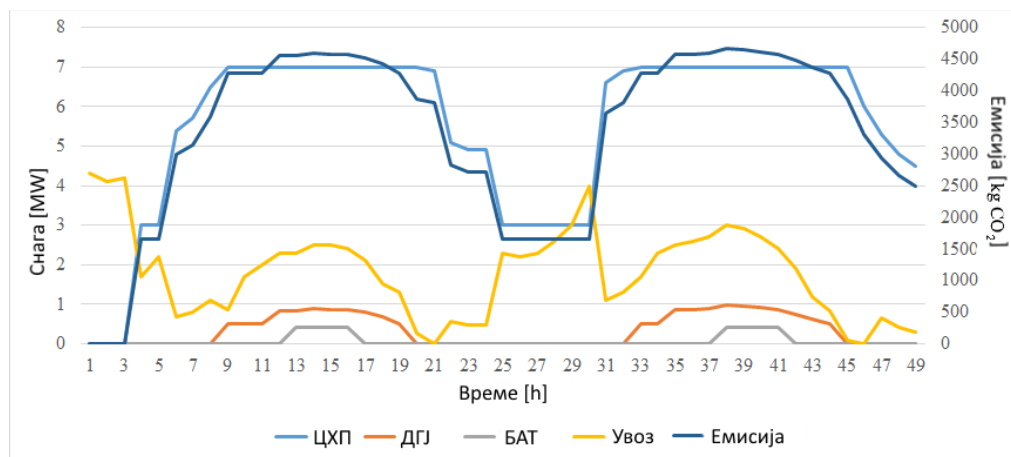
Током трећег корака примају се потенцијални захтеви за сервисима од стране главне дистрибутивне мреже. АС послушкује захтеве за подршком регулацији учестаности, захтеве за ротационом резервом или искључивањем потрошње. У зависности од оперативног мода (рад у реалном времену или оперативно планирање), ове информације се шаљу ка АРВ или АОП. Процес се понавља у циклусима у зависности од агента. Подаци који се шаљу као АРВ комуницирају сваке две секунде, док подаци ка АОП комуницирају сваких пет минута.

У наредним корацима прорачунавају се краткорочне прогнозе (STLF и STRGF), оптимални распоред рада генератора и економске радне тачке за наредна два дана (посматрани период). Током посматраног периода планирано је да микро мрежа ради у повезаном режиму рада, јер је прорачун тај резултат израчунао као оптималан. АОП, користећи економски диспечинг и функцију за прорачун оптималног ангажовања генератора, даје оптимални распоред рада на сатном нивоу – видети слику 14. Већина захтеване снаге генерише се локално у СНР електрани. Такође, може се видети и значајан увоз из главне мреже током периода са ниском ценом (ноћу). Током дневног

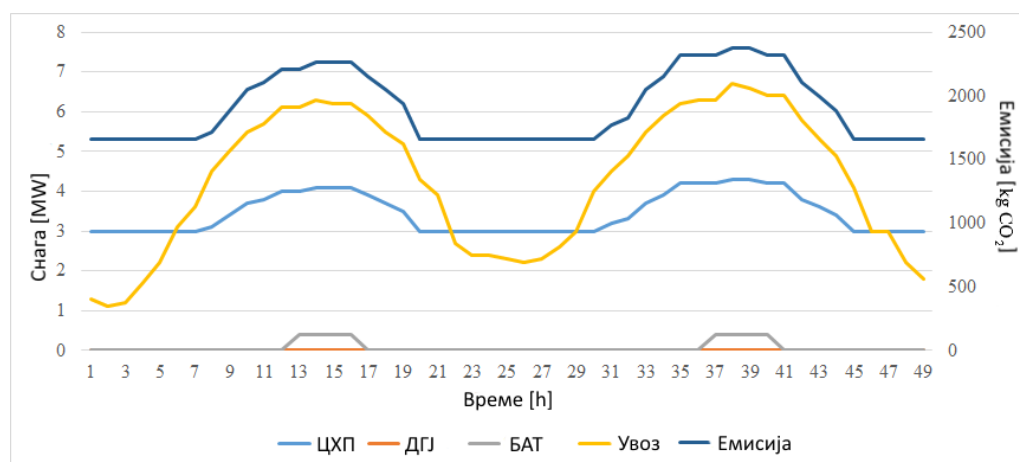
рада, увоз из главне мреже варира у односу на цене и захтеве за енергијом. Дизел генераторска јединица и систем за складиштење енергије се користе само током вршног периода. Емисије су приказане на секундарној вертикалној оси. У овом оперативном моду емисије нису коришћене као ограничење приликом оптимизације.

На тржиштима на којима постоје јасни и стриктни еколошки прописи, мора се додати и ограничење на емисије. КММ укључује ову регулацију кроз додатно ограничење приликом оптимизационог процеса као и коришћењем одговарајућег скупа тежинских фактора у једначини 2.

У овом примеру постоји захтев да максимална емисија угљеника може да износи 2,4 тоне. КММ укључује додатно ограничење и подешава тежинске факторе у циљу повећања искористивости извора са мало или потпуно без емисија (куповина енергије). У примеру без ограничења на емисије сви тежински фактори су 1, док у примеру са ограничењем тежински фактор на куповину енергије се смањује на 0,85 чиме се фактички смањује цена енергије која се купује у оптимизационом процесу. Распоред рада уређаја при овом ограничењу може се видети на слици 15 где се може приметити смањено коришћење дизел генераторске јединице и СНР.



Слика 14. Распоред рада за посматрани период без ограничења на емисије



Слика 15. Распоред рада за посматрани период са ограничењем на емисије

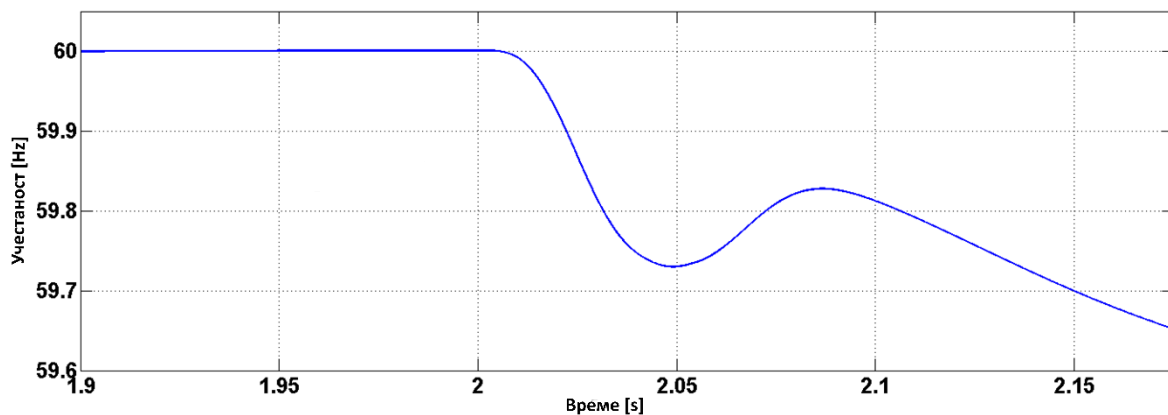
#### 7.4 Хаваријски режим рада

Други режим рада примењен је на почетку другог дана током ког је микро мрежа радила у повезаном режиму рада и увозила 2 MW. Током овог увоза прекидач који спаја микро мрежу са главном мрежом се отвара (на пример због квара на повезном воду ка главној мрежи). АС прима ову информацију од SCADA система и комуницира је АРВ и АОП. АОП користи ову информацију да би поново прорачунао оптималну ангажованост агрегата у наредних седам дана. Део АРВ који ради на SCADA нивоу користи ову информацију да би пребацио AGC из режима *константна снага размене* у режим *константна учестаност*, док део АРВ који ради на RTU користи ову информацију да би прорачунао и послао команде за искључивање потрошње.

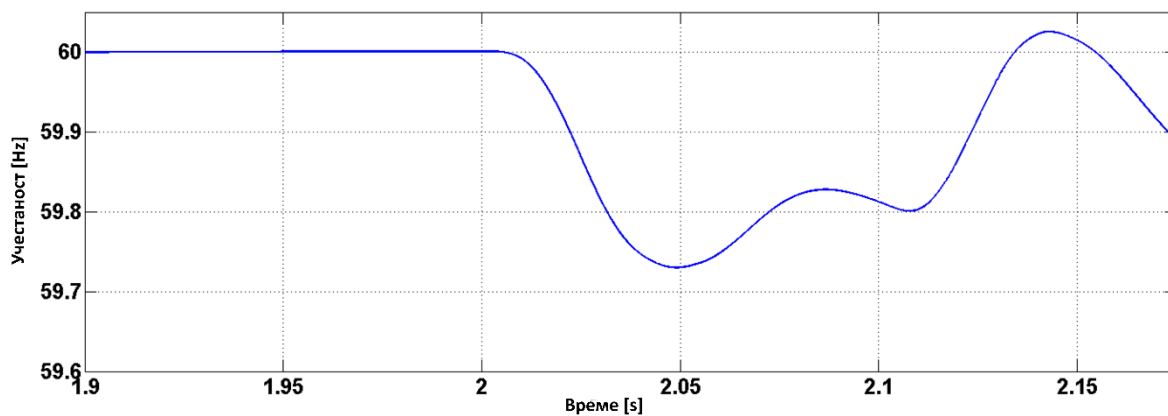
Како више не постоји увоз снаге из главне мреже, дебаланс активне снаге доводи до значајне девијације учестаности. Слика 16а приказује варијацију учестаности у случају када нема искључивања потрошње, док слика 16б приказује учестаност када FS искључује потрошњу. Вредности учестаности добијене су симулацијама у Matlab/Simulink алату, уз коришћење Simpowersystems библиотеке.

Микро мрежа се суочава са значајним пропадом учестаности у само 200 милисекунди, што је веома кратак период за било какве значајније реакције генератора. Овај пример приказује значај FS функције. Неизвесно је да ли би микро мрежа могла да одржи функционалност након овако велике варијације учестаности. После стабилизације учестаности (као резултат искључења потрошње FS функцијом) микро мрежа наставља рад у острвском режиму рада.

FS се одређује табела искључивања (видети поглавље 6.2.2.2) и прорачунава да се прекидачи Б002 и Б003 морају отворити како би се елиминисао дебаланс снаге од 2 MW. Табела искључивања приказана је у Табели 3.



*а. Без искључивања потрошње*



*б. Са искључивањем потрошње*

*Слика 16. Учестаност у микро мрежи приликом преласка у острвски режим рада*

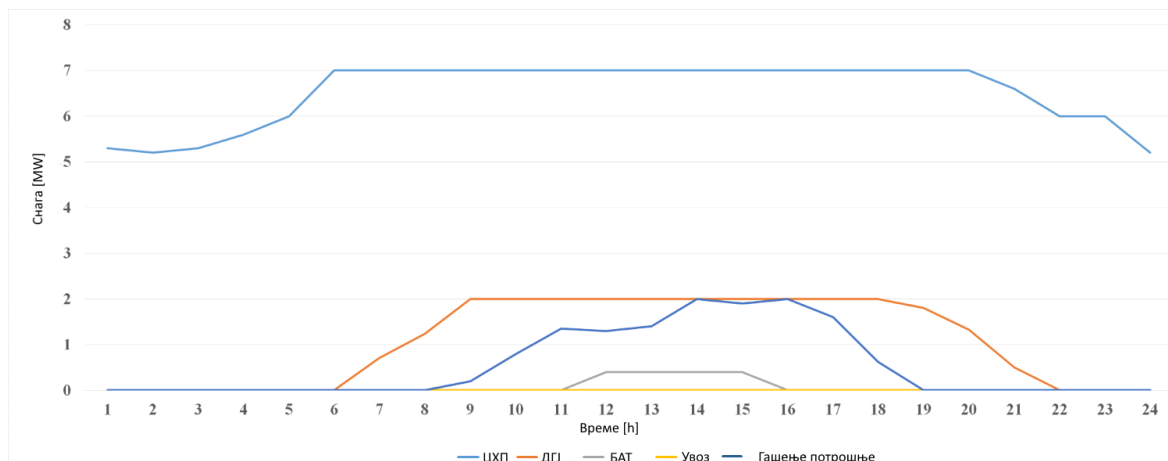
Табела 3. Табела искључивања потрошње

#	Тип догађаја	Опис	Искључена снага [MW]	Код прекидача за отварање [1]	Код прекидача за отварање [2]
1	1	Прелазак у хаваријски режим рада приликом увоза енергије	2	Б002	Б003



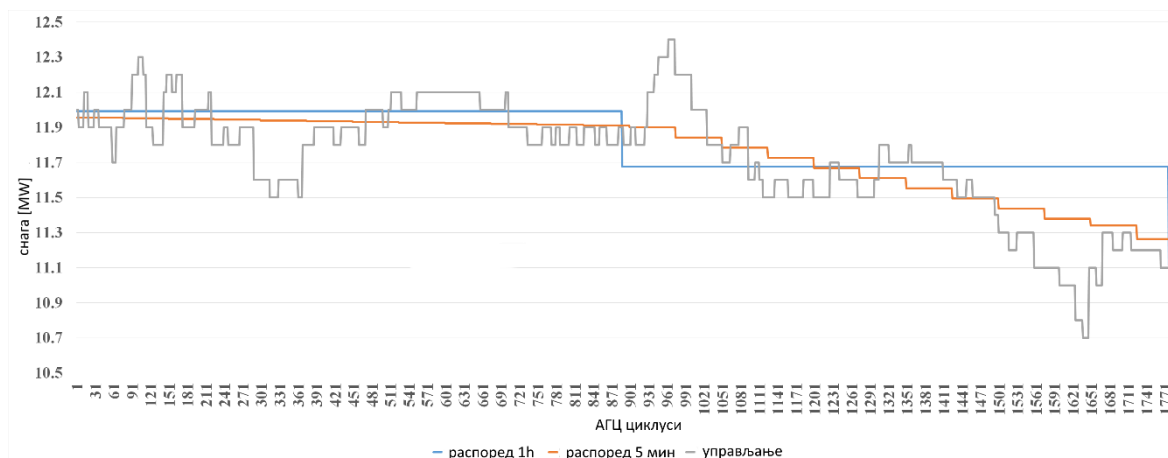
## 7.5 Острвски режим рада

У наставку тест сценарија, микро мрежа наставља рад у острвском режиму и КММ, користећи АОП, поново прорачунава распоред рада ресурса (генератора, система за складиштење електричне енергије и управљања потрошњом) што је приказано на слици 17. КММ користи другачији распоред рада уређаја у односу на повезани режим. Током острвског рада не постоји увоз енергије из главне мреже те према томе искључивање потрошње постаје валидан ресурс за регулацију. У овом примеру искључивање потрошње се значајно користи током вршних сати.



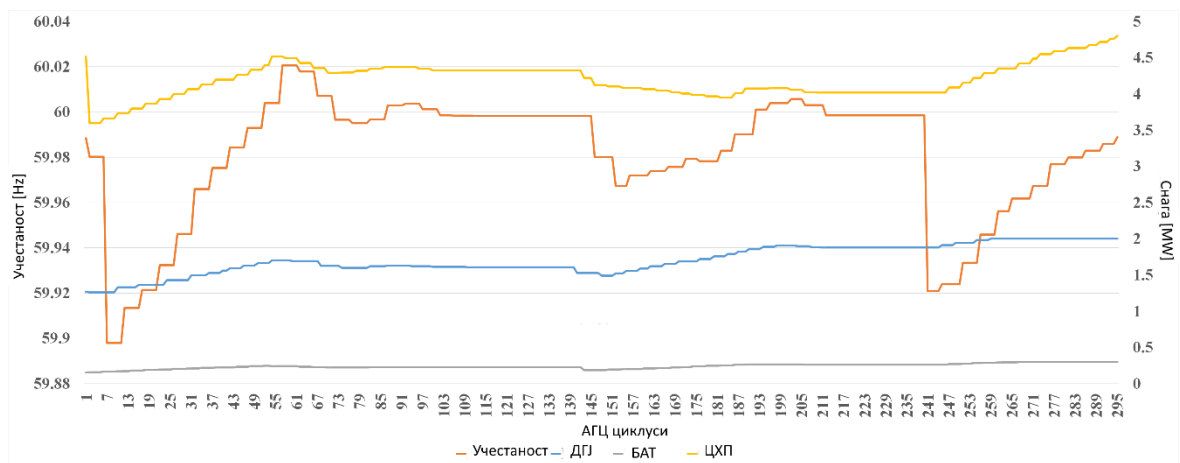
Слика 17. Распоред рада за острвски режим

Слика 18 приказује криве АОП резултата са резолуцијом од једног сата и са резолуцијом од пет минута као и команде AGC-а послате у реалном времену сваке четири секунде. Може се приметити како су ове криве прорачунате уважавајући грешке прогноза. График приказује податке за период од укупно 2 сата и то од 14. до 16. сата другог дана (x оса почиње у 14:00 другог дана).



Слика 18. Распоред рада и управљачке команде

Слика 19 приказује промену учестаности у микро мрежи као и послате команде за радне тачке свих ресурса (дизел генераторска јединица, когенерациона електрана и систем за складиштење енергије) и острвском режиму рада за три нивоа пораста потрошње. АС надгледа вредност учестаност сваке две секунде и шаље одговарајуће податке ка АРВ. АРВ командује уређајима у микро мрежи користећи АГС функцију у сарадњи са оптималним радним тачкама добијеним од економског диспечинга уважавајући стање система, регулациону грешку области, техничка ограничења и параметре КММ задате од стране оператора.



Слика 19. Управљање учестаношћу у острвском режиму рада

После стабилног острвског рада, микро мрежа се може вратити у повезани режим, а што излази из ових разматрања.

# 8. Закључак

У овој докторској дисертацији представљен је нови контролер микро мреже (КММ). Он је базиран на софтверским агентима и дистрибуираној управљачкој архитектури, што додатно повећава робусност управљачког система. У односу на до сада развијена решења овде су направљена следећа унапређења:

1. Нови модел контролера - употребљени су софтверски агенти за решавање обједињеног проблема управљања и оптимизације рада микро мреже током комплетног животног циклуса рада. КММ може се користити у сва три режима рада микро мреже (повезани, острвски и хаваријски) и ради у оба оперативна мода рада, рад у реалном времену и рад у моду оперативног планирања. Додатно, обухваћен је и хаваријски режим рада који је до сада био занемарен у објављеним радовима.
2. Свеобухватност броја и врста величина које се разматрају – предложено решење узима значајан број величина приликом оптимизације што представља унапређење у односу на постојеће моделе. Додатни допринос приликом оптимизација односи се на модел за прогнозе потрошње и производње обновљивих извора енергије који омогућава оптимизацију будућих стања микро мреже.
3. Флексибилна оптимизациона вишекритеријумска функција са подесивим тежинским факторима која остварује различите оптимизационе циљеве (економија, стабилност и емисија угљен-диоксида), поштујући различита техничка и нетехничка ограничења обезбеђује оптималан рад микро мреже.

Сва ова разматрања су илустрована одговарајућим примерима.

Даље унапређење приказаног решења може се одвијати у правцу интеграције са системом за менаџмент дистрибутивних мрежа (енгл. *Advanced Distribution Management System* – ADMS). Приказано решење је предвиђено за имплементацију на нивоу микро мреже, а интеграција са ADMS би омогућила холистички увид у рад дистрибутивног система и оптимални прорачун на нивоу целе дистрибутивне мреже, такозвани режим мулти микро мрежа. Ово би било постигнуто тиме што би систем за

менаџмент дистрибутивних мрежа прорачунавао глобални оптимум рада целе мреже у поређењу са локалним оптимумом рада појединачних микро мрежа.

# Литература

- [1] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [2] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, 2008.
- [3] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [4] C. C. L. Moreira, "Identification and development of microgrids emergency control procedures," University of Porto, 2015.
- [5] Executive office of the President, "The President's Climate Action Plan," 2013. [Online]. Available:  
<https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/image/president27sclimateactionplan.pdf>. [Accessed 16. 3. 2014.].
- [6] US. Dep. of. Energy, "Hurricane Katrina Situation Report," US Department of Energy, 2005.
- [7] K. Webley, "TIME Magazine," 26 November 2012. [Online]. Available:  
<http://nation.time.com/2012/11/26/hurricane-sandy-one-month-later/>. [Accessed 17. March 2015].
- [8] E. Strickland, "A Microgrid That Wouldn't Quit," IEEE, 26. 10. 2011. [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/a-microgrid-that-wouldnt-quit>. [Accessed 1. 5. 2015].
- [9] IEA, "Energy poverty," IEA, [Online]. Available:  
<http://www.iea.org/topics/energypoverty/>. [Accessed 17. 1. 2015.].

- [10] Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy, "Summary Report: 2012 DOE Microgrid," 2012. [Online]. Available: <http://energy.gov/sites/prod/files/2012%20Microgrid%20Workshop%20Report%2009102012.pdf>. [Accessed 1. 4. 2015.].
- [11] S.-J. Ahn, S.-R. Nam, J.-H. Choi, S.-I. Moon, "Power Scheduling of Distributed Generators for Economic and Stable Operation of a Microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 398 - 405, 2013.
- [12] E. Mayhorn, K. Kalsi, M. Elizondo, "Optimal control of distributed energy resources using model predictive control," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
- [13] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 3, pp. 258 - 267, 2011.
- [14] C. Zhao, J. Wang, J.-P. Watson, Y. Guan, "Multi-Stage Robust Unit Commitment Considering Wind and Demand Response Uncertainties," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2708 - 2717, 2013.
- [15] Y. Tan, Y. Cao, C. Li, Y. Li, Z. Zhang, S. Tang, "Microgrid stochastic economic load dispatch based on two-point estimate method and improved particle swarm optimization," *International Transaction on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 10, p. 2144 – 2164, 2014.
- [16] R. Palma-Behnke, C. Benavides, F. Lanas, B. Severino, L. Reyes, J. Llanos, D. Sáez, "A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 996 - 1006, 2013.
- [17] T. Logenthiran, D. Srinivasan, "Short term generation scheduling of a Microgrid," in *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, 2009.
- [18] K. Dietrich, J. M. Latorre, L. Olmos, A. Ramos, "Demand Response in an Isolated System With High Wind Integration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 20 - 29, 2011.
- [19] Y. Zhang, N. Gatsis, G. B. Giannakis, "Robust Energy Management for Microgrids With High-Penetration Renewables," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944 - 953, 2013.

- [20] A. Khodaei, "Microgrid Optimal Scheduling With Multi-Period Islanding Constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1383 - 1392, 2014.
- [21] L. Guo, W. Liu, B. Jiao, B. Hong, C. Wang, "Multi-objective stochastic optimal planning method for stand-alone microgrid system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 7, pp. 1263 - 1273, 2014.
- [22] Microgrids, "Microgrids," [Online]. Available: [www.microgrids.eu](http://www.microgrids.eu).
- [23] M. J. Guerrero, C. J. Vasquez, J. Matas, L. García de Vicuna, M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, 2010.
- [24] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids — A Novel Approach," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 1018 - 1031, 2014.
- [25] A. S. Pourmousavi, H. S. Nehrir, "Real-Time Central Demand Response for Primary Frequency Regulation in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1988 - 1996, 2012.
- [26] L. Gan, T. Yu, J. Li, J. Tang, "Smart Scheduling Strategy for Islanded Microgrid Based on Reinforcement Learning Algorithm," *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 1, no. 1, p. 122–128, 2012.
- [27] C. Battistellia, A. J. Conejob, "Optimal management of the automatic generation control service in smart user grids including electric vehicles and distributed resources," *Electric Power Systems Research*, vol. 111, no. 1, p. 22–31, 2014.
- [28] C. M. Colson, H. M. Nehrir, "Comprehensive Real-Time Microgrid Power Management and Control With Distributed Agents," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 617 - 627, 2013.
- [29] Q. Jiang, M. Xue, G. Geng, "Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380 - 3389, 2013.

- [30] J. Xiao, L. Bai, F. Li, H. Liang, C. Wang, "Sizing of Energy Storage and Diesel Generators in an Isolated Microgrid Using Discrete Fourier Transform (DFT)," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 907 - 916, 2014.
- [31] D. E. Olivares, C. A. Canizares, M. Kazerani, "A Centralized Energy Management System for Isolated Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1864 - 1875, 2014.
- [32] A. Selakov, D. Bekut, A. T. Saric, "A novel agent-based microgrid optimal control for grid-connected, planned island and emergency island operations," *International Transaction on Electrical Energy Systems*, vol. 26, no. 9, pp. 1999-2022, 2016.
- [33] W. G. Scott, "Micro-turbine generators for distribution systems," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 57-62, 1998.
- [34] P. A. Pilavachi, "Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power," *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 18, pp. 2003-2014, 2002.
- [35] O. Fethi, L. A. Dessaint, K. Al-Haddad, "Modeling and simulation of the electric part of a grid connected microturbine," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004.
- [36] Y. Zhu, K. Tomsovic, "Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells," *Electric Power Systems Research*, vol. 62, no. 1, pp. 1-11, 2002.
- [37] R. Lasseter, "Dynamic models for micro-turbines and fuel cells," *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, 2001.
- [38] Eg&g Technical Services Inc and U. S. Department of Energy, Fuel Cell Handbook (Sixth Edition), DIANE Publishing, 2002.
- [39] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, H. Peng, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer-Verlag London, 2004.
- [40] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, 2005.
- [41] I. Munteanu, A. Iuliana Bratcu, N.-A. Cutululis, E. Ceanga, Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach, Springer Science & Business Media, 2008.



- [42] S. S. Soman, H. Zareipour, O. P. Malik, P. Mandal, "A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons," *North American Power Symposium (NAPS), 2010*, 2010.
- [43] J. G. Slootweg, "Wind Power: Modelling and Impact on Power System Dynamics," Doctoral thesis, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2003.
- [44] S. A. Papathanassiou, M. P. Papadopoulous, "Mechanical Stresses in Fixed-Speed Wind Turbines Due to Network Disturbances," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 12, pp. 67-76.
- [45] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar, G. Azevedo, "Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator," *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009.
- [46] M. P. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999.
- [47] B. Lindgren, "A Power Converter for Photovoltaic Applications," PhD thesis, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2000.
- [48] E. F. Camacho, M. B. Soria, F. F. Rubio, D. Martínez, *Control of Solar Energy Systems*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [49] T. L. Vandoorn, B. Meersman, J. D. De Kooning, L. Vandevelde, "Analogy Between Conventional Grid Control and Islanded Microgrid Control Based on a Global DC-Link Voltage Droop," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1405 - 1414, 2012.
- [50] H. Laaksonen, P. Saari, R. Komulainen, "Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid," *2005 International Conference on Future Power Systems*, 2005.
- [51] L. D. Watson, J. W. Kimball, "Frequency regulation of a microgrid using solar power," *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011.
- [52] M. G. Molina, P. E. Mercado, "Modeling and control of grid-connected photovoltaic energy conversion system used as a dispersed generator," *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2008.

- [53] S. Adhikari, F. Li, "Coordinated V-f and P-Q Control of Solar Photovoltaic Generators With MPPT and Battery Storage in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1270 - 1281, 2014.
- [54] G. S. Stavrakakis, G. N. Kariniotakis, "A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction. I. A general multimachine power system model," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, pp. 577 - 583, 1995.
- [55] B. Kuang, Y. Wang, Y. Lin Tan, "An H controller design for diesel engine systems," *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings*, 2000.
- [56] S. Roy, O. P. Malik, G. S. Hope, "A least squares based model fitting identification technique for diesel prime movers with unknown dead time," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, no. 2, pp. 251-256, 1991.
- [57] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009.
- [58] R. Huggins, *Energy Storage*, Springer Science & Business Media, 2010.
- [59] B. Dunn, H. Kamath, J.-M. Tarascon, "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices," *Science*, vol. 334, no. 6058, pp. 928-935, 2011.
- [60] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi, D. Poli, "Control techniques of Dispersed Generators to improve the continuity of electricity supply," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, 2002.
- [61] J. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916 - 924, 2006.
- [62] P. J. Lopes, C. L. Moreira, F. O. Resende, "MicroGrids Black Start and Islanded Operation," in *5 th Power Systems Computation Conference*, Liege, 2005.
- [63] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, S. Meliopoulos, R. Yinger, J. Eto, "The CERTS MicroGrid Concept," *Transmission Reliability Program*

Office of Power Technologies Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy , 2002.

- [64] K. A. Nigim, W.-J. Lee, "Micro Grid Integration Opportunities and Challenges," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [65] A. K. Basu, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, D. Ray, P. A. Crossley, "Reliability study of a micro-grid power system," in *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference*, 2008.
- [66] R. H. Lasseter, "Extended certs microgrid," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
- [67] H. Bevrani, S. Shokoohi, "An Intelligent Droop Control for Simultaneous An Intelligent Droop Control for Simultaneous Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1505 - 1513, 2013.
- [68] G. Diaz, C. Gonzalez-Moran, J. Gomez-Aleixandre, A. Diez, "Scheduling of Droop Coefficients for Frequency and Voltage Regulation in Isolated Microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 489 - 496, 2009.
- [69] H.-K. Kang, S.-J. Ahn, S.-I. Moon, "A new method to determine the droop of inverter-based DGs," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009.
- [70] Y. A. Abass, T. A. Al-Awami, T. Jamal, "Integrating automatic generation control and economic dispatch for microgrid real-time optimization," in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2016.
- [71] G. Mallesham, S. Mishra, A. N. ha, "Automatic generation control of microgrid using artificial intelligence techniques," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
- [72] C. L. Moreira, F. O. Resende, J. A. Peas Lopes, "Using Low Voltage MicroGrids for Service Restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 395 - 403, 2007.
- [73] A. Arif, Z. Wang, "Service restoration in resilient power distribution systems with networked microgrid," in *Power and Energy Society General Meeting*, 2016.

- [74] J. Rocabert, G. Azevedo, I. Candela, R. Teoderescu, P. Rodriguez, I. Etxebarria-Otadui, "Microgrid connection management based on an intelligent connection agent," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010.
- [75] T. Tantimaporn, S. Jiyajan, S. Payakkarueng, "Microgrid islanding operation experience," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2013.
- [76] H. Gao, Y. Chen, Y. Xu, C.-C. Liu, "Dynamic load shedding for an islanded microgrid with limited generation resources," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 12, pp. 2953 - 2961, 2016.
- [77] G. Liu, B. Xiao, M. Starke, O. Ceylan, K. Tomsovic, "A robust load shedding strategy for microgrid islanding transition," in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2016.
- [78] IEEE, "IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power," IEEE Std 1547-2003, 2003.
- [79] IEEE, "IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting," IEEE Std 1547.1-2005, 2005.
- [80] IEEE, "IEEE application guide for IEEE Std 1547(tm), IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," IEEE Std 1547.2-2008, 2009.
- [81] IEEE, "IEEE guide for monitoring, information exchange, and control of distributed resources interconnected with electric power systems," IEEE Std 1547.3-2007, 2007.
- [82] IEEE, "IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems," IEEE Std 1547.4-2011, 2011.
- [83] IEEE, "IEEE recommended practice for interconnecting distributed resources with electric power systems distribution secondary networks," IEEE Std 1547.6-2011, 2011.
- [84] A. Selakov, D. Cvijetinovic, L. Milovic, S. Mellon, D. Bekut, "Hybrid PSO-SVM method for short-term load forecasting during periods with significant temperature variations in city of Burbank," *Applied Soft Computing*, vol. 16, no. 1, p. 80 – 88, 2014.
- [85] A. Selakov, S. Ilic, S. Vukmirovic, F. Kulic, A. Erdeljan, Z. Gorecan, "A comparative analysis of SVM and ANN based hybrid model for short term load forecasting," in *PES T&D 2012*, 2012.

- [86] S. Ilic, A. Selakov, S. Vukmirovic, A. Erdeljan, F. Kulic, "Short-term load forecasting in large scale electrical utility using artificial neural network," *Journal of scientific and industrial research*, vol. 72, pp. 739-745, 2013.
- [87] N. Hatziargyriou, A. Dimeas, A. Tsikalakis, "Centralized and decentralized control of microgrids," *International Journal of Distributed Energy Resources*, vol. 1, no. 3, pp. 197 - 212, 2005.
- [88] N. Jaleeli, L. S. VanSlyck, D. N. Ewart, "Understanding automatic generation control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 1106 - 1122, 1992.
- [89] A. Mehrizi-Sani, R. Iravani, "Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1883 - 1891, 2010.
- [90] S. D. J. McArthur, E. M. Davidson, V. M. Catterson, A. L. Dimeas, N. D. Hatziargyriou, F. Ponci, T. Funabashi, "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1743 - 1752, 2007.
- [91] Q. Li, F. Chen, M. Chen, J. M. Guerrero, D. Abbott, "Agent-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 637 - 649, 2016.
- [92] H. S. V. S. Kumar Nunna, S. Doolla, "Multiagent-Based Distributed-Energy-Resource Management for Intelligent Microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1678 - 1687, 2013.
- [93] S. Hadi, *Power system Analysis*, 3rd edition, PSA Publishing, 2010.
- [94] "MSDN," Microsoft, [Online]. Available: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms731082..> [Accessed 6 2014].
- [95] B. Hassan, *Robust Power System Frequency Control*, Springer US, 2009.
- [96] L. Wang, C. Singh, "PSO-based Hybrid Generating System Design Incorporating Reliability Evaluation and Generation/Load Forecasting," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2008.
- [97] C. Cortes, V. Vapnik, "Support-Vector Networks," *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273 - 297, 1995.

- [98] "EIA," [Online]. Available: <http://www.eia.gov> . [Accessed 11 2016].
- [99] "Mathworks," Mathworks, [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/simpower/> . [Accessed July 2014].
- [100] CISCO, "TCP/IP Overview," CISCO, 2005. [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/routing-information-protocol-rip/13769-5.pdf>. [Accessed 1. 5. 2016].
- [101] Microsoft, "Understanding SOAP," Microsoft, 3 2003. [Online]. Available: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms995800.aspx>. [Accessed 21. 4. 2016].
- [102] "MSDN," Microsoft, [Online]. Available: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ff524509\(v=vs.93\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ff524509(v=vs.93).aspx). [Accessed November 2015].
- [103] A. H. Hajimiragha, M. R. Dadash Zadeh. S. Moazeni, "Microgrids Frequency Control Considerations Within the Framework of the Optimal Generation Scheduling Problem," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 534 - 547, 2015.
- [104] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2346 - 2352, 2008.
- [105] E. S. Agency, "Space-based Solar Power," European Space Agency, 2015. [Online]. Available: <http://www.esa.int/gsp/ACT/nrg/projects/SPS.html>. [Accessed 4 6 2015].
- [106] P. Asmus, M. Lawrence, "Microgrid Enabling Technologies," Navigant Research, 2014.