



РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИСКИ
ТЕХНОЛОГИИ



м-р Наташа Димишкова Крстески

**ПРИМЕНА НА ПОДОБРЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА
РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТ ПРОИЗВЕДЕНА ОД СИСТЕМИ ЗА
ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА ВО МИКРОМРЕЖИ**

- Докторски труд -

Скопје, 2026



РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИСКИ
ТЕХНОЛОГИИ



м-р Наташа Зоран Димишковска Крстески

ПРИМЕНА НА ПОДОБЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА
РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТ ПРОИЗВЕДЕНА ОД СИСТЕМИ ЗА ОБНОВЛИВИ
ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА ВО МИКРОМРЕЖИ

- Докторски труд -

Скопје, 2026

Докторанд:
НАТАША ЗОРАН ДИМИШКОВСКА КРСТЕСКИ

Тема:
ПРИМЕНА НА ПОДОБРЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА
МОКНОСТ ПРОИЗВЕДЕНА ОД СИСТЕМИ ЗА ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА ВО
МИКРОМРЕЖИ

Ментор:

проф. д-р АТАНАС ИЛИЕВ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски
технологии

Комисија за одбрана:

проф. д-р ДИМИТАР ДИМИТРОВ (претседател)
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски
технологии

проф. д-р АТАНАС ИЛИЕВ (ментор),
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски
технологии

проф. д-р АНТОН ЧАУШЕВСКИ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски
технологии

проф. д-р МИРКО ТОДОРОВСКИ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски
технологии

вон. проф. д-р ХРИСТИЈАН ЃОРЕСКИ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски
технологии

Лектор:
Дијана Ристова

Научна област:
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Датум на одбрана:
3.6.2026

**ПРИМЕНА НА ПОДОБРЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА
РАСПРЕДЕЛБА НА МОКНОСТ ПРОИЗВЕДЕНА ОД СИСТЕМИ ЗА ОБНОВЛИВИ
ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА ВО МИКРОМРЕЖИ**

– А п с т р а к т –

Експоненцијалниот развој на технологијата, забрзаната индустријализација и континуираното зголемување на потрошувачката на електрична енергија во сите потрошувачки сектори доведуваат до постојан раст на побарувачката за електрична енергија. Истовремено, климатските промени, зголемената емисија на стакленички гасови и ограничената достапност на фосилни горива ја наметнуваат потребата од развој и примена на еколошки прифатливи и одржливи начини за производство на електрична енергија. Во овој контекст, микромрежите се наметнуваат како еден од клучните концепти за интеграција на обновливи извори на енергија и децентрализирано производство, овозможувајќи флексибилно, сигурно и економски ефикасно снабдување со електрична енергија, со можност за работа и во мрежен и во островски режим.

Но, и покрај бројните предности, микромрежите претставуваат сложени електроенергетски системи кои вклучуваат различни типови генератори, системи за складирање на енергија и флексибилни потрошувачи, а нивната работа е дополнително усложнета од променливите услови на производство, оптоварување и од цените на електричната енергија. Поради тоа, постои изразена потреба од примена на напредни методи за оптимизација и управување со тековите на моќности, кои ќе обезбедат економски оптимална и технички сигурна работа на микромрежите.

Оваа докторска дисертација предлага нов оптимизациски метод базиран на генетски алгоритам, наречен Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA), наменет за симултана оптимизација на оперативните трошоци и напонските варијации кај микромрежи приклучени на електродистрибутивната мрежа. Клучниот придонес на предложениот алгоритам е воведувањето на модифициран селекциски механизам, при што процесот на селекција не се базира исклучиво на најдобрите, односно елитните индивидуи, туку контролирано ги вклучува и помалку конкурентните решенија. Критериумот за селекција е дефиниран врз основа на средната вредност на популацијата и перформансот на елитната индивидуа, со што се овозможува зголемена разновидност на популацијата, подобрена конвергенција и намалена веројатност за предвремено заглавување во локален оптимум.

Предложениот алгоритам е применет за оптимизација на работата на микромрежи кои вклучуваат обновливи извори на енергија, конвенционални генератори, системи за складирање и флексибилни товари, при што истовремено се земаат предвид економските и техничките ограничувања на системот. Верификацијата на алгоритамот е извршена со тестирање на стандардни мултимодални тест-функции (Растрингин и Окли функции). Дополнително, алгоритамот е тестиран на различни топологии на микромрежи и на референтни IEEE тест-системи, а добиените резултати се споредени со резултати од стандарден генетски алгоритам, негови напредни варијанти (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) и други современи методи за оптимизација (Differential Evolution with Heuristic, Improved Differential Evolution, Multi-Objective Particle Swarm Optimization). Споредбената анализа покажува дека MGES-GA обезбедува подобри перформанси на системите во однос на намалување на оперативните трошоци, подобрување на напонската стабилност и брзината на конвергенција на алгоритамот.

Резултатите од ова истражување ја потврдуваат ефикасноста, робушноста и пошироката применливост на MGES-GA, при што се покажува дека алгоритамот може успешно да се примени и на поголеми и посложени микромрежи. Со тоа, оваа докторска дисертација дава значаен научен и практичен придонес кон развојот на напредни методи за оптимизација и управување со современи микромрежи и претставува цврста основа за понатамошни истражувања и реална имплементација во паметни електроенергетски мрежи.

Клучни зборови: Генетски алгоритам, метод на селекција, микромрежи, оптимизација, обновливи извори на енергија, напонски прилики, оперативни трошоци.

MSc Natasha Zoran Dimishkovska Krsteski

APPLICATION OF AN ENHANCED GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMAL POWER FLOW IN MICROGRIDS WITH RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

– A b s t r a c t –

The exponential development of technology, accelerated industrialization, and the continuous increase in electricity consumption across all consumer sectors have led to a persistent growth in electricity demand. At the same time, climate change, rising greenhouse gas emissions, and the limited availability of fossil fuels impose the need for environmentally friendly and sustainable approaches to electricity generation. In this context, microgrids have emerged as a key concept for the integration of renewable energy sources and decentralized generation, enabling flexible, reliable, and cost-effective electricity supply, with the capability to operate in both grid-connected and islanded modes.

Despite their numerous advantages, microgrids represent complex power systems that incorporate diverse types of generation units, energy storage systems, and flexible loads. Their operation is further complicated by the variability of renewable generation, dynamic load profiles, and fluctuating electricity prices. Consequently, there is a strong need for advanced optimization and energy management methods that can ensure economically optimal and technically reliable operation of microgrid systems.

This doctoral dissertation proposes a novel optimization method based on a genetic algorithm, referred to as the Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA), designed for the simultaneous optimization of operating costs and voltage variations in grid-connected microgrids. The main contribution of the proposed algorithm lies in the introduction of a modified selection mechanism. Unlike conventional genetic algorithms that rely solely on elite individuals, the proposed approach allows for the controlled participation of both elite and less competitive individuals in the evolutionary process. The selection criterion is defined based on the population's mean fitness value and the performance of the elite individual, thereby enhancing population diversity, improving convergence behavior, and reducing the risk of premature convergence to local optima.

The proposed algorithm is applied for optimizing the operation of microgrids that include renewable energy sources, conventional generators, energy storage systems, and flexible loads, while simultaneously considering the economic and technical constraints of the system. The verification of the algorithm is performed by testing it on standard multimodal benchmark functions (Rastrigin and Ackley functions). Additionally, the algorithm is tested on different microgrid topologies and on reference IEEE test systems, and the obtained results are compared with those from a standard genetic algorithm, its advanced variants (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), and other modern optimization methods ((Differential Evolution with Heuristic, Improved Differential Evolution, Multi-Objective Particle Swarm Optimization). The comparative analysis shows that MGES-GA provides better system performance in terms of reducing operational costs, improving voltage stability, and increasing the convergence speed of the algorithm.

The results obtained in this research confirm the effectiveness, robustness, and generalizability of the proposed MGES-GA algorithm. The findings indicate that the algorithm can be successfully applied to larger and more complex microgrid systems without sacrificing solution quality or computational efficiency. Therefore, this doctoral dissertation provides a significant scientific and practical contribution to the development of advanced optimization and energy management methods for modern microgrids and establishes a solid foundation for future research and real-world implementation in smart power systems.

Keywords : Genetic Algorithm, Selection methods, Microgrids, Optimization, Renewable Energy Sources, Voltage deviations, Operational costs

Благодарност

Докторските студии претставуваат долг и предизвикувачки процес, кој не може да се изоди без поддршката и насоките од вистинските луѓе. Овој труд е резултат не само на индивидуален ангажман, туку и на поддршката, разбирањето и мотивацијата што ги добив од луѓето околу мене.

Најпрво, сакам да изразам голема благодарност до мојот ментор, проф. д-р Атанас Илиев, за несебичната поддршка од самиот почетокот на мојата академска кариера и за неговата значајна улога во мојот кариерен развој, насочувајќи ме секогаш кон правиот пат. Му благодарам за трпението, советите, одвоеното време и залагањата во сите етапи во процесот на докторските студии.

Исто така, искрена благодарност изразувам до членовите на Комисијата за нивните стручни совети, забелешки и конструктивни критики, кои во значајна мера придонесоа за подобрување на квалитетот и заокружување на овој труд.

Сакам да изразам благодарност и до колегите од Институтот за електрични центри и разводни постројки, проф. д-р Антон Чаушевски, проф. д-р Димитар Димитров, проф. д-р Софија Николова Поцева и проф. д-р Невенка Китева Роглева, за нивните совети, поддршка и охрабрување, кои придонесоа за мојот професионален и личен развој.

Посебна благодарност изразувам и на моето семејство, мојата мајка Дијана, мојот татко Зоран и мојот брат Дејан, за постојаната љубов, разбирање и поддршка во текот на целото мое студирање.

Конечно, најголема благодарност на мојот сакан сопруг Марјан, мојот животен партнер, за безрезервната љубов и поддршка, разбирање и трпение, во текот на овој значаен период.

И секако, благодарност и до мојот син Андреј, кој со својата љубов и присуство претставува постојан извор на мотивација и инспирација.

*Со почит,
Наташа*

Изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд што го имам изработено самостојно.

Своерачен потпис на докторандот
(на електронската верзија потпис и скратеницата с.р.)

(на електронската верзија на докторски труд)

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

Потпис на авторот, с.р.

СОДРЖИНА

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ	IX
ЛИСТА НА СЛИКИ	X
НОМЕНКЛАТУРА	XI
1. ВОВЕД	1
1.1. Позадина и МОТИВАЦИЈА	1
1.2. ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	3
1.3. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКАТА РАБОТА	4
1.4. ОЧЕКУВАН ПРИДОНЕС ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	5
1.5. СТРУКТУРА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА	7
2. ПРЕГЛЕД НА ДОСТИГНУВАЊАТА ВО НАУЧНАТА ОБЛАСТ	10
2.1. МОДИФИКАЦИИ НА ГЕНЕТСКИОТ АЛГОРИТАМ ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ	14
2.2. КОМБИНАЦИЈА НА ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ СО ДРУГИ ОПТИМИЗАЦИСКИ МЕТОДИ ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ 17	
2.3. ДОСЕГАШНИ НАУЧНИ ДОСТИГНУВАЊА ОД ПОТЕСНАТА ОБЛАСТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ	19
3. ДЕФИНИРАЊЕ НА ИСТРАЖУВАЧКИОТ ПРОБЛЕМ	28
3.1. ДЕФИНИРАЊЕ НА МИКРОМРЕЖИТЕ И НИВНИТЕ КОМПОНЕНТИ	28
3.1.1. МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА	30
3.1.2. ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА	33
3.1.3. ПРЕДИЗВИЦИ ПРИ РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА	36
3.2. ПРИМЕНА НА ГЕНЕТСКИТЕ АЛГОРИТМИ ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО СОВРЕМЕНИТЕ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА.....	37
3.2.1. СТАНДАРДЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ	39
3.2.2. ПРЕДИЗВИЦИ ПРИ ПРИМЕНА НА СТАНДАРДЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА	46
3.2.3. ПОТРЕБАТА ОД ПОДОБРЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ	47
3.2.4. ПОДОБРУВАЊА ВО ПРОЦЕСОТ НА СЕЛЕКЦИЈА.....	48
3.2.5. МОДИФИКАЦИИ ВО ПРОЦЕСОТ НА ВКРСТУВАЊЕ И МУТАЦИЈА	51
4. ФОРМУЛАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКИОТ ПРОБЛЕМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА	53
4.1. ПОДОБРУВАЊЕ НА СТАНДАРДНИОТ ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ	54
4.2. ДЕФИНИРАЊЕ НА ОПЕРАТОРИТЕ.....	55
4.2.1. ДЕФИНИРАЊЕ НА ОПТИМИЗАЦИСКА ФУНКЦИЈА	55
4.2.2. ДЕФИНИРАЊЕ НА ВЛЕЗНИ ОГРАНИЧУВАЊА	60
4.2.3. ИНИЦИЈАЛИЗАЦИЈА НА ПАРАМЕТРИ	65

4.2.4.	ЕВАЛУАЦИЈА НА ПАРАМЕТРИ.....	66
4.2.5.	СЕЛЕКЦИЈА НА ИНДИВИДУИ.....	68
4.2.6.	ПРОЦЕС НА ВКРСТУВАЊЕ	70
4.2.7.	ПРОЦЕС НА МУТАЦИЈА	71
4.2.8.	КРИТЕРИУМ ЗА ЗАПИРАЊЕ.....	72
4.3.	БЛОК-ДИЈАГРАМ НА АЛГОРИТАМОТ	73
5.	ВЕРИФИКАЦИЈА НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА	76
5.1.	ВЕРИФИКАЦИЈА НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ СО ПОМОШ НА РАСТРИГИНОВА ФУНКЦИЈА	76
5.2.	ВЕРИФИКАЦИЈА НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ СО ПОМОШ НА ОКЛИ ФУНКЦИЈА	77
6.	СИМУЛАЦИЈА НА СЛУЧАИ НА АНАЛИЗА	80
6.1.	ТЕСТ-СИСТЕМ 1: СИМУЛАЦИЈА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE – ЕВРОПСКА НИСКОНАПОНСКА МРЕЖА.....	80
6.2.	ТЕСТ-СИСТЕМ 2: СИМУЛАЦИЈА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE 33-BUS МРЕЖА СО РАЗЛИЧНИ ТИПОВИ НА ДИСПЕРЗИРАНИ ГЕНЕРАТОРИ.....	83
6.3.	ТЕСТ-СИСТЕМ 3: СИМУЛАЦИЈА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE 33-BUS МРЕЖА СО СТАНИЦИ ЗА ПОЛНЕЊЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА	86
7.	АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО	91
7.1.	СПОРЕДБА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО СТАНДАРДЕН ГЕНЕТИСКИ АЛГОРИТАМ	91
7.2.	СПОРЕДБА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО РЕЗУЛТАТИ ОД ДРУГИ СОВРЕМЕНИ ОПТИМИЗАЦИСКИ АЛГОРИТМИ	96
7.2.1.	АНАЛИЗА НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТ ПРИ ОПТИМИЗАЦИЈА СО ЕДНА ПРОМЕНЛИВА	96
7.2.2.	СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА СО ПОСТОЕЧКИ ОПТИМИЗАЦИСКИ МЕТОДИ	99
7.3.	ДИСКУСИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ	106
8.	ЗАКЛУЧОК.....	110
8.1.	ПРИДОНЕС НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	111
8.2.	НАСОКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА	114
	ПРИЛОГ А - ПСЕВДОКОД НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ.....	116
	ПРИЛОГ В - IEEE - EUROPEAN LOW VOLTAGE FEEDER	119
	ПРИЛОГ С - IEEE 33-BUS NETWORK	124
	ТРУДОВИ ОБЈАВЕНИ ОД ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА	125
	ТРУДОВИ ОБЈАВЕНИ ВО СПИСАНИЈА СО ФАКТОР НА ВЛИЈАНИЕ	125
	ТРУДОВИ ОБЈАВЕНИ НА МЕЃУНАРОДНИ КОНФЕРЕНЦИИ.....	125
	ТРУД ОБЈАВЕН НА РАБОТИЛНИЦА	126
	КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА	127

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

ТАБЕЛА 2-1 ПРЕГЛЕД НА РЕФЕРЕНТНА ЛИТЕРАТУРА РЕЛЕВАНТНА ЗА СПОРЕДБА СО ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ-----	26
ТАБЕЛА 6-1 ТЕХНИЧКИ ОГРАНИЧУВАЊА НА ИНСТАЛИРАНАТА ОПРЕМА И ТРОШОЦИ ЗА ТЕКОВНО РАБОТЕЊЕ И ОДРЖУВАЊЕ -----	83
ТАБЕЛА 6-2 ТОЧКИ НА ПРИКЛУЧУВАЊЕ НА ИНСТАЛИРАНИТЕ ГЕНЕРАТОРИ, НИВНАТА ИНСТАЛИРАНА АКТИВНА МОЌНОСТ И ИНСТАЛИРАН КАПАЦИТЕТ НА БАТЕРИЈАТА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE 33-BUS ТЕСТ-МРЕЖА -----	84
ТАБЕЛА 6-3 ШЕМА НА КУПОВНА И ПРОДАЖНА ЦЕНА НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА -----	85
ТАБЕЛА 6-4 ЈАЗЛИ НА ПОВРЗУВАЊЕ НА ИНСТАЛИРАНИТЕ ГЕНЕРАТОРИ И СТАНИЦИ ЗА ПОЛНЕЊЕ НА ЕВ, КАКО И НИВНАТА ИНСТАЛИРАНА АКТИВНА МОЌНОСТ И ИНСТАЛИРАН КАПАЦИТЕТ НА БАТЕРИЈАТА-----	89
ТАБЕЛА 7-1 ТЕХНИЧКИ ОГРАНИЧУВАЊА НА ИНСТАЛИРАНАТА ОПРЕМА ВО ИЛУСТРАТИВНИОТ МОДЕЛ НА МИКРОМРЕЖА-----	93
ТАБЕЛА 7-2 ЦЕНИ ЗА КУПЕНА И ПРОДАДЕНА ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГИЈА ВО РАМКИ НА ИЛУСТРАТИВНИОТ МОДЕЛ НА МИКРОМРЕЖА-----	93
ТАБЕЛА 7-3 СПОРЕДБА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО ПРИМЕНА НА РАЗЛИЧНИ МЕТОДИ НА СЕЛЕКЦИЈА КАЈ СТАНДАРДЕН ГЕНЕТИСКИ АЛГОРИТАМ-----	94
ТАБЕЛА 7-4 СПОРЕДБА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ПРИ КОРИСТЕЊЕ НА MGES-GA И DE-H [64] ЗА ОПТИМИЗАЦИЈА НА ТРОШОЦИ-----	97
ТАБЕЛА 7-5 СПОРЕДБА НА ПЕРФОРМАНСОТ НА MGES-GA И IDE [66] ЗА МИНИМИЗАЦИЈА НА ОПЕРАТИВНИ ТРОШОЦИ-----	97
ТАБЕЛА 7-6 СПОРЕДБА НА ОПЕРАТИВНИТЕ ТРОШОЦИ И ПРОФИТОТ ПРИ ПРИМЕНА НА MOPSO И MGES-GA -----	102
ТАБЕЛА 7-7 СПОРЕДБА НА ВРЕДНОСТИТЕ НА НАПОНСКИТЕ ВАРИЈАЦИИ ПРИ ПРИМЕНА НА MOPSO И MGES-GA -----	102
ТАБЕЛА 7-8 СПОРЕДБА НА РЕЗУЛТАТИ ДОБИЕНИ ОД АНАЛИЗА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE 33-BUS ТЕСТ-МРЕЖА СО ВКЛУЧЕНИ СТАНИЦИ ЗА ПОЛНЕЊЕ НА ЕВ -----	106
ТАБЕЛА ПРИЛОГ В-1 ПАРАМЕТРИ НА IEEE EUROPEAN LOW VOLTAGE FEEDER.....	119
ТАБЕЛА ПРИЛОГ В-2 ПАРАМЕТРИ НА ВОДОВИ ВО IEEE EUROPEAN LOW VOLTAGE FEEDER	123
ТАБЕЛА ПРИЛОГ С-1 ПАРАМЕТРИ НА IEEE 33-BUS МРЕЖА	124

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 2.1 Најчесто применуваните оптимизациски техники за оптимизација на микромрежи [9].....	11
Слика 3.1 Шематки приказ на структурата на современа микромрежа [80]	28
Слика 3.2 Повеќе микромрежи поврзани на еден извод.....	31
Слика 3.3 Микромрежи кои поврзани формираат синџир	31
Слика 3.4 Вгнездени микромрежи.....	32
Слика 3.5 Блок-дијаграм на стандарден генетски алгоритам	40
Слика 4.1 Блок-дијаграм на предложениот алгоритам.....	74
Слика 4.2 Блок-дијаграм на предложеното подобрување на генетскиот алгоритам.....	75
Слика 5.1 Облик на Растрингова функција	77
Слика 5.2 Облик на Окли функцијата	78
Слика 6.1 Модифицирана IEEE-нисконапонска дистрибутивна мрежа со вклучени генератори на ОИЕ, горивна ќелија, микротурбина и батериски систем	82
Слика 6.2 Влезни параметри во системот: цени на електричната енергија, крива на оптоварување, моќност од фовотоволтаичен и ветрогенератор [64] [66].....	83
Слика 6.3 Модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа.....	84
Слика 6.4 Влезни податоци за генерираната моќност од ФВС и ВГ, кривата на оптоварување и промената на цената на електричната енергија.....	85
Слика 6.5 Модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа која вклучува и станици за полнење на ЕВ [135].....	88
Слика 6.6 Крива на агрегирано оптоварување од сите потрошувачи и активна моќност генерирана од ФВС-систем и ВГ [135].....	89
Слика 6.7 Варијација на цените во анализираниот период [135].....	90
Слика 7.1 Илустративен модел на микромрежа поврзана на мрежа	92
Слика 7.2 Оптимално ангажирање на батеријата и оптимално тргување со мрежата ..	94
Слика 7.3 Варијации на напони во микромрежата во карактеристичните јазли по извршената оптимизација со предложениот алгоритам	95
Слика 7.4 Оптимална распределба на оптоварувањето во микромрежата со примена на MGES-GA.....	96
Слика 7.5 Распределба на оптоварувањето помеѓу активните генератори користејќи MGES-GA без ограничување на размената на моќност со мрежата	98
Слика 7.6 Распределба на оптоварувањето помеѓу активните генератори користејќи MGES-GA со ограничување на размената на моќност со мрежата	98
Слика 7.7 Варијации на нормализираните вредности на целната функција при примена на MGES-GA со земање превид на промената на тежинскиот фактор.....	99
Слика 7.8 Парето фронт на нормализираните вредности на оперативните трошоци и напонските варијации добиен со примена на MGES-GA	100
Слика 7.9 Споредба на Парето фронтони добиени со примена на MGES-GA и NSGA-II за оптимизација на трошоци и напонски варијации.....	101
Слика 7.10 Оптимална распределба на оптоварувањето помеѓу генераторите во модифицираната IEEE 33-bus тест-мрежа	103
Слика 7.11 Парето фронт при примена на MGES-GA на модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа	104
Слика 7.12 Оптимално ангажирање на батериите и на ДГ и размена на електрична енергија со мрежата во систем со станици за полнење на ЕВ	105

НОМЕНКЛАТУРА

Математички симболи

Симбол	Опис
Δt	Временски интервал за семплирање на податоци
x	Подолжна реактанса во Ω/km
V_r	Номинален напон
T	Анализиран временски период
r	Подолжна активна опторност во Ω/km
Q	Реактивна моќност
l	Растојание помеѓу јазли во мрежа во km
g	Оптимизациска функција
f_2	Функција на напонски варијации
f_1	Функција на оперативни трошоци
C	Вкупните трошоци во микромрежа
η^{dis}	Ефикасност на празнење на батеријата
$\eta^{dis,EV}$	Ефикасност на празнење на батеријата на електрично возило
η^{ch}	Ефикасност на полнење на батеријата
$\eta^{ch,EV}$	Ефикасност на полнење на батеријата на електрично возило
η^{MT}	Ефикасност на микротурбина
η^{FC}	Ефикасност на горивна ќелија
c^{wind}	Трошоци за генерирање на моќност од ветрогенератор
c^{sell}	Продажна цена на електричната моќност кон мрежа
$c^{run,MT}$	Оперативни трошоци за микротурбина
$c^{run,FC}$	Оперативни трошоци за горивната ќелија
$c^{maint,MT}$	Трошоци за одржување на микротурбина
$c^{maint,FC}$	Трошоци за одржување на горивната ќелија
c^{buy}	Куповна цена на електричната моќност од мрежа
c^{PV}	Трошоци за генерирање моќност од фотоволтаичниот генератор
Z_{ij}	Импеданса на гранка

$V_i^{(k)}(t)$	Напонот во јазолот i во итерација k
SoC^{EV}	Состојбата на наполнетост на батеријата на електрично возило
Q_t^{load}	Вкупната потрошувачка на реактивна моќност
Q^{grid}	Реактивна моќност разменета со мрежата
Q^{bat}	Реактивна моќност на батеријата
$p^{wind,max}$	Максималната генерирана моќност од ветрогенератор
$p_t^{EV,bat}$	Моќност на полнење/празнење на батеријата на електрично возило
$p^{sell,max}$	Максималната продадена моќност кон мрежата
p^{load}	Оптоварување на потрошувачите
p^{grid}	Моќност купена од/продадена на мрежа
$p^{buy,max}$	Максималната купена моќност од мрежата
$p^{bat_dis,max}$	Максимална моќност на празнење батерија
$p^{bat_ch,max}$	Максимална моќност на полнење батерија
p^{bat}	Моќност на полнење/празнење на батеријата
$p^{bat,max}$	Максималната моќност преземена или предадена на батеријата
p^{WT}	Моќност генерирана од ветрогенератор
p^{PV}	Моќност генерирана од фотоволтаичен генератор
$p^{PV,max}$	Максималната генерирана моќност од фотоволтаичниот систем
p^{MT}	Моќност предадена од микротурбина
p^{FC}	Моќност предадена од горивна ќелија
$p^{EV_bat_dis,max}$	Максималната моќност на празнење на батеријата на електрично возило
$p^{EV_bat_ch,max}$	Максималната моќност на полнење на батеријата на електрично возило
p^{EV_bat}	Моќноста на полнење/празнење на батеријата на електрично возило
$I_i^{inj,(k)}$	Струја која се инјектира во јазол i во момент t
C_{RES}	Функција на трошоци за производство за електрична енергија од ОИЕ
C_{grid}	Функција на паричните текови од тргувањето на микромрежата со енергетската мрежа
C_{DG}	Функција на трошоци за производство на електрична енергија од горивните ќелии и микротурбините
C_{bat}	Функција на трошоци за деградација на батеријата

Ω	Множество од гранки кои излегуваат од даден јазол
N_{wind}	Вкупен број на ветрогенератори во микромрежата
N_{PV}	Вкупен број на фотоволтаични генератори во микромрежата
N_{MT}	Вкупен број на микротурбини во микромрежата
N_{FC}	Вкупен број на горивни ќелии во микромрежата
N_{DG}	Вкупен број на дизел генератори во микромрежата
N_{bat}	Вкупен број на батерии во микромрежата
c^{bat}	Трошоци за оперативна работа и одржување на батеријата

Акроними

Кратенка	Опис
CPSO	Chaos Particle Swarm Optimization
DE-H	Differential Evolution with Heuristic
GCPT	Grey Cumulative Prospect Theory
GWO	Grey Wolf Optimization
MFPA	Modified Flower Pollination Algorithm
MGES-GA	Mean Guided Elite Selection Genetic Algorithm
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
MOSHEPO	Multi-Objective Spotted Hyena & Emperor Penguin
NSGA	Non Dominated Sorting Genetic Algorithm
OPF	Optimal Power Flow (Оптимална распределба на моќности)
PSO	Particle Swarm Optimization
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
БС	Батериски систем
ВГ	Ветрогенератор
ГА	Генетски алгоритам
ГЌ	Горивна ќелија
ДГ	Дизел генератор
ЕВ	Електрични возила
ЕЕС	Електроенергетски систем
КБ	Кондензаторска батерија
ККП	Комбинирана когенеративна постројка
МТ	Микротурбина
ММ	Микромрежа
ОИЕ	Обновливи извори на енергија
ФВС	Фотоволтаичен систем

1. ВОВЕД

1.1. ПОЗАДИНА И МОТИВАЦИЈА

Моменталната ситуација во енергетскиот сектор бара енергетски одржливи решенија кои ќе ја помогнат борбата во решавање на проблемите кои се јавуваат во животната средина како резултат на долгогодишното искористување на фосилните горива за производство на електрична енергија и транспорт. Иако, ОИЕ не се новитет, начинот на нивната употреба со цел децентрализирање на производството и распространетоста се актуелна тема кај истражувачите [1]. Како алтернативно решение се разгледува формирањето на заедници од микрогенератори на ОИЕ и потрошувачи во нивна близина, кои можат да работат и независно од електроенергетскиот систем.

Терминот микромрежа се дефинира како систем од микрогенератори (фотоволтаичен генератор, ветрогенератор, микробиогасни турбини, когенеративни постројки итн.) и потрошувачи, кои можат да бидат истовремено и произведувачи на електрична енергија, кои се во нивна непосредна близина и работат како една единица [2]. Микромрежите претставуваат диверзитет од конфигурации, во зависност од нивната намена (индустриски, комерцијални, за мали или за големи заедници, за потребите на војската итн.), начинот на управување (централизирани или децентрализирани), големината, од типот на мрежата (еднонасочна или наизменична струја), типот на напојување (типот на генераторите кои се во склоп на микромрежата), локацијата (урбана или рурална) итн. Поради тоа, креирањето на стандарди за нивна заштита и управување е предизвик [3].

Но, без разлика на типот на микромрежите, нивната работа има многубројни бенефити по однос на енергетскиот сектор и економијата на една држава, како и на животната средина и на самите потрошувачи. Бенефитите од имплементацијата на микромрежите во стандардниот енергетски систем вклучуваат [4]:

- Заштита од значителни промени во цената на електричната енергија.
- Економски бенефит: намалувањето на цената на електричната енергија кога има голема побарувачка, овозможува стабилност на фреквенцијата на преносната мрежа, вклучување во пазарот на електрична енергија со понуда според побарувачката.
- Континуирано снабдување со можност за островска работа во услови на испад на главната мрежа.
- Интегрирање на ОИЕ.
- Зголемена доверливост поради намалување на бројот на испади и неиспорака на електрична енергија до потрошувачите.
- Зголемен квалитет на електрична енергија. Имплементацијата на микромрежите овозможува подобра контрола на параметрите, особено во случај на критични потрошувачи.
- Поддршка на електроенергетскиот систем. Со можноста за островска работа и задоволување на сопствените потреби, се намалува веројатноста од појава на пикови и справување со големи оптоварувања на мрежата. Исто така, можат да послужат и како резервно напојување.

Иако досега постојат многубројни апликации на микромрежите насекаде низ светот [3], сепак, сè уште постојат предизвици со кои тие се соочуваат при нивната работа. Управувањето со токовите на моќност во микромрежите е сè уште актуелна тема на истражување. Подесувањето на параметрите во микромрежата, за нејзина оптимална работа бара примена на различни оптимизациски алгоритми со цел добивање задоволително решение. Иако, навидум тоа изгледа како едноставна работа, поради стохастичноста на производството и побарувачката на електрична енергија, како надополнување на сложеноста на микромрежите, оптимизацијата претставува голем предизвик. Ова особено се однесува на микромрежите кои содржат ФВС и ВГ, како типови на генератори кои не можат да се вклучат или исклучат според побарувачката, туку нивната генерирана енергија треба да се искористи во истиот момент на производство [3]. Од оваа причина во склоп на микромрежите се воведуваат и генератори кои можат да се вклучат/исклучат според побарувачката. Најчесто решение е употребата на ДГ. Но современите микромрежи тежнеат кон тоа да ја намалат употребата на фосилни горива, па поради тоа се вклучуваат БС. Предизвикот во овој случај е во ефективното координирање на системот за складирање на енергија со ФВС и ВГ и променливата побарувачка [3].

Дополнително, проблемите со кои се соочуваат микромрежите опфаќаат [4]:

- Проблеми при префрлувањето во островски режим, кое има големо влијание на фреквенцијата и напонот на микромрежата.
- Различни топологии на микромрежи и изнаоѓање на универзално решение за проблемот со оптимизацијата.
- Следење на производството и планирање на потрошувачката во островски режим.
- Одржување на напонските нивоа и испорака на квалитетна електрична енергија.
- Заштита на микромрежите.
- Одржување прифатливи цени и високи инвестициски трошоци.
- Административни и легални бариери. Непостоењето на регулатива за управување со микромрежите и регулатива за меѓусебно тргување ја отежнува нивната работа.

Денешните микромрежи се значително посложени од оние кои го дефинирале нивниот почетокот, главно поради разновидноста на дисперзираните генератори и застапеноста на потрошувачи – произведувачи на електрична енергија. Поради тоа, се јавува потреба од примена на машинско учење и вештачка интелигенција, како и употреба на различни оптимизациски методи за решавање на проблемот со оптимална работа на микромрежите. Тоа опфаќа распределба на енергијата во рамките на микромрежата, до потрошувачите и системот за складирање на електрична енергија, како оптимално преземање на енергија од локалната мрежа на која е таа приклучена со цел минимизација на трошоците.

Во литературата се среќава примена на различни оптимизациски методи за решавање на овој проблем. Примената зависи од сложеноста на проблемот и од параметрите кои се оптимизираат. Генетскиот алгоритам како еден од најчесто употребувани оптимизациски методи, има широк спектар на примена со голема агилност, па затоа наоѓа примена за решавање на инженерски проблеми, проблеми од областа на медицина, економија, логистика и други области [5]. Исто така, тој може да оптимизира различни типови на функции со повеќе локални минимума, функции со повеќе параметри, функции кои имаат недефинирани ограничувања, или функции кои се

стохастични. Една од неговите најголеми предности е тоа што има способност за решавање на многу сложени проблеми, кои се предизвик за останатите оптимизациски методи.

Генетскиот алгоритам наидува на предизвици при негова примена, од аспект на сложеноста на алгоритамот, како и од времетраењето за изнаоѓање на оптималното решение. Секој од овие недостатоци може делумно да се надмине со модифицирање на некој од процесите кои се одвиваат при потрагата на оптимално решение и ги вклучуваат, големината на почетната популација, процесот на евалуација, селекција, вкрстување (crossover) и мутација. Според [5], правилната селекцијата на индивидуи помага да се надмине проблемот со прерана конвергенција на алгоритамот, која е резултат на недоволната различност (диверзитет) на индивидуите и крајното решение, а изборот на почетна популација е важен за да се постигне поголем диверзитет на решението, но истовремено и да се намали времетраењето на работа на алгоритамот. Големата популација го забавува времето на извршување, но од друга страна, малата популација може да наведе до погрешни резултати.

1.2. ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Оптималната распределба на моќности (ОПМ) претставува комплексен оптимизациски проблем чија основна цел е да се одреди оптималната распределба на активната и реактивната моќност во електроенергетски систем, така што ќе се минимизира или оптимизира дефинирана целна функција, при истовремено почитување на техничките и оперативните ограничувања на мрежата. Во контекст на микромрежите, овој проблем добива дополнителна сложеност поради присуството на различни типови на извори на електрична енергија, вклучувајќи обновливи извори на енергија како фотоволтаични системи и ветрогенератори, како и диспечабилни генератори како горивни ќелии, микротурбини и дизел генератори. Дополнително, во системот се интегрирани батериски системи за складирање на електрична енергија, флексибилни потрошувачи и можност за двонасочна размена на електрична енергија со главната електроенергетска мрежа, што значително го зголемува бројот на променливи и ограничувања во оптимизацискиот процес.

Целта на оваа докторска дисертација е да се изврши оптимална распределба на моќностите во микромрежа поврзана со електроенергетската мрежа преку примена на унапреден генетски алгоритам. Предложеното подобрување е фокусирано на процесот на селекција на индивидуите, кој претставува еден од најкритичните чекори во еволутивните алгоритми, бидејќи директно влијае врз квалитетот, стабилноста и брзината на конвергенција на решенијата. За разлика од класичните генетски алгоритми, кои во најголема мера ги фаворизираат индивидуите со највисока оценка на погодност, предложениот пристап овозможува искористување на генетскиот потенцијал и на единките со пониска оценка на погодност. На тој начин се обезбедува поголем диверзитет во популацијата, се намалува ризикот од предвремена конвергенција кон локално оптимално решение и се подобрува способноста на алгоритамот да го истражува просторот на можни решенија.

Ефективноста на предложениот алгоритам се оценува преку анализа на постигнатите резултати во однос на повеќе критериуми, како што се минимизација на

оперативните трошоци, максимизација на економскиот профит и одржување на стабилен напонски профил во микромрежата. Добиените резултати се споредуваат со резултати добиени со примена на други современи оптимизациски методи, како и преку верификација со стандардни тест-функции, со цел да се обезбеди објективна оценка на перформансите на предложениот пристап.

Во рамките на истражувањето се дефинирани следните задачи:

- Дефинирање на барањата на системот и формулација на оптимизациската функција, која ги опфаќа економските и техничките аспекти на работењето на микромрежата,
- Развој и имплементација на предложениот оптимизациски алгоритам во програмскиот пакет Matlab,
- Дефинирање на релевантните технички ограничувања, како што се инсталираниот капацитет на генераторите, капацитетот на батерискиот систем, границите на размена со мрежата и дозволените напонски варијации,
- Генерирање и обработка на влезни податоци, вклучувајќи профили на оптоварување и производство од обновливи извори на енергија,
- Тестирање на предложениот алгоритам на репрезентативни тест-системи од релевантни бази на податоци,
- Анализа, споредба и верификација на добиените резултати со постоечки методи и техники.

Во истражувањето кое беше спроведено, беа докажани следните хипотези:

- **Главна хипотеза**

Примената на предложениот модел, кој воведува подобрен механизам за селекција на индивидуи, треба да даде реална проценка на работата на микромрежите и да го поедностави процесот на нивно моделирање, оптимизирајќи ги оперативните трошоци и варијациите на напонот во приклучните јазли.

- **Прва помошна хипотеза**

Со едновремено разгледување на трошоците за оперативна работа на микромрежата и варијациите на напонот во приклучните јазли води до поефикасно управување на микромрежата во однос на нејзината економична работа и стабилност.

- **Втора помошна хипотеза**

Предложениот алгоритам треба да овозможи подобра селекција на индивидуи соодветни за понатамошна репродукција врз основа на нивната евалуациска проценка, што треба да резултира со одбегнување на предвремена конвергенција кон локален оптимум.

1.3. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКАТА РАБОТА

Истражувањето опфаќа анализа на достигнувањата во областа на оптимизација и управување со микромрежи, утврдување на недостатоците во постоечки модели за оптимизација, креирање модел базиран на генетски алгоритам и негова примена на

модели на микромрежи со различна архитектура. Истражувањето спроведено на докторската дисертација е поделено на повеќе етапи, образложени во продолжение.

Во првата етапа беше извршена анализа на литература и утврдување на можностите за понатамошно истражување, подобрување или надградување. Понатаму следуваше анализа за најсоодветен избор за оптимизациски метод. Поедноставните оптимизациски проблеми можат да се решат со примена на илустративен метод за оптимизација, како што е методот на динамичко програмирање. Овој метод беше тестиран со цел утврдување на можноста за негова примена на посложени системи.

Во втората етапа беше извршена анализа за примена на генетски алгоритам за решавање на проблемот на управување со текови на моќност на микромрежи и беа утврдени можностите за негово надградување и подобрување со програмирање на код во програмскиот пакет Matlab.

Во третата етапа беше извршено прибирање на податоци и анализа на бази со податоци за она што е дефинирано како влезни параметри во предложениот алгоритам. Тоа вклучуваше температурата, податоци за сончевото зрачење, брзина на ветер, како и потрошувачка на електрична енергија за различни типови на потрошувачи. Дополнително, беше направено истражување за цените на поедините елементи во рамки на системот, цените на електричната енергија, како и трошоците за производство на електрична енергија од различни типови на генератори на ОИЕ.

Во четвртата етапа беше извршено тестирање на предложеното подобрување на генетскиот алгоритам на модели на микромрежи и беа разгледани повеќе различни сценарија (различни топологии и начини на управување на микромрежите), кои ги земаат предвид тековите на моќност во мрежата и напонските нивоа во јазлите. Беше разгледана примена на методот за микромрежи поврзани на локална мрежа, кои во себе содржат повеќе различни типови на генератори, потрошувачи – произведувачи со константна и со стохастична потрошувачка, за случај на константна и динамичка цена на електричната енергија, како и мрежи кои вклучуваат станици за полнење на електрични возила.

Во петтата етапа беше верификуван предложениот метод со стандардни методи за оптимизација кои имаат широка примена, современи методи за оптимизација, како и со алгоритми за тестирање на конвергенција на оптимизациски методи (Растрингова и Окли функција). На тој начин беше оценет придонесот на спроведеното истражување и предложеното подобрување на генетскиот алгоритам.

1.4. ОЧЕКУВАН ПРИДОНЕС ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

Современата трансформација на електроенергетските системи е тесно поврзана со интензивната интеграција на обновливи извори на енергија, децентрализирано производство и формирање на енергетски заедници. Во овој контекст, микромрежите претставуваат клучен елемент на идните интелигентни електроенергетски системи, овозможувајќи локално производство, складирање и управување со електрична енергија. За разлика од нивната првична примена во рурални и изолирани подрачја, денес микромрежите се сè почесто имплементирани и во урбани средини, каде што функционираат како интегрирани системи на произведувачи – потрошувачи (prosumers), со висока пенетрација на дисперзирани генератори и системи за складирање енергија.

Меѓутоа, зголемената интеграција на дисперзирани и обновливи извори на енергија носи и нови технички предизвици [6]. Производството од фотоволтаични и ветерни системи е стохастичко и зависно од временските услови, додека потрошувачката на електрична енергија се карактеризира со динамички и непредвидливи профили. Како резултат на ова, во микромрежите се јавуваат варијации на напонските нивоа, дисбаланс помеѓу производството и потрошувачката, како и потенцијални проблеми во точката на заедничко приклучување кон главната мрежа. Во традиционалните дистрибутивни системи, ваквите проблеми најчесто се адресираат преку уреди за компензација на реактивна моќност. Сепак, нивниот релативно бавен одзив и ограничената адаптивност не овозможуваат ефикасно справување со брзите и чести промени на напонот предизвикани од динамичките карактеристики на дисперзираните генератори.

Во таа насока, оваа докторска дисертација го разгледува проблемот на ОРМ на микромрежите од проширена перспектива, при што напонските варијации не се третираат како секундарен ефект, туку се интегрираат директно како составен дел од оптимизацискиот процес. Наместо оптимизацијата да биде насочена исклучиво кон минимизација на оперативните трошоци, предложениот модел овозможува истовремена оптимизација на економските и техничките критериуми, со експлицитно почитување на напонските ограничувања во сите јазли на мрежата. На овој начин се обезбедува технички изводливо, стабилно и практично применливо решение, кое ја зема предвид реалната физичка состојба на микромрежата.

Централниот научен придонес на дисертацијата е развојот на подобрен генетски алгоритам, именуван како Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA). Овој алгоритам претставува подобрена варијанта на класичниот генетски алгоритам, со модифициран селекциски механизам кој овозможува контролирана селекција и подобрен баланс помеѓу истражувањето на просторот на решенија и испитување на веќе одбраните добри решенија. За разлика од стандардната селекција, која често доведува до брзо доминирање на елитните единки и намалување на диверзитетот, MGES-GA воведува механизам за повторна евалуација на послабо рангираните единки. Со тоа се овозможува нивна интеракција со елитните решенија и се зачувува генетскиот диверзитет на популацијата, што значително го намалува ризикот од предвремена конвергенција кон локален оптимум.

Развиениот алгоритам е применет во рамките на систем за управување со енергетските текови во микромрежа приклучена на главната електроенергетска мрежа. Системот за управување со енергија (EMS) ги надгледува енергетските размени со мрежата, донесува одлуки за складирање или продажба на вишокот електрична енергија, како и за избор на извор при недостиг на енергија, притоа обезбедувајќи одржување на напонската стабилност во сите критични јазли, вклучувајќи ја и точката на заедничко приклучување. Како резултат на примената на MGES-GA, се постигнува оптимално ангажирање на локалните генератори и на батериските системи, намалување на загубите, поефикасно искористување на локалните ресурси и намалена зависност од главната мрежа. Ова директно придонесува кон намалени оперативни трошоци и зголемена доверливост на микромрежата.

Во рамките на истражувањето е извршена сеопфатна компаративна анализа на предложениот алгоритам со стандардната верзија на генетскиот алгоритам, негови варијации, како и со други современи оптимизациски методи. Сите споредби се

реализирани под исти влезни параметри и еднаков пресметковен буџет, со што се обезбедува објективност и фер евалуација на перформансите. Дополнително, перформансите на MGES-GA се анализирани и во услови на стрес-сценарија, кои вклучуваат ограничена размена на електрична енергија со мрежата и построги технички ограничувања. Резултатите покажуваат дека MGES-GA демонстрира подобрена стабилност, конзистентност и способност за адаптација во споредба со конвенционалните селекциски механизми.

Со цел потврдување на методолошката вредност на алгоритмот независно од конкретната апликација, MGES-GA е тестиран и на стандардни мултимодални тест-функции, како што се Растринг и Окли. Овие функции се познати по својата сложена структура и голем број локални оптимуми, што ги прави погодни за оценување на способноста на алгоритмите да избегнуваат предвремена конвергенција. Резултатите од овие тестирања потврдуваат дека предложениот алгоритам обезбедува стабилна конвергенција и поефикасно пребарување на просторот на решенија.

1.5. СТРУКТУРА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА

Докторската дисертација е концептуално и методолошки структурирана во осум меѓусебно поврзани поглавја, кои логички го следат текот на научното истражување, од поставување на теоретската рамка и дефинирање на проблемот, преку развој на иновативно решение, па сè до негова практична примена, анализа, верификација и изведување на релевантни заклучоци. Ваквата организација овозможува јасна, систематична и постепенa разработка на истражувачката проблематика, со што читателот добива целосен увид во мотивацијата, методологијата, резултатите и научниот придонес на трудот.

Поглавје 1 претставува вовед во истражувачката област и ја поставува основната концептуална рамка на дисертацијата. Во ова поглавје се разгледуваат современите трендови во развојот на електроенергетските системи, со посебен акцент на зголемената интеграција на обновливи извори на енергија и појавата на микромрежи како флексибилни, децентрализирани енергетски системи. Се анализираат предизвиците кои произлегуваат од стохастичноста на производството од фотоволтаични системи и ветерни електрани, како и од варијабилната природа на потрошувачката. Во тој контекст се истакнува потребата од примена на напредни оптимизациски методи кои ќе овозможат економично и технички сигурно управување со микромрежите. Генетските алгоритми се воведуваат како моќна алатка за решавање на нелинеарни, повеќекритериумски и комплексни оптимизациски проблеми. Во ова поглавје се дефинираат целите и хипотезите на истражувањето, се формулира научниот проблем, се наведуваат очекуваните научни и практични придонеси, како и методолошкиот пристап што ќе се користи за реализација на истражувањето. Дополнително, се објаснува структурата на дисертацијата и логиката на нејзината организација.

Поглавје 2 содржи детален и критички преглед на релевантната научна литература. Во него се анализираат постојните методи за оптимизација на работата на микромрежи, вклучувајќи класични математички методи, евристички и метаевристички алгоритми. Посебно внимание е посветено на пристапите за минимизација на оперативните трошоци, управување со складишта на енергија, оптимално тргување со

дистрибутивната мрежа и подобрување на напонските профили во системот. Дополнително, се разгледуваат истражувања кои предлагаат различни модификации на генетските алгоритми, подобрувања во селекцијата, крстосувањето, мутацијата и управувањето со популацијата, со цел зголемување на нивната ефикасност и избегнување на предвремена конвергенција. Преку критичка анализа на литературата се идентификуваат постојните ограничувања, како што се недоволно разгледување на напонските варијации во оптимизациската функција и недоволна сложеност на тест-системите за верификација на оптимизациските алгоритми. Ова поглавје ја оправдува потребата од нов пристап и го позиционира истражувањето во рамките на современите научни текови.

Поглавје 3 е насочено кон формална дефиниција на истражувачкиот проблем. Во него се дава дефиниција на поимот микромрежа, нејзините основни компоненти (дистрибуирани генератори, батериски системи, потрошувачи и точка на поврзување со дистрибутивната мрежа), како и режимите на работа. Дополнително се презентирани и предизвиците при решавање на проблемот на оптимална распределба на моќности во современите микромрежи поврзани на мрежа. Во ова поглавје се презентира и стандардниот генетски алгоритам, предизвиците при негова примена за решавање на проблемот на оптимална распределба на моќности во микромрежи, потребата од негово подобрување и усовршување, а презентирани се и истражувања кои предлагаат подобрување конкретно во процесот на селекција и нивна примена во решавањето на оптимизациски задачи.

Поглавје 4 претставува клучен дел од дисертацијата каде се формулира математичкиот модел на оптимизацискиот проблем, при што целната функција ги опфаќа оперативните трошоци и напонските отстапувања. Детално се опишуваат ограничувањата на системот, како што се техничките лимити на генераторите, ограничувањата на батерискиот систем (SOC, максимална моќност на полнење и празнење), како и напонските граници во јазлите на мрежата. Преку блок-дијаграми и шематски прикази се прикажува текот на алгоритмот и неговите фази. Особено внимание е посветено на иновативните аспекти на предложениот пристап, со што се истакнува научниот придонес на трудот. Ова поглавје ја поврзува теоријата со практичната имплементација и претставува основа за понатамошната анализа.

Поглавје 5 обезбедува верификација на предложеното подобрување на генетскиот алгоритам преку тестирање на сложени математички функции со повеќе локални екстреми. Овие тестови овозможуваат проценка на способноста на алгоритмот да избегне локални оптимуми и да пронајде глобално решение. Резултатите потврдуваат дека предложениот пристап покажува подобрена стабилност и конзистентност во споредба со класичниот алгоритам.

Поглавје 6 е посветено на практичната имплементација и на симулациската анализа. Во него се прикажани три различни тест-системи, кои овозможуваат проверка на алгоритмот во различни услови и сценарија. Овие тест-системи опфаќаат илустративен модел на микромрежа и стандардизирани тест-мрежи користени во научната литература. Се опишуваат параметрите на симулацијата, почетните услови и сценаријата на работа.

Поглавје 7 содржи анализа и дискусија на добиените резултати. Преку детални табели и графички прикази се презентираат резултатите од оптимизацијата. Прикажани се резултати од споредба на предложениот генетски алгоритам со стандардната верзија

на генетски алгоритам со пет различни типови на селекција: Roulette Wheel селекција, Remainder Selection, Tournament Selection, Stochastic Universal Sampling (SUS) и Uniform Selection. Споредбата е извршена на илустративен модел на микромрежа (анг. toy microgrid) кој има за цел да го прикаже перформансот на предложеното подобрување на генетскиот алгоритам за решавање на проблемот на оптимална распределба на моќности во микромрежи поврзани на мрежа. Исто така, прикажани се и резултатите од симулациите извршени врз тест-системите. Анализата ги опфаќа вредностите на целната функција, стабилноста на напонските профили, брзината на конвергенција и робусноста на алгоритмот. Се дискутира значењето на добиените резултати и нивната практична применливост.

Поглавје 8 ги сумира главните резултати и заклучоци од истражувањето. Во него се истакнуваат научните и практичните придонеси, се анализира нивното значење и се предлагаат насоки за идни истражувања кои би вклучувале и оптимална распределба на моќности на ниво на потрошувачи – произведувачи, имплементација на податоци од реално време и на реални мрежи, како и интеграција на дополнителни извори на неизвесност (ЕВ во домаќинства).

Покрај главните поглавја, дисертацијата содржи и прилози, во кои се вклучени псевдокодот на алгоритмот и технички параметри на тест-мрежите. Овие прилози обезбедуваат транспарентност, репродуктивност и дополнителна поддршка на изложеното истражување, со што дисертацијата претставува заокружена и научно аргументирана целина.

2. ПРЕГЛЕД НА ДОСТИГНУВАЊАТА ВО НАУЧНАТА ОБЛАСТ

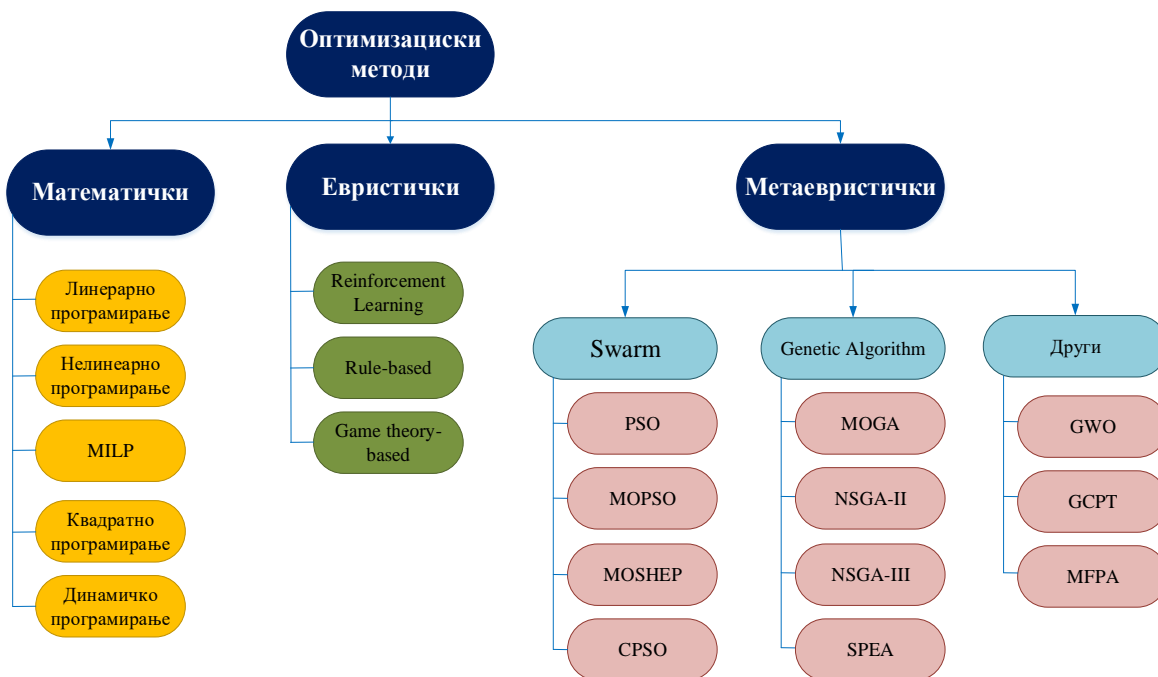
Со интензивниот развој на концептот на микромрежи и нивната сè поголема интеграција во современите ЕЕС, се јавува зголемена потреба од продлабочени истражувања насочени кон сеопфатно моделирање и оптимизација на сите нивни составни ентитети. Современата микромрежа повеќе не претставува едноставен локален систем со ограничен број извори, туку комплексна структура што вклучува дисперзирани генератори од ОИЕ, системи за складирање енергија, флексибилни потрошувачи, електрични возила и активни произведувачи – потрошувачи. Оваа хетерогеност, заедно со стохастичката природа на производството од фотоволтаични и ветерни системи, наметнува потреба од напредни оптимизациски методи кои ќе овозможат економична, стабилна и сигурна работа на микромрежата во различни режими, поврзана со главната мрежа или во автономна конфигурација.

Системот за управување со текови на енергија има за цел да ја оптимизира работата на микромрежата, во дадениот момент, како и да го планира ангажирањето на агрегатите за ден однапред, со предвидување на нивното производство. Примарната цел е да се задоволи потрошувачката во секој момент и тоа првично од производството во микромрежата, а потоа оптимално да се искористат и другите ресурси при зададени услови. Дополнително, треба да се одржува стабилноста во системот со ограничување на варијациите на напонот и фреквенцијата.

Големиот интерес на истражувачката заедница за имплементацијата на дисперзирано генерирање во рамките на традиционалниот ЕЕС резултира со значително проширување на научната литература [7]. Во рамките на овие истражувања се предлагаат бројни методи за оптимизација, меѓу кои доминираат пристапи инспирирани од природни процеси и интелигентни алгоритми кои се базираат на еволутивни, ројни (swarm) и стохастички принципи. Таквите алгоритми овозможуваат пребарување на голем простор на можни решенија и се покажуваат како особено соодветни за решавање на нелинеарни, неконвексни и повеќекритериумски проблеми, карактеристични за микромрежите.

Во литературата може да се сретне оптимизација на микромрежите според повеќе различни критериуми и цели: минимизација на трошоци, максимизација на добивка, минимизирање на испуштањето полутанти, минимизирање на загубите на електрична енергија или пак варијации на напоните. Но, без разлика на целта, на крај секогаш се разгледуваат трошоците. Научниците постојано ја испитуваат примената на различни оптимизациски методи или нивна комбинација за решавање на проблемот со оптимизација на микромрежи поврзани на мрежа. Тоа значи дека потрагата по метод за оптимизација кој ги исполнува сите зададени услови и ги почитува зададените ограничувања е сè уште актуелна.

Според прегледот на користени оптимизациски методи за оптимизација на микромрежи во [8] и [9], најчесто користените методи за оптимизација на микромрежи може да се поделат во категориите прикажани на Слика 2.1.



Слика 2.1 Најчесто применуваните оптимизациски техники за оптимизација на микромрежи [9]

Во најголем дел од достапната литература, оптимизацијата на микромрежите се фокусира на минимизација на вкупните оперативни трошоци, кои ги вклучуваат трошоците за производство, одржување, купување и продажба на електрична енергија или на максимизација на економската добивка преку оптимално тргување со главната мрежа.

Во [10] за оптимизација на хибридна микромрежа составена од ветерни турбини, фотоволтаичен систем, дизел генератор и батерија е применето динамичко програмирање. Оптимизациската функција ги минимизира трошоците преку оптимално распоредување на дисперзираните генератори, при што се земаат предвид нивните ограничувања, намалувањето на емисиите и балансирањето на потрошувачката и производството на електрична енергија. Влезните податоци на предложениот метод се информациите за изворите, потрошувачката и пазарот на електрична енергија. При оптимизацијата се разгледува состојбата на наполнетост на батеријата во секој момент, што претставува почетна точка на оптимизацискиот процес.

Методот базиран на динамичко програмирање, претставен во [11], се користи за оптимизација на производството на електрична енергија во локална микромрежа поврзана со главната мрежа, во која е имплементиран систем за складирање на енергија. Оптимизацискиот метод ги зема предвид неизвесностите поврзани со оптимизацијата на микромрежата, како што е потрошувачката, која се претпоставува дека може да се управува, како и цените на пазарот на електрична енергија. Методот е симулиран во Matlab, а резултатите покажуваат дека земањето предвид на неизвесностите доведува до подобри резултати.

Во [12] се анализира проблемот на ангажирање на производните единици во микромрежа. Анализата се базира на 24-часовно однапред планирање на производството во микромрежа со имплементиран систем за складирање, микрогасни турбини и активни

генератори. За таа цел се користи методот на динамичко програмирање. Целната функција ги зема предвид емисиите од производните единици, особено емисиите на CO_2 , како и оперативните трошоци. Ограничувањата на системот вклучуваат баланс помеѓу произведената и побаруваната моќност, нивото на оптоварување на единиците и режимот на работа на микромрежата. Методот го определува оптималното ангажирање на единиците во однос на емисиите од микрогасните турбини.

Истражувањето спроведено во [13] го разгледува проблемот на оптимална распределба на моќности во микромрежа која вклучува повеќе дистрибуирани извори на електрична енергија и системи за складирање. Главната цел на истражувањето е да се постигне поекономично и поефикасно функционирање на микромрежата преку оптимално распоредување на производството и управување со ресурсите. Во трудот се предлага метод базиран на мултипараметарско динамичко програмирање (multi-parameter dynamic programming) кој се користи за решавање на проблемот на управување со енергијата. Оптимизацискиот модел е формулиран како повеќекритериумски оптимизациски проблем, при што се земаат предвид економските аспекти и еколошките фактори поврзани со производството на електрична енергија. Методот ги разгледува динамичките состојби на системот, како што се производството од распределените извори и состојбата на системите за складирање на енергија, и врз основа на тоа се определува оптимално управување со микромрежата во различни временски интервали. Со примена на динамичко програмирање, сложениот оптимизациски проблем се дели на повеќе потпроблеми кои се решаваат рекурзивно. Ефикасноста на предложениот алгоритам е проверена преку симулации, при што резултатите покажуваат дека предложениот метод може успешно да ја подобри економската работа на микромрежата и да обезбеди рационално управување со дистрибуираните енергетски ресурси.

Во [14] се разгледува проблемот на оптимална распределба на моќности (OPF) во микромрежи со интегрирани системи за складирање енергија. Во моделот се вклучени ограничувања на напонот, струјата и моќноста на генераторите, како и ограничувањата на системите за складирање енергија (капацитет и загуби). За разлика од поедноставените модели во литературата, предложениот пристап ја зема предвид реалната топологија на електричната мрежа, што овозможува анализа на посложени микромрежи. Системите за складирање се моделирани како динамичка состојба на системот, при што нивната енергија се контролира со цел да се усогласи производството од обновливите извори со потрошувачката. На овој начин складирањето на енергија се користи за балансирање на производството и потрошувачката и за намалување на зависноста од главната мрежа. Оптимизацијата има за цел минимизација на трошоците за енергија која се увезува од главната мрежа, додека истовремено се задоволуваат сите технички ограничувања на микромрежата. Резултатите покажуваат дека предложениот OPF-модел овозможува глобално оптимално решение за управување со микромрежата, подобрувајќи ја енергетската ефикасност и стабилноста на системот.

Во [15] се разгледува проблемот на динамичка оптимална распределба на моќности (Dynamic Optimal Power Flow – D-OPF) во електроенергетски систем со висока интеграција на обновливи извори на енергија. Целта на истражувањето е да се развие метод за оптимално планирање на производството за следниот ден (day-ahead scheduling), кој ќе ги земе предвид променливоста и неизвесноста на производството од ветерни и фотоволтаични централи. Во предложениот пристап се комбинира

прогнозирање на обновливите извори со оптимизациски модел за OPF. За прогнозирање на ветерната брзина и сончевото зрачење се користи вештачка невронска мрежа (ANN) обучена со алгоритам Levenberg–Marquardt, што овозможува предвидување на достапната енергија од обновливите извори во следниот ден. Врз основа на овие прогнози се формулира day-ahead dynamic optimal power flow (DA-DOPF) проблем, кој ги определува оптималните вредности на контролни променливи во електроенергетскиот систем со цел да се постигне економично и сигурно функционирање. При оптимизацијата се земаат предвид ограничувањата на системот, како што се границите на моќност, ограничувањата на мрежата и безбедносните услови за работа на системот.

Истражувањето спроведено во [16] го разгледува проблемот на оптимална распределба на моќности во микромрежа со висока интеграција на обновливи извори, како што се фотоволтаични и ветерни системи. Авторите предлагаат метод базиран на напредно динамичко програмирање (Advanced Dynamic Programming – ADP) за оптимално планирање и управување со дистрибуираните извори и системите за складирање енергија. Во моделот се користат веројатносни распределби (Probability Distribution Functions) со цел да се моделираат флукуациите во производството од ветерните и соларните извори. Оптимизацискиот модел ги разгледува производството од генераторите, управувањето со батерискиот систем и распределбата на енергијата во микромрежата, со цел да се постигне економично и стабилно функционирање на системот. Методот е имплементиран и тестиран преку симулации во Matlab, при што резултатите покажуваат дека предложениот пристап може да ги намали оперативните трошоци, да ја зголеми искористеноста на обновливите извори и да ја подобри сигурноста на системот.

Современите истражувања сè почесто ги вклучуваат и техничките показатели како напонска стабилност, намалување на загубите, подобрување на доверливоста, редукација на емисиите на CO₂ и зголемување на автономијата на системот. Ова ја трансформира задачата во повеќекритериумски оптимизациски проблем, во кој е неопходно воспоставување компромис помеѓу економските и техничките критериуми и бара примена на оптимизациски методи кои можат да се справат со комплексни проблеми со многу нелинеарности и со голем број променливи.

Динамичкото програмирање претставува ефикасен метод за оптимизација на проблеми со временска структура и ограничен број на состојби. Меѓутоа, при оптимизација на микромрежи со повеќе дисперзирани извори, системи за складирање енергија и мрежни ограничувања, бројот на можни состојби и управувачки променливи значително се зголемува. Во такви услови бројот на можни состојби или комбинации расте експоненцијално со зголемување на бројот на променливи, поради што примената на динамичко програмирање станува пресметковно многу сложена. Од таа причина, во овој труд е применет генетски алгоритам, кој овозможува ефикасно пребарување на голем и нелинеарен простор на можни решенија без потреба од експлицитна дискретизација на сите состојби на системот.

Според бројни истражувања, ГА се издвојува како еден од најчесто применуваните и најфлексибилни методи за оптимизација на микромрежи [17] [18] [19]. Неговата популарност произлегува од способноста да работи со мешани дискретни и континуални променливи, како и од релативната независност од градиентни информации. Дополнително, истражувањата покажуваат дека ГА е особено погоден во рамки на

хиперевристички пристапи, каде се комбинираат повеќе поедноставни еврестики за ефикасно решавање на сложени и високодимензионални проблеми [20]. Овој пристап овозможува подобра адаптација на алгоритмот кон специфичните карактеристики на микромрежата и кон променливите оперативни услови.

Во литературата се среќаваат бројни варијации и модификации на генетскиот алгоритам, како и подобрени стратегии за селекција, адаптивни стапки на мутација, хибридизација со други метаевристички техники и паралелни имплементации со цел забрзување на конвергенцијата [21]. И покрај разликоста на пристапите, заедничката цел останува иста: постигнување поефикасна, поекономична и посигурна работа на микромрежите. Примената на генетскиот алгоритам е потврдена на различни тест-системи и топологии, што дополнително ја нагласува неговата адаптивност и релевантност во оваа научна област.

Тековните научни достигнувања покажуваат дека оптимизацијата на микромрежите претставува динамична и интензивно развивана област, во која ГА и нивните унапредени варијанти заземаат централно место. Сепак, комплексноста на современите микромрежи и растечките барања за економска и техничка одржливост оставаат простор за понатамошни истражувања и развој на нови, поефикасни алгоритамски пристапи.

2.1. МОДИФИКАЦИИ НА ГЕНЕТСКИОТ АЛГОРИТАМ ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ

Со зголемената комплексност на современите микромрежи и нивната интеграција со главната електроенергетска мрежа, класичните оптимизациски пристапи често се соочуваат со ограничувања во однос на конвергенција, стабилност и способност за справување со нелинеарноста и стохастичноста на системот. Поради тоа, во последните години се забележува интензивна примена на модифицирани и унапредени варијанти на генетскиот алгоритам за решавање на задачите поврзани со енергетски менаџмент, оптимално диспечирање, планирање на капацитети и повеќекритериумска оптимизација во микромрежи.

Генетскиот алгоритам, како еволутивен метаевристички метод, се покажува како особено погоден за решавање на сложени, неконвексни и мултидимензионални проблеми со мешани дискретни и континуални променливи, што е карактеристично за микромрежите. Сепак, стандардната верзија на алгоритмот може да покаже појава на прерана конвергенција, губење диверзитет во популацијата и зголемено време на пресметка. Токму овие предизвици поттикнуваат развој на различни модификации, како што се подобрени селекциски стратегии, адаптивни параметри на мутација и вкрстување, хибридизација со други оптимизациски методи и паралелни имплементации.

Целта на овие модификации е да се подобри способноста на алгоритмот за пребарување на глобалниот простор на решенија, да се зголеми стабилноста и репродукцибилноста на резултатите и да се обезбеди поефикасна оптимизација на економските и техничките показатели на микромрежата. Примената на унапредени генетски алгоритми во оваа област претставува активна и динамична насока на

истражување, насочена кон обезбедување поодржливо, поекономично и пофлексибилно управување со децентрализираните енергетски системи.

Истражувањето спроведено во [22] предлага подобрен систем за управување со енергија за микромрежи со наизменична струја преку паралелно прилагоден генетски алгоритам (Parallel Population-Based Genetic Algorithm – PPBGA) за оптимална работа на батериски системи за складирање енергија при променливи производство и побарувачка. Моделот има за цел минимизирање на оперативните трошоци, загубите на моќност и емисија на јаглероден диоксид (CO_2) во двата режими на работа, поврзана со главната мрежа и во автономен режим, со употреба на часовен тек на моќности за техничка валидација на решенијата. Трудот ги споредува перформансите на предложениот алгоритам со PSO и Vortex Search Algorithm (VSA), при што покажува дека PPBGA постигнува повисока точност, подобра стабилност и поголема ефикасност при пресметките. Во режим кога микромрежата е поврзана на мрежа, овој алгоритам обезбедува значителни намалувања на трошоците, моќностните загуби и емисиите на CO_2 , а слични подобрувања се остварени и во автономен режим. Симулациите на IEEE 33-bus тест-систем со реални профили на побарувачка и производство потврдуваат дека предложениот пристап дава подобри резултати во споредба со други познати методи, што ја нагласува неговата применливост за ефикасно управување со микромрежите.

Во [23] е направена компаративна анализа на четири метаевристички оптимизациски алгоритми: Population-Based Genetic Algorithm (PGA), Particle Swarm Optimization (PSO), JAYA и Generalized Normal Distribution Optimizer (GNDO) за минимизирање на оперативните трошоци во микромрежи на наизменична струја (AC) кои работат како поврзани со главна мрежа и во изолирана конфигурација. Главниот фокус е на управување со производството на енергија од распределени ВГ со цел да се намалат трошоците за производство, купување енергија и одржување. Во истражувањето е применета IEEE 33-bus мрежа како тест-систем и извршува 100 независни експерименти за секој алгоритам и конфигурација, со што се прават строги статистички анализи (ANOVA и Tukey's post-hoc тест) за да се оценат перформансата и стабилноста на решенијата. Резултатите покажуваат дека PGA постигнува најниски оперативни трошоци и најдобра стабилност, особено кога микромрежата е поврзана со главната мрежа.

Во [24] претставена е имплементација на хиерархиски генетски алгоритам за максимизација на добивката од размена на енергија на микромрежа со локалната мрежа, определувајќи ја цената на електричната енергија според времето на користење.

Забрзан генетски алгоритам за решавање на оптимизациски проблеми со повеќе променливи за цел во микромрежи е предложен во [25]. Функцијата на цел ги опфаќа трошоците за работа и одржување на микромрежата, трошоците за гориво за ДГ и трошоците за емисија на гасови при негово користење, како и трошоците за замена на елементите.

Адаптиран генетски алгоритам (Adaptive Genetic Algorithm) за оптимизација на микромрежа составена од ФВС, ВГ, батерија и ДГ, а приклучени се и ЕВ, кои се полнат доколку нема каде да се пласира вишокот енергија, е предложен во [26]. Забрзувањето на генетскиот алгоритам е извршено со филтрација на популацијата со цел побрзо добивање на оптимално решение. Извршена е споредба со Fire Fly Algorithm и PSO.

Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) е применет во [27]. Алгоритамот разгледува микромрежа со пумпно-акумулациона ХЕЦ и батерија како систем за складирање на вишокот енергија. Оптимизациската функција ги зема предвид инвестициските трошоци и ја минимизира емисијата на јаглерод диоксид.

Во [28] е применет Multi Objective Genetic Algorithm и разгледана е микромрежа составена од ФВ, ВТ, батерија, како и размена на електрична енергија со локалната мрежа. Применет е метод за предвидување на производството и потрошувачката и направена е споредба помеѓу фиксни и променливи тарифи на мрежата.

Во [29] предложен е генетски алгоритам со способност за помнење (Memory-Based Genetic Algorithm), кој има за цел оптимална распределба на производството на електрична енергија помеѓу вклучените дисперзирани генератори во една микромрежа. Алгоритамот, минимизирајќи ги трошоците за производство на електрична енергија го распределува производството помеѓу ФВС, ВГ и комбинирана когенеративна постројка. Подобрувањето кое е предложено во трудот се оправдува со споредба на добиените резултати со генетски алгоритам и две варијанти на методот на оптимизација со рој на честички (PSO).

Уште една употреба на генетскиот алгоритам за оптимизација на микромрежа со вклучен голем број на ОИЕ е презентирана во [30]. Истражувањето покажува дека комбинација на генетски алгоритам со други оптимизациски алгоритми за оптимизација на оперативните трошоци, емисија на гасови и достапноста на генераторите од ОИЕ, има позитивен фидбек со позитивни резултати.

Во [31] генетски алгоритам е применет за оптимална распределба на оптоварувањето помеѓу ВГ, ФВС, батерии и ДГ во микромрежа, додека во [32] за решавање на проблемот со оптимизација е предложена надградба на генетски алгоритам за побрза конвергенција.

Подобрувањето на стандардниот генетски алгоритам, кое е предложено во [33] го применува методот на селекција преку натпревар (Tournament Selection), со вкрстување (crossover) во една точка и степен на мутација 0,1 до 0,01. Алгоритамот применува концепт на вгнезден генетски алгоритам, каде секој индивидуален ген со хромозоми независно применува друг генетски алгоритам. Функцијата на цел го адресира намалувањето на загубите на моќност во водовите со правилно планирање на изворите.

Во [34] се разгледува проблемот на оптимизација на повеќе поврзани микромрежи. Истражувањето се фокусира на интеракцијата помеѓу микромрежите со минимизација на трошоците и употреба на подобрен генетски алгоритам. Процесот на селекција се оптимизира со примена на оценка за перформансот на индивидуите делејќи ги на елитни и на катастрофални членови. Процесот на мутација се оптимизира со примена на методот на рој честички (PSO). Подобрувањето се подобрува со надминување на проблемот на заглавување на алгоритамот во локален минимум и бавната итерација.

Случај на управување со токовите на енергија и оптимизација на оптоварувањето со примена на подобрен генетски алгоритам, во рамките на една микромрежа со оптоварување кое може да се регулира, е разгледан во [35]. Иницијализацијата на параметрите започнува со претходно дефинирана популација, која е веќе адаптирана на анализираниот случај, без притоа многу да се ограничи изборот. Вкрстувањето е според методот на симулирано бинарно вкрстување (Simulated Binary Crossover - SBX), а

степенот на мутација е помеѓу 0,001 и 0,05. При евалуација на индивидуите, не се разгледуваат само трошоците за работа на микромрежата, туку и казнените трошоци за прекршување на зададени ограничувања и сличност помеѓу индивидуите. Во анализата се земени предвид и варијациите на напонот.

Во [36] применет е подобрен генетски алгоритам за намалување на трошоците на распоредување на оптоварувањето во рамките на една микромрежа, земајќи ги предвид побарувачката и моменталната цена. Иницијализацијата на параметрите се базира на линеарна комбинација со која секој генериран хромозом веќе ги познава границите во кои може да се движи неговата вредност. Иницијализацијата на популацијата се базира на повеќепараметарско генерирање на популација, која обединува повеќе параметри, како што се оценката од евалуацијата, хромозомите, поврзувањето на мрежата и БС. Како метод за селекција е избран методот на рулетно тркало (анг. Roulette Wheel).

2.2. КОМБИНАЦИЈА НА ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ СО ДРУГИ ОПТИМИЗАЦИСКИ МЕТОДИ ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ

Генетскиот алгоритам може да се употребува во комбинација и со други оптимизациски методи. Како што е прикажано во [37], предложен е хибриден алгоритам составен од PSO-методот и генетски алгоритам за контрола на напонот и фреквенцијата во островска микромрежа. Целта е поголемо искористување на електричната енергија добиена од дисперзираните генератори.

Оптимизацијата на микромрежите може да се разгледува од повеќе различни аспекти. Покрај управувањето со токовите на енергија во рамки на мрежата, може да се употреби и за оптимизација на напонот и фреквенцијата. Во [38] извршена е оптимизација со генетски алгоритам за минимизирање на падот на напонот при многу брзи промени во оптоварувањето во островска микромрежа. Во [39] презентирани е модел базиран на генетски алгоритам, во кој се содржани и казнени трошоци за неиспорака на електрична енергија и непочитување на однапред зададените услови. Анализа на напонот и фреквенцијата со користење на генетски алгоритам е презентирани во [40], каде што варијациите на напонот и фреквенцијата дефинирани како технички ограничувања на влезните параметри. Истражувањето не ги става варијациите на напонот и фреквенцијата во фокусот, ниту се тие дел од оптимизациската функција. Потребата од контрола на напонот и реактивната моќност во микромрежите приклучени на локална дистрибутивна мрежа е прикажана во [41].

Во [42] е прикажана симултана оптимизација на дисперзирано генерирање и систем за складирање на енергијата во микромрежи поврзани на мрежа и микромрежи кои работат самостојно (островски). Трудот анализира две алтернативни функции на цел. Првата ги минимизира годишните загуби на моќност, а втората ги минимизира трошоците за производство на електрична енергија. Најдобри резултати се постигнати кога микромрежата тргува со локалната мрежа, при инсталиран систем за складирање на вишокот енергија.

Планирањето на работата на БС е исто така дел од процесот на оптимизација. Во [43] претставен е распоред на систем за складирање на енергијата за ден порано. Предложената методологија се базира на два оптимизациски алгоритми, генетски

алгоритам и метод на оптимизација на рој честички. Оптимизацијата е постигната со минимизирање на трошоците за работа на микромрежата, кои ги покриваат потрошувачите и кои се дефинирани со динамичко определување на цената на електричната енергија. Методот цели кон оптимално искористување на моќноста генерирана од дисперзираните генератори и складираната моќност од батериите во период на високи цени.

Истражувањето направено во [44] разгледува стратегија за управување со енергијата во микромрежа поврзана на мрежа, опремена со повеќе батерии, во услови на динамичко определување на цената на електричната енергија. Функцијата на цел разгледува две можни сценарија. Во првото сценарио се разгледува можноста микромрежата да купува електрична енергија од локалната мрежа, а во второто сценарио таа ја продава енергијата на локалната мрежа.

Во [45] применет е генетски алгоритам за планирање на полнењето и празнењето на батеријата во микромрежа со потрошувачи – производители на електрична енергија, со минимизирање на моќноста во точката на поврзување на микромрежата со главната мрежа, но не и економска евалуација.

Генетски алгоритам е искористен за намалување на оперативните трошоци на микромрежа која е поврзана на дистрибутивната мрежа во услови на променлива цена на електричната енергија во [46]. Случајот на анализа разгледува микромрежа со ФВС и ВГ, горивни ќелии, батериски систем и потрошувачи.

Во [47] генетскиот алгоритам е применет за оптимизација на микромрежи кои се состојат од повеќе различни видови на ОИЕ и технологии за складирање на вишокот електрична енергија. Во истражувањето се разгледани повеќе различни сценарија, кои анализираат различни временски услови и различна побарувачка. Резултатите укажуваат на потребата од креирање оптимизациски модел кој може лесно да се адаптира на промените кои настануваат заради стохастичноста на производството и потрошувачката во микромрежите.

Во [48] разгледан е случај за станбен објект кој преставува микромрежа составена од ФВС, ВГ и батериски систем, која е поврзана на дистрибутивната мрежа. Истражувањето разгледува два случаи на промена на цената на електричната енергија во текот на еден ден. Првиот случај е со фиксна цена која има различна вредност во различни периоди од денот, додека вториот случај разгледува случај кога цената се менува според побарувачката. Оптимизацискиот метод ги зема предвид инвестициските и оперативните трошоци, трошоците за замена на некој елемент од системот и трошоците за купување електрична енергија од локалната дистрибутивна мрежа. Резултатите од анализата покажуваат дека следењето на потрошувачката според цената на пазарот има бенефит по однос на приходите. На тој начин нето-сегашната вредност на трошоците и трошоците на произведената електрична енергија се намалуваат.

Во [49] предложен е генетски алгоритам за оптимизација на работата на ДГ во една микромрежа. За таа цел искористени се податоци ден однапред за предвиденото производство на енергија од ОИЕ, како и за потрошувачката.

Во оваа докторска дисертација ќе биде разгледан проблемот на оптимизација на сложена микромрежа која е поврзана на локалната мрежа, земајќи ги предвид тековите на моќност во мрежата и варијациите на напоните во приклучните точки на

дисперзираните генератори и потрошувачите. Предложениот метод обединува два важни параметри за безбедна работа на микромрежите:

- стабилност на микромрежата дефинирана преку контрола на варијациите на напонот во приклучните јазли, и
- минимизирање на трошоците за работа на микромрежата при оптимално тргување со локалната мрежа на која е таа приклучена.

Придобивката од примената на предложената методологија на оптимизација за потрошувачите и потрошувачите – произведувачи во микромрежата се минималните трошоци за користење на електричната енергија и непрекината испорака на квалитетна електрична енергија. За предложената методологија за оптимизација на тековите на моќност во микромрежите ќе биде применет подобрен генетски алгоритам, кој треба да ги надмине основните недостатоци на овој оптимизациски метод.

2.3. ДОСЕГАШНИ НАУЧНИ ДОСТИГНУВАЊА ОД ПОТЕСНАТА ОБЛАСТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ

Во литературата постојат бројни техники за оптимална распределба на моќности во микромрежи, а истражувачите постојано настојуваат да ги подобрат постојните методи преку разгледување на различни сценарија или со дополнување на целните функции со дополнителни параметри што ја дефинираат работата на микромрежите. Сепак, во модерните микромрежи, оптималниот проток на енергија може да се постигне и преку управување со потрошувачката, познато како управување од страната на побарувачката.

Во [50] е предложена трислојна архитектура за планирање и распоредување на ресурси во микромрежа во реално време, со цел да се подобрат ефикасноста, стабилноста и оперативните перформанси на енергетски системи со висока пенетрација на ОИЕ. Новитетот во трудот лежи во структурирање на контролниот процес во три повеќеслојни нивоа, кои овозможуваат координирано управување со внатрешните ресурси на микромрежата и со интеракцијата со главната електроенергетска мрежа. Првиот слој ги адресира краткорочните одлуки за распределба на моќност, како што се динамичко балансирање помеѓу производството, складирањето и потрошувачката; вториот слој се фокусира на оптимизација на ресурси на среден рок со цел да ги минимизира трошоците и варијациите во напонот; а третиот слој ги интегрира стратегиите на највисоко ниво за оптимална координација во услови на неизвесност и промени во пазарните услови. Предложениот систем е тестиран на симулирани случаи на микромрежи со различни конфигурации на генератори, складирање и потрошувачи, при што резултатите укажуваат на подобра стабилност, пониски оперативни трошоци и побрзо приспособување на системот на промени во побарувачката и флукуациите на ОИЕ во реално време. Во овој труд фокус е ставен на адаптација и интелигентно управување во реално време, што е критично за идни паметни мрежи со голем удел на ОИЕ и динамичка побарувачка. Иако предложениот пристап во трудот не се базира директно на генетски алгоритам, проблематиката која се разгледува е директно поврзана со оптимизацискиот проблем што се разгледува во оваа докторска дисертација. Имено, и во двата случаи централниот предизвик е истовремено минимизирање на оперативните трошоци и обезбедување сигурна и стабилна работа на микромрежата, при постоење на повеќе технички ограничувања и временски променливи параметри.

Во [51] е предложен генетски алгоритам за оптимизација на микромрежи со фокус на управувањето со енергијата и економско-еколошките цели. Во трудот се разгледува комплексна проблемска поставка каде што целта е да се постигне оптимално работење на микромрежа со минимизација на оперативните трошоци, намалување емисии на штетни гасови и балансирање на генерацијата и потрошувачката во услови на неизвесност на производство од ОИЕ. За таа цел, авторите користат генетски алгоритам (ГА) кој ги интегрира различните компоненти на системот, вклучувајќи распределени генератори, програми за управување со побарувачката и реактивни оптоварувања во единствена оптимизациска структура. Новитетот во пристапот што го предлага трудот е во тоа што генетскиот алгоритам не се користи само за класична оптимизација на трошоците, туку експлицитно ги вклучува реактивните товари и учеството на корисниците преку програми за управување со побарувачката во процесот на оптимизација, со што се постигнува синергетско намалување на оперативните трошоци (на пр. трошоци за резерва, старт-ап и пенални трошоци за емисии на стакленички гасови). Според авторите, учеството во програми за управување со побарувачката доведува до приближно 16 % намалување на трошоците за резерви на системот, што укажува на значајно економско и еколошко подобрување.

Истражувањето спроведено во [52] се занимава со класичен проблем на ангажирање на генераторски единици (Unit Commitment Problem) во ЕЕС, користејќи генетски алгоритам како оптимизациска техника за минимизирање на оперативните трошоци, особено трошоците за гориво на генераторите. Проблемот на ангажирање на генераторски единици се однесува на одлуката кои генератори да бидат вклучени или исклучени во одреден временски хоризонт со цел да се покрие варијабилниот товар при најниски можни оперативни трошоци и да се задоволат сите технички ограничувања на системот. Овој проблем е комплексен бидејќи вклучува бинарни одлуки (генератори вклучени/исклучени) и континуирани променливи (количина на генерирана моќност), околу кои треба да се балансира економскиот и оперативниот контекст на системот. Во трудот е применет генетски алгоритам за оптимизација на трошоците на веќе определената комбинација на unit commitment со цел да се минимизира вкупната потрошувачка на гориво и да се оптимизираат параметрите на распределба на оптоварувањето. Предложената методологија е тестирана на стандарден IEEE 14-bus систем, со варијабилни товарни профили во текот на 24-часовен период.

Во [53] е предложен повеќекритериумска оптимизациска рамка базирана на генетски алгоритам (MOGA) за оптимално управување и планирање на микромрежи со дисперзирана генерација. Предложената оптимизациска рамка опфаќа максимизација на економската добивка на производителот, минимизација на активните загуби во дистрибутивните водови, намалување на CO₂ емисиите на гасови, контрола на реактивната моќност и индиректно подобрување на напонскиот профил. Особено значаен придонес е хромозомското кодирање каде секој јазол е претставен со бинарна променлива што означува присуство или отсуство на генератор/батерија, додека моќноста се оптимизира континуирано. На тој начин, алгоритамот истовремено решава проблем на локација, димензионирање и оперативно управување. Пристапот е тестиран на IEEE 14-bus system.

Системот за управување со енергија го контролира производството, складирањето и оптоварувањето, а може и во реално време да ги прилагоди управливите оптоварувања

за да го оптимизира работењето на системот заедно со ресурсите за производство и складирање. Ова се постигнува преку контрола, преместување и ограничување на потрошувачката на електрична енергија во согласност со достапноста на производните ентитети [54].

Поголемиот дел од истражувањата анализираат како да се применат различни стратегии за оптимизација на оперативните трошоци, енергетските загуби и напонските отстапувања во микромрежите преку управување со побарувачката на енергија. Во [55] авторите спровеле споредбена анализа на две различни политики за одсив на побарувачката засновани на стимули за ограничување на оптоварувањето. Првата политика користи матрица на ценовна еластичност за поттикнување на потрошувачите да ја намалат потрошувачката за време на пиковите, додека втората политика се фокусира на компензација на потрошувачите за ограничување на оптоварувањето во истите периоди. Истражувањето во [56] предлага комбиниран интелигентен метод што го зема предвид данокот на јаглерод како ограничување со цел намалување на емисиите и вкупните трошоци за користење на оптоварувањата во микромрежа.

Дополнителен елемент на сложеноста на модерните микромрежи се електричните возила, кои можат да служат како флексибилни потрошувачи или како дистрибуирани системи за складирање енергија. За да се одржи стабилноста и да се постигнат економските цели, системот за управување со енергија ги контролира ЕВ преку дефинирање на распоред за полнење и празнење. Дополнително, системот за управување со енергија одредува кога ЕВ треба да го променат оптоварувањето, за да се постигне и економска и техничка оптималност.

Истражувањата во [54] и [57] воведуваат хибриден пристап за управување од страната на побарувачката (Hybrid Demand-Side Management – HDSDM), кој комбинира стратегии за преместување на оптоварувањето и ограничување на оптоварувањето со цел оптимизација на работата на микромрежа интегрирана со приклучени хибридни електрични возила.

Во [58] е претставена двослојна оптимизациска рамка за минимизација на вкупните оперативни трошоци на нисконапонска микромрежа поврзана со мрежата, која ги разгледува ЕВ од различни големини и нивното влијание врз работата на микромрежата. Истражувањето во [59] воведува хибридна политика за управување од страната на побарувачката што комбинира стратегии за преместување и ограничување на оптоварувањето со интелигентно полнење на приклучени хибридни електрични возила.

Во [60] е предложен напреден модел за оптимално управување со активна дистрибутивна мрежа што вклучува ОИЕ, конвенционални генератори и електрични возила, при што посебен акцент е ставен на агрегираното моделирање на ЕВ како флексибилен енергетски ресурс. Главниот новитет на трудот лежи во комбинирањето на економските и техничките цели преку повеќекритериумска оптимизациска формулација, која истовремено ги минимизира оперативните трошоци и напонските девијации во мрежата. Во овој труд ЕВ се моделирани како паркинзи за ЕВ со можност за контрола и на активната и на реактивната моќност, што овозможува дополнителна флексибилност и подобрување на напонскиот профил. За таа цел е применета адаптивна робусна оптимизација, со која се зема предвид неизвесноста кај оптоварувањето, цените на електричната енергија, производството од ОИЕ и побарувачката од електричните возила. Примената на моделот на IEEE 33-bus систем дополнително ја потврдува практичната

применливост на предложениот пристап и неговата ефикасност во подобрување на економските и техничките индикатори на дистрибутивната мрежа.

Слично и во [61] е предложена сеопфатна мултикритериумска оптимизациска рамка за оптимално планирање и алокација на распределени генератори и интеграција на електрични возила во микромрежи, каде е формулиран повеќекритериумски проблем кој истовремено ги минимизира вкупните инвестициски и оперативни трошоци и го максимизира индексот на напонска стабилност на микромрежата. Во моделот се разгледуваат повеќе типови на распределени извори, вклучувајќи фотоволтаични генератори, ветрогенератори и горивни ќелии, додека електричните возила се агрегирани во форма на паркинг-места за ЕВ со временски зависна побарувачка. Решавањето на проблемот е извршено со Crow Search Algorithm (CSA), а валидацијата е спроведена на IEEE 33-bus микромрежа.

Во [62] е претставен иновативен систем за управување со енергија што интегрира управување и од страната на понудата и од страната на побарувачката. Управувањето со потрошувачката го оптимизира распоредот на оптоварувањето врз основа на цените на електричната енергија, додека системот за управување со производството го одредува производството од ФВС, системот за складирање енергија (БС) и електричната мрежа. Со примена на PSO, се намалуваат трошоците за електрична енергија и односот врвно – просечно оптоварување

Истражувањата во [17] [19] [18] [25] [5] покажуваат дека PSO и ГА, заедно со нивните варијации и хибриди со други оптимизациски техники, се најчесто користени методи за решавање на проблемот на оптимален проток на енергија.

Студиите укажуваат дека ГА често обезбедува квалитетни решенија, покажува мала варијабилност низ итерациите и брзо конвергира кон оптимални резултати [20]. На пример, во споредбени студии како [62], ГА покажува подобар квалитет на решенија од PSO, иако PSO обично конвергира побрзо. Дополнително, ГА нуди поголема флексибилност при избор и прилагодување на хиперпараметри (hyperparameters), што го прави погоден за комплексни оптимизациски проблеми, како што е потврдено во повеќе студии, вклучувајќи ја [24].

Прегледот на литературата покажува дека главните цели на истражувањата за оптимален проток на енергија, без разлика на користената оптимизациска техника, се минимизација на оперативните трошоци, емисиите на гасови или варијациите на напон/фреквенција.

Анализата во [17] покажува дека ГА или неговите хибриди со други оптимизациски алгоритми сè уште се меѓу најчесто користените за управување со енергија и оптимизација на различни цели во микромрежите, што укажува дека користењето ГА не е новост. Сепак, тоа демонстрира голема флексибилност и адаптивност на ГА кон различни оптимизациски проблеми.

Во [36] е претставен подобрен генетски алгоритам (Improved Genetic Algorithm – ГА+PSO) што користи елитистичко размислување (elite thinking) и катастрофално размислување (catastrophe thinking) за оптимизација на селекцијата. Елитизмот ги зачувува најдобрите особини од една генерација во следната, додека катастрофалниот пристап ги елиминира најдобрите индивидуи ако останат непроменети по повеќе итерации. Комбинацијата на овие два пристапи помага да се избегне локален оптимум.

Предложениот алгоритам ги оптимизира оперативните трошоци и распоредот помеѓу повеќе микромрежи (multi-microgrid system). Во [63] е предложен алгоритам на змеј мува (Dragonfly Algorithm – DFA) за минимизација на оперативните трошоци на микромрежи поврзани со мрежата, преку интегрирање на програма за одсив на побарувачката во системот за управување. Алгоритамот е тестиран на подобрениот IEEE 34-node тест-систем.

Истражувањето во [28] предлага подобрен адаптивен генетски алгоритам (Adaptive Genetic Algorithm – AGA) за оптимизација на микромрежи поврзани со мрежата со ОИЕ и самостоен ДГ. Алгоритамот динамички ги прилагодува стапките на мутација и вкрстување за да избегне прерана конвергенција и да овозможи подобро истражување на просторот на решенија.

Системот за управување има за цел да ги минимизира оперативните трошоци, да ги намали емисиите и да ја зголеми сигурноста на системот преку ефикасно распоредување на ресурсите. Во [64] е предложен подобрен диференцијален еволуциски пристап засилен со евристички техники (Differential Evolution with Heuristic – DE-H), кој ги оптимизира оперативните трошоци земајќи ги предвид трошоците за деградација на складирање енергија во заеднички микромрежи.

Во [65] е претставена детална споредбена анализа и повеќекритериумска оптимизација на AC и DC-системи со примена на Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) алгоритам. Целта е да се минимизира вкупниот трошок на мрежата и истовремено да се максимизира достапноста на системот преку одредување на оптималниот капацитет и конфигурација на компонентите.

Во [66] е применет подобрен повеќецелен диференцијален еволуциски алгоритам (Improved Multi-Objective Differential Evolution – IMODE) за повеќекритериумска оптимизација со различни ограничувања со цел намалување на оперативните трошоци и на влијанието на микромрежите врз животната средина. Алгоритамот е тестиран под различни услови поврзани со ограничувањата на тргување со мрежата и учеството на ОИЕ.

Истражувањето спроведено во [67] предлага подобрен алгоритам за оптимизација заснован на биогеографија (Improved Biogeography-Based Optimization Algorithm – IBBOA) за оптимално димензионирање и работење на систем за складирање на енергија во батерии во микромрежа со интеграција на ветерната енергија. Целта е минимизација на вкупните трошоци (капитални и оперативни), при почитување на ограничувањата на батеријата, како што се длабочина на празнење (DoD) и животен век, како и обезбедување рамнотежа помеѓу производството и побарувачката на енергија во часовни интервали.

Преку симулација на три сценарија: без БС, со БС со фиксна големина и со оптимално димензиониран БС, авторите покажуваат дека батерија од 150 kWh нуди најдобар компромис, значително ги намалува оперативните трошоци во споредба со фиксна батерија од 100 kWh.

Во [68] е предложена нова рамка за минимизација на напонските отстапувања и оперативните трошоци во активни дистрибутивни системи, базирана на длабоко засилено учење со повеќе агенти (Multi-Agent Deep Reinforcement Learning). Истражувањето предлага Multi-Agent Twin Delayed Deterministic Policy Gradient –

MATD3 за решавање на комплексниот оптимизациски проблем кој ги адресира клучните прашања како што се интермитентноста на ОИЕ, економската работа и сигурноста на системот. Авторите предлагаат контролна стратегија базирана на оптимизација што го распоредува протокот на енергија меѓу различни ресурси, земајќи ги предвид интеракциите со мрежата.

Во [69] е воведена рамка за истовремена економска распределба и оптимален проток на енергија. Студијата ја оптимизира распределбата на производните единици за минимизирање на оперативните трошоци, при обезбедување стабилност и баланс на енергија, користејќи мешано целобројно нелинеарно програмирање (Mixed Integer Non-Linear Programming – MINLP).

Во [70] е презентирана повеќекритериумска рамка за планирање еден ден однапред (day-ahead scheduling), користејќи Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization – QIPSO, за истовремена минимизација на трошоци и емисии.

Во [71] е предложена двостепена рамка за управување со модерни дистрибутивни мрежи. Во првата фаза се оптимизираат оперативните трошоци за потрошувачите кои учествуваат во операторот на дистрибутивната мрежа (Distribution Network Operator – DNO), додека во втората фаза се спроведува повеќекритериумска оптимизација за минимизација на загуби, напонски девијации, оперативни трошоци и емисии на гасови, користејќи комбинација на Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS и Elephant Herding Optimization – EHO.

Во [72] се користени Imperialist Competitive Algorithm – ICA и ГА за оптимизација на напонски девијации во микромрежи преку стратегија за одсив на побарувачката. Студијата предлага управување со оптоварувањето врз основа на цените на електричната енергија и напонските девијации во јазлите. Сепак, не се разгледуваат рамнотежата на енергија и оперативните трошоци во микромрежата.

Истражувањето во [73] користи комбиниран ГА и предиктивна контрола базирана на модел (Model Predictive Control – MPC) за минимизација на трошоците за енергија и увезена моќност од мрежата.

Во [74] е претставен систем за управување со енергија за изолирана микромрежа опремена со фотоволтаичен систем, горивни ќелии, микротурбина и гасен мотор. Студијата користи мешано целобројно линеарно програмирање (MILP) за истовремена оптимизација на оперативните трошоци и напонските девијации. Целните функции ги вклучуваат трошоците на дисперзираните генератори за производство на активна и реактивна моќност, како и трошоците на ОИЕ и трошоците за ограничување на оптоварувањето.

Во [75] MILP-пристап е користен за намалување на оперативните трошоци, земајќи ги предвид енергетските загуби, еколошките влијанија и одсивот на побарувачката во микромрежи. Студијата вклучува повеќе извори на енергија: фотоволтаичен систем, ветрогенератор, горивни ќелии, микротурбина, дизел генератор и систем за складирање на енергија во батерии. Анализирани се микромрежи кои работат и во режим поврзан со мрежа и во изолиран режим. Повеќекритериумската оптимизација е насочена кон економска распределба, одредувајќи го оптималниот капацитет на генераторите и системите за складирање, при што нивото на напон е земено како едно од ограничувањата.

Во [76] е анализирана заедничка минимизација на оперативните трошоци и напонските девијации во микромрежи поврзани со мрежа, кои вклучуваат дистрибуирани извори (ФВС, ВГ, ДГ), БС и ЕВ. Придонесот на студијата е во примена на Ladder Spherical Evolution – LSE-алгоритам за ова повеќецелно прашање, со моделирање на системот преку целосен трофазен неурамнотежен проток на енергија (full 3-phase unbalanced power flow), што овозможува реалистично претставување на ограничувањата на мрежата. Пристапот експлицитно се справува со неизвесноста во производството и побарувачката, а резултатите покажуваат дека предложениот метод постигнува значително пониски трошоци во споредба со други метаевристички пристапи.

Истражувањето во [77] предлага нова повеќекритериумска оптимизациска рамка за дистрибутивни мрежи интегрирани со електрични возила, разгледувајќи проблеми како енергетски загуби, трошоци за набавка на енергија, ограничување на оптоварувањето и напонски девијации. Моделот користи Hiking Optimization Algorithm – HOA, кој применува адаптивен механизам за пребарување базиран на Tobler’s Hiking Function, со цел подобро истражување на просторот на решенија и избегнување на локални оптимуми. Симулациите на IEEE 33-bus дистрибутивна мрежа покажуваат дека интеграцијата на ЕВ доведува до намалување на оперативните трошоци, намалување на енергетските загуби, помало ограничување на оптоварувањето и подобрување на напонските девијации во споредба со сценаријата без ЕВ.

Во [78] целта е оптимизација на напонските флукуации и загубите на енергија предизвикани од интеграцијата на ОИЕ во електричната мрежа. Од страната на побарувачката, интегрираната координација на одсивот на побарувачката, прекинувачите на регулациски трансформатори (On-Load Tap Changers – OLTCs) и кондензаторските батерии во флексибилна меѓусебно поврзана дистрибутивна мрежа овозможува максимално задоволство на потрошувачите, при што варијацијата на оптоварувањето е минимизирана. Користејќи Fuzzy Transitive Closure Method – FTSM за сегментација на временски периоди и NSGA-II повеќецелен оптимизатор, авторите имаат за цел да ги минимизираат и оперативните трошоци и напонските девијации, создавајќи координирана шема помеѓу понудата и побарувачката во поврзаните дистрибутивни мрежи.

Резиме на поврзаните студии е прикажано во Табела 2-1, каде се нагласени користените техники за оптимизација, разгледаните цели, како и видовите на дисперзирани генератори и тест-системите.

Од анализираниите истражувања може да се заклучи дека проблемот на оптимален тек на моќностите во микромрежи е разгледан од повеќе аспекти, со примена на различни оптимизациски техники, вклучувајќи истовремена оптимизација на оперативните трошоци и емисиите, оптимизација на трошоците со одсив на потрошувачката, како и оптимизација на трошоците и напонските девијации. Поголемиот дел од истражувањата се ограничени на нисконапонски микромрежи или на IEEE 33-bus тест-мрежи, при што не се разгледуваат нисконапонски дистрибутивни водови, кои пореално ја отсликуваат структурата и оперативните карактеристики на реалните микромрежи. За надминување на овој недостаток, во оваа дисертација се применува модел на европски нисконапонски вод со 116 јазли, што овозможува подетална и пореалистична евалуација на перформансите на предложениот MGES-GA-алгоритам.

Истражувањето во ова докторска дисертација воведува Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA) пристап, кој истовремено ги оптимизира трошоците и напонските девијации, вклучува широк спектар на дисперзирани генератори (фотоволтаичен генератор, ветрогенератор, горивни ќелии, микротурбина, батериски систем и трговија со мрежата), и ја применува методологијата на модифициран IEEE - нисконапонски дистрибутивен вод (European LV feeder), како и на модифицирана IEEE - 33-bus мрежа.

Табела 2-1 Преглед на референтна литература релевантна за споредба со предложениот алгоритам

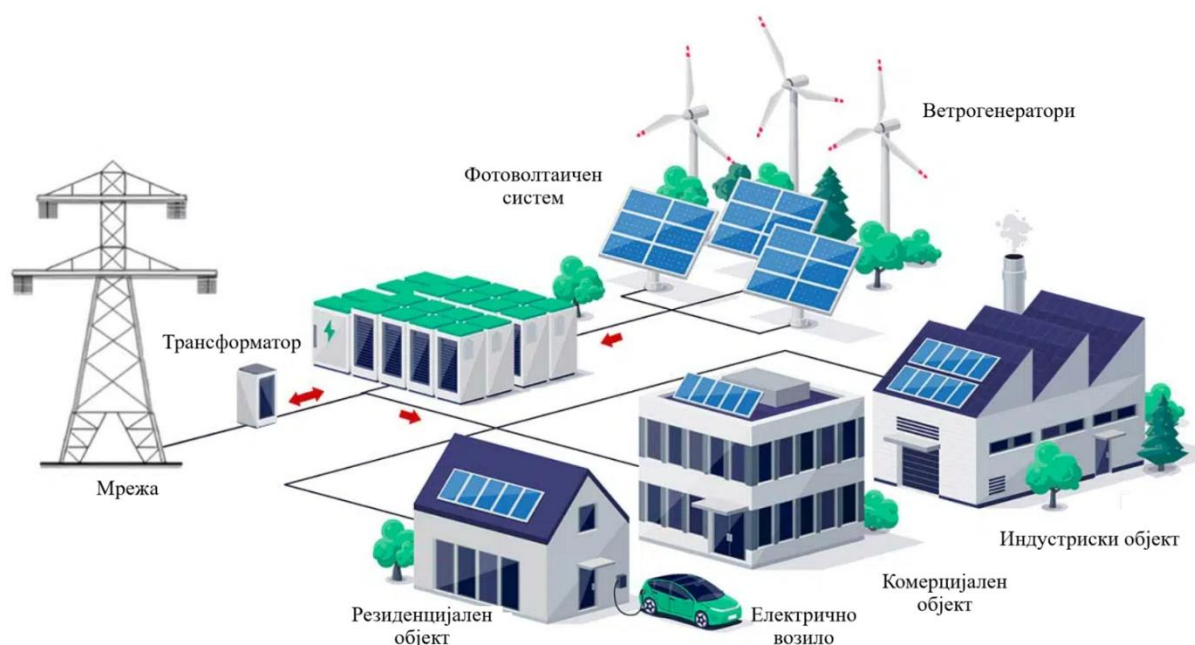
Реф. Бр.	Метод за оптимизација	Оптимизација-цели		Случај на анализа	ОИЕ	Главни придонеси
		Трошоци	Напон			
[36]	Improved GA & PSO	✓	✗	ММ поврзана на мрежа	ФВ, ВГ, БС	Воведува елитистичко и катастрофско размислување за оптимизација на селекцијата.
[28]	Improved AGA	✓	✗	ММ поврзана на мрежа	ФВ, ВГ, БС, ДГ	Минимизирање на оперативните трошоци преку управување со распределба и користење на енергијата; вклучува контролер на DC и AC шините.
[64]	DE-H	✓	✗	Хибриден систем поврзан со мрежа	ФВ, ВГ, БС, ГК, МТ	Предлага повеќекритериумска оптимизација што го зема предвид влијанието на деградацијата на батеријата врз оперативните трошоци.
[65]	MOPSO	✓	✗	Резиденцијална ММ	ФВ, ВГ, БС	Оптимизацијата ги разгледува оперативните трошоци и достапноста на ОИЕ.
[66]	IMODE	✓	✗	Типична нисконапонска ММ поврзана на мрежа	ФВ, ВГ, БС, ГК, МТ	Извршува истовремена оптимизација на трошоци и емисии, земајќи ги предвид различните ограничувања.
[68]	MATD3	✓	✓	IEEE 33-bus и 69-bus дистрибутивни мрежи	ФВ, ВГ, БС, ДГ	Предлага рамка за управување со БС и ДГ за намалување на зависноста од надворешната мрежа и стабилизација на напонот.
[69]	MINLP	✓	✓	Изолирана ММ поврзана на мрежа	ФВ, ВГ, БС, ККП, ДГ, единица на природен гас	Предлага заедничка рамка за економска распределба и оптимален проток на моќност, одржувајќи стабилност на напонот.

[70]	QPSO	✓	✗	ММ поврзана на мрежа	ФВ, ВГ, БС, ГЌ, МТ	Предлага нов алгоритам базиран на PSO за балансирано намалување на трошоците и на емисиите.
[71]	TOPSIS и ЕНО	✓	✓	IEEE 33-bus мрежа	ФВ, ВГ, ДГ	Имплементира програма за одговор на побарувачка и повеќекритериумска оптимизација за намалување на загуби, напонски девијации, оперативни трошоци и емисии.
[73]	GA & MPC	✓	✗	Хибридна ММ	ФВ, ВГ, БС, ГЌ	Оптимизација на трошоци и намалување на јаглеродниот отпечаток, земајќи ја предвид деградацијата на батеријата.
[74]	MILP	✓	✓	Изолирана ММ	ФВ, ВГ, МТ, ГЌ, ГЕ	Повеќекритериумска оптимизација на напонските девијации, оперативните трошоци и загадувањето. Методот има за цел да ја минимизира апсолутната вредност на очекуваните флукуации на напонот во однос на референтните вредности пред појавата на флукуации на моќноста.
[75]	MILP	✓	✗	Изолирани и поврзани ММ	ФВ, ВГ, БС, ГЌ, МТ, ДГ	Фокус на минимизација на оперативни трошоци и оптимизација на складишниот капацитет.
[76]	LSE	✓	✓	Небалансирани ММ поврзани на мрежа	ФВ, ВГ, БС, ДГ, ЕВ	Оптимизација на оперативни трошоци и напонски девијации во мали небалансирани микромрежи.
[77]	HOA	✓	✓	IEEE 33-bus мрежа	ФВ, ВГ, БС, ДГ, ЕВ	Повеќекритериумска оптимизација за минимизација на оперативни трошоци, загуби и управување со ЕВ.
[78]	NSGA-II (FTCM & NSGA-II)	✓	✓	IEEE 33-bus мрежа	ФВ, ВГ, КБ	Координирана оптимизација на побарувачка и понуда, минимизирајќи оперативни трошоци и напонски девијации.
Тековно истражување	MGES-GA	✓	✓	IEEE European low voltage network, IEEE 33-bus network	ФВ, ВГ, БС, ГЌ, МТ	Предлага нов метод за селекција во генетски алгоритам применет за оптимизација на трошоци и напонски девијации во микромрежа преку пристап со пондериран збир за повеќекритериумска оптимизација.

3. ДЕФИНИРАЊЕ НА ИСТРАЖУВАЧКИОТ ПРОБЛЕМ

3.1. ДЕФИНИРАЊЕ НА МИКРОМРЕЖИТЕ И НИВНИТЕ КОМПОНЕНТИ

Во современата научна и стручна литература, микромрежите се препознаваат како еден од најзначајните концепти во трансформацијата на електроенергетските системи кон поодржливи, пофлексибилни и поинтелигентни структури. Според дефиницијата дадена во [79], микромрежата претставува локално ограничен електроенергетски систем кој овозможува интеграција, координација и заедничко управување со различни дистрибуирани извори на електрична енергија, потрошувачи и системи за складирање, во рамките на јасно дефинирана електрична инфраструктура. Таа претставува функционална целина која може да работи како дел од главната електроенергетска мрежа, но и независно од неа, во таканаречен островски (изолиран) режим на работа. На Слика 3.1 е даден шематски приказ на една современа микромрежа.



Слика 3.1 Шематски приказ на структурата на современа микромрежа [80]

Оваа двојна можност за работа, поврзана со главната мрежа или автономно, претставува една од клучните предности на микромрежите. Во поврзан режим, микромрежата може да разменува енергија со дистрибутивната или преносната мрежа, односно да купува електрична енергија во периоди на недостиг или да продава вишоци кога локалното производство ја надминува потрошувачката. Во автономен режим, микромрежата функционира како самостоен систем кој ги балансира сопствените ресурси и обезбедува континуирано напојување на приклучените потрошувачи. Оваа способност значително ја зголемува сигурноста на снабдувањето, особено во услови на дефекти, прекини или нарушувања во главната мрежа. Дополнително, микромрежите придонесуваат за зголемување на отпорноста на системот кон екстремни временски настани и други непредвидливи ситуации.

Основната цел на микромрежите е обезбедување стабилна, сигурна и квалитетна испорака на електрична енергија до крајните корисници, при истовремено зголемување

на учеството на ОИЕ во електроенергетскиот систем [81]. Преку локална интеграција на фотоволтаични системи, ветерни генератори и други дистрибуирани извори, се намалува зависноста од централизираните конвенционални електрани и се овозможува намалување на емисиите на штетни гасови. Истовремено, оптималното управување со локалните ресурси овозможува намалување на техничките загуби во мрежата и минимизирање на оперативните трошоци, што има и економска и еколошка придобивка.

Структурно, микромрежата се состои од повеќе меѓусебно поврзани компоненти кои функционираат како интегриран систем [81]. Една од најзначајните групи компоненти се дистрибуираните генератори. Тие претставуваат извори на електрична енергија кои се лоцирани во близина на потрошувачите и се приклучени на дистрибутивно напонско ниво. Во најголем број случаи, овие генератори вклучуваат обновливи извори на енергија како ФВС, ВГ, кои се карактеризираат со варијабилно и стохастично производство зависно од временските услови. Поради нивната непредвидлива природа, тие често се комбинираат со конвенционални извори како микротурбина, дизел генератор и горивни ќелии. Овие извори обезбедуваат дополнителна флексибилност, резервна моќност и поддршка на стабилноста на напонот и фреквенцијата, особено во периоди на намалено производство од обновливите извори.

Покрај генераторите, клучна улога во микромрежата имаат и потрошувачите. Тие можат да бидат класични, односно пасивни потрошувачи, кои единствено консумираат електрична енергија, или активни потрошувачи, познати како потрошувачи – произведувачи (prosumers). Активните потрошувачи располагаат со сопствени извори на производство, најчесто фотоволтаични панели инсталирани на покриви, и можат дел од произведената енергија да ја користат за сопствени потреби, а остатокот да го предаваат во микромрежата. Со ова се создава двонасочен проток на енергија, што претставува значајна разлика во однос на традиционалните електроенергетски системи, каде што протокот на енергија е еднонасочен – од производителот кон потрошувачот.

Системите за складирање на електрична енергија претставуваат уште една суштинска компонента на микромрежите. Најчесто станува збор за батериски системи, иако можат да се користат и други технологии како суперкондензатори или водородни системи. Улогата на складиштата е повеќекратна: тие овозможуваат апсорбирање на вишоците енергија во периоди на високо производство, нејзино складирање и повторно користење во периоди на зголемена побарувачка или на намалено производство. На тој начин се обезбедува балансирање помеѓу понудата и побарувачката, се намалуваат пиковите на оптоварување и се подобрува квалитетот на напонските профили. Дополнително, системите за складирање придонесуваат за зголемување на стабилноста на микромрежата во автономен режим на работа, овозможувајќи континуирано напојување дури и при краткотрајни нарушувања.

Централна и координирачка улога во микромрежата има системот за управување со енергија (EMS). Овој интелигентен систем врши мониторинг, анализа и оптимизација на работата на сите компоненти во реално време или во однапред дефинирани временски интервали. Системот за управување ја одредува оптималната распределба на производството, управува со полнењето и празнењето на батериите, ги оптимизира трошоците за купување или продажба на електрична енергија од и кон главната мрежа и обезбедува исполнување на техничките ограничувања, како што се напонските граници и ограничувањата на моќноста на поединечните елементи. Во современите микромрежи,

системот за управување често користи напредни алгоритми за оптимизација, вклучувајќи метахеуристички методи како генетски алгоритми, со цел да се постигне најдобар можен компромис помеѓу економските и техничките критериуми.

Интеграцијата на сите овие компоненти во една функционална целина ја прави микромрежата сложен, но високоадаптивен систем. Таа претставува транзиционен чекор од централизирана кон децентрализирана електроенергетски системи, каде фокусот се префрла од големи производни капацитети кон локално производство, интелегентно управување и активна улога на потрошувачите. Преку ваквата организација, микромрежите придонесуваат за намалување на емисиите на стакленички гасови, зголемување на енергетската независност и подобрување на отпорноста на системот.

Оттука, микромрежите не се само техничко решение, туку и стратешки концепт кој овозможува одржлив развој на електроенергетските системи. Нивната способност за интеграција на различни извори, флексибилно управување со ресурсите и обезбедување сигурно напојување ги позиционира како клучен елемент во идните паметни мрежи и во процесот на енергетска транзиција кон нискојаглеродна економија.

3.1.1. МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

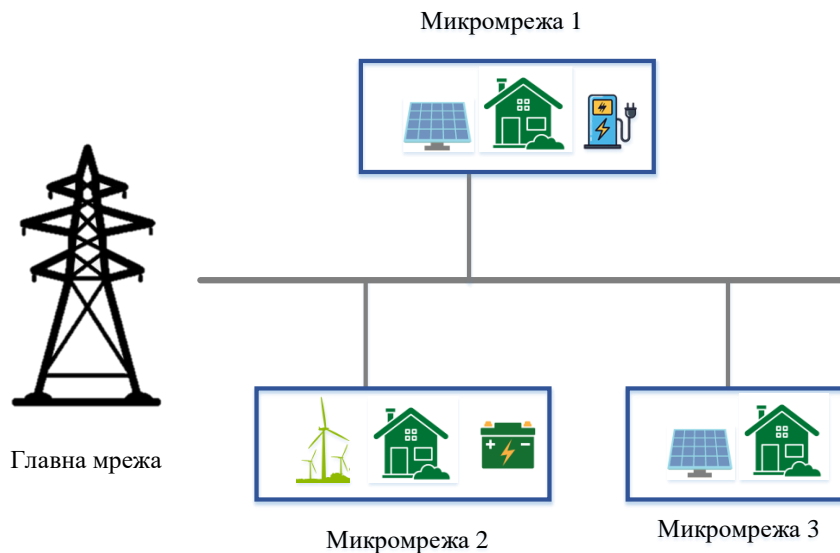
Микромрежите поврзани на главната електроенергетска мрежа претставуваат напреден концепт на дистрибуирани енергетски системи, кој овозможува локално производство, складирање и управување со електричната енергија, при истовремена интеракција со централната мрежа. Овие микромрежи функционираат во нормален режим на работа синхронизирано со мрежата, што им овозможува да разменуваат електрична енергија, односно да испорачуваат вишоци или да преземаат енергија при недостиг, во зависност од моменталната состојба на локалното производство и побарувачката. Поврзаноста со мрежата значително ја зголемува сигурноста на снабдувањето и ја намалува потребата од прекумерни локални резервни капацитети.

Во микромрежите поврзани на мрежа, дистрибуираните генератори, како ФВС и ВГ, често работат под влијание на временски услови и покажуваат варијабилно производство. Поради тоа, улогата на батериски систем за складирање и флексибилните диспечабилни извори, како микротурбина и горивни ќелии, е од особено значење за балансирање на енергетските текови. Главната електроенергетска мрежа во овој контекст делува како дополнителен извор и повор на енергија, овозможувајќи оптимално управување со локалните ресурси и минимизација на оперативните трошоци.

Клучен елемент кај микромрежите поврзани на мрежа е системот за управување со енергија, кој врши координација на сите компоненти и донесува одлуки за купување, продажба или складирање на електрична енергија врз основа на економски сигнали, технички ограничувања и барања за квалитет на електричната енергија. Особено внимание се посветува на одржување на напонската стабилност и почитување на мрежните кодекси во точката на заедничко приклучување. Преку ваков интегриран пристап, микромрежите поврзани на мрежа придонесуваат кон поефикасно искористување на ОИЕ, намалување на емисиите и зголемување на флексибилноста и отпорноста на современите ЕЕС.

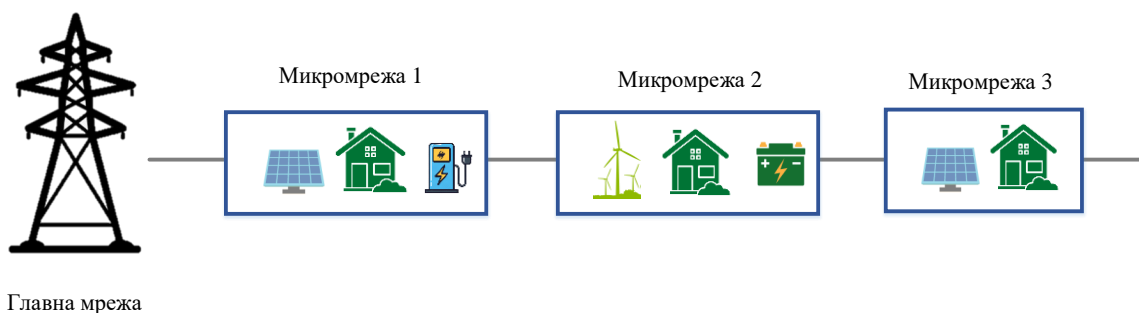
Микромрежите кои се поврзани на локалната мрежа можат да се конфигурираат со различни топологии. Генерално, тие можат да се класифицираат во три категории [82]:

- Повеќе микромрежи поврзани на еден извод.** Извод на кој се поврзани повеќе микромрежи во различни точки по должина на изводот (Слика 3.2). Покрај микромрежите може да се поврзат и други единици кои не се во склоп на микромрежите. Во овој случај контролниот систем треба да ги препознае деловите од изводот кои се дел од микромрежите и да ги координира со останатите единици.



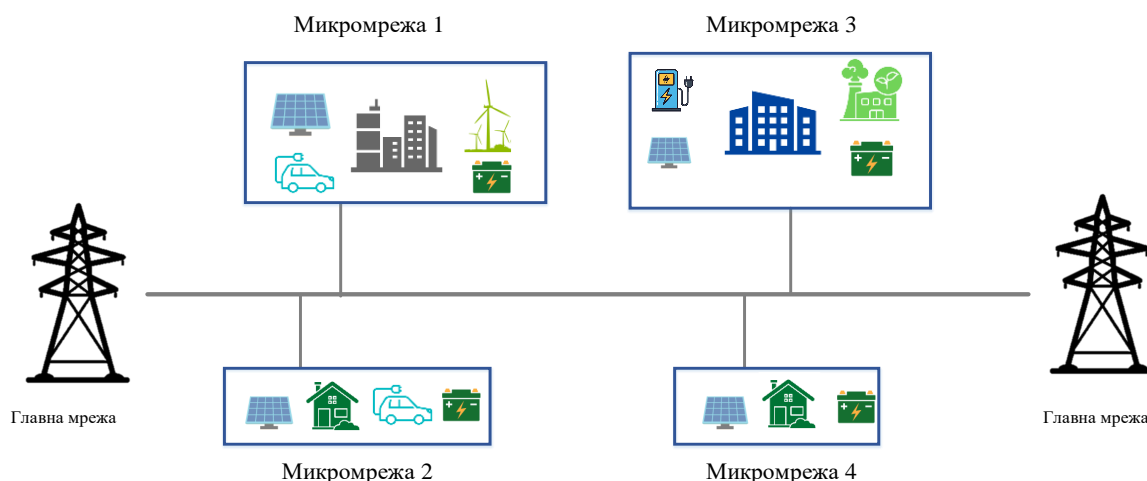
Слика 3.2 Повеќе микромрежи поврзани на еден извод

- Синцир поврзани микромрежи** (анг. Cascaded microgrids). Во овој случај, постои микромрежа која е директно поврзана на мрежата, а останатите микромрежи се поврзани една по друга на нејзе, формирајќи синцир (Слика 3.3). Недостатокот на оваа топологија е што доколку првата микромрежа е во испад, не постои начин останатите микромрежи да се поврзат на локалната мрежа.



Слика 3.3 Микромрежи кои поврзани формираат синцир

- Вгнездени микромрежи** (анг. Nested microgrids). Во овој случај во рамките на една микромрежа постојат и други помали микромрежи (Слика 3.4). Внатрешните микромрежи служат за напојување на критични потрошувачи и домаќинства кои се класифицирани како потрошувачи – произведувачи. Доколку настане испад на главната микромрежа, секоја од внатрешните микромрежи може да се поврзе во точката на побрзување со локалната мрежа (анг. Point of Common Coupling – PCC).



Слика 3.4 Вгнездени микромрежи

Микромрежите поврзани на главната електроенергетска мрежа претставуваат напреден концепт на дистрибуирани енергетски системи кој овозможува локално производство, складирање и управување со електричната енергија, при истовремена интеракција со централната мрежа. Во нормален режим на работа тие функционираат синхронизирано со мрежата, што им овозможува двонасочна размена на електрична енергија, односно испорака на вишоци или преземање енергија при недостиг, во зависност од состојбата на локалното производство и побарувачката. На системско ниво, ваквиот концепт е препознаен како средство за зголемување на локалната сигурност, подобрување на напонските услови и намалување на загубите во дистрибутивните изводи, токму поради тоа што дел од енергијата се произведува блиску до потрошувачите и може да се управува како координирана целина.

Од аспект на стабилноста, микромрежите поврзани на мрежа може да имаат и позитивни и негативни влијанија, во зависност од нивната структура, степенот на пенетрација на инвертерски базирани извори и применетите стратегии за контрола. Кога тие се поврзани на локалната мрежа, напонот и фреквенцијата во точката на приклучок (PCC) се „наметнати“ од главната мрежа, па микромрежата се однесува како контролирана единица која може да обезбедува помошни услуги, како регулација на реактивна моќност и локално подобрување на напонскиот профил. Сепак, варијабилното производство од ФВС и ВГ може да доведе до брзи промени на активната моќност, што се рефлектира како флукуации на напон, фреквенција и промени на протокот на моќност по изводите; ако овие промени не се компензираат преку складирање или диспечабилни извори, тие можат да ја зголемат динамичката чувствителност на дистрибутивната мрежа и да ја усложнат напонската регулација [83].

Кога микромрежата има висок удел на инвертерски извори, особено значајни стануваат прашањата на динамичка стабилност и интеракции меѓу контролерите. Дури и кога секоја единица е поединечно стабилна, паралелното работење на повеќе инвертери преку заедничка мрежна импеданса може да предизвика „coupling“ ефекти, појава на повеќекратни резонанции и потенцијални нестабилности, особено во слаби мрежи и при промени на импедансата на приклучувањето. Овој проблем дополнително се изразува

кога постојат поврзани или кластери на микромрежи, каде што се јавуваат меѓусебни динамички влијанија меѓу микромрежите преку линиите и РСС, па затоа се бара контролен дизајн кој експлицитно ја зема предвид поврзаноста и вклучува техники за амортизација на резонанциите [84].

Ефектот од вклучување и исклучување на микромрежата (премин од островски режим на приклучување на мрежа и обратно) е еден од најкритичните процеси за целокупниот електроенергетски систем, бидејќи претставува настан со изразени транзиенти и промени на балансот на моќности. При планирано исклучување или исклучување поради дефект, микромрежата мора за многу кратко време да премине од режим каде што фреквенцијата и напонот се одредени од главната мрежа, кон режим во кој самата микромрежа ги регулира тие величини. Истражувањата за автономна работа покажуваат дека стабилноста при островски режим на работа зависи од брзината и од логиката на управување, достапноста на диспечабилни извори и од правилно подесени контролни петли, бидејќи во спротивно може да се појават осцилации на напон/фреквенција, преоптоварувања и исклучувања на единици [85].

При повторно приклучување на микромрежата на главната мрежа, неопходна е синхронизација на напон, фреквенција и фазен агол во РСС за да се избегнат големи ударни струи и електромеханички напрегања. Во пракса, тоа подразбира дека контролата мора да овозможи постепено преземање/предавање на моќност, стабилно делење на товарот и префрлување на референтите (од главната мрежа кон микромрежата и обратно) без нарушување на квалитетот на електричната енергија.

Клучен елемент за минимизирање на негативните влијанија врз стабилноста е хиерархиската контрола и енергетскиот менаџмент. Широкоприфатен пристап е контролата да се организира во примарно ниво (брза локална стабилизација), секундарно ниво (реставрација на номинална фреквенција и напон) и терцијарно ниво (оптимизација на размена со мрежата и економски цели). Ваквата структура овозможува микромрежата да остане стабилна и во автономен режим, но и да нема големо негативно влијание на локалната мрежа, обезбедувајќи предвидливо однесување во РСС, намалувајќи ја веројатноста од осцилации при промени на товарот, производството или мрежната импеданса [86].

3.1.2. ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

Оптималната распределба на моќности кај микромрежи поврзани на главната електроенергетска мрежа претставува комплексен и повеќеслоен проблем, особено кога микромрежата вклучува голем број различни компоненти како произведувачи – потрошувачи, станици за полнење на електрични возила и повеќе различни типови генератори од ОИЕ [19]. За разлика од традиционалните дистрибутивни мрежи со еднонасочни енергетски текови, ваквите микромрежи се карактеризираат со двонасочни текови на енергија, динамична промена на производството и побарувачката, како и силна меѓузависност помеѓу техничките и економските аспекти на работата. Ова значително ја усложнува формулацијата и решавањето на оптимизацискиот проблем.

Еден од главните предизвици произлегува од стохастичната природа на ОИЕ, како ФВС и ВГ, чија продукција директно зависи од временските услови. Неизвесноста во

производството бара употреба на напредни модели за предвидување и робусни оптимизациски стратегии, со цел да се обезбеди сигурно снабдување и минимизација на трошоците [87]. Дополнително, присуството на произведувачи – потрошувачи воведува варијабилни и тешко предвидливи профили на потрошувачка и производство, што го отежнува балансирањето на енергијата во реално време.

Станиците за електрични возила претставуваат уште еден значаен предизвик, бидејќи тие можат да функционираат и како потрошувачи и како извори на енергија (vehicle-to-grid концепт). Нивната употреба зависи од навиките на корисниците, временските интервали на полнење и ограничувањата на батериите, што дополнително ја зголемува димензионалноста и нелинеарноста на оптимизацискиот проблем [60]. Истовремено, потребно е да се обезбеди дека полнењето на електричните возила нема негативно да влијае врз напонската стабилност и преоптоварувањето на дистрибутивната мрежа.

Покрај економските цели, како минимизација на оперативните трошоци и оптимизација на размената на енергија со главната мрежа, оптимизацијата мора да ги земе предвид и строгите технички ограничувања, вклучувајќи напонски граници, ограничувања на моќноста на генераторите и складиштата, како и мрежните кодекси во точката на заедничко приклучување (PCC). Овие ограничувања често се нелинеарни и временски зависни, што ја зголемува пресметковната сложеност на проблемот [88].

Во научната литература сè почесто се среќаваат истражувања кои се фокусираат на оптимизација на работата на батериските системи за складирање електрична енергија, при што нивното управување не се разгледува изолирано, туку како интегрален дел од целокупниот процес на оптимизација на микромрежата. Во овие трудови, оптималното полнење и празнење на батериите се координира со цел минимизација на оперативните трошоци, намалување на напонските варијации во дистрибутивната мрежа и редукција на емисиите на јаглерод диоксид [64] [89].

Во контекст на микромрежи поврзани на мрежа, оптимизацијата на загубите на активна моќност претставува значаен техничко-економски аспект. Загубите во дистрибутивната мрежа се функција од струите во водовите и нивните отпори и се пропорционални на квадратот од струјата. Поради тоа, неправилната распределба на локалното производство, прекумерната размена со главната мрежа или неконтролираното полнење на батерии и електрични возила може да доведе до зголемени технички загуби.

Оптимизацијата на загубите на активна моќност најчесто се формулира како дополнителна целна функција или како дел од вкупната целна функција, на пример преку минимизација на збирот од активните загуби во сите водови за даден временски интервал. Ова може да се постигне преку оптимално позиционирање и диспечирање на распределените генератори, управување со реактивната моќност, координирано управување со батериите и оптимизација на профилите на полнење на електричните возила. Намалувањето на загубите директно влијае врз намалување на оперативните трошоци и подобрување на енергетската ефикасност на системот, како и врз намалување на потребата од дополнителна енергија од главната мрежа [90].

Во повеќекритериумските модели, минимизацијата на загубите често се разгледува паралелно со минимизација на трошоците, девијациите на напонот и/или намалување на

емисиите на стакленички гасови, при што се добива Парето фронт на оптимални решенија. Изборот на компромисно решение зависи од приоритетите на операторот, дали примарна цел е економската исплатливост, техничката стабилност или енергетската ефикасност.

Современите микромрежи се развиваат во насока на декарбонизација и намалување на емисиите на стакленички гасови, особено CO₂ [70] [91]. Иако микромрежите со висок удел на ОИЕ имаат потенцијал за значително намалување на емисиите, нивното поврзување со главната мрежа значи дека дел од потрошувачката може да биде покриен од енергија произведена од фосилни горива. Дополнително, присуството на дизел генератори или на микротурбини во рамките на микромрежата придонесува за директни локални емисии.

Затоа, во оптимизацискиот модел често се вклучува посебна целна функција за минимизација на емисиите, која може да се дефинира како збир од емисионите фактори на поединечните извори помножени со нивното произведено количество енергија во даден временски интервал [92]. Во случај на размена со главната мрежа, емисиите може да се пресметаат врз основа на дефинираниот просечен или маргинален емисионен фактор на електроенергетскиот систем.

Еден од клучните технички индикатори за квалитетот на електричната енергија во микромрежите поврзани на мрежа претставува одржувањето на напонските нивоа во дозволените граници. Поради радијалната структура на дистрибутивните мрежи, присуството на распределени генератори и двонасочните текови на моќност, напонските профили во микромрежата можат значително да варираат во текот на денот. Во периоди со високо локално производство од ФВС и ниска потрошувачка, може да дојде до пораст на напонот (overvoltage), додека во периоди со висока потрошувачка и недоволно локално производство се јавува пад на напон (undervoltage), особено во оддалечените јазли од точката на заедничко приклучување (PCC).

Падот на напон е директно поврзан со активните и реактивните текови на моќност и со импедансата на водовите. Зголемените струи поради неконтролирано полнење на електрични возила, неповолна диспечерска стратегија или некоординирано празнење на батерии можат да доведат до недозволените девијации на напонот. Ваквите девијации не само што го нарушуваат квалитетот на снабдување, туку можат да предизвикаат дополнителни загуби, намалување на животниот век на опремата и активација на заштитни механизми.

Минимизацијата на напонските девијации често се комбинира со минимизација на оперативните трошоци и загубите на моќност, при што се добива повеќекритериумски оптимизациски проблем. Во таков контекст, се овозможува идентификација на компромисни решенија кои обезбедуваат економски исплатливо работење без нарушување на напонската стабилност.

Контролата на падот на напон може да се реализира преку повеќе механизми: оптимално управување на распределените генератори, управување со реактивната моќност на инверторите кај ФВС и ВГ, координирано управување со батериските системи, како и оптимизација на режимот на полнење и празнење на електричните возила. Дополнително, во некои случаи се разгледува и оптимално поставување на уреди за компензација на реактивна моќност или регулациски трансформатори.

Конечно, зголемениот број на компоненти и временски интервали доведува до проблеми со скалабилноста и пресметковното време, особено кај часовни оптимизации или оптимизации во реално време. Поради тоа, класичните детерминистички методи често не се доволно ефикасни, што ја оправдува примената на напредни метаевристички и хибридни оптимизациски алгоритми [8]. Надминувањето на овие предизвици е клучно за обезбедување ефикасно, стабилно и економски оправдано функционирање на сложените микромрежи поврзани на мрежа во идните ЕЕС.

Повеќекритериумската оптимизација, која истовремено ги минимизира трошоците, загубите на моќност и емисиите на гасови, овозможува добивање на одржливи решенија кои ги балансираат економските и еколошките цели. Во овој контекст, примената на напредни метаевристички и хибридни алгоритми е особено оправдана, бидејќи тие овозможуваат ефикасно пребарување на комплексниот простор на решенија и идентификација на глобално или на квазиглобално оптимални решенија.

Зголемениот број на компоненти, временски интервали и критериуми доведува до проблеми со скалабилноста и пресметковното време, особено кај часовни или кај оптимизации во реално време. Поради тоа, класичните детерминистички методи често не се доволно ефикасни, што ја оправдува примената на напредни метаевристички пристапи, како и развојот на подобрени генетски алгоритми и нивни хибридни варијанти. Надминувањето на наведените предизвици е клучно за обезбедување ефикасно, стабилно, економски и еколошки оправдано функционирање на сложените микромрежи поврзани на мрежа во идните електроенергетски системи.

3.1.3. ПРЕДИЗВИЦИ ПРИ РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

Во контекст на оптимизацијата на микромрежи, ограничувањата често се манифестираат како практични и методолошки предизвици кои значително го усложнуваат процесот на донесување оптимални управувачки одлуки. Еден од клучните предизвици произлегува од високата комплексност и хетерогеност на микромрежите, кои интегрираат различни типови генератори, произведувачи – потрошувачи, системи за складирање енергија и флексибилни потрошувачи. Оваа разновидност воведува голем број меѓусебно зависни променливи и ограничувања, што ја отежнува формулацијата на унифициран и прецизен оптимизациски модел.

Во литературата се среќаваат многубројни истражувања кои ја оптимизираат работата на микромрежите по една променлива вклучувајќи минимизација на трошоци, емисија на гасови, загуби на активна и реактивна моќност и деградација на батеријата, како и максимизација на профит, доверливост, производство на моќност и нето-сегашна вредност. Но, при повеќе критериумска оптимизација проблемот се усложнува, па во литературата се среќаваат истражувања со два и повеќе критериуми за оптимизација [93].

Значаен предизвик претставува неизвесноста поврзана со ОИЕ и побарувачката. Неточните прогнози за соларното зрачење, брзината на ветерот или корисничкото однесување на произведувачите – потрошувачи директно влијаат врз квалитетот на оптималното решение и можат да доведат до неефикасно управување или до зголемени оперативни трошоци. Дополнително, динамичната природа на микромрежите, особено кај часовните оптимизации или кај оптимизациите во реално време, претставува

предизвик за алгоритмите кои мора брзо и стабилно да реагираат на промените во системот.

Друг значаен предизвик е балансирањето помеѓу повеќе, често спротивставени цели, како минимизација на трошоците, намалување на напонските девијации, ограничување на емисиите и продолжување на животниот век на БС. Овие цели бараат повеќекритериумски пристапи, кои ја зголемуваат пресметковната сложеност и чувствителноста на резултатите на избраниот оптимизациски метод.

Покрај тоа, ограничувањата во пресметковните ресурси и времето за донесување одлуки претставуваат практичен предизвик, особено кај големи микромрежи со висок степен на деталност. Многу алгоритми покажуваат задоволителни резултати во офлајн анализи, но нивната примена во реално време е ограничена. Сите овие предизвици укажуваат дека оптимизацијата на микромрежи не е само математички проблем, туку интердисциплинарен предизвик кој бара робусни модели, напредни алгоритми и внимателно интегрирање на техничките и на практичните аспекти на системот.

3.2. ПРИМЕНА НА ГЕНЕТСКИТЕ АЛГОРИТМИ ЗА РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМОТ НА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО СОВРЕМЕНИТЕ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

Целта на оптимизациските алгоритми за управување и планирање на микромрежи е да воспостават рационален и технички оправдан компромис помеѓу повеќе меѓусебно зависни, а често и конфликтни цели. Во реални услови, операторот на микромрежата истовремено се стреми кон минимизација на оперативните трошоци, намалување на загубите, одржување на напонските профили во дозволени граници, зголемување на уделот на обновливи извори на енергија и подобрување на сигурноста и стабилноста на системот. Меѓутоа, оптимизирањето на еден од овие критериуми неретко води до влошување на друг, на пример, максималното искористување на батерискиот систем може да ги намали трошоците за купување електрична енергија од мрежата, но истовремено да предизвика забрзана деградација на батеријата или зголемени инвестициски трошоци.

Поради тоа, проблемот на оптимизација на микромрежи се третира како комплексна, најчесто нелинеарна и неконвексна задача, во која е потребно внимателно дефинирање на целните функции и ограничувањата. Во научната литература се среќаваат различни пристапи кон негово решавање, зависно од приоритетите на истражувањето и карактеристиките на анализираниот систем. Дел од трудовите применуваат детерминистички методи како линеарно, мешано-целобројно или квадратско програмирање, особено кога моделот може да се линеаризира и кога се бара гарантирана конвергенција кон глобален оптимум. Од друга страна, поради стохастичноста на производството од ФВС и ВГ, варијабилноста на товарот и присуството на дискретни одлучувачки променливи, сè почесто се користат метаевристички алгоритми како генетски алгоритам, PSO, диференцијална еволуција и нивни подобрени варијанти или хибриди со други оптимизациски методи.

Различните истражувачки пристапи дефинираат различна перцепција на тоа што претставува оптимално решение во контекст на микромрежите. Додека некои автори акцентот го ставаат на економската исплатливост, други приоритет му даваат на

квалитетот на електричната енергија, намалувањето на емисиите или зголемувањето на автономијата на системот. Токму затоа, изборот на соодветен алгоритам не е универзален, туку зависи од структурата на проблемот, бројот на променливи, типот на ограничувања и поставените оперативни цели. Ова ја прави областа на оптимизација на микромрежи динамична и истражувачки предизвикувачка, со постојана потреба од развој и унапредување на постоечките методи за да се обезбеди поефикасно, постабилно и поекономично функционирање на современите енергетски системи.

Генетскиот алгоритам, како еден од начесто применуваните методи за оптимизација во електроенергетиката, претставува метод за селективно пребарување и подобрување, кој често се користи за оптимизација на различни карактеристики и параметри [94]. Предностите од неговата примена вклучуваат можност за справување со проблеми поврзани со различни конфигурации. Исто така е лесно пренослив на постоечки имплементации и модели. Но, во споредба со другите стохастички пресметковни методи има побавна стапка на конвергенција и не може да гарантира конзистентно време на одговор.

Примената на генетските алгоритми за решавање на проблемот со оптимизација на современите микромрежи претставува еден од најистражуваните и најнеефективни пристапи во областа на интелегентните ЕЕС. Современите микромрежи се карактеризираат со висока комплексност поради интеграцијата на различни ОИЕ, диспечабилни генератори, системи за складирање енергија, произведувачи – потрошувачи и електрични возила, како и поради нивната интеракција со главната електроенергетска мрежа. Овие карактеристики резултираат со нелинеарни, недиференцијабилни и повеќекритериумски оптимизациски проблеми, кои тешко можат да се решат со класични детерминистички методи.

Генетските алгоритми, како метаевристички оптимизациски техники инспирирани од принципите на природната еволуција, се особено погодни за вакви сложени проблеми [95]. Тие не бараат прецизна математичка формулација или конвексност на проблемот и можат ефикасно да пребаруваат големи и комплексни простори на решенија. Во контекст на микромрежите, генетските алгоритми најчесто се применуваат за оптимизација на оперативните трошоци, минимизација на напонските девијации, оптимално управување со БС, како и за планирање на енергетската размена со главната мрежа.

Една од клучните предности на генетските алгоритми е нивната флексибилност при интеграција на повеќе цели и ограничувања. Современите микромрежи често бараат истовремено оптимизирање на економски и технички критериуми, кои се меѓусебно спротивставени [96]. Генетските алгоритми овозможуваат ефикасно решавање на вакви повеќекритериумски проблеми, преку генерирање на оптимални компромисни решенија или Парето фронтови, што е од особено значење за системите за управување со енергија.

Дополнително, генетските алгоритми покажуваат висока робустност во услови на неизвесност, што е особено важно поради интермитентната природа на ОИЕ и динамичките профили на побарувачка. Преку соодветен дизајн на операторите за селекција, вкрстување и мутација, како и преку воведување на подобрени или хибридни варијанти, можно е да се подобрат брзината на конвергенција, стабилноста на резултатите и способноста за избегнување на локални оптимуми [97].

Покрај многубројните предности, примената на генетските алгоритми во оптимизацијата на микромрежи носи и одредени предизвици, како што се изборот на соодветни параметри и пресметковната сложеност кај големи системи. Сепак, континуираниот развој на напредни генетски алгоритми и нивната интеграција во системите за управување со енергија ги прави овие методи клучна алатка за ефикасно, стабилно и одржливо функционирање на современите микромрежи [70].

3.2.1. СТАНДАРДЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

Генетскиот алгоритам претставува евристички метод за оптимизација кој е инспириран од Дарвиновиот принцип на природна еволуција, односно од процесите на селекција, репродукција и мутација кои се одвиваат во природата. Овој метод претставува апстрактна и математички формализирана интерпретација на еволутивниот процес, при што решенијата на даден оптимизациски проблем се третираат како поединци во популација. За одредена популација од хромозоми, преку итеративен процес се применуваат оператори на селекција, вкрстување и мутација, со цел постепено да се подобрува квалитетот на решенијата и да се насочи пребарувањето кон оптималното или кон блиску оптимално решение [98].

Хромозомите во генетскиот алгоритам претставуваат кодирани низи кои ја носат целокупната информација за едно потенцијално решение. Најчесто тие се претставени во бинарен облик, каде што секој ген може да има вредност 0 или 1, иако во зависност од природата на проблемот можат да се користат и други форми на кодирање (реално, целобројно или мешано кодирање) [99]. Секој хромозом ја претставува генетската структура на една единка во популацијата, а збирот на сите хромозоми ја дефинира генерацијата во даден момент [99]. Преку еволуцијата на генерациите, информацијата што ја носат хромозомите се модифицира и усовршува, со што се зголемува веројатноста за пронаоѓање на поквалитетни решенија.

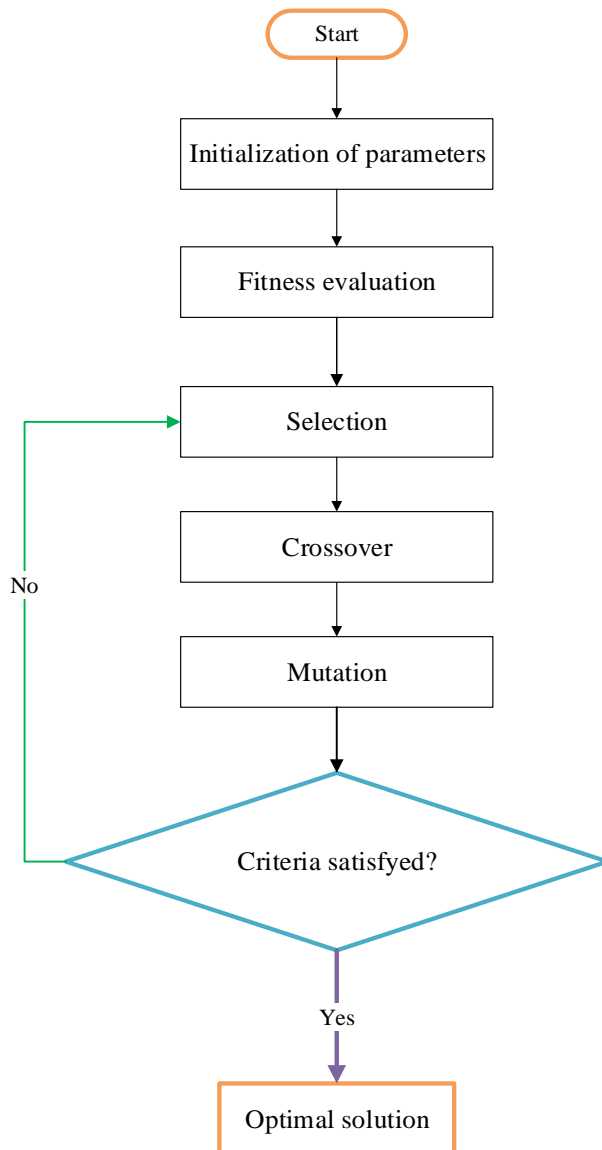
Поради својата флексибилност, робусност и способност да решава сложени, нелинеарни и мултимодални оптимизациски проблеми, генетскиот алгоритам наоѓа широка примена во голем број научни и инженерски области. Тој се користи во вештачката интелигенција и машинското учење за оптимизација на модели и параметри, во инженерството за дизајн и управување со сложени системи, во биоинформатиката за анализа на генетски податоци, како и во економијата и енергетиката за решавање на проблеми поврзани со планирање, распределба на ресурси и минимизација на трошоци.

Работата на генетскиот алгоритам може да се сумира преку неколку последователни и меѓусебно поврзани фази, кои заедно го дефинираат еволутивниот процес [100]. Овие фази вклучуваат иницијализација на популацијата, евалуација на единките, селекција на родители, вкрстување, мутација и примена на критериум за запирање, при што секоја од нив има клучна улога во ефикасноста и конвергенцијата на алгоритмот. Редоследот на извршување на фазите на стандардниот генетскиот алгоритам е претставен преку блок-дијаграм на Слика 3.5.

3.2.1.1. Иницијализација

Работата на генетскиот алгоритам започнува со иницијализација на популација од случајно генерирани индивидуи (хромозоми). Секоја индивидуа е потенцијално решение на оптимизациониот проблем и е кодирана како хромозом, кој најчесто претставува низа од битови, броеви или други структури на податоци.

Секој од хромозомите се тестира на оптимизациската функција и на секој до нив се задава оценка на погодност (анг. fitness score) за тоа како одговараат на зададениот проблем.



Слика 3.5 Блок-дијаграм на стандарден генетски алгоритам

3.2.1.2. Селекција

Во наредниот чекор се врши селекција на индивидуи кои ќе ја креираат наредната генерација, генерација на деца хромозоми. Селекцијата се врши врз основа на оценката добиена во претходната фаза. Слично како и во природата поголема шанса за преживување, односно поголема шанса да бидат избрани за родители, имаат индивидуите кои имаат повисока оценка, односно подобри и посилни гени.

Постојат повеќе докажани методи на селекција кои врз основа на различни математички алгоритми ги избираат најдобрите индивидуи за репродукција.

3.2.1.2.1. Селекција според рулетно тркало

Концептот на селекцијата според рулетно тркало (анг. Roulette Wheel Selection) е секоја од индивидуите да добие парче од кружното рулетно тркало. Веројатноста за

селекција е пропорционална на соодветноста на индивидите. Притоа, доколку некоја индивидуа не „биде избрана“ при вртење на рулетното тркало е само лоша среќа. Но, со поголем број на итерации се добива просек за тоа која индивидуа има поголеми шанси да биде избрана за родител. [100]

3.2.1.2.2. Селекција според стохастично универзално семплирање

Селекцијата според стохастично универзално семплирање (анг. Stochastic Universal Sampling-SUS Selection) е продолжение на селекција според рулетно тркало, но овозможува постабилна и пофер селекција. Изборот се врши според вкупната оценка на соодветност на индивидите и ја рефлектира нивната пропорционалност врз вкупната оценка на соодветност. Идејата е индивидите со повисока оценка на соодветност да добијат поголема шанса да бидат избрани за репродукција. Прераната конвергенција и диверзитетот се одржуваат со поставување на повеќе фиксни точки на рулетното тркало, кои се на еднакво растојание, за разлика од методот на рулетно тркало каде има само една фиксна точка. Истовремено, со овој метод се осигурува дека и индивидите со послаби оценки се вклучени во процесот на селекција. [101]:

3.2.1.2.3. Селекција со рангирање

Селекцијата со рангирање (анг. Rank Selection) има за цел да спречи прерана конвергенција. Индивидите се рангирани според нивната соодветност, а очекуваната вредност на секоја индивидуа зависи од нејзиното рангирање, а не од нејзината соодветност. Тоа може да се смета за предност, бидејќи кога неколку индивидуи имаат висока оценка на соодветност, тие го доминираат процесот на селекција, со што се создава висок притисок за нивни избор. Како резултат на ова, диверзитетот на популацијата брзо опаѓа и алгоритмот може да конвергира кон локален оптимум. [100]:

3.2.1.2.4. Селекција со натпревар

Селекцијата со натпревар (анг. Tournament Selection) наложува да се изберат неколку индивидуи по случаен избор, а избрана за понатамошна репродукција е онаа индивидуа која е најсоодветна. Таа потоа се враќа во популацијата, по што може повторно да биде избрана за учествува во ваков тип на натпревар. Овој концепт е сличен на ранк селекцијата по однос на притисокот за избор, но е пресметковно поефикасен. [100]:

3.2.1.2.5. Селекција според остаточна вредност

Според селекцијата според остаточна вредност (анг. Remainder Selection) секоја индивидуа од популацијата има веројатност да биде избрана според нејзината скалирана оценка на соодветност. Процесот на избор на индивидуи кои ќе бидат родители се врши според целодробната вредност на секоја индивидуа, а потоа ја користи селекцијата според рулетно тркало или принципот на фрлање паричка на останатиот дел од фракцијата. На пример, ако скалираната вредност на некоја индивидуа е 2,8, тогаш ќе постојат две копии од таа индивидуа која ќе се смета како родител, бидејќи целодробниот дел е 2. Но, откако ќе бидат избрани родители според целодробниот дел од нивната скалирана вредност, тогаш останатиот дел на родители се избрани стохастично. Веројатноста дека еден од нив ќе биде избран е пропорционално со децималниот дел на скалираната вредност. Во овој случај тоа е вредноста 0,8. [102]:

3.2.1.3. Вкрстување (рекомбинција)

Секоја генерација има родители, освен почетната генерација од која почнува репродукцијата. Индивидуите избрани во процесот на селекција претставуваат родители, кои во оваа фаза преку рекомбинација креираат нова генерација на хромозоми, т.н. деца. Оваа фаза ја имитира сексуалната репродукција на комбинирање на генетски материјал. Гените на децата хромозоми се креираат од гените на двајца родители. За таа цел се дефинира начин и точка на вкрстување на гени (анг. crossover). Вкрстувањето е начин на кој се мешаат гените од двајцата родители, со што се создаваат нови хромозоми кои имаат слични, но не и исти карактеристики како своите родители.

Најчести начини на вкрстување на гените на индивидуите се дадени во продолжение на ова поглавје.

3.2.1.3.1. Вкрстување во една точка (анг. Single-point crossover)

Точката на вкрстување се избира по случаен избор. Потоа генетскиот материјал на двете индивидуи родители се разгледува во два дела, поделени според точката на вкрстување. Индивидуите деца содржат генетски материјал од двајцата родители, со тоа што, еден дел од генетскиот материјал е од едниот родител до точката на вкрстување, а другиот дел е од другиот родител по точката на вкрстување, како што е прикажано со Пример 3.1-1 [103].

Пример 3.1-1

Нека r_1 и r_2 се родители, а точката на вкрстување е 3.

$$r_1 = [a\ b\ c\ d\ e\ f]$$

$$r_2 = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6]$$

Тогаш новокреираните хромозоми деца ќе го имаат следниот генетски код.

$$d_1 = [a\ b\ c\ 4\ 5\ 6]$$

$$d_2 = [1\ 2\ 3\ d\ e\ f]$$

3.2.1.3.2. Вкрстување во повеќе точки (анг. Multi-point crossover)

При вкрстување во повеќе точки, размената на генетскиот материјал се одвива слично како при вкрстување во една точка, како што е прикажано со Пример 3.2-2 [103].

Пример 3.2-2

Нека r_1 и r_2 се родители, а точките на вкрстување се 2 и 4.

$$r_1 = [a\ b\ c\ d\ e\ f]$$

$$r_2 = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6]$$

Тогаш новокреираните хромозоми деца ќе го имаат следниот генетски код.

$$d_1 = [a\ b\ 3\ 4\ e\ f]$$

$$d_2 = [1\ 2\ c\ d\ 5\ 6]$$

Недостаток на вкрстувањето во една точка и вкрстувањето во повеќе точки е што не се воведуваат нови информации, односно не се креираат деца хромозоми со нови карактеристики, туку само се рекомбинираат гените на родителите.

3.2.1.3.3. Униформно вкрстување (анг. Uniform crossover)

При униформно вкрстување гените се разменуваат по случаен избор помеѓу родителите, со еднаква веројатност на сите гени. Тогаш, наместо повеќе последователни гени од секој од родителите, се пренесуваат поедини гени, како во Пример 3.3-3. [103].

Пример 3.3-3

Нека r_1 и r_2 се родители, а точките на вкрстување се 2 и 4.

$$r_1 = [a\ b\ c\ d\ e\ f]$$

$$r_2 = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6]$$

Тогаш новокреираните хромозоми деца може да го имаат следниот генетски код.

$$d_1 = [a\ 2\ c\ 4\ e\ f]$$

$$d_2 = [1\ b\ 3\ d\ 5\ 6]$$

3.2.1.3.4. Аритметичко вкрстување (анг. Arithmetic Crossover)

За непрекинати оптимизациски проблеми каде хромозомите се претставени како реални броеви, аритметичкото вкрстување ги комбинира гените од двајцата родители според зададен тежински фактор, како што е претставено со следната равенка [104]:

$$D = \alpha R_1 + (1 - \alpha) R_2 \quad (3.1)$$

Овој начин на вкрстување ги комбинира гените од двајцата родители, осигурувајќи се дека децата хромозоми имаат вредност која е во опсегот на пребарување на решението. Пресметката се одвива како што е прикажано со Пример 3.4-4.

Пример 3.4-4

Нека r_1 и r_2 се родители.

$$r_1 = [2\ 9]$$

$$r_2 = [5\ 7]$$

Со примена на равенката (4.1), за случајно избран тежински фактор $\alpha = 0,7$ се добиваат децата хромозоми d_1 и d_2 .

$$d_1 = 0,7 \cdot 2 + (1 - 0,7) \cdot 5 = 2,9$$

$$d_2 = 0,7 \cdot 9 + (1 - 0,7) \cdot 7 = 8,4$$

3.2.1.3.5. Лапласово вкрстување (анг. Laplace Crossover)

При Лапласово вкрстување, децата хромозоми се генерирани со нарушување на родителските хромозоми користејќи дистрибуција со некаква веројатност. Лапласовата дистрибуција има остар пик во центарот, кој е во близина на вредностите од родителите и јаки „опашки“, кои овозможуваат помали и поголеми варијации на решенијата, во зависност од случајното сепмптирање од дистрибуцијата [105]. Прво униформните случајни броеви $u_i, r_i \in [0,1]$ се генерираат, а потоа случаен број β_i , кој ја задоволува Лапласовата дистрибуција, се генерира според следниот израз [105]:

$$L_i = \begin{cases} a - b \log(u_i), & r_i \leq 1/2 \\ a + b \log(u_i), & r_i \geq 1/2 \end{cases} \quad (3.2)$$

Каде, a претставува локациски параметар, а $b > 0$ е параметар за скалирање. Децата хромозоми се определуваат според (3.3).

$$D = R_1 + (R_2 - R_1) \cdot L \quad (3.3)$$

Лапласовото вкрстување е особено корисно во проблеми каде одржувањето на диверзитетот во популацијата е важно, бидејќи создава широк опсег на потенцијални решенија, а истовремено креира деца хромозоми чии вредности се блиску до оние на родителите.

3.2.1.3.6. Евристичко вкрстување (анг. Heuristic Crossover)

При евристичко вкрстување се креираат деца хромозоми кои содржат гени од двајца родители, од кои едниот има подобра оценка на соодветност од другиот. Со задавање вредност на тежински фактор се определува колку блиску ќе биде детето хромозом до родителот со подобри гени [106], како што е прикажано со изразот во продолжение:

$$D = R_1 + (R_1 - R_2) \cdot r \quad (3.4)$$

Каде што, r е случаен број во опсег $[0,1]$, кој одредува колку блиску е решението до родителот 1, кој има подобри гени.

Евристичкото вкрстување ги користи информациите од евалуацијата на индивидуите, односно нивната оценка на соодветност, за да создаде деца кои се поблиску до родителот со подобри гени. Ова помага решението да се доближи до оптималното решение побрзо. За да не се изгуби диверзитетот на популацијата, тежинскиот фактор r овозможува разноликост на решенија, кој треба да биде внимателно избран за да се одбегне заглавување во локален оптимум [106].

3.2.1.4. Мутација

Еден дел од новата генерација на хромозоми се создава со вкрстување, а друг дел со мутација (анг. mutation). За мутација е доволно еден родител, чии гени се изменети. Многу мал дел од генерацијата на родители, директно преминува во наредната генерација, како индивидуи со најдобри гени (анг. elite individuals).

Во процесот на мутација се случуваат случајни промени во генетскиот материјал на индивидуите, за да се постигне разноликост во популацијата и за да се заштити алгоритмот од прерана конвергенција кон локален оптимум.

Со примената на процесот на мутација се обезбедува истражување на нови варијанти на можните решенија во рамките на оптимизацискиот процес. Мутацијата има суштинска улога во зголемувањето и одржувањето на генетскиот диверзитет, бидејќи преку контролирано модифицирање на одредени сегменти од хромозомите се генерираат нови генетски комбинации кои не можат да се добијат исклучиво преку процесите на селекција и вкрстување. Овие новосоздадени комбинации на гени можат да доведат до идентификација на поквалитетни и пооптимални решенија. Дополнително, иако вкрстувањето претставува основен механизам за комбинирање на постоечката генетска информација, само по себе тоа често не е доволно за обезбедување на соодветна разновидност во популацијата. Во тој контекст, мутацијата има комплементарна улога, бидејќи го намалува ризикот од предвремена конвергенција кон локални оптимуми и

овозможува истражување на нови региони од просторот на решенија кои не се лесно достапни преку селекцијата и вкрстувањето.

Степен на мутација е веројатност дека ќе се случи мутација на даден ген во хромозомот. Ниска стапка на мутација значи дека генетскиот алгоритам е предводен од процесите на селекција и вкрстување, но повремени мутација воведува разноликост. Висока стапка на мутација може да ги наруши добрите решенија и да ја забави конвергенцијата, бидејќи во тој случај промената е премногу честа и случајна. Изборот на вистинската стапка на мутација е од големо значење. Ако е премногу ниска, постои веројатност од низок степен на разновидност на решенијата, што води кон прерана конвергенција. Ако пак стапката на мутација е премногу висока, алгоритмот може да ја загуби структурата изградена преку вкрстувањето и селекцијата и да се однесува повеќе како случајно пребарување на оптималните решенија.

3.2.1.4.1. Бинарна мутација

Овој тип на мутација се користи кај генетски алгоритми со бинарно кодирање на хромозомите. Мутацијата се изведува со инверзија на вредноста на одреден ген, односно промена од 0 во 1 или обратно. Таа е едноставна за имплементација и ефикасна за проблеми со дискретни одлуки. Бинарната мутација овозможува локални промени во решението и помага во истражување на нови комбинации на бинарни променливи.

На пример, доколку оригиналниот код на хромозомот бил 101100, по мутација на вториот и на петтиот ген тој ќе биде 111110.

3.2.1.4.2. Континуирана мутација

Кај проблеми со реално кодирани променливи, мутацијата се изведува со додавање на мала случајна вредност на постоечкиот ген. Најчесто се користат нормална (Гаусова) или униформна распределба. Овој тип на мутација овозможува фино прилагодување на решенијата и е особено погоден за континуирани оптимизациски проблеми, како што се оние во ЕЕС.

На пример, ако оригиналниот ген има вредност 2,34, по мутација, со додавање на мала случајна вредност тој би имал вредност $2,34 + 0,02 = 2,36$.

3.2.1.4.3. Униформна мутација

Кај униформната мутација, вредноста на мутираниот ген се заменува со нова вредност избрана случајно од дозволеният опсег. Овој тип на мутација овозможува поголеми скокови во просторот на решенија и е корисен за глобално истражување, особено во раните фази на оптимизацијата.

3.2.1.4.4. Неуниформна мутација

Неуниформната мутација е дизајнирана така што интензитетот на мутацијата се намалува со зголемување на бројот на генерации. На тој начин, алгоритмот овозможува интензивно истражување во почетните фази, а подоцна се фокусира на фино прилагодување на решенијата. Овој пристап ја подобрува стабилноста и брзината на конвергенција.

3.2.1.4.5. Мутација на замена

Мутацијата на замена (анг. swap mutation) најчесто се користи кај пермутационски проблеми, како што се проблемите на распоредување или рутирање. Таа се изведува со

размена на позициите на два гена во хромозомот. Овој тип на мутација го задржува валидниот распоред на решението и внесува структурни промени.

На пример, ако оригиналниот хромозом го има следниот изглед: (1,2,3,4), по мутација, со замена на местата на вториот и третиот ген тој ќе го има следниот изглед: (1,3,2,4).

3.2.1.4.6. Адаптивна мутација

Кај адаптивната мутација, стапката или типот на мутација се менува динамички во зависност од состојбата на популацијата, на пример диверзитетот или брзината на конвергенција. Овој пристап е особено погоден за сложени и динамични оптимизациски проблеми.

3.2.1.5. Замена

Децата индивидуи креирани со вкрстување и мутација на гените на генерацијата родители, има исти димензии како генерацијата родители, со тоа што дел од индивидуите кои не се класифицирале како достоини за понатамошна репродукција во процесот на селекција, се заменети со новокреираните деца.

Стратегии за замена се следните:

- Генерациска замена: Целата популација се заменува со новата генерација потомци.
- Стабилна (анг.steady-state) замена: Се заменува само дел од популацијата, при што се задржуваат некои од најдобрите единки.

3.2.1.6. Критериум за запирање

Итерациите за креирање на нови генерации се повторуваат сè додека не се постигне критериумот за запирање. При секоја итерација се добива подобро решение [107]. Најчести критериуми за запирање се следните:

- Постигнување на максималниот број на генерации.
- Пронаоѓање на индивидуа со задоволителна оценка на погодноста.
- Конвергенција, при што новите генерации имаат многу мали подобрувања во споредба со претходната генерација.

3.2.2. ПРЕДИЗВИЦИ ПРИ ПРИМЕНА НА СТАНДАРДЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

Примената на стандарден генетски алгоритам за оптимизација на микромрежи се соочува со повеќе предизвици кои произлегуваат од комплексноста, динамичноста и повеќекритериумската природа на ваквите ЕЕС. Иако генетските алгоритми се широко користени поради нивната флексибилност и способност за решавање на нелинеарни оптимизациски проблеми, нивната директна примена без дополнителни подобрувања често не е доволна за обезбедување на стабилни и квалитетни решенија кај реални микромрежи [108].

Еден од најизразените предизвици е појавата на предвремена конвергенција, при што популацијата брзо се насочува кон локално оптимално решение, без соодветно истражување на целиот простор на можни решенија. Овој проблем е особено изразен кај микромрежите со висока пенетрација на ОИЕ, каде што стохастичноста и нелинеарноста на системот создаваат бројни локални оптимуми. Предвремената конвергенција најчесто е последица на силен селекциски притисок и губење на диверзитетот на популацијата во раните фази на оптимизација [109].

Друг значаен предизвик е чувствителноста на резултатите на изборот на параметрите на алгоритмот, како што се големината на популацијата, стапките на вкрстување и мутација и бројот на генерации. Несоодветно подесените параметри можат да доведат до бавна конвергенција, нестабилни резултати или до прекумерна пресметковна сложеност. Кај големи микромрежи со часовна или оптимизација во реално време, оваа сложеност може да ја ограничи практичната примена на стандардниот ГА.

Дополнително, стандардниот генетски алгоритам има ограничена способност за ефикасно справување со повеќекритериумските проблеми карактеристични за микромрежите, како што се истовремената минимизација на оперативните трошоци и одржување на напонската стабилност. Често се користат тежински фактори за агрегација на целните функции, што воведува субјективност и ја намалува транспарентноста на добиените компромисни решенија. Исто така, класичниот ГА не е секогаш ефикасен во справувањето со динамички и временски зависни ограничувања, како променливите профили на оптоварување и производство од ОИЕ.

Конечно, стандардниот генетски алгоритам не е дизајниран за директна интеграција во системи за управување со енергија во реално време, каде што се бараат брзи и сигурни одлуки. Овие предизвици ја нагласуваат потребата од развој на подобрени и специјализирани варијанти на генетските алгоритми, прилагодени на специфичните барања и сложеноста на современите микромрежи [110].

3.2.3. ПОТРЕБАТА ОД ПОДОБРЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

Со пораст на потрошувачката и напредокот на технологијата, поимот за микромрежи се менува и подразбира систем кој обединува потрошувачи, потрошувачи – произведувачи на електрична енергија, различни дисперзирани генератори, батериски систем, електрични возила и други резервни генератори, како дизел генератор и горивни ќелии. Ваквата структура претставува сложен и високодинамичен систем со голем број технички, економски и оперативни променливи, кои системот за управување мора континуирано да ги зема предвид со цел да се одржи стабилноста и квалитетот на електричната енергија, како и сигурноста на снабдувањето. Генетскиот алгоритам, како широкораспространет оптимизациски алгоритам во областа на електроенергетиката и метод кој поставува минимални барања во однос на аналитичката формулација на проблемот, се покажал како погоден за решавање на вакви комплексни оптимизациски задачи.

Сепак, примената на класичниот генетски алгоритам кај управувањето и оптимизацијата на микромрежи често е ограничена поради предвремена конвергенција, губење на диверзитетот на популацијата и чувствителност на изборот на параметрите,

особено при повеќекритериумска оптимизација и временски зависни сценарија. Овие ограничувања ја намалуваат способноста на алгоритмот да обезбеди стабилни и глобално оптимални решенија во услови на интермитентни ОИЕ, променливи оптоварувања и сложени мрежни ограничувања. Оттука, се јавува јасна потреба од развој и примена на подобрени варијанти на генетскиот алгоритам, кои преку напредни стратегии за селекција, зачувување на диверзитетот и насочено пребарување овозможуваат поефикасна, постабилна и поробусна оптимизација на современите микромрежи.

Иако генетскиот алгоритам е широкоприменуван поради својата робусност и способност за глобално пребарување, неговата практична ефикасност често е нарушена од неговите гореспоменати ограничувања. Дополнително, класичниот пристап обично користи фиксни параметри за селекција, вкрстување и мутација, кои не се адаптивни на различните фази на оптимизација, што резултира со недоволен баланс помеѓу истражувањето на просторот на решенија и експлоатацијата на веќе пронајдените добри решенија. Овие слабости стануваат уште поизразени кај повеќекритериумските проблеми, каде што често се користат тежински фактори за агрегација на целните функции, што внесува субјективност и може да доведе до губење на релевантни компромисни решенија.

Во контекст на енергетските системи, како што се микромрежите со висока пенетрација на ОИЕ, ЕВ и системи за складирање енергија, проблемите дополнително се усложнуваат поради стохастичната природа на изворите, динамичките оптоварувања и бројните технички и економски ограничувања. Поради тоа, класичниот генетски алгоритам често покажува висока пресметковна сложеност и нестабилна конвергенција. Развојот на нови и подобрени варијанти на генетскиот алгоритам овозможува воведување на понапредни механизми за селекција, одржување на диверзитетот и насочено пребарување, со што се постигнува побрза, постабилна и поквалитетна конвергенција, како и подобра способност за идентификација на оптимални и компромисни решенија во реални и големоразмерни оптимизациски задачи.

3.2.4. ПОДОБРУВАЊА ВО ПРОЦЕСОТ НА СЕЛЕКЦИЈА

Подобрувањето на процесот на селекција во генетските алгоритми е од клучно значење бидејќи селекцијата директно го одредува начинот на кој информацијата од тековната популација се пренесува во следните генерации, а со тоа и квалитетот, стабилноста и конвергенцијата на крајното оптимално решение.

Во класичните генетски алгоритми, селекцијата најчесто се базира исклучиво на вредноста на функцијата за оценка на погодноста (анг. fitness function), при што единките со најдобри резултати имаат доминантна веројатност да бидат избрани за репродукција, додека послабите единки брзо се елиминираат. Иако ваквиот пристап може да доведе до брзо подобрување на решенијата во почетните итерации, тој често резултира со предвремена конвергенција и до значително намалување на диверзитетот на популацијата, што го ограничува пребарувањето на алгоритмот на тесен регион од просторот на решенија.

Подобрувањето на процесот на селекција има за цел да воспостави поефикасен баланс помеѓу експлоатацијата на најдобрите единки и истражувањето на потенцијално

добри, но недоволно развиени решенија. Ова може да се постигне преку воведување на адаптивни или хибридни селекциски стратегии, користење на статистички мерки како просечната оценка на погодност на популацијата, ограничување на доминацијата на елитните единки или повторна евалуација и комбинирање на послабите единки со елитни решенија. Ваквите подобрувања се манифестираат во крајното решение преку поголема стабилност и повторливост на резултатите, подобра способност за избегнување на локални оптимуми и повисок квалитет на пронајдените решенија. Дополнително, подобрениот процес на селекција овозможува побрза и порамномерна конвергенција, намалување на пресметковната сложеност и генерирање на пофлексибилни и пооптимални компромисни решенија, особено кај повеќекритериумските и големоразмерни оптимизациски проблеми, какви што се современите микромрежи и ЕЕС.

Во литературата се среќаваат многубројни истражувања кои предлагаат нови начини на селекција, но секој од нив има различна цел за изнаоѓање на оптималното решение. Некои истражувања се концентрирани на креирање генерација на родители која се одликува со висок перформанс, додека други акцентот го ставаат на креирање поголем диверзитет во генерацијата.

Во [111] е предложен нов начин на селекција во генетски алгоритам именуван како Stairwise Selection (SWS). Овој метод има за цел да воспостави баланс помеѓу проблемот на креирање поголем диверзитет на популацијата и притисокот од избор на подобри единки. SWS-методот е дизајниран така што во рангирана популација се доделуваат веројатности за избор „во чекори“ (степенесто), односно различни сегменти од популацијата добиваат контролирана, но не занемарлива шанса да учествуваат во репродукцијата. На тој начин, и послабите единки не се целосно елиминирани, што помага да се зачуваат алтернативни генетски структури и да се избегне брзо „заклучување“ во подооптимални региони. Во експерименталната валидација, SWS е споредена со неколку стандардни селекциски шеми, а евалуацијата е изведена преку 10 познати benchmark функции и различни димензионалности (приближно 10 до 100 димензии), со дополнителна статистичка проверка (вклучително и χ^2 goodness-of-fit тест) за квалитетот на селекцискиот процес. Резултатите, покажуваат дека SWS постигнува подобра робусност, стабилност и ефикасност, и има поповолни перформанси според избрани индекси за споредба што ја прави соодветна како селекциско подобрување за глобална оптимизација на мултимодални континуирани проблеми.

Во [112] е предложен нов селекциски оператор за генетски алгоритми, наречен split-based selection (SBS). Предложениот SBS-пристап ја дели популацијата на две подмножества врз основа на нивните оценки на погодност: подгрупа со подобро рангирани единки и подгрупа со послаби единки. Селекцијата се врши така што се обезбедува контролирано учество на двете групи во процесот на репродукција, при што се задржува доволен селекциски притисок кон квалитетните решенија, но истовремено се овозможува и зачувување на генетскиот диверзитет. Ефикасноста на SBS е верифицирана преку тестирање на повеќе стандардни benchmark функции за глобална оптимизација и споредба со класични селекциски оператори. Резултатите покажуваат дека предложениот оператор обезбедува постабилна конвергенција, подобра точност и зголемена робусност, особено кај мултимодални проблеми.

Во [113] е предложен нов селекциски оператор за генетски алгоритми наречен Round-Robin Based Tournament Selection (RRTS), каде популацијата се дели на две еднакви, меѓусебно неповрзани групи, по што секој член на една група се натпреварува со сите членови на другата група, што овозможува пообјективно, „сите-наспроти-сите“ рангирање на единките и со тоа пониски губитоци во диверзитетот и порамнотежено насочување кон глобалното решение. Статистичката анализа на перформансите користи тестови како χ^2 (chi-square) и емпириската функција на распределба, што ја потврдува подобрената точност на селектирањето во споредба со конвенционалните шеми. Иако предложениот оператор воведува само номинално зголемена сложеност во пресметувањето, резултатите покажуваат дека тој обезбедува релативно повисок селекциски притисок со минимални трошоци за диверзитет, што значи дека ефикасно ги одржува варијациите во популацијата додека се приближува кон оптимално решение. Методот е тестиран на стандардниот Traveling Salesman Problem (TSP), при што набљудувале подобрена глобална ефикасност во споредба со други, традиционални оператори на селекција. Ова укажува дека предложениот метод не само што има солидни теоретски својства туку и реални предности во практични оптимизациски задачи, особено кога е важно да се одржи разновидноста на гените и да се избегне залепување во локални оптимуми.

Авторите во [114] предлагаат нов пристап за селекција во генетски алгоритми наречен Selection Operator Decider for Genetic Algorithms (SODGA). Главниот новитет во трудот е динамички избор на селекциски оператор во текот на оптимизацискиот процес, што значително ја подобрува флексибилноста и адаптивноста на алгоритмот. Наместо да се користи еден фиксен оператор на селекција низ целата еволуција, SODGA ја дефинира селекцијата како динамички процес каде што се оценуваат перформансите на повеќе селекциски оператори (на пр. roulette-wheel, tournament, rank и други) и се одбира најсоодветниот во зависност од состојбата на популацијата во моментот. Авторите ја поставуваат оваа идеја на основата дека различни фази од еволуцијата бараат различни селекциски механизми. На пример, во почетните фази кога популацијата е широко распространета може да е подобро да се користи селекција со повеќе диверзитет, додека во подоцнежните фази кога е потребна стабилна експлоатација може да е поефикасна селекција со повисок притисок. Затоа тие предвидуваат оператор-децидер модул што ја анализира распределбата на оценките на погодност, степенот на диверзитет и структурните промени во популацијата, и автоматски ја избира најсоодветната селекциска шема за следната генерација. Предложениот метод, SODGA, е тестиран на низа класични тест-функции и benchmark оптимизациски проблеми, при што резултатите покажуваат дека адаптивното менување на селекцискиот оператор води до поголема стабилност, побрза конвергенција и подобар баланс помеѓу диверзитет и перформанси во споредба со традиционалните, фиксни селекциски механизми. Особено е забележано дека кај комплексни и мултимодални проблеми SODGA помага да се избегне прераната конвергенција и да се зголеми веројатноста за достигнување на глобално оптимално решение.

Истражувањето спроведено во [115] предлага нов пристап за селекција ориентиран кон диверзитет при решавање на оптимизациски проблеми со повеќе цели. Главниот новитет е diversity-based selection оператор кој намерно го насочува еволутивниот процес кон најмалку истражените делови од просторот на решенија. Наместо популацијата да се концентрира само околу густо населени региони на приближениот Парето фронт,

методот ги пополнува празнините и ја зголемува распространетоста на решенијата по фронтот. Авторите посочуваат дека ваквото водење кон најслабо покриените области ја подобрува целокупната разновидност, но може да влијае и позитивно врз конвергенцијата, бидејќи подобрата распределба на решенијата често помага да се откријат посоодветни компромисни решенија и да се избегне стагнација. Клучната придобивка е што методот е наменет за ситуации каде има многу цели и ограничувања, каде класичните механизми за селекција/рангирање често губат дискриминациска моќ и доведуваат до брзо губење на диверзитет. Резултатите потврдуваат дека насочувањето кон најмалку истражените региони води кон поширок и порамномерен Парето фронт, што е значајно за практични системи каде корисникот сака повеќе различни компромисни решенија.

Во [116] авторите воведуваат иновативна варијанта на турнирска селекција наречена Adaptive Stochastically Ranking-based Tournament Selection (ASR-TS). Новитетот се состои во тоа што процесот не завршува со класично споредување според оценката на погодност. По иницијалниот турнир, избраните кандидати дополнително рангираат стохастички користејќи комбинација од оценката на погодност и мерки за диверзитет, и дури потоа се одредува победникот на турнирот. Ова е важно затоа што селекција ориентирана строго по фитнес вредноста често создава преголем селекциски притисок и доведува до прерана конвергенција, особено кај мултимодални функции. Со вклучување на диверзитет во критериумот (и тоа адаптивно и стохастички), ASR-TS има цел да ги задржи добрите решенија, но да не ја задуши разновидноста на популацијата.

Во [117] се предлага еволуциски пристап за Neural Architecture Search (NAS) со нова стратегија наречена Similarity Adaptive Guidance (SAGNAS), каде централниот новитет е интеграцијата на мерење на сличноста за да се контролира диверзитетот и да се подобри локалното пребарување. Клучната идеја е дека во еволуцискиот NAS не е доволно само да се избираат најдобрите архитектури, туку е потребно и да се избегне сценарио каде популацијата станува премногу слична и затоа пребарувањето стагнира. Авторите воведуваат similarity-based selection (селекција водена од сличност/различност) и adaptive tournament selection како две комплементарни стратегии: турнирската селекција обезбедува селекциски притисок, додека similarity-селективниот дел ја штити разновидноста на архитектурите и го намалува ризикот од „клонови“ во популацијата. Дополнително, трудот нагласува нов начин за пресметка на сличноста на архитектури (со раздвојување на компоненти како клеточна и макроструктура) и користење на тоа знаење за насочување на пребарувањето.

3.2.5. МОДИФИКАЦИИ ВО ПРОЦЕСОТ НА ВКРСТУВАЊЕ И МУТАЦИЈА

Во споредба со процесот на селекција, подобрувањата во процесите на вкрстување и мутација имаат поинаков, но подеднакво значаен ефект врз перформансите на генетските алгоритми, при што нивната улога е првенствено поврзана со механизмите за генерирање нови решенија и одржување на диверзитетот на популацијата. Додека селекцијата ја одредува насоката на еволуцијата преку фаворизирање на поквалитетни единки, вкрстувањето и мутацијата ја дефинираат способноста на алгоритмот да истражува нови региони од просторот на решенија и да избегне стагнација.

Вкрстувањето претставува основен оператор за комбинирање на генетската информација од родителските единки и најчесто има доминантна улога во експлоатацијата, бидејќи преку размена на гени се создаваат потомци кои ги наследуваат добрите карактеристики на родителите. Подобрувањата во овој процес можат да се движат во насока на избор на поадекватен тип на вкрстување, како што се расфрлано, повеќеточково или адаптивно вкрстување, како и динамичко прилагодување на веројатноста за вкрстување во зависност од фазата на оптимизација. Ваквите стратегии овозможуваат поефикасно комбинирање на информацијата и побрзо подобрување на решенијата, но доколку не се внимателно дизајнирани, можат да доведат до преголема сличност меѓу единките и губење на диверзитетот.

Од друга страна, мутацијата има клучна улога во истражувањето на просторот на решенија, бидејќи внесува мали, случајни промени во генетската структура на единките и овозможува откривање на нови, потенцијално подобри региони. Основните подесувања на мутацијата се поврзани со типот на мутација и нејзината стапка, при што премногу ниска стапка може да доведе до стагнација, а премногу висока стапка да го претвори алгоритмот во случајно пребарување. Подобрувањата во овој процес најчесто се насочени кон адаптивни или самоприлагодливи мутациски стапки, кои се менуваат во зависност од диверзитетот на популацијата или од брзината на конвергенција.

Оттука може да се заклучи дека подобрувањата во вкрстувањето и мутацијата има комплементарно влијание, но не и доминантно во однос на селекцијата. Селекцијата ја поставува глобалната насока и притисокот на оптимизација, додека вкрстувањето и мутацијата ја одредуваат длабочината и широчината на пребарувањето. Подобрувањата во овие оператори најчесто даваат најдобри резултати кога се комбинирани со интелегентно дизајниран селекциски механизам. На крај, ваквите подобрувања се одразуваат на крајниот резултат преку подобра способност за избегнување на локални оптимуми, постабилна конвергенција, поквалитетни оптимални решенија и поголема робусност на алгоритмот, особено кај сложени, динамични и повеќекритериумски проблеми како оние во современите ЕЕС.

4. ФОРМУЛАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКИОТ ПРОБЛЕМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

Современите микромрежи се состојат од повеќе различни генератори базирани на ОИЕ (ФВС, ВГ, хидроелектрани, биомаса и сл.), потрошувачи и произведувачи – потрошувачи, како и системи за складирање енергија (батерии, пумпно-акумулациски хидро системи и складирање со водород) и резервни генератори (дизел генератор, горивни ќелии). Ова значи дека микромрежите можат да бидат релативно едноставни, но и исклучително комплексни системи кои бараат соодветно управување за да функционираат во рамнотежа, како внатрешно, така и со електроенергетската мрежа на која се приклучени. Комплексните системи вклучуваат голем број променливи кои мора да се земат предвид во процесот на оптимизација, при што меѓу најзначајните е потребата истовремено да се минимизираат оперативните трошоци и да се одржи напонската стабилност низ целиот систем. Овие две цели често се меѓусебно спротивставени, што ја прави нивната заедничка оптимизација сложен, повеќекритериумски проблем. Дополнително, интермитентната природа на ОИЕ и динамичките шемии на цени на електричната енергија уште повеќе го усложнуваат управувањето со енергијата. Поради тоа, системот за управување со енергија претставува клучна компонента за стабилна и балансирана работа на микромрежата, овозможувајќи оптимално користење, складирање и размена на енергија со електроенергетската мрежа, при истовремено почитување на сите релевантни ограничувања [118].

Овој труд го анализира проблемот на оптимален тек на моќност кај микромрежа поврзана на мрежа, која се состои од повеќе различни типови на генератори од ОИЕ, како и системи за складирање на вишокот електрична енергија. Микромрежата разменува електрична енергија со главната мрежа под дефинирани услови и цени на електричната енергија.

Досегашните истражувања покажуваат дека проблемот со оптимизација на микромрежите е сè уште актуелен и во иднина истражувачите ќе треба повеќе внимание да посветат на поврзаноста на сите ентитети во рамките на една микромрежа [18] [119] [1]. Тоа е резултат на постојаното усложнување на нивната структура, кое се должи на континуираната дигитализација на нашето опкружување. На почетокот, микромрежите се карактеризирале со едноставност, бидејќи во рамките на една микромрежа биле вклучени еден до два типа на генератори и потрошувачи. Современите микромрежи обединуваат повеќе различни типови на генератори од ОИЕ, потрошувачи, потрошувачи – произведувачи, БС и електричен транспорт (возила). Дополнително, приклучувањето на локалната дистрибутивна мрежа ја усложнува нивната структура.

Микромрежите кои се поврзани на локалната дистрибутивна мрежа треба да се одликуваат со стабилна работа (стабилен напон и фреквенција), бидејќи нивната работа не треба да е во конфликт со работата на мрежите на кои се тие приклучени. Всушност, проблемот не произлегува од приклучување на една микромрежа, туку од приклучување на поголем број на микромрежи, односно со исполнување на дозволеният приемен капацитет на мрежата. Оттука произлегуваат ограничувањата по однос на напонските варијации и разменетата моќност помеѓу микромрежата и мрежата на која е таа приклучена.

Имајќи предвид дека генетскиот алгоритам е еден од најзастапените методи за оптимизација, на тој начин се докажува неговата неисцрпна примена и флексибилност во зависност од проблемот. Ова истражување ја испитува можноста за подобрување на генетскиот алгоритам и ги испитува неговите перформанси при оптимизација на микромрежа поврзана на локална дистрибутивна мрежа. Подобрувањето е во делот за селекција на индивидуи кои при процесот на репродукција ќе создадат нова генерација на индивидуи и кои се потенцијално оптималното решение.

Оптимизацијата со примена на предложеното подобрување на генетскиот алгоритам ќе ги земе предвид и напонските варијации, при што изборот на оптимално решение ќе ги задоволи двата зададени критериуми: минимални трошоци и стабилен напон.

4.1. ПОДОБРУВАЊЕ НА СТАНДАРДНИОТ ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

За решавање на комплексни оптимизациски проблеми, какви што се оние поврзани со управување и оптимизација на современи микромрежи, во ова истражување е предложен модифициран генетски алгоритам кој воведува суштински поинаков пристап во процесот на селекција на индивидуите што учествуваат во репродукцијата. Основната идеја на предложениот пристап произлегува од согледувањето дека класичниот генетски алгоритам најчесто се фокусира исклучиво на единките со најдобар перформанс, додека единките со послаба оценка на погодност брзо се елиминираат од популацијата. Иако ваквата стратегија може да доведе до побрза конвергенција, таа истовремено значително го намалува диверзитетот на популацијата и ја зголемува веројатноста за предвремена конвергенција кон локално оптимално решение.

Со цел да се надминат овие ограничувања, предложениот алгоритам воведува селекциски механизам кој ги зема предвид не само најдобрите, туку и дел од послабите индивидуи во популацијата. На тој начин се овозможува создавање на поразновидна генерација на родители, што директно се одразува и врз зголемен диверзитет на генерацијата на потомци. Овој пристап е особено значаен кај проблеми со голем број локални оптимуми и сложена структура на просторот на решенија, каде што зачувувањето на разновидноста е клучно за постигнување на глобално оптимално решение.

Предложениот алгоритам е именуван како Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA), односно генетски алгоритам со селекција на елитни единки водена од средната вредност. Самото име на алгоритмот произлегува од начинот на кој се врши селекцијата на индивидуите што ќе ја формираат генерацијата на родители. За разлика од стандардниот генетски алгоритам, каде што селекцијата најчесто се базира на пропорционалност со оценката на погодност или на турнирски пристап, кај MGES-GA централна улога има просечната оценка на погодност на тековната популација.

Конкретно, во предложениот алгоритам првиот чекор во селекцијата подразбира идентификација на сите единки чии оценки на погодност се повисоки од просечната оценка на погодност на популацијата. Овие единки директно се промовираат во следната фаза и стануваат дел од генерацијата на родители. Овој механизам го објаснува делот „mean-guided“ во името на алгоритмот, бидејќи средната вредност служи како динамичен праг кој се менува од генерација во генерација, во зависност од општата еволуција на популацијата. На овој начин се обезбедува дека значаен дел од родителската

генерација секогаш ќе биде составен од индивидуи со добар и натпросечен перформанс, што е важно за стабилноста и за квалитетот на оптимизацискиот процес.

Сепак, клучната разлика во однос на класичниот генетски алгоритам лежи во фактот дека единките со оценка на погодност под просекот не се автоматски исклучени од понатамошниот процес. Наместо тоа, тие добиваат дополнителна можност преку повторна евалуација, што претставува суштинска иновација во предложениот пристап. Овие послаби единки се комбинираат, односно подлежат на рекомбинација со елитната единка – индивидуата со најдобар перформанс во тековната популација. На овој начин се создава нова група потомци, кај кои се комбинираат генетските карактеристики на најдоброто решение со потенцијално корисни, но недоволно искористени информации од послабите единки.

По извршената рекомбинација, потомците повторно се евалуираат според нивната оценка на погодност. Само оние потомци кои успеваат да го надминат просечниот праг на оценката на погодност на популацијата се прифаќаат и се вклучуваат во следната генерација, додека останатите се отфрлаат. Со ова се воведува втор степен на селекција, кој осигурува дека во популацијата ќе опстанат само решенија со соодветен квалитет. Оттука произлегува и делот „elite selection“ во името на алгоритмот, бидејќи елитната единка игра централна улога во подобрувањето на послабите индивидуи, без притоа да се наруши квалитетот на популацијата.

Овој двостепен селекциски механизам овозможува ефикасно комбинирање на експлоатацијата и истражувањето на просторот на решенија. Од една страна, преку директната промоција на натпросечните единки се задржува силен селекциски притисок и се обезбедува континуирано подобрување на оценките на погодност. Од друга страна, преку повторната евалуација и „рециклирање“ на послабите единки, се зачувува генетската разновидност и се намалува ризикот од предвремена конвергенција.

Како резултат на ваквиот пристап, популацијата постепено се развива кон поквалитетни и постабилни решенија, при што се зголемува веројатноста за пронаоѓање на глобално оптимално решение. Дополнително, предложениот механизам овозможува автоматско прилагодување на селекцискиот процес на тековната состојба на популацијата, без потреба од рачно подесување на сложени параметри. Ова го прави MGES-GA особено погоден за решавање на сложени, нелинеарни и повеќекритериумски проблеми, какви што се оптимизациските задачи поврзани со современите микромрежи.

На крај, може да се заклучи дека предложениот MGES-GA претставува значајно унапредување на класичниот генетски алгоритам, бидејќи истовремено го зачувува квалитетот на најдобрите решенија и овозможува еволутивно подобрување на послабите индивидуи. Овој пристап резултира со поголем диверзитет, постабилна конвергенција и повисок квалитет на конечните оптимални решенија, што ја потврдува неговата применливост и ефикасност во реални инженерски апликации.

4.2. ДЕФИНИРАЊЕ НА ОПЕРАТОРИТЕ

4.2.1. ДЕФИНИРАЊЕ НА ОПТИМИЗАЦИСКА ФУНКЦИЈА

Примарната цел на предложениот оптимизациски алгоритам е неговата примена за управување и оптимизација на работата на сложени микромрежи поврзани на главната електроенергетска мрежа. Ваквите микромрежи се карактеризираат со интеграција на

различни дисперзирани генератори, ОИЕ, системи за складирање, како и активни потрошувачи, што резултира со висока комплексност и зголемени барања во однос на стабилноста и економската ефикасност на нивното работење. Поради тоа, оптимизацијата мора истовремено да ги земе предвид и економските и техничките аспекти на системот, со цел да се обезбеди сигурно, стабилно и економски оправдано функционирање на микромрежата.

Во рамките на ова истражување, оптимизацискиот процес ги опфаќа оперативните трошоци и напонските состојби во јазлите на мрежата, со посебен акцент на јазлите на кои се приклучени генераторите и потрошувачите, како и на точката на заедничко приклучување со главната мрежа. Овие параметри се од суштинско значење, бидејќи директно влијаат врз квалитетот на електричната енергија, сигурноста на снабдувањето и економската исплатливост на микромрежата. Со цел систематски да се адресираат овие аспекти, оптимизациската функција е формулирана како повеќекритериумска функција составена од две целни функции. Првата целна функција, означена како f_1 во равенката во продолжение, претставува функција на трошоци и има за цел минимизација на вкупните оперативни трошоци на микромрежата, вклучувајќи ги трошоците за производство, складирање и размена на електрична енергија со главната мрежа.

$$f_1 = \sum_{i=1}^T (C(P_i) + C(Q_i))\Delta t \quad (4.1)$$

Втората целна функција, означена како f_2 , претставува функција на напонски девијации и е насочена кон минимизација на падот на напонот, особено во точката на заедничко приклучување, со што се обезбедува почитување на мрежните кодекси и одржување на квалитетот на напонот во дозволените граници. Оваа функција е математички дефинирана со следниот израз:

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N ||V_i(t)| - 1| \quad (4.2)$$

Каде што, Δt е временски интервал за семприрање на податоци во часови, C е функцијата на трошоци, P_i е активна моќност изразена во kW, а Q_i реактивна моќност во системот изразена во kVAr, $V_i(t)$ е напон на n -тиот јазол во t -тиот час изразен во р.и., T е разгледуван временски интервал во часови, а N е број на јазли.

Врската помеѓу двете целни функции е воспоставена преку методот на пондериран збир (weighted sum), кој овозможува трансформација на повеќекритериумски проблем во еквивалентен оптимизациски проблем со една променлива. Со примена на овој метод се добива Парето фронтот, кој ги опишува недоминантните решенија и ја дефинира границата на оптималните компромисни решенија помеѓу економските и техничките цели. Бидејќи станува збор за повеќекритериумска оптимизација, не постои единствено оптимално решение, туку множество решенија, при што изборот на конкретно решение зависи од приоритетите на операторот, односно од релативната важност што ѝ се дава на минимизацијата на трошоците или на минимизацијата на напонските варијации. За таа

цел, во оптимизациската функција е воведен тежински фактор w , кој има вредности во интервалот $[0,1]$ и ја дефинира релативната важност на секоја од целните функции. За да се избегне доминација, поради разлики во размерот, двете целни функции се нормализирани во бездимензионална форма пред нивното агрегирање во целната функција g со користење на тежински коефициенти. Корелацијата и меѓусебната зависност помеѓу двете целни функции се формално прикажани со равенката во продолжение, со што се овозможува јасна и транспарентна анализа на компромисите во процесот на оптимизација.

$$\min g = wf_1^{norm} + (1 - w)f_2^{norm}, \forall w \in [0,1] \quad (4.3)$$

Во следните равенки се прикажани нормализираните вредности на секоја од целните функции.

$$f_1^{norm} = \frac{f_1}{f_1^{base}} \quad (4.4)$$

$$f_2^{norm} = \frac{f_2}{f_2^{base}} \quad (4.5)$$

Каде што, f_1^{base} и f_2^{base} претставуваат референтни вредности на функцијата на трошоци и функцијата на напонски девијации, соодветно избрани како максималните вредности на секоја од функциите добиени со примена на стандарден генетски алгоритам со селекција со натпревар (Tournament selection). Овие вредности служат како референтни (базни) вредности на целните функции и се користат како скалирачки фактори при нивната нормализација. Во овој случај вредностите на функциите се во опсег $[0,1]$, како што е дефинирано со следните две равенки:

$$0 \leq f_1^{norm} \leq 1 \quad (4.6)$$

$$0 \leq f_2^{norm} \leq 1 \quad (4.7)$$

Во почетната итерација, поради непознатата скала на целните функции, референтните вредности се иницијализираат со единична вредност. По добивањето на првата популација решенија, референтните вредности се ажурираат врз основа на добиените вредности на целните функции и понатаму се користат како скалирачки фактори при нормализацијата. Селекцијата со натпревар е избрана како референтен метод поради нејзината способност да обезбеди соодветен баланс помеѓу експлоатацијата на најдобрите решенија и одржувањето на разновидноста на популацијата, што придонесува за стабилна конвергенција на алгоритмот кон Парето фронтот [120] [121]. Овој тип на селекција е широко применет во повеќекритериумските еволутивни алгоритми, како што е NSGA-II, кој претставува една од најчесто користените варијанти на генетски алгоритми за оптимизација на микромрежи [122] [123].

Функцијата на трошоци е дефинирана така што сеопфатно ги опфаќа сите релевантни финансиски текови поврзани со работењето на микромрежата, земајќи ги предвид и приходите и трошоците што произлегуваат од интеракцијата помеѓу локалните енергетски ресурси и електроенергетската мрежа. На овој начин се обезбедува реалистична и прецизна економска проценка на работата на микромрежата во различни оперативни состојби.

Од аспект на приходите, функцијата на трошоци ги вклучува приходите остварени од продажба на електрична енергија кон главната електроенергетска мрежа во услови кога микромрежата располага со вишок на произведена енергија. Ова е особено значајно за микромрежи со висока пенетрација на ОИЕ, каде што во одредени временски интервали локалното производство може да ја надмине потрошувачката. Дополнително, во приходната страна се земаат предвид и придонесите од производството на електрична енергија од различни локални извори, вклучувајќи фотоволтаичен систем, ветрогенератор, горивни ќелии и микротурбина. Во зависност од конфигурацијата на микромрежата, приходите може да вклучуваат и енергија добиена преку празнење на батериските системи за складирање и на батериите на електричните возила, доколку тие се интегрирани и овозможуваат двонасочен проток на енергија.

Од друга страна, трошоците за работа на микромрежата се дефинирани така што ги опфаќаат сите финансиски обврски поврзани со обезбедување на потребната енергија и со управување на системите за складирање. Во оваа група трошоци спаѓаат трошоците за полнење на батерискиот систем, како и трошоците за купување електрична енергија од главната електроенергетска мрежа во периоди кога локалното производство не е доволно за задоволување на побарувачката. На тој начин, функцијата на трошоци овозможува јасно разграничување помеѓу приходните и расходните енергетски текови, што е прикажано со равенката:

$$C_t = C_{\text{RES}}(t) + C_{\text{grid}}(t) + C_{\text{DG}}(t) + C_{\text{bat}}(t), \forall t \in [1, T] \quad (4.8)$$

Каде што, C_{RES} е функција на трошоци за производство за електрична енергија од ОИЕ, C_{grid} е функција на паричните текови од тргувањето на микромрежата со енергетската мрежа, C_{DG} е функција на трошоци за производство на електрична енергија од горивните ќелии, микротурбините и дизел генераторите, а C_{bat} е функција на трошоци за деградација на батеријата.

Понатаму, равенките (4.9) до (4.12) детално го опишуваат начинот на пресметка на секоја поединечна компонента на трошоците и приходите, со што се овозможува транспарентна и модулarna економска анализа. Овој пристап овозможува лесна адаптација на моделот во зависност од специфичните карактеристики на микромрежата, како и од пазарните услови и ценовните сигнали.

Равенката во продолжение ги пресметува оперативните трошоци поврзани со ОИЕ во временскиот интервал t . Бидејќи во моделот се разгледуваат фотоволтаични панели и ветерни турбини, како ОИЕ, вкупниот трошок се добива како производ од моменталната произведена моќност и од соодветниот трошок на производство. Иако обновливите извори немаат трошок за гориво, во моделот се вклучуваат оперативни трошоци и трошоци за одржување.

$$C_{RES}(t) = \sum_{i=1}^{N_{PV}} (P_{i,t}^{PV} \cdot c^{PV}) + \sum_{j=1}^{N_{wind}} (P_{j,t}^{wind} \cdot c^{wind}), \forall t \in [1, T] \quad (4.9)$$

Каде што, $P_{i,t}^{PV}$ е моќност произведена од i -тиот фотоволтаичен генератор во t -тиот час, $P_{j,t}^{wind}$ е моќност произведена од j -тиот ветрогенераторот во t -тиот час, c^{PV} претставува оперативни трошоци на фотоволтаичниот систем, c^{wind} претставува оперативни трошоци на ветрогенераторот, N_{PV} е вкупен број на фотоволтаични генератори, а N_{wind} е вкупен број на ветрогенератори во системот.

Во следната равенка е дефиниран начинот на пресметка на трошоците за купување на електрична енергија од мрежа и профитот од продавање електрична енергија на мрежата.

$$C_{grid}(t) = \begin{cases} P_t^{grid} \cdot \Delta t \cdot c^{buy}, & P_t^{grid} > 0 \\ P_t^{grid} \cdot \Delta t \cdot c^{sell}, & P_t^{grid} < 0, \\ 0, & P_t^{grid} = 0 \end{cases} \quad \forall t \in [1, T] \quad (4.10)$$

Каде што, $P_t^{grid} \cdot \Delta t > 0$ е енергија преземена од енергетската мрежа, $P_t^{grid} \cdot \Delta t < 0$ е енергија продадена кон енергетската мрежа, c^{buy} е куповна цена на електрична енергија, c^{sell} е продажна цена на електрична енергија.

На овој начин се моделира двонасочен пазарен механизам, каде цената на купување и продажба може да биде различна.

Со равенката (4.11) се дефинирани оперативните трошоци на горивните ќелии, микротурбините и дизел генераторите. Притоа се земени предвид ефикасноста на горивната ќелија, односно микротурбината, трошоците за одржување, како и трошоците за гориво кај дизел генераторите.

$$C_{DG}(t) = \sum_{i=1}^{N_{FC}} \left(\frac{P_{i,t}^{FC}}{\eta^{FC}} c^{run,FC} + P_{i,t}^{FC} c^{maint,FC} \right) \cdot \Delta t \\ + \sum_{j=1}^{N_{MT}} \left(\frac{P_{j,t}^{MT}}{\eta^{MT}} c^{run,MT} + P_{j,t}^{MT} c^{maint,MT} \right) \cdot \Delta t \\ + \sum_{k=1}^{N_{DG}} \left(a_{DG} (P_{k,t}^{DG}(t))^2 + b_{DG} P_{k,t}^{DG}(t) + c_{DG} \right) \cdot \Delta t, \forall t \in [1, T] \quad (4.11)$$

Каде што, P_t^{FC} е инјектираната моќност од горивната ќелија, P_t^{MT} е инјектираната моќност од микротурбина, η^{FC} и η^{MT} се ефикасности на горивната ќелија и микротурбината, соодветно, $c^{run,FC}$ и $c^{run,MT}$ се оперативните трошоци на горивната ќелија и микротурбината, соодветно, $c^{maint,FC}$ и $c^{maint,MT}$ се трошоци за одржување на горивната ќелија и микротурбината, соодветно. Поради ограничената ефикасност на уредите, потребната влезна енергија (гориво) за нивно работење е поголема од

испорачаната електрична моќност, поради што овие величини се делат со соодветниот степен на искористување. На овој начин се земаат предвид загубите при конверзија на енергијата кај горивните ќелии и микротурбините. P^{DG} претставува моќност од дизел генераторот, a_{DG} ја опишува нелинеарната зависност на трошоците од произведената моќност на дизел генераторот, b_{DG} претставува трошок за гориво, а c_{DG} вклучува трошоци за одржување на дизел генераторот. N_{FC} означува вкупен број на горивни ќелии, N_{MT} означува број на микротурбини, а N_{DG} означува број на дизел генератори.

Трошокот поврзан со работењето на батерискиот систем во микромрежата е пресметан со следниот израз:

$$C_{bat}(t) = \sum_{i=1}^{N_{bat}} |P_{i,t}^{bat}| \cdot \Delta t \cdot c^{bat}, \forall t \in [1, T] \quad (4.12)$$

Каде што, $P_t^{bat} > 0$ означува празнење на батеријата, $P_t^{bat} < 0$ означува полнење на батеријата, c^{bat} е трошок за оперативна работа и одржување на батеријата.

Полнењето на батериите на електричните возила е моделирано на идентичен начин како и размената на електрична енергија со електроенергетската мрежа. Соодветно на тоа, електричната енергија што се користи за полнење на батериите на ЕВ се вреднува по иста ценовна шема како и енергијата што се купува од мрежата.

Тоа значи дека во моменти на полнење на батеријата на ЕВ, алгоритмот смета дека се зголемува оптоварувањето, а цената по која се продава таа електрична енергија на корисниците на ЕВ е еднаква со цената по која се продава во мрежа.

Оваа претпоставка овозможува поедноставување на економскиот модел, но истовремено ја задржува неговата реалистичност и конзистентност, особено во контекст на микромрежи поврзани на мрежа, каде што електричните возила претставуваат флексибилни и значајни потрошувачи, а потенцијално и извори на енергија.

4.2.2. ДЕФИНИРАЊЕ НА ВЛЕЗНИ ОГРАНИЧУВАЊА

Влезните податоци што се користат во предложениот оптимизациски алгоритам се дефинирани така што целосно ги опфаќаат техничките, оперативните и пазарните аспекти на работењето на микромрежата поврзана на локалната дистрибутивна мрежа. Овие податоци претставуваат основа врз која алгоритмот ја гради оптимизациската постапка и овозможуваат донесување реалистични и технички изводливи одлуки. Во таа насока, алгоритмот ги зема предвид техничките ограничувања на сите инсталирани генератори, карактеристиките и ограничувањата на БС за складирање енергија, ограничувањата поврзани со размената на електрична енергија со мрежата, како и дозволените граници на напоните во јазлите на микромрежата.

Максималната генерирана активна моќност од генераторите базирани на ОИЕ е ограничена со нивните технички и природни карактеристики. Во конкретниот модел, максималната излезна моќност на ФВС е дефинирана на следниот начин:

$$0 \leq P_{i,t}^{PV} \leq P^{PV,max}, \forall i \in [0, N_{PV}], \forall t \in [1, T] \quad (4.13)$$

Додека за ВГ, ограничувањата за генерираната моќност се дефинирани со изразот во продолжение. На овој начин се обезбедува оптимизацискиот процес да не предлага нереални вредности на производство кои не можат да се реализираат во пракса.

$$0 \leq P_{j,t}^{wind} \leq P^{wind,max}, \forall j \in [0, N_{wind}], \forall t \in [1, T] \quad (4.14)$$

Каде што, $P^{PV,max}$ е максималната генерирана моќност од секој од фотоволтаичните генератори, а $P^{wind,max}$ е максималната генерирана моќност од секој од ветрогенераторите.

Батерискиот систем за складирање енергија е моделиран преку ограничувањата на неговата максимална и минимална моќност на полнење и празнење, како и преку состојбата на наполнетост (SOC). Овие ограничувања се формално претставени со равенките (4.15) и (4.16), со што се гарантира дека батеријата работи во дозволеният опсег и дека не доаѓа до прекумерно празнење или преполнување, што би можело да доведе до забрзана деградација или до оштетување на системот.

$$0 \leq P_{i,t}^{bat} \leq P^{bat,max}, \forall i \in [0, N_{bat}], \forall t \in [1, T] \quad (4.15)$$

Каде што, $P^{bat,max}$ е максималната моќност преземена или предадена на секоја од батериите. $P_t^{bat} < 0$ означува полнење, а $P_t^{bat} > 0$ означува празнење на батеријата.

Состојбата на наполнетост на батеријата (SOC) претставува клучен параметар во оптимизацијата, бидејќи директно влијае врз можноста за складирање на вишокот енергија и нејзино користење во периоди на недостиг. Таа е дефинираната во следните граници:

$$SOC_{min}^{bat} \leq SOC_{i,t}^{bat} \leq SOC_{max}^{bat}, \forall i \in [0, N_{bat}], \forall t \in [1, T] \quad (4.16)$$

Каде што, SOC_{min}^{bat} е минималната, а SOC_{max}^{bat} е максималната состојба на наполнетост на секоја од батериите.

Со цел да се ограничи влијанието на микромрежата врз стабилноста на локалната дистрибутивна мрежа, во моделот се дефинирани максималните и минималните дозволени вредности на разменетата електрична енергија со мрежата. Овие ограничувања се воведуваат за да се спречат големи и нагли промени во тековите на моќност кои би можеле негативно да се одразат врз напонскиот профил и сигурноста на мрежата. Истовремено, со нив се намалуваат и потенцијалните напонски варијации во приклучните точки. Овие граници се пропишани од операторот на дистрибутивната мрежа и се претставени со следните равенки:

$$0 \leq P_t^{buy} \leq P^{buy_max}, \forall t \in [1, T] \quad (4.17)$$

$$0 \leq P_t^{sell} \leq P^{sell_max}, \forall t \in [1, T] \quad (4.18)$$

Каде што, P^{buy_max} е максималната купена, а P^{sell_max} е максималната продадена моќност кон мрежата.

Билансот на активните моќности во микромрежата е опишан со равенката во продолжение, при што се обезбедува рамнотежа помеѓу производството, потрошувачката, складирањето и размената на енергија со мрежата во секој временски интервал.

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{N_{PV}} P_{p,t}^{PV} + \sum_{w=1}^{N_{wind}} P_{w,t}^{wind} + \sum_{n=1}^{N_{bat}} P_{n,t}^{bat,dis} + \sum_{i=1}^{N_{FC}} P_{i,t}^{FC} + \sum_{j=1}^{N_{MT}} P_{j,t}^{MT} + \sum_{k=1}^{N_{DG}} P_{k,t}^{DG} + P_t^{buy} \\ = P_t^{load} + P_t^{sell} + \sum_{n=1}^{N_{bat}} P_{n,t}^{bat,ch}, \forall t \in [0, T] \end{aligned} \quad (4.19)$$

Симултаното полнење и празнење на батеријата, како и истовременото купување и продавање на електрична енергија со електроенергетската мрежа, не се дозволени во рамките на разгледуваниот модел. Овие ограничувања се воведени со цел да се обезбеди физичка изводливост и реалистично претставување на работата на микромрежата, бидејќи во практични услови ваквите состојби не се технички оправдани и можат да доведат до нелогични или до нестабилни оперативни сценарија.

Додека билансот на реактивните моќности е прикажан на следниот начин:

$$\sum_{n=1}^{N_{bat}} Q_{n,t}^{bat} + Q_t^{grid} = Q_t^{load}, \forall t \in [0, T] \quad (4.20)$$

Каде што, Q_t^{bat} е реактивна моќност на батеријата. Батерискиот систем преку својот конвертор може да обезбедува или апсорбира реактивна моќност. Активната и реактивната моќност на батерискиот систем се контролираат преку инверторот и теоретски можат да се регулираат независно. Сепак, нивната истовремена вредност е ограничена со номиналната привидна моќност на инверторот, при што важи условот $(P^{bat})^2 + (Q^{bat})^2 \leq (S^{bat})^2$. Ова значи дека зголемувањето на активната моќност ја намалува достапната реактивна моќност и обратно. Q_t^{grid} е реактивна моќност разменета со мрежата, при што ако $Q_{grid,t} > 0$ микромрежата презема реактивна моќност од мрежа, а при $Q_{grid,t} < 0$ микромрежата предава реактивна моќност кон мрежата, а Q_t^{load} е вкупната потрошувачка на реактивна моќност.

Фотоволтаичните модули како примарен извор произведуваат еднонасочна електрична енергија и сами по себе не генерираат реактивна моќност. Сепак, фотоволтаичниот генератор поврзан на наизменична мрежа преку инвертор може да учествува во размена на реактивна моќност со мрежата. Тоа значи дека реактивната моќност не ја обезбедуваат самите фотоволтаични модули, туку тоа е резултат на управувањето со мрежниот инвертор. Во општ случај, активната и реактивната моќност на инверторот се ограничени со неговата номинална привидна моќност:

$$(P^{PV})^2 + (Q^{PV})^2 = (S^{inv})^2 \quad (4.21)$$

Каде што, S^{inv} е номинална привидна моќност на инверторот, а Q^{PV} реактивна моќност што инверторот може да ја генерира или апсорбира.

Од равенката (4.21) се гледа дека способноста на фотоволтаичниот систем за обезбедување реактивна моќност зависи од моменталната активна моќност. Кога фотоволтаичниот систем работи со висока активна моќност, преостанатиот капацитет за реактивна моќност е помал. Обратно, кога активната моќност е пониска, инверторот има поголема можност за генерирање или апсорпција на реактивна моќност.

Ветрогенераторите, за разлика од фотоволтаичните системи, поради присуството на електромашински генератори, природно се поврзани со размена на реактивна моќност. Кај асинхроните генератори тие претежно трошат реактивна моќност од мрежата, додека кај современите решенија како DFIG и синхрони генератори со конвертор, реактивната моќност може активно да се контролира, овозможувајќи поддршка на напонот и подобрување на стабилноста на системот. Слично како кај фотоволтаичните системи и кај ветрогенераторите важи следното ограничување:

$$(P^{WT})^2 + (Q^{WT})^2 = (S^{WT})^2 \quad (4.22)$$

Каде што, S^{WT} е привидна моќност на ветрогенераторот, а Q^{WT} реактивна моќност што ветрогенераторот може да ја генерира или апсорбира, зависно од типот на генераторот.

Во рамки на развиениот модел, фотоволтаичните и ветерните генератори се разгледуваат како извори на активна моќност, при што нивниот придонес во реактивната моќност се занемарува. Иако современите инверторски и конверторски технологии овозможуваат генерирање и апсорпција на реактивна моќност, во ова истражување се претпоставува дека тие работат со фактор на моќност еднаков на единица. Оваа претпоставка е направена со цел поедноставување на оптимизацискиот модел и фокусирање на главните цели на истражувањето, односно минимизација на оперативните трошоци и на напонските варијации. Дополнително, од економски аспект, ограничувањето на активната моќност од фотоволтаичниот систем најчесто не е поволно, бидејќи води до директна загуба на енергија и приход. Поради тоа, во практични услови често е поповолно реактивната моќност да се обезбеди од мрежата или од посебни компензирачки уреди, освен ако цената или пеналите за реактивна моќност не се доволно високи за да го оправдаат намалувањето на активното производство.

Дозволените варијации на напонот во нисконапонската дистрибутивна мрежа се дефинирани во EN 50160, каде што се пропишува опсег од $\pm 10\%$ од номиналниот напон

во точките на снабдување на потрошувачите [124] [125], како што е дефинирано со следната равенка:

$$0,9 \cdot V_r \leq V_{i,t} \leq 1,1 \cdot V_r, \forall i \in [0, n_{\text{nodes}}], \forall t \in [0, T] \quad (4.23)$$

За генераторските единици приклучени на дистрибутивна мрежа, построги барања произлегуваат од EN 50549 и EU 2016/631, со што во практични анализи често се применува ограничување од $\pm 5\%$ во точката на приклучување на генераторите [124] [125], дефинирано со следната равенка (4.24):

$$0,95 \cdot V_r \leq V_{i,t}^{DER} \leq 1,05 \cdot V_r, \forall i \in [0, n_{\text{nodes}}], \forall t \in [0, T] \quad (4.24)$$

Во Република Северна Македонија ограничувањата на напонот во сите јазли во дистрибутивните мрежи со номинален напон 10 kV се дефинирани со мрежните правила од ЕВН и според член 62 [126], ограничувањата се во следните граници:

$$0,95 \leq V \leq 1,07 \quad (4.25)$$

Напонските состојби во микромрежата се определуваат на тој начин што прво се пресметуваат струите во гранките, почнувајќи од крајните јазли кон референтниот јазол, врз основа на струите кои се инјектираат во јазлите и струите на низводните гранки. Потоа, почнувајќи од референтниот јазол, се ажурираат напоните во сите јазли преку падот на напон на соодветните гранки. Струјата која се инјектира во јазол i во момент t се пресметува според изразот:

$$I_i^{inj,(k)}(t) = \text{conj} \left(\frac{P_i(t) + jQ_i(t)}{V_i^{(k)}(t)} \right), \forall t \in [0, T] \quad (4.26)$$

Каде што, $V_i^{(k)}(t)$ е напонот во јазолот i во итерација k .

Струјата во гранката меѓу јазлите i и j се определува со следниот израз:

$$I_{ij}^{(k)}(t) = I_j^{inj,(k)}(t) + \sum_{m \in \Omega_j} I_{jm}^{(k)}(t), \forall t \in [0, T] \quad (4.27)$$

Каде што, Ω_j претставува множество од гранки кои излегуваат од јазолот j .

Напонот во јазол j во наредната итерација се ажурира со изразот:

$$V_j^{(k)}(t) = V_i^{(k+1)}(t) - Z_{ij} I_{ij}^{(k)}(t), \forall t \in [0, T] \quad (4.28)$$

Каде што, $Z_{ij} = (r_{ij} + jx_{ij})l_{ij}$ е импеданса на секоја гранка помеѓу јазлите i и j , r е подолжна реактанса на водот во Ω/km , x е подолжна импеданса на водот во Ω/km , а l претставува должина на водот во km .

Итеративната постапка продолжува сè додека максималната разлика меѓу напоните во две последователни итерации не стане помала од зададената толеранција. По добивањето на јазловите напони, напонската девијација се определува како отстапување на модулот на напонот од референтната вредност, како што е прикажано со следниот израз:

$$\max_i |V_i^{(k+1)}(t) - V_i^{(k)}(t)| < \varepsilon \quad (4.29)$$

Каде што, $\varepsilon = 10^{-6}$ претставува зададена толеранција.

Покрај техничките ограничувања, алгоритмот како влезни податоци ги користи и временските прогнози, предвидената потрошувачка на електрична енергија, како и пазарните цени за купување и продажба на електрична енергија. Дополнително, се користат и параметри поврзани со батерискиот систем, како што се максималната моќност на полнење и празнење и почетната состојба на наполнетост. Батеријата се полни исклучиво во услови кога во микромрежата постои вишок на енергија и кога SOC е под максималната дозволена вредност, додека во спротивно таа се празни со цел да се покрие дел од побарувачката. Состојбата на наполнетост во секој часовен интервал се пресметува со следниот израз, независно од тоа дали батеријата се наоѓа во режим на полнење или на празнење [127] [128]:

$$SOC(t+1) = \begin{cases} SOC(t) + P_t^{bat} \eta^{ch} \Delta t, & P^{bat} < 0 \\ SOC(t) - \frac{P_t^{bat}}{\eta^{dis}} \Delta t, & P^{bat} > 0 \\ SOC(t) & P^{bat} = 0 \end{cases} \quad (4.30)$$

Каде што, $SOC(t)$ е состојба на наполнетост на батеријата во t -тиот час, P_t^{bat} моќноста на полнење/празнење на батеријата во t -тиот час, при што $P^{bat} < 0$ означува полнење, а $P^{bat} > 0$ означува празнење на батеријата, Δt е временскиот интервал на семплирање, а η^{ch}/η^{dis} ефикасност на полнење/празнење на батеријата, соодветно.

Алгоритмот ги анализира сите влезни податоци во секој временски интервал и генерира условно оптимално решение врз основа на состојбата во претходниот час и моменталните услови. Доколку предложеното решение ги задоволува сите технички и оперативни ограничувања, истото се прифаќа, во спротивно, алгоритмот продолжува со пребарување на ново решение, со што се обезбедува сигурен и стабилен оптимизациски процес.

4.2.3. ИНИЦИЈАЛИЗАЦИЈА НА ПАРАМЕТРИ

На почетокот на оптимизацискиот процес, предложениот алгоритам ги презема сите релевантни влезни податоци неопходни за правилно и реалистично моделирање на работата на микромрежата. Овие податоци претставуваат почетна основа врз која се изведуваат сите понатамошни пресметки и оптимизациски чекори. Пред сè, се прибираат информациите за потрошувачката на електрична енергија, односно профилите на оптоварување во микромрежата за разгледуваниот временски интервал. Истовремено, се

земаат предвид и податоците за моменталното производство на електрична енергија од ФВС и ВГ, кои претставуваат главни недиспечабилни извори на енергија и чие производство зависи од временските услови.

Покрај податоците за потрошувачката и производството, алгоритмот ја зема предвид и состојбата на наполнетост SOC на БС за складирање енергија во почетниот момент. Овој параметар е од суштинско значење, бидејќи директно влијае врз можноста за понатамошно полнење или празнење на батеријата и со тоа врз флексибилноста на микромрежата. Дополнително, се проверува дали во микромрежата се вклучени електрични возила, како и нивниот број и почетната состојба на наполнетост на батериите на возилата. Вклучувањето на електричните возила како дополнителни потрошувачи, а потенцијално и како извори на енергија, значително ја зголемува комплексноста на оптимизацискиот проблем и затоа овие информации се неопходни уште во почетната фаза на алгоритмот.

Во продолжение, се дефинираат сите релевантни технички ограничувања на системот, кои ги опфаќаат максималните и минималните моќности на диспечабилните генератори, ограничувањата на БС, дозволените граници на размена на енергија со електроенергетската мрежа, како и напонските ограничувања во јазлите на микромрежата. Овие ограничувања служат како рамка во која алгоритмот мора да ги бара оптималните решенија, со што се обезбедува нивна техничка изводливост.

Откако ќе се дефинираат влезните податоци и ограничувањата, се пристапува кон фазата на иницијализација на популацијата. Во оваа фаза, за секој од променливите параметри на оптимизацискиот проблем кои ја вклучуваат моќноста испорачана од горивни ќелии, микротурбина, дизел генератор, батериски систем, како и интеракциите со електроенергетската мрежа, се генерираат случајни вредности во рамките на однапред дефинираните дозволени опсези. Секоја комбинација на овие вредности претставува една индивидуа, односно потенцијално решение во популацијата.

Иницијализацијата на популацијата има клучна улога во целокупниот процес на оптимизација, бидејќи таа го определува почетниот диверзитет на решенијата и влијае врз способноста на алгоритмот да го истражува просторот на можни решенија. Премала популација може да резултира со недоволен диверзитет и со поголема веројатност за конвергенција кон локално оптимални решенија, што води кон послаб квалитет на конечниот резултат. Од друга страна, преголемата популација значително го зголемува пресметковното време и може да ја намали практичната применливост на алгоритмот. Во рамките на ова истражување е избрана популација од 100 индивидуи, која претставува соодветен компромис помеѓу квалитетот на решенијата и ефикасноста на оптимизацискиот процес, обезбедувајќи доволен диверзитет и прифатливо време на извршување на алгоритмот.

4.2.4. ЕВАЛУАЦИЈА НА ПАРАМЕТРИ

Во следниот чекор од оптимизацискиот процес се спроведува евалуација на сите индивидуи во иницијалната популација, при што секоја од случајно доделените вредности на променливите параметри се тестира во однос на дефинираните оптимизациски функции. Оваа евалуација се изведува земајќи ги предвид сите технички и оперативни ограничувања на системот, со цел да се обезбеди дека секое потенцијално

решение е физички изводливо и реалистично од аспект на работата на микромрежата. На тој начин, алгоритмот не само што го оценува квалитетот на решението од економска и од техничка перспектива, туку истовремено проверува и дали истото ги задоволува поставените гранични услови.

Резултатите од оваа анализа претставуваат квантитативна мерка за тоа колку успешно секоја индивидуа од популацијата ги исполнува целите на оптимизацијата. Овие резултати се дефинираат како оценки на погодност, кои ја одразуваат релативната „добрина“ на секое решение во споредба со останатите индивидуи. Бидејќи апсолутните оценки на погодност не можат да бидат нерамномерно распределени или да покажуваат големи разлики, во алгоритмот се применува рангово скалирање. Со овој пристап, индивидуите се рангираат според нивниот перформанс, а оценките на погодност се трансформираат така што се намалува доминацијата на екстремно добрите решенија и се одржува поголем диверзитет во популацијата. Ова е особено важно за стабилноста на еволутивниот процес и за избегнување на предвремена конвергенција.

Излезот од оптимизацискиот процес, по завршување на евалуацијата, претставува збир од оптимални вредности на сите релевантни управувачки променливи во микромрежата. Поточно, алгоритмот одредува колкав дел од произведената електрична енергија од секој дистрибуиран генератор ќе биде директно искористен за снабдување на потрошувачите, колкава количина на енергија ќе се складира во БС или ќе се повлече од него, како и колкава моќност ќе биде генерирана од диспечабилните извори, како што се горивни ќелии и микротурбина. Дополнително, се утврдува и оптималната количина на електрична енергија што ќе се разменува со главната електроенергетска мрежа, преку купување во периоди на недостиг или преку продажба во услови на вишок на енергија.

Евалуацијата на индивидуите во популацијата се врши врз основа на добиените оценки на погодност, кои служат како основен критериум за понатамошните фази на алгоритмот, вклучувајќи ги селекцијата, вкрстувањето и мутацијата. Функцијата за оценување на секој поединечен член на популацијата е имплементирана во согласност со зададената синтакса на Matlab, софтверски пакет во кој е развиен програмскиот код на алгоритмот. Ова овозможува флексибилна и ефикасна пресметка на оптимизациските функции, како и лесна модификација и проширување на моделот. Формалната дефиниција на функцијата за определување на оценката на индивидуите е прикажана со следниот израз, кој претставува централна компонента во процесот на евалуација и селекција на решенијата:

$$expectation_i = \frac{scores_i \cdot \sum_{k=1}^p nParents_k}{\sum_{j=1}^n scores_j}, i \in [1, n] \quad (4.31)$$

Каде што, *scores* претставува вектор од скалари за секој член на популацијата, *nParents* е бројот на родители потребни за зададената популација, *n* претставува должина на векторот *scores*, *p* е должина на векторот *nParents*, *expectation* е вектор-колона со скалари со иста должина како *scores*, кој ги содржи скалираните вредности на секој член на популацијата.

Вредностите во векторот expectation се добиени преку процес на скалирање и рангирање, со што се овозможува намалување на диспропорциите помеѓу поединечните оценки на погодност и се избегнува прекумерна доминација на индивидуи со екстремно високи оценки.

Ваквиот начин на дефинирање и користење на овие параметри овозможува постабилен и порамномерен селекциски процес, при што секоја индивидуа добива соодветна веројатност за избор во зависност од нејзиниот релативен перформанс, а не само од апсолутната вредност на функцијата за оценка на погодност. На тој начин се зачувува генетскиот диверзитет во популацијата и се обезбедува поефикасна еволуција на решенијата во наредните генерации.

4.2.5. СЕЛЕКЦИЈА НА ИНДИВИДУИ

Во наредната фаза од генетскиот алгоритам се спроведува процесот на селекција, чија основна цел е избор на единките што ќе ја формираат родителската популација и ќе учествуваат во генерирањето на следната генерација на решенија. Селекцијата претставува еден од најкритичните чекори во еволутивниот процес, бидејќи директно ги определува насоката и динамиката на конвергенцијата, како и рамнотежата помеѓу искористување на веќе добрите решенија и истражување на нови области од просторот на можни решенија. Изборот на родителските единки се базира на резултатите од претходната фаза на евалуација, односно на добиените оценки на погодност, кои претставуваат квантитативна мерка за квалитетот и прилагоденоста на секоја индивидуа во однос на оптимизациските цели.

Кај стандардниот генетски алгоритам, селекцијата најчесто се изведува со користење на селекциски механизми пропорционални на оценката на погодност, како што се рулет-тркалото или турнирската селекција. Во ваквите пристапи, единките со повисоки оценки на погодност имаат поголема веројатност да бидат избрани како родители, додека единките со пониска прилагоденост често се елиминираат уште во раните генерации. Иако ова овозможува релативно брза конвергенција, ваквиот пристап може да доведе до губење на генетскиот диверзитет и до појава на предвремена конвергенција кон локално оптимални решенија, особено кај сложени и нелинеарни оптимизациски проблеми, какви што се оние поврзани со управувањето на микромрежи.

Со цел да се надминат овие ограничувања, во предложениот пристап е воведен поинаков и порафиниран механизам за селекција, кој комбинира директна промоција на натпросечните единки и дополнителна евалуација на оние со послаб перформанс. Поточно, сите единки чија оценка на погодност е поголема од просечната оценка на погодност на тековната популација автоматски се промовираат во следната фаза и стануваат дел од родителската генерација. На овој начин се обезбедува дека јадрото на родителската популација е составено од решенија со докажано добар квалитет, што придонесува за стабилност и континуирано подобрување на резултатите.

Единките со оценки на погодност под просекот, наместо веднаш да бидат отфрлени, подлежат на секундарна евалуација. Овој чекор претставува суштинска разлика во однос на стандардниот ГА и има за цел да се искористи потенцијалната корисна генетска информација што може да биде содржана и во послабите решенија. Во оваа фаза, секоја таква единка се спарува со елитната единка, односно со единката која има највисока

оценка на погодност во тековната популација. Меѓу овие две единки се изведува вкрстување во една точка (single point crossover), со што се генерираат две потомства кои комбинираат карактеристики од најдоброто решение и од послабата индивидуа.

Од добиените потомци се избира оној со повисока оценка на погодност, кој потоа се споредува со просечната оценка на погодност на популацијата. Доколку избраниот потомок ја достигне или ја надмине оваа просечна вредност, тој се прифаќа и се вклучува во следната генерација како родител. Во спротивно, потомокот се отфрла и единката не учествува понатаму во репродуктивниот процес. Со оваа двостепена селекциска стратегија се обезбедува дека во популацијата опстојуваат само решенија со доволен квалитет или со јасен потенцијал за подобрување, при што се елиминираат единките со навистина низок перформанс.

Ваквиот пристап овозможува ефективно комбинирање на експлоатацијата и истражувањето. Од една страна, директната промоција на натпросечните единки овозможува брза и стабилна конвергенција кон подобри решенија. Од друга страна, повторната евалуација на послабите единки преку интеракција со елитната индивидуа придонесува за зачувување на генетскиот диверзитет и намалување на ризикот од заглавување во локални оптимуми. На тој начин, алгоритмот не само што ги задржува најдобрите решенија, туку и активно работи на подобрување на дел од популацијата која, во класичниот ГА, би била целосно елиминирана.

За реализација на овој селекциски механизам е развиена посебна функција, имплементирана согласно правилата и синтаксата на Matlab, кој е користен како програмска околина за развој на алгоритмот. Како влезни параметри во функцијата за селекција се користат векторот *expectation*, кој ги содржи скалираните оценки на прилагоденост за сите единки во популацијата, параметарот *nParents*, кој го дефинира бројот на родители што треба да бидат избрани, како и структурата *options*, во која се содржани дополнителни услови и поставки за работата на генетскиот алгоритам. Условот според кој се прифаќаат единките во процесот на селекција е формално дефиниран со изразот:

$$expectation_i \geq \max(expectation), i \in [1, n] \quad (4.32)$$

Веројатноста за појава, односно избор на одредена оценка на прилагоденост, се пресметува со изразот во продолжение, при што се обезбедува пропорционална застапеност на прифатените единки во зависност од нивниот релативен квалитет:

$$p_i = \frac{expectation_i}{\sum_{i=1}^n expectation_i}, i \in [1, n] \quad (4.33)$$

Конечно, изборот на конкретните родителски единки се изведува со користење на вградена Matlab функција, која генерира случајни броеви согласно однапред дефинираните веројатности, прикажана со следниот израз:

$$parents = \text{randsample}(accepted, nParents, true, p) \quad (4.34)$$

Каде што, *accepted* е множество на прифатени единки кои го исполнуваат условот во израз (4.32), *nParents* е големината на множеството кое треба да биде генерирано, *true* значи дека случајно генерираните броеви можат да се појават повеќепати во низата, p е веројатноста да прифатената единка има соодветна вредност.

Овој формализиран и структуриран пристап кон селекцијата обезбедува робусен, флексибилен и ефикасен механизам за избор на родители, со што се подобрува целокупната ефикасност и стабилност на предложениот генетски алгоритам.

4.2.6. ПРОЦЕС НА ВКРСТУВАЊЕ

По завршувањето на процесот на селекција, избраните единки кои се квалификувале како родители продолжуваат во следната фаза од генетскиот алгоритам, односно фазата на вкрстување. Вкрстувањето претставува еден од основните еволутивни оператори во генетските алгоритми и има клучна улога во создавањето на нови решенија преку комбинирање на генетската информација од родителските единки. Неговата основна цел е да се искористат позитивните карактеристики на избраните родители и преку нивна соодветна комбинација да се генерира нова популација на единки, односно генерација на потомци, која потенцијално може да поседува подобар квалитет во однос на претходната генерација.

Во процесот на вкрстување се врши размена на гени помеѓу родителските индивидуи, при што секој потомок наследува дел од генетската структура на двата родители. Овој механизам овозможува експлоатација на веќе пронајдените добри решенија, бидејќи се комбинираат нивните најповолни карактеристики, но истовремено придонесува и за создавање нови генетски комбинации кои не постоеле во претходните генерации. Начинот на кој се изведува вкрстувањето може да варира во зависност од типот на кодирање на хромозомите, природата на оптимизацискиот проблем и дефинираните технички ограничувања. Поради тоа, во литературата постојат повеќе типови на вкрстување кои се опишани во §3.2.1.3. *Вкрстување (рекомбинација)*.

Во рамките на ова истражување е избрано да се примени расеано вкрстување (*scattered crossover*), кое е особено погодно за проблеми кај кои гените се кодирани во бинарна форма. Кај бинарното кодирање, секој ген во хромозомот може да има вредност 0 или 1, со што се овозможува едноставна и ефикасна примена на овој тип на вкрстување. Расеаното вкрстување функционира така што за секоја позиција во хромозомот се користи бинарна маска која одредува од кој родител ќе се преземе соодветниот ген. Во конкретниот случај, гените со вредност 1 во маската се преземаат од првиот родител, додека гените со вредност 0 се преземаат од вториот родител, како што е прикажано со Пример 4.1-1.

Пример 4.1-1

Нека r_1 и r_2 се родители, а точката на вкрстување е 3.

$$r_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$r_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$$

Да се претпостави следната бинарна маска:

$$M = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Првиот потомок се добива по следната шема: ако $M_i = 1$ тогаш генот се зема од родител r_1 , ако $M_i = 0$ тогаш генот се зема од родител r_2 . Додека вториот потомок се добива по инверзна шема, односно: ако $M_i = 1$ тогаш генот се зема од родител r_2 , ако $M_i = 0$ тогаш генот се зема од родител r_1 .

Новокреираните хромозоми деца ќе го имаат следниот генетски код.

$$d_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$$

$$d_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Со примена на расеаното вкрстување се обезбедува рамномерна и флексибилна комбинација на генетската информација од двата родители, бидејќи секој ген се третира независно од останатите. Ова значително го зголемува диверзитетот на создадените потомци во споредба со класичните методи на вкрстување, кај кои размената на гени е ограничена на континуирани сегменти од хромозомот. Како резултат на тоа, расеаното вкрстување овозможува поефикасно истражување на просторот на можни решенија и ја намалува веројатноста за предвремена конвергенција кон локални оптимуми.

Множеството на единки добиени по завршувањето на процесот на вкрстување се нарекува генерација на деца. Оваа генерација претставува нова популација која содржи потенцијални решенија со комбинирани карактеристики од родителските единки. Потоа, овие потомци продолжуваат во следната, финална фаза од алгоритмот, каде што преку дополнителни оператори, како и повторната евалуација, се врши понатамошно подобрување и се определува оптималното решение. На тој начин, процесот на вкрстување претставува клучен чекор во еволутивната динамика на алгоритмот и има значајно влијание врз квалитетот и стабилноста на конечните резултати.

4.2.7. ПРОЦЕС НА МУТАЦИЈА

Генерацијата на потомци, покрај процесот на вкрстување, вклучува и примена на операторот на мутација, кој претставува суштински елемент во еволутивниот механизам на генетскиот алгоритам. Мутациите се применуваат врз одреден дел од родителските или од новосоздадените единки и имаат за цел да внесат контролирани случајни промени во генетската структура на хромозомите. На овој начин се овозможува појава на нови генетски варијанти кои не можат да се добијат исклучиво преку процесите на селекција и вкрстување, со што се зголемува способноста на алгоритмот да истражува поширок простор на можни решенија.

Изборот на соодветна стапка на мутација е од особена важност, бидејќи таа директно влијае врз стабилноста, конвергенцијата и квалитетот на добиените резултати. Општо земено, стапката на мутација треба да биде релативно ниска, со цел да се избегне прекумерно нарушување на добрите генетски структури кои се веќе идентификувани во популацијата. Преголема стапка на мутација може да доведе до однесување слично на случајно пребарување, при што се губи еволутивната насока на алгоритмот и се намалува веројатноста за стабилна конвергенција кон оптимално решение. Во такви случаи, иако се зголемува диверзитетот, квалитетот на резултатите може значително да се влоши.

Од друга страна, премногу ниска стапка на мутација не секогаш гарантира подобар перформанс на алгоритмот. Доколку мутацијата е недоволно застапена, популацијата може брзо да ја изгуби разновидноста и алгоритмот да се заглави во локално оптимално решение, особено кај сложени и нелинеарни оптимизациски проблеми. Затоа, постои потреба од внимателен избор и балансирање на стапката на мутација, така што ќе се обезбеди соодветна рамнотежа помеѓу зачувување на квалитетните решенија и истражување на нови потенцијално подобри региони од просторот на решенија.

Во рамките на ова истражување, стапката на мутација е одредена по спроведување на серија нумерички експерименти и анализи на чувствителност на параметрите. Притоа се тестирани повеќе вредности, вклучувајќи и пониски стапки на мутација, со цел да се утврди нивното влијание врз конвергенцијата и конечниот квалитет на решението. Врз основа на добиените резултати, како најсоодветна е избрана стапка на мутација со вредност 0,05. Оваа вредност овозможи најдобар компромис помеѓу диверзитетот на популацијата и ефикасната конвергенција, при што беше постигната највисока вкупна ефикасност и стабилност на алгоритмот во разгледуваните сценарија.

4.2.8. КРИТЕРИУМ ЗА ЗАПИРАЊЕ

Критериумот за запирање претставува завршна и суштинска компонента во функционирањето на предложениот генетски алгоритам, бидејќи тој го определува моментот во кој оптимизацискиот процес се смета за завршен и се прифаќа најдоброто пронајдено решение. Во рамките на ова истражување, алгоритмот е дефиниран да запира во два можни случаи, со што се обезбедува рамнотежа помеѓу пресметковната ефикасност и квалитетот на добиеното решение.

Првиот критериум за запирање се однесува на достигнување на однапред дефинираниот максимален број на итерации (генерации). Овој критериум овозможува контрола врз времето на извршување на алгоритмот и спречува негово бесконечно работење, особено во случаи кога подобрувањето на решението е минимално или незначително во подоцнежните фази од оптимизацијата. Максималниот број на итерации е избран така што овозможува доволно еволутивни чекори за конвергенција на популацијата, а истовремено се задржува прифатливо пресметковно оптоварување.

Вториот критериум за запирање е поврзан со конвергенцијата на решението. Поточно, алгоритмот се запира доколку во одреден број последователни итерации не се забележи значително подобрување на вредноста на оптимизациската функција. Овој услов укажува дека популацијата достигнала стабилна состојба и дека понатамошното извршување на алгоритмот нема да доведе до суштинско подобрување на резултатите. На овој начин се избегнува непотребно продолжување на пресметките и се зголемува вкупната ефикасност на алгоритмот.

Комбинирањето на овие два критериуми овозможува робустен и флексибилен механизам за запирање, кој е прилагоден на сложеноста на оптимизацискиот проблем и на динамиката на еволутивниот процес.

4.3. БЛОК-ДИЈАГРАМ НА АЛГОРИТАМОТ

Со цел јасно и систематски да се прикаже функционирањето на предложениот алгоритам, истиот е претставен со два блок-дијаграми, кои визуелно ја доловуваат работата на алгоритамот во целост, како и модификацијата на генетскиот алгоритам.

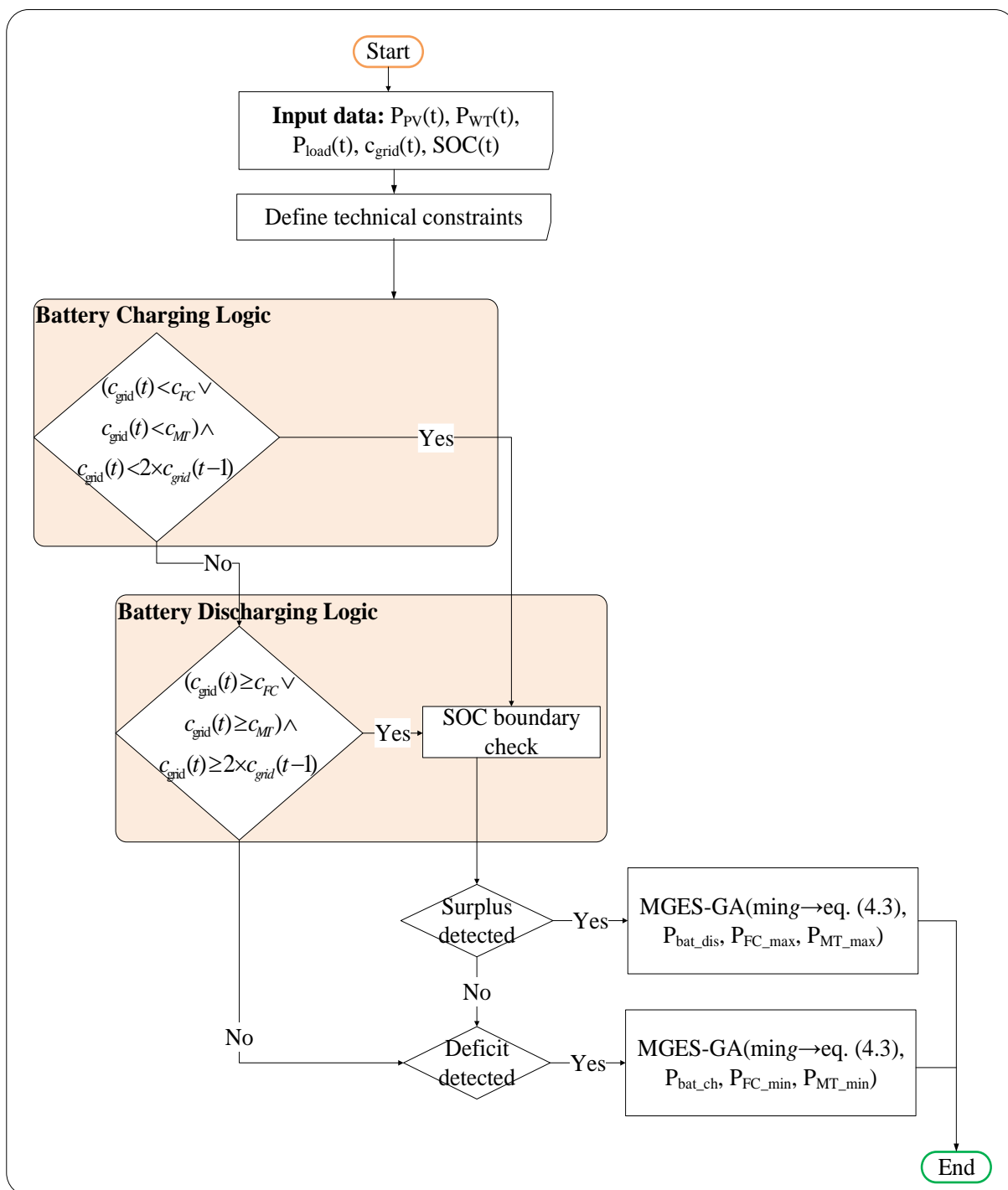
На Слика 4.1 е прикажан целокупниот тек на предложениот оптимизациски алгоритам и преглед на логичката структура и редоследот на извршување на поединечните чекори во алгоритамот.

На почетокот од анализата на работата на алгоритамот за оптимална распределба на моќностите во микромрежата, се врши рангирање на диспечибилните извори на енергија, како што се горивните ќелии, микротурбините и дизел генераторите, заедно со цените за купување и продажба на електрична енергија од мрежата. Ваквото сортирање претставува основа за донесување на економски оправдани одлуки во процесот на управување. Основната логика на тргување со мрежата се базира на искористување на ценовните разлики: при ниски тарифи се врши купување на електрична енергија со цел задоволување на потрошувачката и полнење на батерискиот систем до неговиот максимален капацитет, додека при високи тарифи се продава вишокот енергија.

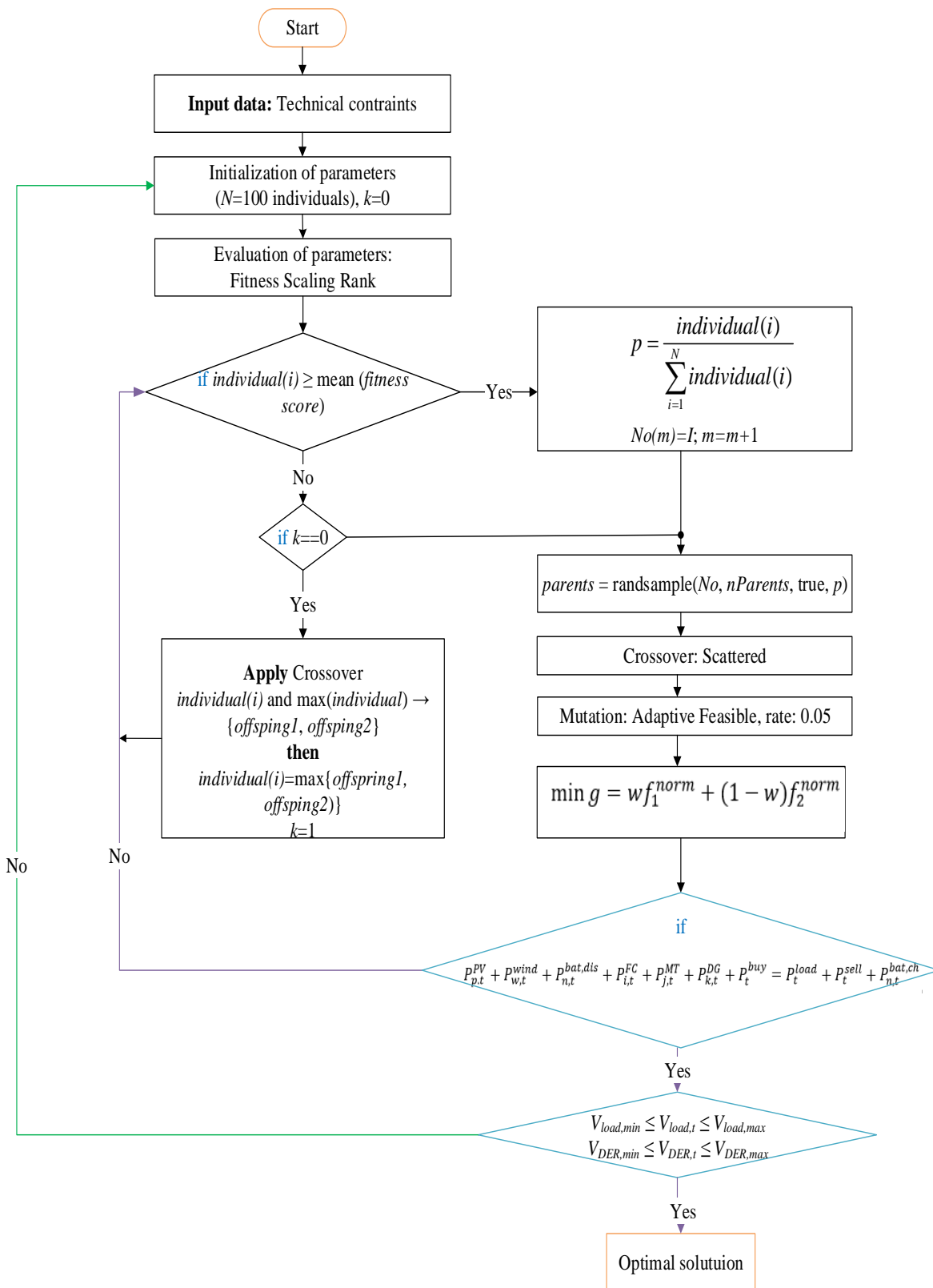
Доколку се појави вишок енергија во услови на ниска цена и истиот не може да се складира, таа се насочува кон продажба. Во случај на недостиг на енергија при висока цена, се врши ограничено купување исклучиво за покривање на потрошувачката, без дополнително полнење на батериите. При премин од висока кон однапред дефинирана ниска тарифа, системот паралелно обезбедува енергија за потрошувачите и врши полнење на батериите. Конечно, доколку цената на електричната енергија од мрежата е повисока од трошоците за ангажирање на локалните генератори, се избегнува купување од мрежата и се користат сопствени ресурси.

На Слика 4.2 е прикажана модификацијата на стандардниот генетски алгоритам, со посебен акцент на предложениот механизам за селекција. Преку овој дијаграм јасно се истакнуваат разликите помеѓу класичниот ГА и предложениот MGES-GA, особено двостепениот процес на селекција, во кој се комбинираат директната промоција на натпросечните единки и повторната евалуација на послабите единки преку интеракција со елитната индивидуа.

Во Прилог А е приложен псевдокодот за алгоритамот, каде е прикажана логичката поврзаност помеѓу сите оператори во предложениот алгоритам.



Слика 4.1 Блок-дијаграм на предложениот алгоритам



Слика 4.2 Блок-дијаграм на предложеното подобрување на генетскиот алгоритам

5. ВЕРИФИКАЦИЈА НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ КАЈ МИКРОМРЕЖИ ПОВРЗАНИ НА МРЕЖА

5.1. ВЕРИФИКАЦИЈА НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ СО ПОМОШ НА РАСТРИГИНОВА ФУНКЦИЈА

Растригиновата функција (Rastrigin's function) претставува една од најшироко користените стандардни тест-функции во областа на глобалната оптимизација и служи како референтна алатка за верификација и споредбена евалуација на перформансите на различни оптимизациски алгоритми [129]. Таа особено често се применува при тестирање на еволуциски алгоритми, генетски алгоритми, алгоритми за диференцијална еволуција, методи базирани на рој честички, како и други стохастички и метаевристички пристапи [130]. Причината за нејзината широка примена лежи во нејзината комплексна структура, која претставува сериозен предизвик дури и за напредни оптимизациски методи.

Математичката дефиниција на Растригиновата функција е [131]:

$$f(x) = A_n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)] \quad (5.1)$$

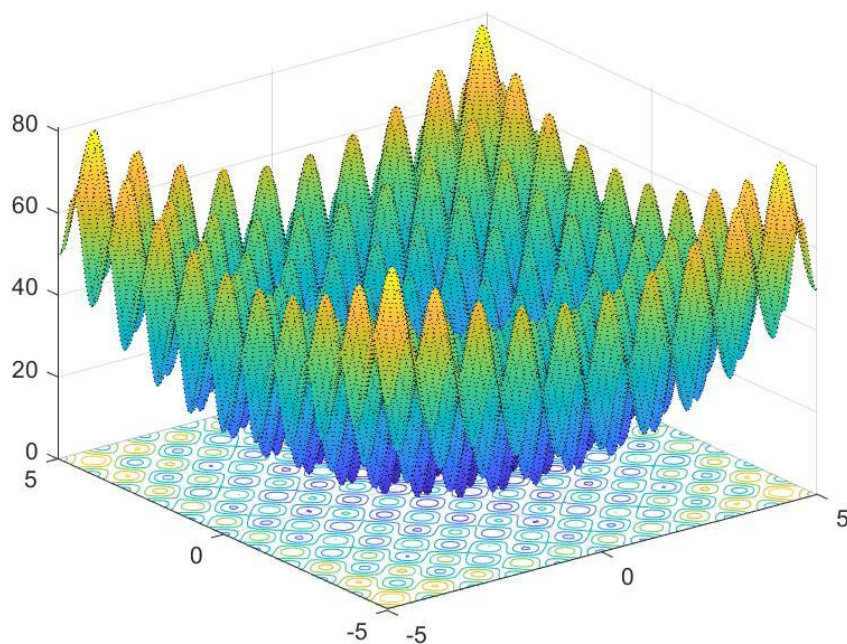
Каде што, $A = 10$ е константа, x претставува n -димензионален вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, а доменот на секоја променлива е дефиниран како $x_i \in [-5,12; 5,12]$. Оваа формулација овозможува функцијата лесно да се прошири на повеќедимензионални простори, што е особено корисно при тестирање на скалабилноста на оптимизациски алгоритми.

Растригиновата функција е континуирана, диференцијабилна и сепарабилна, но истовремено и изразито мултимодална. Таа има облик на параболична „чинија“ врз која се надоврзани голем број периодични осцилации, Слика 5.1 [130], предизвикани од косинусниот член во равенката. Овие осцилации резултираат со појава на голем број локални минимуми, рамномерно распоредени низ целиот домен, што ја прави функцијата исклучително тешка за оптимизација. Поради оваа карактеристика, Растригиновата функција се смета за класичен тест за способноста на алгоритмите да избегнуваат локални оптимуми и да конвергираат кон глобалното решение.

Глобалниот минимум на функцијата е единствен и се наоѓа во точката $x^* = (0, 0, \dots, 0)$, каде што вредноста на функцијата изнесува $f(x^*) = 0$ [132]. Во дводимензионален случај, функцијата може да се запише како што е прикажано со равенка:

$$f(x, y) = 20 + x^2 + y^2 - 10[\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y)] \quad (5.2)$$

при што, глобалниот минимум е во точка $f(0,0) = 0$.



Слика 5.1 Облик на Растрингова функција

Покрај тестирање на способноста за избегнување на локални минимуми, Растринговата функција се користи и за оценување на стабилноста, точноста и брзината на конвергенција на оптимизациските алгоритми. Алгоритам кој успешно и конзистентно се приближува до глобалниот минимум на оваа функција се смета за робустен и ефикасен.

При решавање на Растринговата функција со предложениот метод во ова истражување, добиена е оптимална точка $f(-2,8475 \cdot 10^{-5}, -1,8277 \cdot 10^{-6}) = 1,6152 \cdot 10^{-7}$. Овие вредности се исклучително блиски до теоретскиот глобален минимум, што јасно укажува на тоа дека предложениот алгоритам покажува одлична конвергенција кон глобалното решение. Истовремено, резултатите потврдуваат дека алгоритмот е способен ефикасно да ги надмине бројните локални минимуми и да обезбеди стабилно и прецизно решение, што ја потврдува неговата соодветност за решавање на сложени мултимодални оптимизациски проблеми.

5.2. ВЕРИФИКАЦИЈА НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ СО ПОМОШ НА ОКЛИ ФУНКЦИЈА

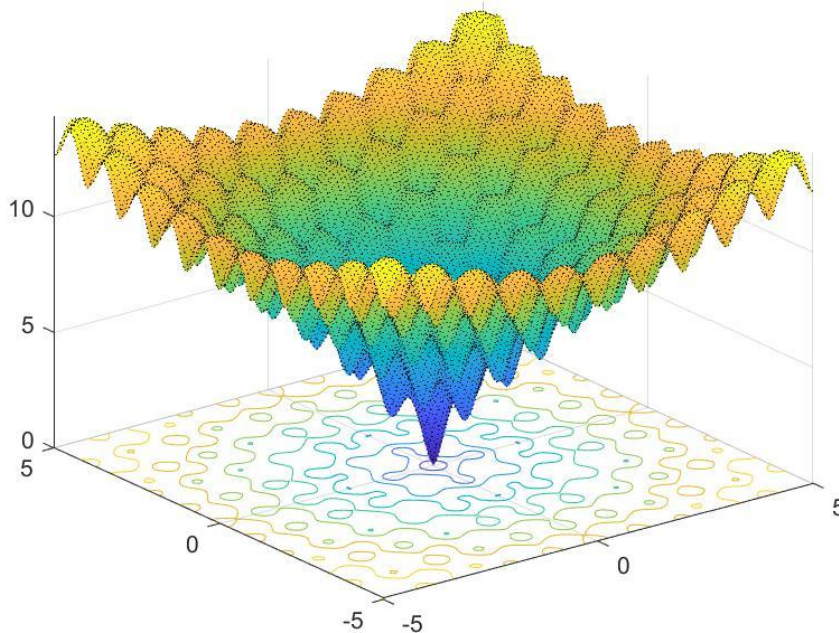
Слично на Растринговата функција, Окли функцијата (Ackley function) претставува една од најчесто користените стандардни тест-функции за евалуација и споредбена анализа на перформансите на оптимизациските алгоритми, вклучувајќи ги генетските алгоритми и другите еволуциски и стохастички методи. Таа е особено погодна за тестирање на способноста на алгоритмите за глобално истражување на просторот на решенија, како и за нивната ефикасност при избегнување на локални минимуми [133].

Математичката формулација на Окли функцијата е дадена со следниот израз [131]:

$$f(x) = -20 \exp\left(0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e \quad (5.3)$$

Каде што, \mathbf{x} претставува n -димензионален вектор $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, а доменот на секоја променлива е дефиниран како $x_i \in [-32,768; 32,768]$. Константата e ја означува Неперовата константа. Формулацијата овозможува функцијата да се примени во простори со различна димензионалност, што ја прави погодна за анализа на скалабилноста на оптимизациските алгоритми.

Окли функцијата е континуирана, диференцијабилна и изразито мултимодална. Таа се карактеризира со голем број на локални минимуми, кои се распоредени во вид на плитки бранови околу централниот регион. Глобалниот минимум е единствен и се наоѓа во точката $x^* = (0, 0, \dots, 0)$, каде што вредноста на функцијата изнесува $f(x^*) = 0$. Карактеристична особина на Окли функцијата е тоа што регионот околу глобалниот минимум е релативно рамен и мазен, што овозможува стабилна локална конвергенција. Сепак, надвор од овој централен регион се појавуваат бројни локални минимуми со мала длабочина, кои можат да го „измамат“ оптимизацискиот алгоритам и да доведат до прерано заглавување во подоптимално решение, како што е прикажано на Слика 5.2 [131].



Слика 5.2 Облик на Окли функцијата

Поради овие својства, Окли функцијата се смета за соодветен тест за проверка на рамнотежата помеѓу истражувањето на податочен сет на оптимизациските алгоритми и нивната локална експлоатација. Алгоритам кој успешно ја решава оваа функција мора да поседува доволно силен механизам за глобално пребарување, со цел да ги надмине бројните локални минимуми, но и способност за прецизна конвергенција во рамниот регион околу глобалниот минимум.

При тестирање на предложениот метод врз Окли функцијата, добиени се следните резултати за оптималната точка: $f(-8,313 \cdot 10^{-6}, 5,1588 \cdot 10^{-5}) = 1,478 \cdot 10^{-4}$. Добиената вредност е многу блиска до теоретскиот глобален минимум, што укажува на тоа дека предложениот алгоритам покажува висока точност и стабилна конвергенција. Овие резултати потврдуваат дека алгоритамот е способен ефикасно да ги надмине локалните минимуми и успешно да се насочи кон глобалното оптимално решение, што дополнително ја верифицира неговата робусност и применливост за решавање на сложени мултимодални оптимизациски проблеми.

6. СИМУЛАЦИЈА НА СЛУЧАИ НА АНАЛИЗА

Предложениот метод е валидиран и тестиран преку примена на повеќе репрезентативни случаи на анализа, кои се детално опишани во рамките на ова поглавје. Испитувањата се спроведени врз различни конфигурации на микромрежи поврзани на главната електроенергетска мрежа, со цел да се оцени робусноста, флексибилноста и применливоста на предложениот алгоритам во реалистични и сложени услови на работа. Посебен акцент е ставен на сценарија кои ја одразуваат современата структура на микромрежите, карактеризирана со висока пенетрација на ОИЕ и активна улога на корисниците.

Во анализираните случаи се разгледуваат сложени микромрежи кои вклучуваат повеќе различни типови на дисперзирани генератори, како што се фотоволтаичен систем, ветрогенератор, горивни ќелии и микротурбина, како и батериски систем за складирање енергија. Дополнително, во моделите се интегрирани различни категории на потрошувачи, вклучувајќи класични пасивни потрошувачи, активни произведувачи – потрошувачи (просумери) и станици за полнење на електрични возила. Вклучувањето на електричните возила овозможува анализа на нивното влијание врз профилите на оптоварување, флексибилноста на системот и оптимизацијата на енергетските текови во микромрежата.

Сите разгледани сценарија се имплементирани и тестирани на референтни тест-мрежи предложени според IEEE-стандардите, кои се широко прифатени и користени во научната литература за верификација и споредба на нови методи. Примената на вакви стандардизирани тест-системи овозможува објективна евалуација на добиените резултати и нивна споредливост со постоечките истражувања, како и јасно демонстрирање на ефикасноста и предностите на предложениот оптимизациски метод во различни сценарија.

6.1. ТЕСТ-СИСТЕМ 1: СИМУЛАЦИЈА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE – ЕВРОПСКА НИСКОНАПОНСКА МРЕЖА

Предложениот метод за оптимизација, MGES-GA, е валидиран преку примена на репрезентативен тест-случај кој опфаќа микромрежа поврзана на електроенергетската мрежа и опремена со различни типови на дисперзирани енергетски ресурси и потрошувачи. Конкретно, разгледуваната микромрежа вклучува фотоволтаичен систем, ветрогенератор, горивни ќелии и микротурбина како генераторски единици, како и резиденцијални потрошувачи, што претставува реалистичен и типичен пример за современа заедничка микромрежа со комбинирано производство од ОИЕ и диспечабилни извори на енергија.

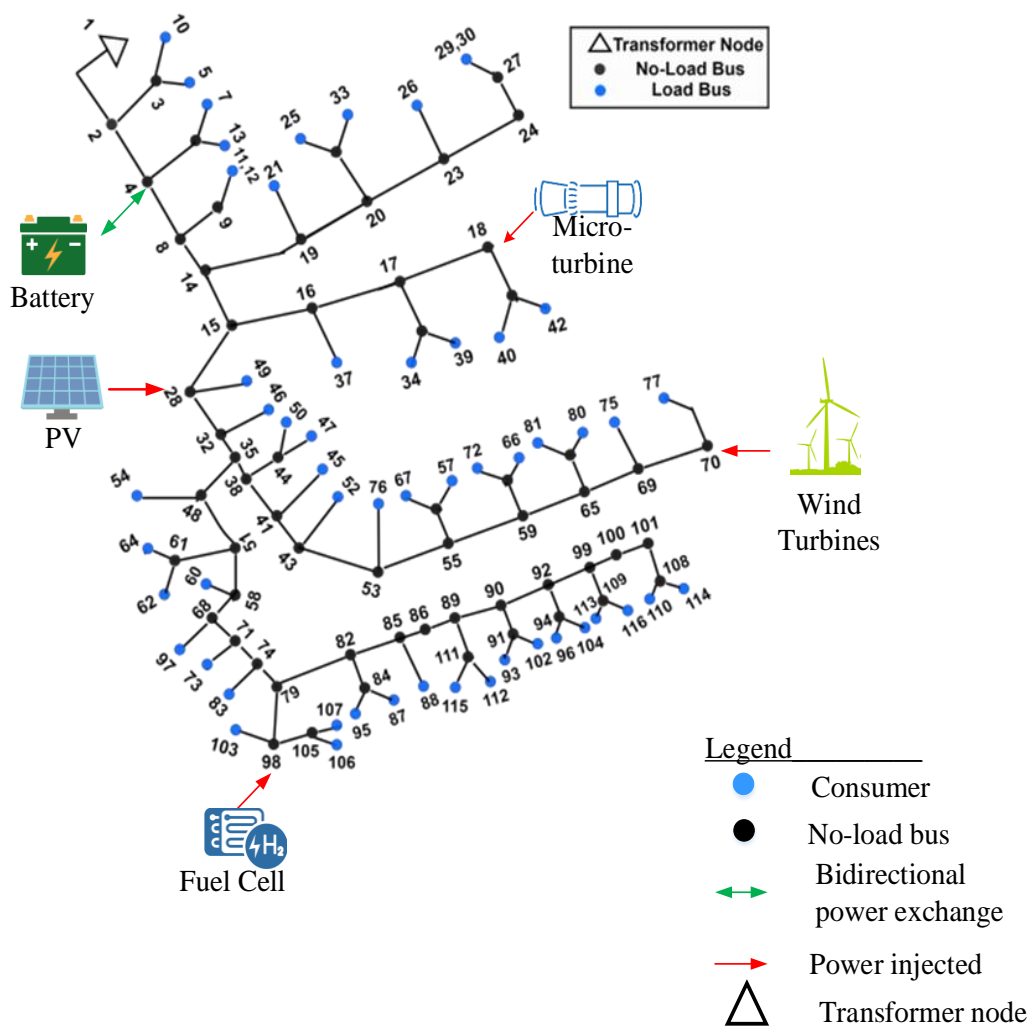
Покрај генераторските единици, микромрежата е поддржана и од батерија за складирање на електрична енергија, со инсталиран енергетски капацитет од 222 kWh, при што минималната граница на наполнетост изнесува 40 kWh, а максималната граница на наполнетост изнесува 200 kWh. Овие граници се воведени со цел да се обезбеди безбедно и реалистично работење на батеријата, како и да се земат предвид ограничувањата поврзани со нејзиниот животен век и техничките карактеристики. На почетокот на анализираниот временски период, батеријата се смета за целосно

испразнета, што претставува конзервативна почетна состојба и овозможува јасна анализа на улогата на батеријата во процесот на оптимизација.

Микромрежата е во интеракција со главната електроенергетска мрежа и учествува во размена на електрична енергија по однапред дефинирани цени. За целите на симулацијата, размената на активна моќност е ограничена на максимални 50 kW за продажба на електрична енергија кон мрежата и 100 kW за купување на електрична енергија од мрежата. Овие ограничувања се воведени со цел да се ограничи влијанието на микромрежата врз локалната дистрибутивна мрежа и да се симулираат реални технички услови на приклучување. Дополнително, во анализата е направена претпоставка дека цените за купување и продавање на електрична енергија се идентични, иако во реални пазарни услови тие најчесто се разликуваат. Оваа претпоставка овозможува појасна интерпретација на резултатите и фокусирање на перформансите на предложениот оптимизациски алгоритам.

Податоците за тест-системот се преземени од релевантен извор наведен во [64], додека топологијата на разгледуваната мрежа претставува изменета (модифицирана) верзија на IEEE – Европската нисконапонска тест-мрежа, базирана на конфигурацијата прикажана во [134]. Оригиналниот IEEE – European Low Voltage Test Feeder претставува трифазна несиметрична мрежа која содржи еднофазни потрошувачи. Меѓутоа, во рамки на оваа докторска дисертација е користен редуциран и балансиран еквивалентен модел на мрежата. Во овој пристап, еднофазните товари се агрегирани и претставени како еквивалентни трифазни товари, рамномерно распределени по фазите. Потребата од примена на ваков модел е тоа што фокусот на истражувањето е ставен на оптимално управување и распределба на моќностите на дистрибуираните извори во микромрежата, а не на детална фазна анализа. Топологијата на мрежата е прикажана на Слика 6.1, додека техничките податоци за овој тест-систем се приложени во Прилог В. Анализата е спроведена за временски хоризонт од 24 часа, што овозможува детална проценка на дневната динамика на производството, потрошувачката, складирањето и размената на електрична енергија во микромрежата.

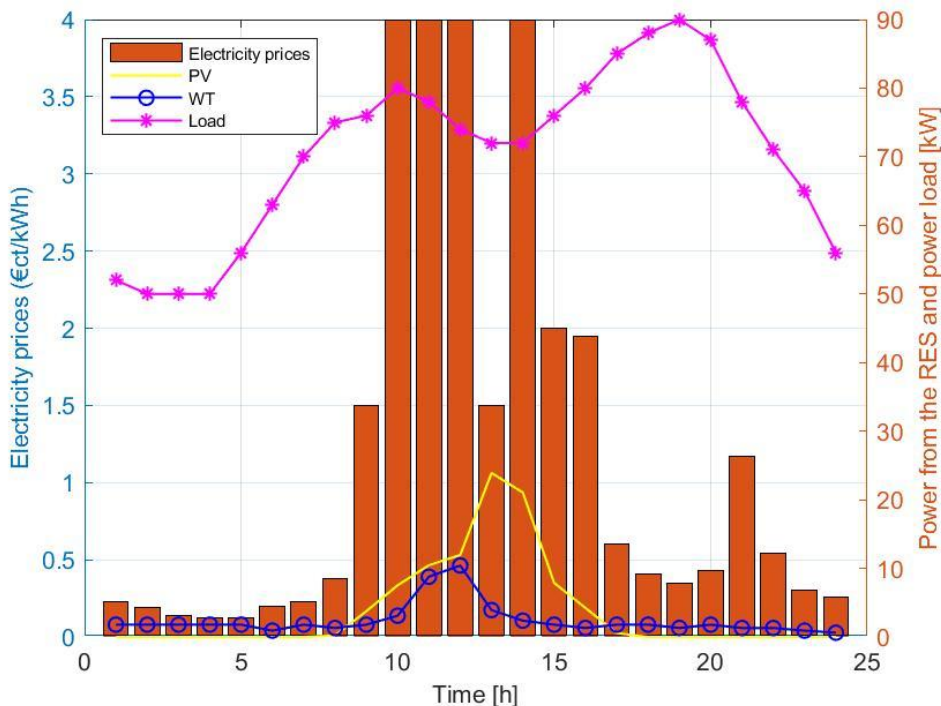
Системот за управување со енергијата има централна улога во координацијата и контролата на сите енергетски текови во микромрежата. Неговата задача е да обезбеди оптимално и сигурно функционирање на системот преку донесување одлуки во согласност со дефинираните технички и економски критериуми. Покрај почетните влезни информации, кои ги опфаќаат моменталната состојба и расположливоста на дисперзираните генератори, состојбата на наполнетост на БС и однапред дефинираните цени за електричната енергија, системот за управување со енергија континуирано добива и ажурирани информации за реалната состојба на системот. Овие информации вклучуваат податоци за тековната работа на микромрежата, моменталните енергетски текови, како и цени на електричната енергија во реално време.



Слика 6.1 Модифицирана IEEE-нисконапонска дистрибутивна мрежа со вклучени генератори на ОИЕ, горивна ќелија, микротурбина и батериски систем

Вклучувањето на податоци во реално време овозможува системот за управување динамички да ги прилагодува своите одлуки на променливите услови на работа, како што се ненадејни промени во потрошувачката, флукуации во производството од ОИЕ или промени во пазарните цени. На тој начин, системот за управување со енергија обезбедува дека микромрежата работи во рамки на дозволените технички ограничувања, истовремено минимизирајќи ги оперативните трошоци и одржувајќи го квалитетот на електричната енергија.

Влезните податоци кои се користат во системот за управување се прикажани на Слика 6.2. Дополнително, техничките ограничувања на системот, како и трошоците за работа и одржување на поединечните компоненти, се сумирани и презентирани во Табела 6-1. Оваа табела обезбедува транспарентен увид во параметрите што го дефинираат оперативниот опсег на микромрежата и претставува важна основа за правилна интерпретација на резултатите од симулациите и анализите. Притоа, се разгледуваат две сценарија и тоа според услови и податоци за оперативните трошоци и трошоците за одржување од [64] и според услови и агрегирани трошоци од [66].



Слика 6.2 Влезни параметри во системот: цени на електричната енергија, крива на оптоварување, моќност од фотоволтаичен и ветрогенератор [64] [66]

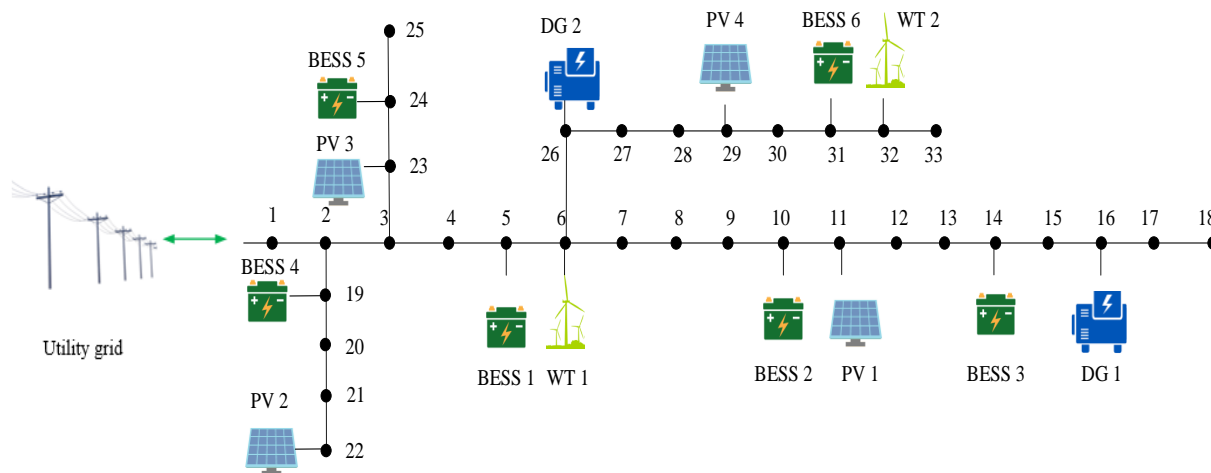
Табела 6-1 Технички ограничувања на инсталираната опрема и трошоци за тековно работење и одржување

Параметар	Минимум (kW)	Максимум (kW)	Оперативни трошоци (€/kWh) [64]	Трошоци за одржување (€/kWh) [64]	Трошоци (\$/kWh) [66]
ФВС	0	25	-	0,08	2,584
ВГ	0	15	-	0,11	1,073
БС	-30	30	-	0,02	0,38
ГК	3	30	0,2	0,04	0,294
МТ	6	30	0,4	0,12	0,457

6.2. ТЕСТ-СИСТЕМ 2: СИМУЛАЦИЈА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE 33-BUS МРЕЖА СО РАЗЛИЧНИ ТИПОВИ НА ДИСПЕРЗИРАНИ ГЕНЕРАТОРИ

Со цел да се изврши подетална и поригорозна евалуација на перформансите на предложениот метод за оптимизација во услови на зголемена комплексност, истиот е применет и тестиран на посложена мрежа, односно на модифицирана IEEE 33-bus систем. Овој тест-систем се карактеризира со значително поголем број јазли и повисока густина на дисперзирани генератори во споредба со IEEE – Европската нисконапонска мрежа, што овозможува пореалистична анализа на скалабилноста, робусноста и ефикасноста на предложениот алгоритам.

Топологијата на разгледуваната мрежа е заснована на модифицираната IEEE 33-bus мрежа презентирани во [68], која претставува симетричен дистрибутивен систем со радијална структура. Техничките параметри на IEEE 33-bus мрежата се приложени во Прилог С. Во оваа конфигурација, која е прикажана на Слика 6.3., се вклучени различни типови на дисперзирани генератори, горивна ќелија, микротурбина и батериски систем за складирање на електрична енергија, а техничките ограничувања на генераторските единици, како и капацитетот и оперативните граници на батерискиот систем, горивната ќелија и микротурбината се прикажани во Табела 6-2. Овие параметри се дефинирани со цел да се обезбеди техничка изводливост и реалистично моделирање на системот во услови на најлошо можно сценарио (worst-case scenario), кога системот треба подолг временски период да функционира независно од електроенергетската мрежа, односно во островски режим, со цел да се обезбеди зголемена доверливост на напојувањето. Анализата е спроведена за временски хоризонт од 24 часа, што овозможува да се опфатат дневните варијации на оптоварувањето, производството од обновливите извори на енергија и динамиката на работењето на батерискиот систем. Ваквиот пристап не мора да ја одразува типичната секојдневна експлоатација на системот, туку претставува конзервативна проценка насочена кон евалуација на неговата робуност.



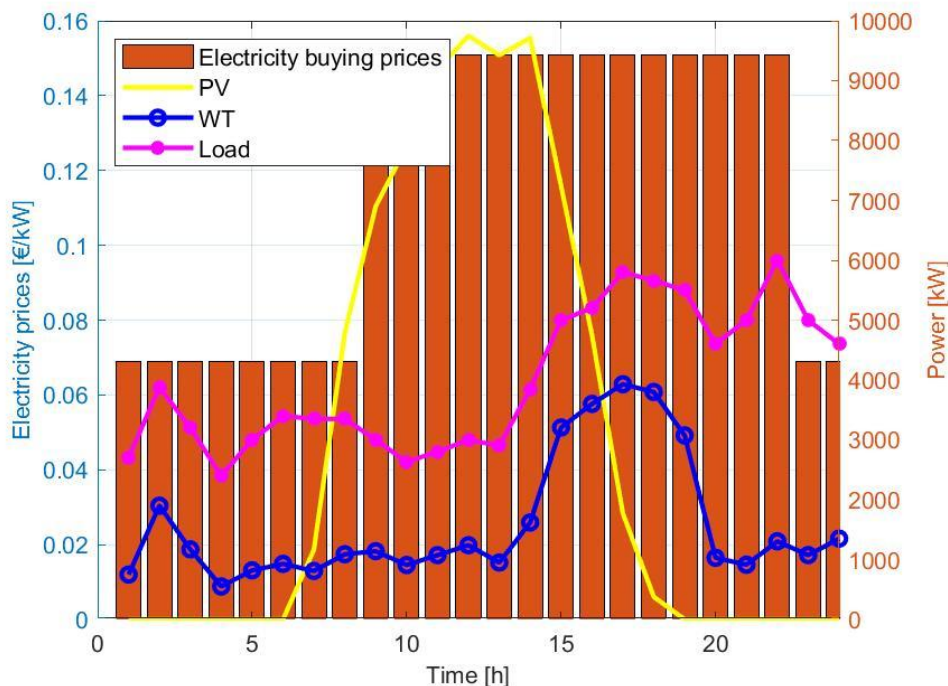
Слика 6.3 Модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа

Табела 6-2 Точки на приклучување на инсталираните генератори, нивната инсталирана активна моќност и инсталиран капацитет на батеријата на модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа

Тип на генератор	Вкупен број на агрегати	Јазол на поврзување	Ограничувања на активната моќност (kW)	Капацитет (kWh)
Батерија	6	(5,10,14,19,24,31)	[-500,500]	15000
ФВС	4	(11,22,23,29)	[0,2609.07]	/
ВГ	2	(6,32)	[0,235.61]	/
ДГ	2	(16, 26)	[0,500]	/

Влезните податоци кои се користат за анализата, вклучувајќи ја генерираната моќност од ФВС и ВГ, профилот на оптоварување, како и цените на електричната енергија, се преземени од релевантниот извор наведен во [68]. Графичката презентација на наведените временски серии е прикажана на Слика 6.4, при што јасно се илустрира

дневната динамика на производството од ОИЕ, варијациите во потрошувачката и нивната меѓусебна зависност.



Слика 6.4 Влезни податоци за генерираната моќност од ФВС и ВГ, кривата на оптоварување и промената на цената на електричната енергија

Цените на електричната енергија се дефинирани како временски променливи и се менуваат во текот на денот согласно однапред утврдена ценовна шема. Овој пристап овозможува симулација на реални пазарни услови, во кои цените варираат во зависност од периодите на ниска и висока побарувачка, како и од расположливоста на производните капацитети. Деталната распределба на цените по часови е прикажана во Табела 6-3 што овозможува транспарентен увид во применетите ценовни нивоа и нивното влијание врз процесот на оптимална распределба на моќностите во системот. На овој начин, предложениот модел ја зема предвид интеракцијата помеѓу техничките параметри на системот и пазарните механизми, што е од суштинско значење за реалистична евалуација на перформансите на оптимизацискиот алгоритам.

Табела 6-3 Шема на куповна и продажна цена на електричната енергија

Период	Куповна цена за електрична енергија	Продажна цена за електрична енергија
09:00 до 22:00 часот	0,151 €/kWh	0,446 €/kWh
22:00 до 09:00 часот	0,069 €/kWh	

Во анализираниот модел е претпоставено дека продажната цена на електричната енергија е повисока од куповната. Ваквиот пристап, иако не е во согласност со типичните пазарни услови каде куповната цена најчесто е повисока од продажната, често се користи во научната литература со цел да се анализираат сценарија со стимулирано производство и извоз на електрична енергија од микромрежата. Основната цел на оваа претпоставка е да се стимулира оптимално управување со енергетските ресурси, вклучувајќи го и

користењето на електрична енергија во периоди со пониска побарувачка (ноќни часови), како и да се поттикне продажбата на вишокот енергија кон мрежата. Со цел да се избегнат нереални сценарија на арбитража (купување по ниска цена и непосредна продажба по повисока цена), во моделот се воведени соодветни ограничувања. Конкретно, ограничен е начинот на купување и продавање на електричната енергија, со што се спречува полнење на батерискиот систем при ниска тарифа и негово последователно празнење со цел остварување профит исклучиво врз основа на ценовни разлики. Дополнително, не е дозволено истовремено полнење и празнење на батерискиот систем, со што се обезбедува физичка реалистичност на моделот. На овој начин, и покрај поедноставената ценовна структура, моделот задржува реалистично однесување и овозможува релевантна анализа на стратегиите за управување со микромрежата.

Во почетниот момент сите батерии во системот се полни со половина од нивниот капацитет, а трошоците за нивно ангажирање изнесуваат 0,009 €/kWh, а ефикасноста на батеријата е 95 %. Во овој тест-систем трошоците за ангажирање на дизел генераторите се моделирани со квадратна равенка, како што е прикажано со следниот израз:

$$C_{DG}(t) = [a_{DG}(P^{DG}(t))^2 + b_{DG}P^{DG}(t) + c_{DG}], \forall t \in [1, T] \quad (6.1)$$

Каде што, $a_{DG} = 0,0005 \text{ €/kW}^2\text{h}$, $b_{DG} = 0,1 \text{ €/kWh}$, $c_{DG} = 0$, а $P^{DG}(t)$ е моќноста од дизел генераторите во t -тиот час.

6.3. ТЕСТ-СИСТЕМ 3: СИМУЛАЦИЈА НА МОДИФИЦИРАНА IEEE 33-BUS МРЕЖА СО СТАНИЦИ ЗА ПОЛНЕЊЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА

Современите микромрежи се развиваат паралелно со напредокот на енергетските технологии и на дигиталните системи за управување, поради што тие се сè повеќе подготвени да интегрираат нови типови на потрошувачи и флексибилни ресурси, меѓу кои значајно место заемаат и електричните возила. Вклучувањето на електричните возила во микромрежите претставува еден од клучните чекори кон одржлив и декарбонизиран енергетски систем, но истовремено воведува и дополнителна комплексност во процесот на управување и оптимизација, поради нивната временски променлива побарувачка и можноста за концентрирани оптоварувања.

Во рамките на оваа докторска дисертација, предложениот оптимизациски алгоритам е дополнително тестиран на сложена микромрежа која се базира на модифицирана IEEE 33-bus дистрибутивна мрежа и која интегрира повеќе типови на енергетски ресурси и потрошувачи. Конкретно, разгледуваната микромрежа вклучува фотоволтаичен генератор, ветрогенератор, дизел генератор, батериски систем за складирање на вишокот електрична енергија, како и станици за напојување на електрични возила. Ваквата конфигурација овозможува реалистична анализа на интеракцијата помеѓу ОИЕ, диспечабилните генератори, складирањето на енергија и новите типови на потрошувачи, кои сè почесто се присутни во современите дистрибутивни мрежи.

Податоците за модифицираната IEEE 33-bus мрежа се преземени од истражувањето прикажано во [135], што овозможува конзистентност со постоечката литература и споредливост на добиените резултати. Оптоварувањето кое произлегува од полнењето на електричните возила е моделирано како процент од вкупното оптоварување во

микромрежата, со што се овозможува флексибилно прилагодување на интензитетот на побарувачката на ЕВ во зависност од сценариото на анализа.

Во истражувањето спроведено во [135] се разгледуваат три различни типови на станици за полнење на електрични возила: резиденцијални, комерцијални и индустриски. Секој од овие типови се карактеризира со различна временска распределба на оптоварувањето, која е директно поврзана со навиките и со режимот на користење на возилата. Комерцијалните станици за полнење се најоптоварени во утринските часови, околу 8 часот, кога најголем дел од корисниците пристигнуваат на своите работни места. Резиденцијалните станици, пак, покажуваат зголемена побарувачка во попладневните и во вечерните часови, почнувајќи од околу 16 часот, кога корисниците се враќаат дома од работа. Индустриските станици за полнење се карактеризираат со повеќе периоди на зголемено оптоварување во текот на денот, што е резултат на работата во смени, при што полнењето се одвива во три карактеристични термини: во 6 часот, 14 часот и 22 часот.

Ограничувањата на батериите на ЕВ се по однос на брзината на полнење и празнење, степенот на наполнетост на батеријата, како и максималната дозволена моќност на полнење и празнење. Ограничувањата се дефинирани со следните равенки:

$$P^{EV_bat,min} \leq P_t^{EV_bat} \leq P^{EV_bat,max}, \forall t \in [0, T] \quad (6.2)$$

$$0 \leq SOC_t^{EV} \leq 1, \forall t \in [0, T] \quad (6.3)$$

$$0 \leq P_t^{EV_bat,ch} \leq P^{EV_bat,ch,max}, \forall t \in [0, T] \quad (6.4)$$

$$0 \leq P_t^{EV_bat,dis} \leq P^{EV_bat,dis,max}, \forall t \in [0, T] \quad (6.5)$$

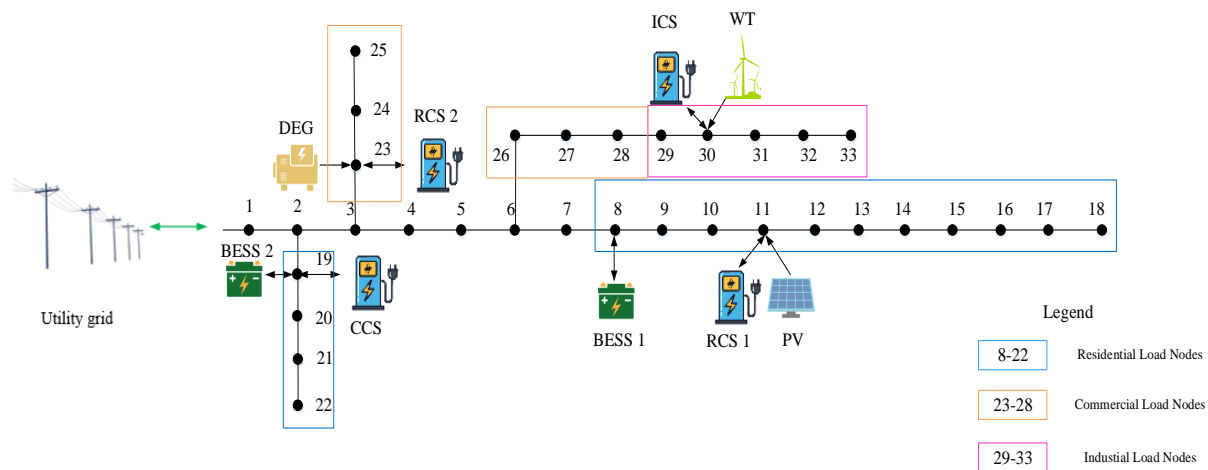
Каде што, $P_t^{EV_bat}$ претставува моќноста на полнење/празнење на батеријата на ЕВ, $P^{EV_bat,min}$ и $P^{EV_bat,max}$ претставуваат минималната, односно максималната моќност на полнење/празнење на батеријата на ЕВ, кои се дефинирани и дополнително во равенките (6.4) и (6.5), при што $P^{EV_bat,ch,max}$ е максимална моќност на полнење, а $P^{EV_bat,dis,max}$ е максимална моќност на празнење, SOC_t^{EV} е состојбата на наполнетост на батеријата на ЕВ во t -тиот час.

Станиците за полнење на електричните возила во моделот се третираат како потрошувачи, при што тие ги напојуваат електричните возила сè додека нивните батерии не достигнат целосна наполнетост, што е формално претставено со изразот:

$$SOC_t^{EV}(t+1) = \begin{cases} SOC_t^{EV}(t) + P_t^{EV,bat} \eta^{ch,EV} \Delta t, & P^{EV,bat} < 0 \\ SOC_t^{EV}(t) - \frac{P_t^{EV,bat}}{\eta^{dis,EV}} \Delta t, & P^{EV,bat} > 0 \\ SOC_t^{EV}(t) & P^{EV,bat} = 0 \end{cases} \quad (6.6)$$

Каде што, $SOC_t^{EV}(t)$ претставува состојба на наполнетост на батеријата на ЕВ во t -тиот час, $P_t^{EV,bat}$ е моќност на полнење/празнење на батеријата на ЕВ, при што $P_t^{EV,bat} < 0$ означува полнење, а $P_t^{EV,bat} > 0$ означува празнење на батеријата, $\eta^{ch,EV}/\eta^{dis,EV}$ претставува ефикасност на полнење/празнење на батеријата на ЕВ, соодветно.

На Слика 6.5 е прикажана модифицираната IEEE 33-bus шема која ги опфаќа трите типови на оптоварување: резиденцијално, комерцијално и индустриско, како и станиците за полнење на електрични возила.



Слика 6.5 Модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа која вклучува и станици за полнење на ЕВ [135]

Во рамките на оваа шема, оптоварувањето е распределено на следниот начин:

- Јазли 1-7 се оптоварени со константно оптоварување,
- Јазли 8-22 се резиденцијално оптоварување,
- Јазли 23-28 се комерцијално оптоварување,
- Јазли 29-33 се индустриско оптоварување.

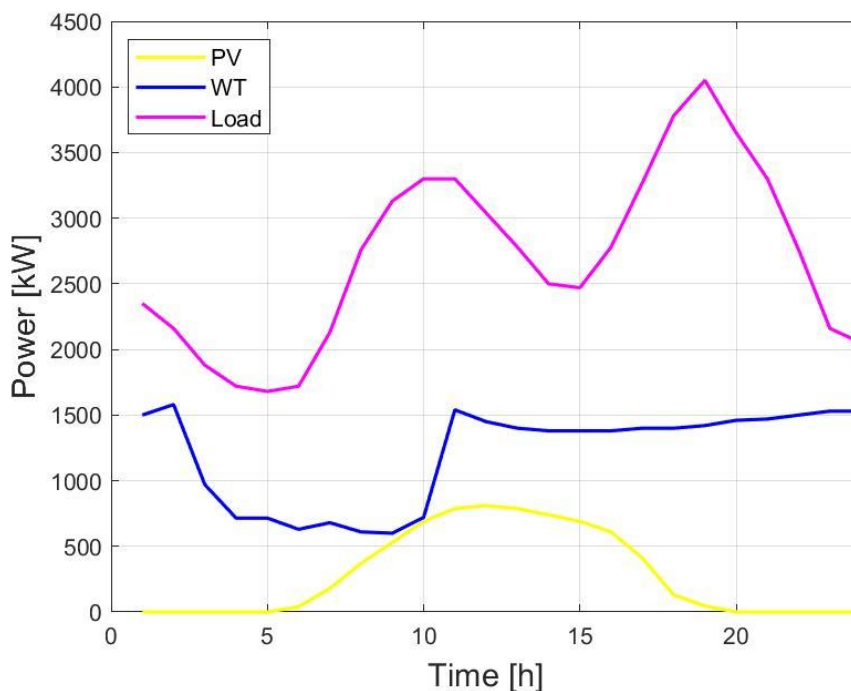
Ограничувањата на активната моќност на генераторските единици, како и капацитетот и оперативните граници на батериите за складирање на електрична енергија, се прикажани во Табела 6-4. Како и кај Тест-систем 2, и во овој случај овие параметри се дефинирани со цел да се обезбеди техничка изводливост и моделирање на системот во услови на најлошо можно сценарио кога системот треба подолг временски период да функционира независно од електроенергетската мрежа, односно во островски режим, со цел да се обезбеди зголемена доверливост на напојувањето. Анализата е спроведена за временски хоризонт од 24 часа, што овозможува да се опфатат дневните варијации на оптоварувањето, производството од обновливите извори на енергија и динамиката на работењето на батерискиот систем, но ваквиот пристап не мора да ја одразува типичната секојдневна експлоатација на системот.

Табела 6-4 Јазли на поврзување на инсталираните генератори и станици за полнење на ЕВ, како и нивната инсталирана активна моќност и инсталиран капацитет на батеријата

Тип на генератор	Вкупен број на агрегати	Јазол на поврзување	Ограничувања на активната моќност (kW)	Капацитет (kWh)
Батерија	2	(8,19)	[-1000,1000]	35000
ФВС	1	(11)	[0,5000]	/
ВГ	1	(30)	[0,150]	/
ДГ	1	(23)	[0,1800]	/
Станици за полнење на ЕВ	4	(11, 19, 23, 30)	[-3,3]	24

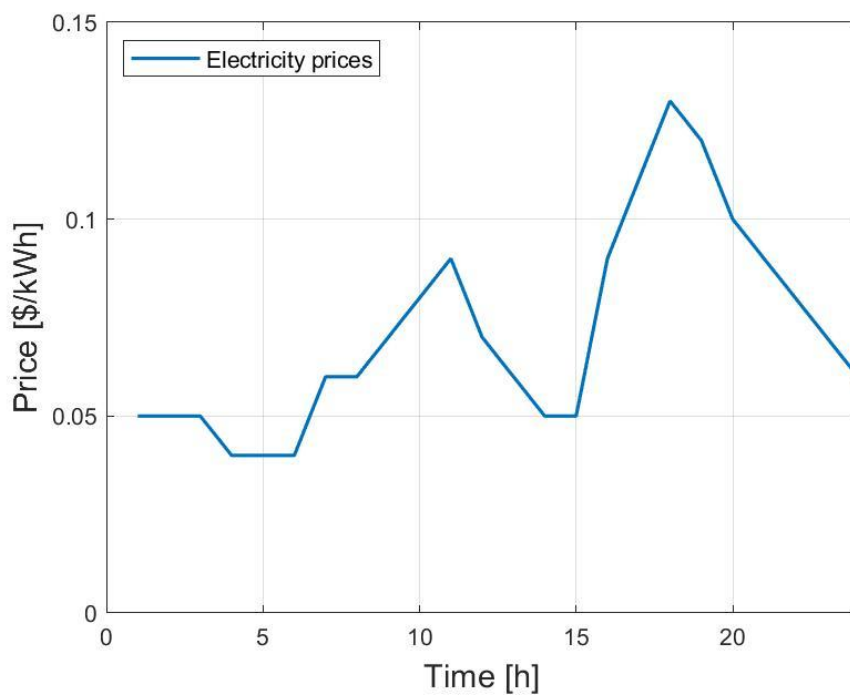
Промените во оптоварувањето, како и варијациите на генерираната активна моќност од фотоволтаичниот генератор и ветрогенераторот во текот на разгледуваниот 24-часовен период, се илустрирани на Слика 6.6. Иако во моделот се разгледуваат повеќе типови потрошувачи (резиденцијални, комерцијални, индустриски и електрични возила), во оптимизацискиот алгоритам како влезен податок се користи агрегираната крива на вкупното оптоварување, бидејќи истиот е насочен кон управување со енергетските текови на ниво на целата мрежа.

Овие профили ја отсликуваат типичната дневна динамика на ОИЕ и потрошувачката, при што се забележуваат карактеристични периоди на зголемено и намалено производство и побарувачка. Вклучувањето на вакви временски променливи профили овозможува реалистичната евалуација на способноста на предложениот оптимизациски алгоритам да се прилагоди на флукуациите во системот.



Слика 6.6 Крива на агрегирано оптоварување од сите потрошувачи и активна моќност генерирана од ФВС-систем и ВГ [135]

Дополнително, варијациите на цената на електричната енергија во текот на испитуваниот период се прикажани на Слика 6.7. За потребите на симулацијата, цената на гасот е фиксирана и земена во вредност од 50 \$/MWh.



Слика 6.7 Варијација на цените во анализираниот период [135]

7. АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

Во ова поглавје детално се презентирани и анализирани резултатите добиени од извршените симулации на тест-системите опишани во поглавје §6. *Симулација на случај на анализа*. Анализата опфаќа различни оперативни сценарија со цел да се оцени перформансот на предложениот модел и неговата применливост во различни услови на работа на микромрежата.

Извршена е компаративна анализа со стандарден генетски алгоритам, кој се базира на конвенционални и во литературата широко прифатени методи на селекција, како што се Roulette Wheel, Remainder selection, Tournament selection, SUS и Uniform selection. Овие методи претставуваат референтна основа за евалуација на перформансите на предложениот алгоритам, бидејќи нивната ефикасност и стабилност се веќе потврдени во бројни истражувања.

Покрај споредбата со стандардниот генетски алгоритам, направена е и анализа во однос на современи оптимизациски методи кои се користат за решавање на комплексни, нелинеарни и повеќекритериумски проблеми во ЕЕС. На тој начин се овозможува сеопфатна проценка на конвергенцијата, квалитетот на добиените решенија, стабилноста на алгоритмот и неговата способност за избегнување на локални минимуми. Симулациите се реализирани во Matlab, со имплементација на развиениот оптимизациски алгоритам и со вклучување на сите релевантни технички и оперативни ограничувања на системот. Притоа се земени предвид равенката за биланс на моќности, ограничувањата на генераторите и системите за складирање, како и условите поврзани со напонските варијации и оперативните трошоци.

Добиените резултати се прикажани во форма на табели и графички прикази, што овозможува јасна споредба на различните сценарија и полесна интерпретација на влијанието на поединечните параметри врз работењето на системот. Табеларните прикази содржат квантитативни показатели како што се оперативни трошоци, размена на енергија со главната мрежа и напонски девијации, додека графичките прикази ја илустрираат временската динамика и трендовите во однесувањето на системот.

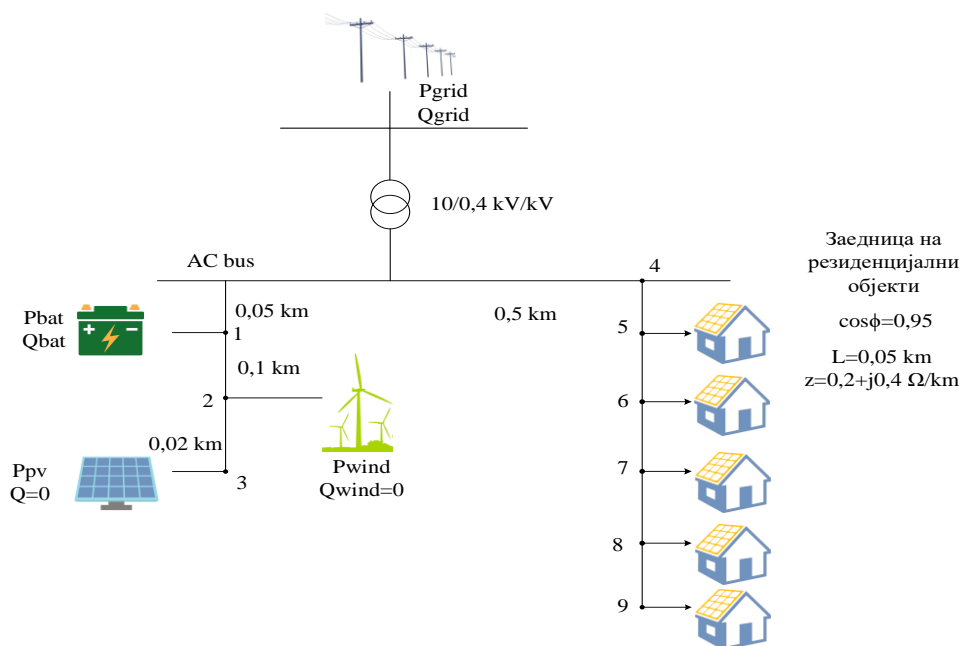
7.1. СПОРЕДБА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО СТАНДАРДЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

Предложениот оптимизациски алгоритам во првата фаза е подложен на компаративна анализа со повеќе конвенционални стратегии за селекција кои вообичаено се применуваат во генетските алгоритми. Целта на оваа почетна анализа е систематски да се оцени влијанието на предложениот селекциски механизам врз квалитетот на добиените решенија, брзината на конвергенција и стабилноста на оптимизацискиот процес. Со ваквиот пристап се овозможува јасно издвојување на придобивките и подобрувањата што ги носи предложениот метод во споредба со стандардните пристапи.

Алгоритмот најпрво е тестиран на илутративен модел на микромрежа (анг. toy microgrid), кој служи како појдовен тест за валидација на основните карактеристики и перформанси на методот. Изборот на ваков модел е направен со цел да се минимизира комплексноста на системот и истовремено да се овозможи јасна интерпретација на резултатите, без влијание на дополнителни фактори кои се јавуваат кај поголеми и

пореалистични мрежи. На овој начин, фокусот е ставен исклучиво на ефикасноста на селекцискиот механизам и неговата способност да ја подобри оптимизацијата.

Моделот на микромрежата се состои од ОИЕ, и тоа ФВС и ВГ, кои обезбедуваат електрична енергија за снабдување на резиденцијални потрошувачи, кои истовремено произведуваат електрична енергија од ФВС поставени на крововите на објектите. За зголемување на флексибилноста и сигурноста во работата на микромрежата, во системот е вклучена и батерија за складирање на електрична енергија, која овозможува акумулација на вишокот произведена енергија и нејзино користење во периоди на зголемена побарувачка или намалено производство. Структурата и меѓусебната поврзаност на компонентите се прикажани на Слика 7.1.



Слика 7.1 Илустративен модел на микромрежа поврзана на мрежа

Производството на електрична енергија од ФВС поставени на крововите на објектите се користи за задоволување на потрошувачката на домаќинствата. Доколку се јави вишок на електрична енергија, тогаш таа се предава на соседите. Во овој тест-систем меѓусебната размена на електрична енергија помеѓу домаќинствата не е предмет на анализа за добивка и трошоци.

Во Табела 7-1 се прикажани релевантните технички параметри на микромрежата, вклучувајќи ги номиналните капацитети, ограничувањата и карактеристиките на поединечните компоненти. Воведувањето на построги ограничувања ја става мрежата во услови на зголемен стрес, што овозможува појасна анализа на перформансите на алгоритмот и поочигледно разграничување помеѓу селекциските методи. Дополнително, во Табела 7-2 се дадени тарифните модели за електрична енергија, како и оперативните трошоци поврзани со производството од секој инсталиран генератор. Во анализата е земена предвид и цената за пречекорување на дозволената потрошувачка на реактивна моќност повлечена од електроенергетската мрежа, за одржување на напонското ниво во дефинираните граници, што овозможува пореална и покомплетна економска евалуација на работата на микромрежата.

Табела 7-1 Технички ограничувања на инсталираната опрема во илустративниот модел на микромрежа

Параметар	Значење	Вредност
P_{pv}	Инсталирана моќност на ФВС	25 [kW]
P_{wind}	Инсталирана моќност на ВГ	10 [kW]
P_{pv_load}	Инсталирана моќност на ФВС поставени на крововите на објектите	6 [kW]
P_{bat_ch}	Максимална моќност на полнење батерија	30 [kW]
P_{bat_dis}	Максимална моќност на празнење батерија	
P_{buy_max}	Максимална моќност преземена од мрежа	50 [kW]
P_{sell_max}	Максимална моќност предадена на мрежа	50 [kW]
C_{bat}	Инсталиран капацитет на батеријата	200 [kWh]
SoC_{bat_min}	Минимална состојба на наполнетост	20 %
SoC_{bat_max}	Максимална состојба на наполнетост	100 %
$\eta_{ch} \cdot \eta_{dis}$	Ефикасност на полнење/ празнење на батеријата	95 %

Табела 7-2 Цени за купена и продадена електрична енергија во рамки на илустративниот модел на микромрежа

Единица	Номенклатура	Цена
Моќност продадена на мрежа	p_{grid}	Слика 6.2
Моќност преземна од мрежа		
○ I тарифен систем	p_c	2,8 [€ct/kWh]
○ II тарифен систем	p_p	6,9 [€ct/kWh]
Трошоци за полнење/празнење на батеријата	p_{bat}	3 [€ct/kWh]
Преземена реактивна моќност од мрежа	p_Q	0,17 [€ct/kVAr]

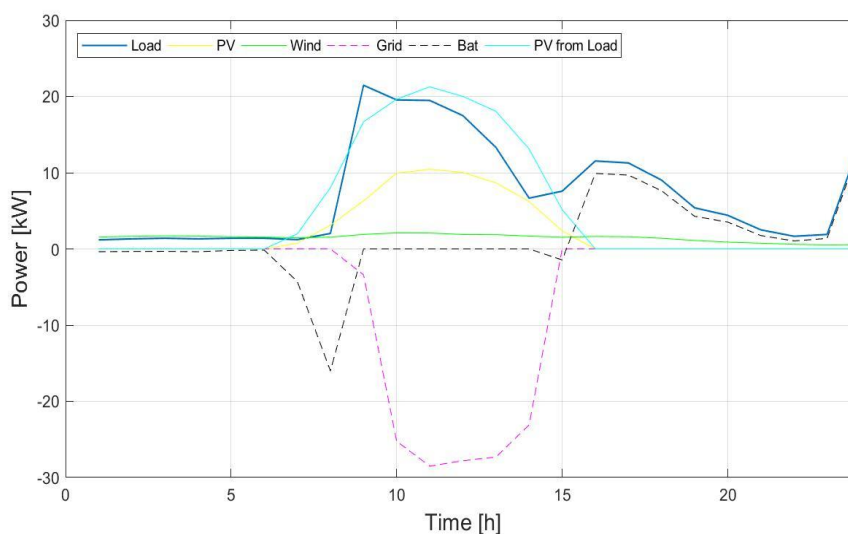
Компаративните резултати од извршените симулации на илустративниот модел на микромрежа со примена на стандарден генетски алгоритам со различни методи на селекција и со примена на MGES-GA се прикажани во Табела 7-3. Резултатите укажуваат дека сите анализирани стратегии на селекција конвергираат кон речиси идентични оперативни решенија, што се одразува преку сличните обрасци на размена на моќност со мрежата и блиските вредности на стандардната девијација. Сепак, се забележува мала разлика во економската добивка, што е резултат не само на размената на моќност со мрежата туку и ангажирањето на батеријата. За да утврди дали разликите помеѓу MGES-GA и останатите методи на селекција се случајни, методот беше тестиран со Wilcoxon

signed-rank тестот. Тој претставува непараметарски статистички тест кој се користи за споредба на две поврзани групи на податоци и за утврдување дали постои статистички значајна разлика во нивната медијанска вредност, без претпоставка за нормална распределба. Примената на Wilcoxon signed-rank тестот врз парни извршувања открива статистички значајни разлики помеѓу предложениот MGES-GA и конвенционалните селекциски механизми во услови на стрес-тестирање. Иако апсолутното подобрување на вкупната добивка е маргинално, конзистентната насочена предност укажува дека предложениот селекциски механизам нуди поголема ефикасност во изнаоѓањето на оптималното решение, а не врз локацијата на глобалниот оптимум.

Табела 7-3 Споредба на добиените резултати со примена на различни методи на селекција кај стандарден генетски алгоритам

Метод	Remainder selection	Roulette Wheel	Tournament selection	Uniform selection	SUS	MGES-GA
Добивка (€ct)	953,9741	953,9767	953,9803	953,9808	953,9825	953,9963
P_{buy} (kW)	0	0	0	0	0	0
P_{sell} (kW)	135,322	135,321	135,321	135,320	135,322	135,324
Wilcoxon signed-rank	0,0098	0,0117	0,0703	0,1250	0,0703	/
Стандардна девијација	60,7839	60,7835	60,7835	60,7842	60,7836	60,7840

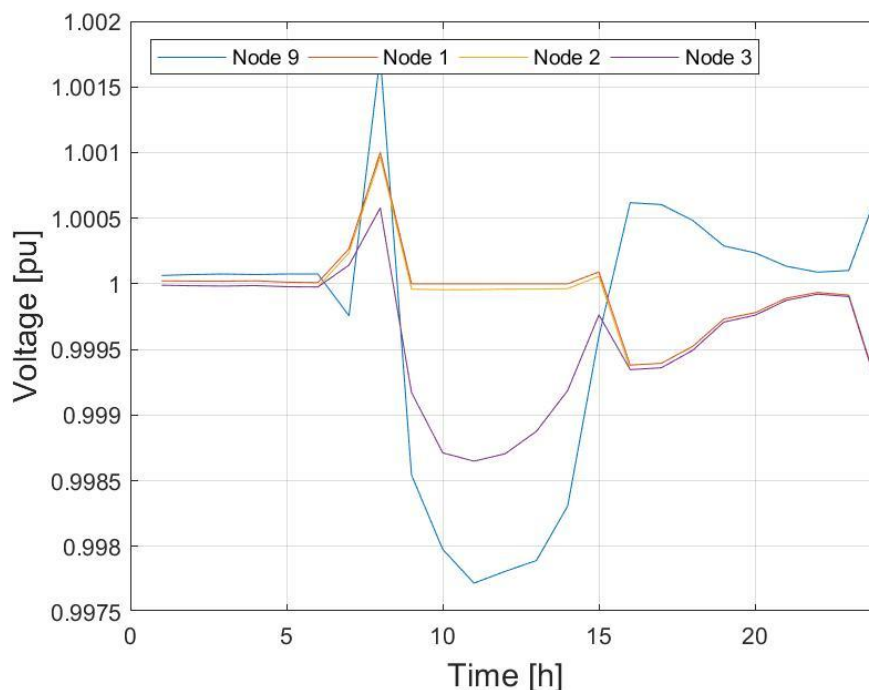
Резултатите се графички прикажани на Слика 7.2 и Слика 7.3. Оптималното ангажирање на батерискиот систем и оптималното тргување со електродистрибутивната мрежа се прикажани на Слика 7.2.



Слика 7.2 Оптимално ангажирање на батеријата и оптимално тргување со мрежата

Од графичкиот приказ јасно може да се забележи дека предложениот алгоритам успешно ја следи временската промена на цената на електричната енергија и соодветно го прилагодува начинот на размена на енергија со локалната мрежа. Во периоди кога цената на електричната енергија е ниска, алгоритмот интензивно користи енергија од мрежата, при што истовремено се врши и полнење на батерискиот систем. Ова укажува на економски рационално однесување на алгоритмот, кој ја користи можноста за складирање на поевтина електрична енергија за подоцнежна употреба. Во спротивност, за време на часовите со повисоки цени на електричната енергија, се забележува намалена зависност од мрежата, при што батеријата се активира како примарен извор за покривање на дел од потрошувачката или за продажба на електрична енергија. На овој начин, алгоритмот придонесува кон намалување на вкупните оперативни трошоци и зголемување на економската ефикасност на микромрежата. Максималното и континуирано искористување на батерискиот систем во рамките на дозволените технички ограничувања укажува дека алгоритмот успешно ја препознава улогата на батеријата како клучен флексибилен ресурс во системот. Дополнително, ваквиот начин на управување со батеријата и тргувањето со мрежата придонесува и кон подобрување на стабилноста на микромрежата, бидејќи се намалуваат наглитите промени во размената на моќност со надредената мрежа. Со тоа, резултатите прикажани на Слика 7.2 ја потврдуваат способноста на предложениот алгоритам да донесува оптимални одлуки кои ги балансираат економските и техничките аспекти на работата на микромрежата.

На Слика 7.3 пак, се прикажани варијациите на напонските нивоа во сите јазли на микромрежата за разгледуваниот временски период.



Слика 7.3 Варијации на напони во микромрежата во карактеристичните јазли по извршената оптимизација со предложениот алгоритам

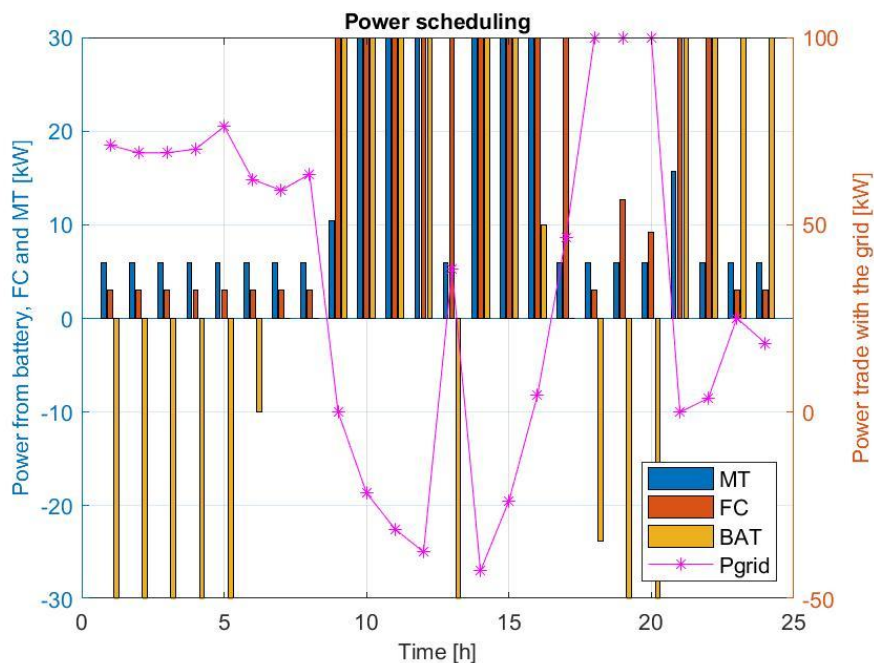
Од прикажаните резултати јасно се забележува дека напонските варијации се задржани во рамките на зададените дозволени граници, што укажува на стабилна и сигурна работа на системот. Ниту во еден од анализираните часови не се јавуваат

напонски отстапувања кои би можеле да доведат до нарушување на квалитетот на електричната енергија или до потенцијално активирање на заштитни механизми во мрежата. Ова однесување е директен резултат на оптимизацискиот процес, во кој напонските ограничувања се експлицитно вклучени како дел од целната функција и/или како технички ограничувања. Алгоритамот успешно ги координира активните и реактивните моќности на достапните генератори, системот за складирање и размената со надредената мрежа, со што се обезбедува избалансиран напонски профил низ целата микромрежа. Дополнително, минималниот интензитет на напонските варијации укажува дека предложениот метод не само што ги почитува зададените граници, туку активно придонесува кон подобрување на напонската стабилност. Со тоа, резултатите прикажани на Слика 7.3 ја потврдуваат способноста на алгоритамот да обезбеди технички прифатливи и стабилни решенија, дури и во услови на променливо оптоварување и производство.

7.2. СПОРЕДБА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО РЕЗУЛТАТИ ОД ДРУГИ СОВРЕМЕНИ ОПТИМИЗАЦИСКИ АЛГОРИТМИ

7.2.1. АНАЛИЗА НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТ ПРИ ОПТИМИЗАЦИЈА СО ЕДНА ПРОМЕНЛИВА

Резултатите добиени од симулацијата на MGES-GA на Тест-систем 1, опишан во §6.1. Тест-систем 1: Симулација на модифицирана IEEE - Европска нисконапонска мрежа, се презентирани на Слика 7.4. Негативните вредности за батеријата означуваат полнење, додека негативните вредности за активната моќност од мрежа означуваат продадена моќност кон мрежата.



Слика 7.4 Оптимална распределба на оптоварувањето во микромрежата со примена на MGES-GA

Од резултатите може да се заклучи дека кога цената на електричната енергија е пониска од трошоците за нејзино генерирање користејќи ги горивните ќелии и

микротурбината, микромрежата купува моќност од мрежата за да ја задоволи потрошувачката и за да ја наполни батеријата. Во часовите кога цената на електричната енергија е висока и економски е неисплатливо да се купува електрична енергија од мрежа, тогаш микромрежата го продава вишокот електрична енергија и ја празни батеријата. Но, при ненадејни промени во цената (висока кон ниска) микромрежата купува електрична енергија за да ја задоволи потрошувачката и да ја наполни батеријата за понатамошна употреба.

Генерално, цените на електричната енергија се пониски во ноќните часови, кога потрошувачката е исто така пониска, а предложениот алгоритам го зема тоа предвид. Поради тоа, кон крајот на денот се користи енергијата складирана во батеријата, за таа да почне да се полни со почетокот на наредниот ден (од 01:00 часот).

Во Табела 7-4 се презентирани резултатите добиени за вкупните оперативни трошоци и од профитот од тргување со електричната енергија со мрежата. Резултатите се споредени со современ алгоритам кој се базира на диференцијална еволуција (DE-N) презентирани во [64]. За фер споредба со DE-N алгоритмот, направена е оптимизација само на трошоците, не земајќи ги предвид варијациите на напоните.

Табела 7-4 Споредба на добиените резултати при користење на MGES-GA и DE-N [64] за оптимизација на трошоци

Метод за оптимизација	Оценка на погодност [€ct]	Трошоци за производство на електрична енергија [€ct]
MGES-GA	518,26	1096,08
DE-N	550,6	1160,6

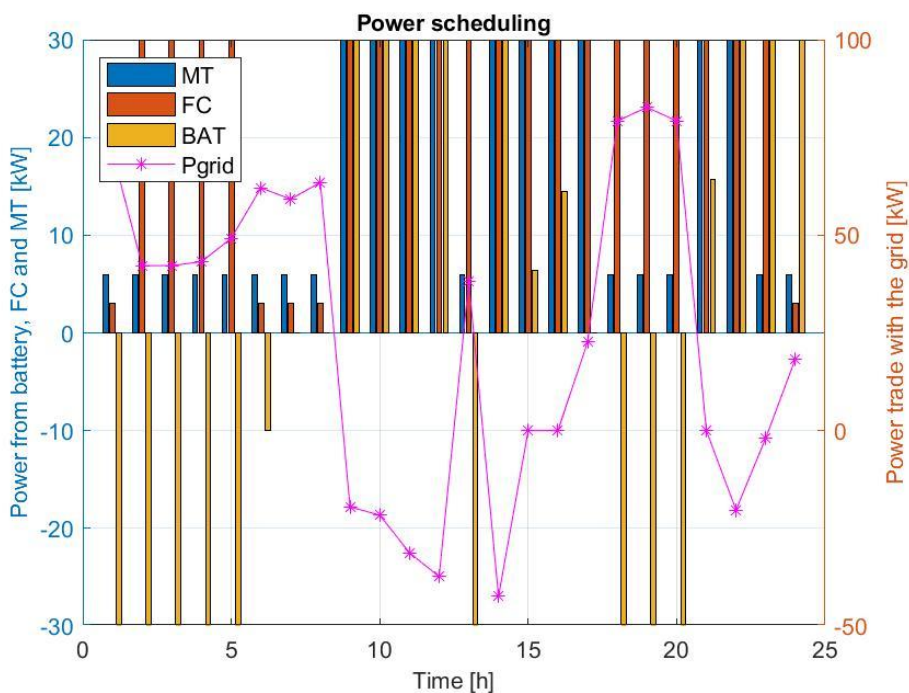
Дополнително е направена и анализа на чувствителност и споредба со алгоритмот прикажан во [66] кој разгледува микромрежа за две оперативни сценарија. Во првото сценарио се ограничува размената на моќност со мрежата (од +100 kW до -50 kW), а во второто разгледувано сценарио размената на моќности со мрежата е ограничена на ±30 kW. Во Табела 7-5 се презентирани резултатите добиени со примена на MGES-GA и се споредени со резултатите добиени при примена на Improved Differential Evolutionary (IDE) методот за оптимизација на оперативните трошоци за двете разгледувани сценарија.

Табела 7-5 Споредба на перформансот на MGES-GA и IDE [66] за минимизација на оперативни трошоци

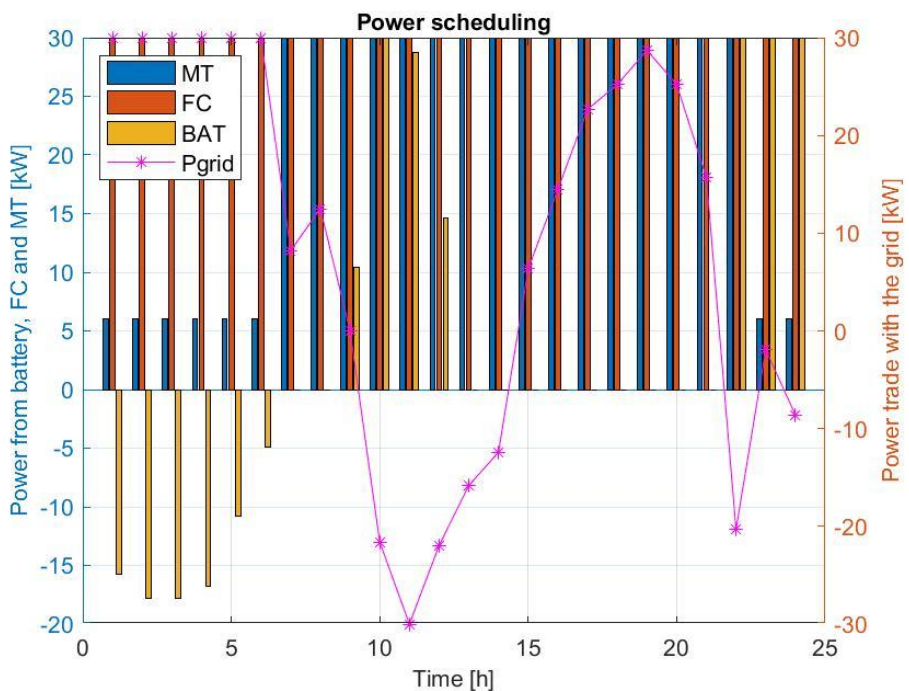
Метод за оптимизација	Без ограничување на размената со мрежа		Со ограничување на размената со мрежа	
	Оценка на погодност [\$]	Стандардна девијација [\$]	Оценка на погодност [\$]	Стандардна девијација [\$]
MGES-GA	335,229	40,87	544,11	26,01
IDE	618,91	45,22	661,37	10,81

На Слика 7.5 и на Слика 7.6 е прикажан економскиот диспечинг на микромрежата за две различни сценарија: во првиот случај, размената на моќност со главната електроенергетска мрежа не е ограничена, додека во вториот случај се воведува експлицитно ограничување на купувањето и продавањето на електрична енергија. Анализата на добиените резултати покажува дека во двете сценарија предложениот

алгоритам демонстрира јасна способност за следење на динамиката на цената на електричната енергија и рационално прилагодување на стратегијата за управување со енергетските ресурси.



Слика 7.5 Распределба на оптоварувањето помеѓу активните генератори користејќи MGES-GA без ограничување на размената на моќност со мрежата



Слика 7.6 Распределба на оптоварувањето помеѓу активните генератори користејќи MGES-GA со ограничување на размената на моќност со мрежата

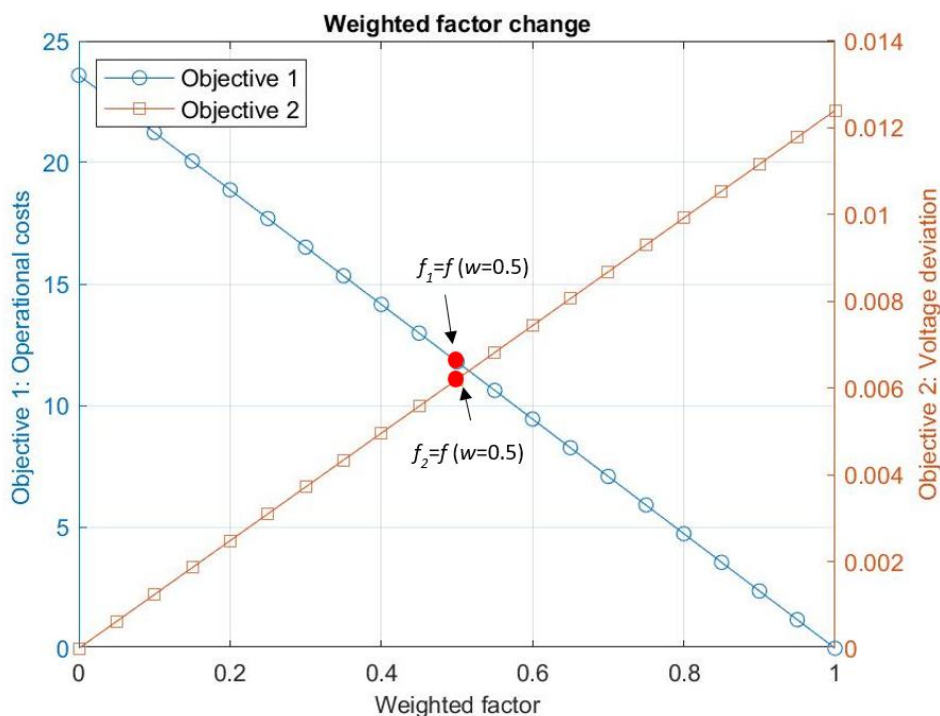
Поконкретно, во периоди кога цената на електричната енергија е ниска, алгоритмот ја користи можноста за купување електрична енергија од мрежата со цел задоволување на побарувачката и истовремено полнење на батеријата. Ова овозможува акумулација на енергија која подоцна може да се искористи во периоди со висока цена. Во интервали кога цената на електричната енергија е зголемена, алгоритмот преминува кон празнење на батеријата и продавање електрична енергија кон мрежата, со што се постигнува економска оптималност преку арбитража.

Меѓутоа, при воведување ограничување на размената на електрична енергија со мрежата, се забележува значајна промена во начинот на ангажирање на локалните генератори. Поточно, значително почесто се активираат генераторите со конвенционални извори, како што се горивните ќелии и микротурбините. Ова укажува дека, во услови на ограничена интеракција со мрежата, алгоритмот се потпира повеќе на локалните диспечабилни извори за да ја обезбеди потребната рамнотежа помеѓу производството и побарувачката, при што истовремено се задржува економската и техничката одржливост на микромрежата.

7.2.2. СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА СО ПОСТОЕЧКИ ОПТИМИЗАЦИСКИ МЕТОДИ

7.2.2.1. Модифицирана IEEE European Low Voltage Feeder

Повеќекритериумската оптимизација ги зема предвид и оперативните трошоци и напонските варијации во микромрежата. На Слика 7.7 е прикажана промената на двете целни функции во зависност од факторот на тежина w , кој се користи во формулацијата со пондериран збир.

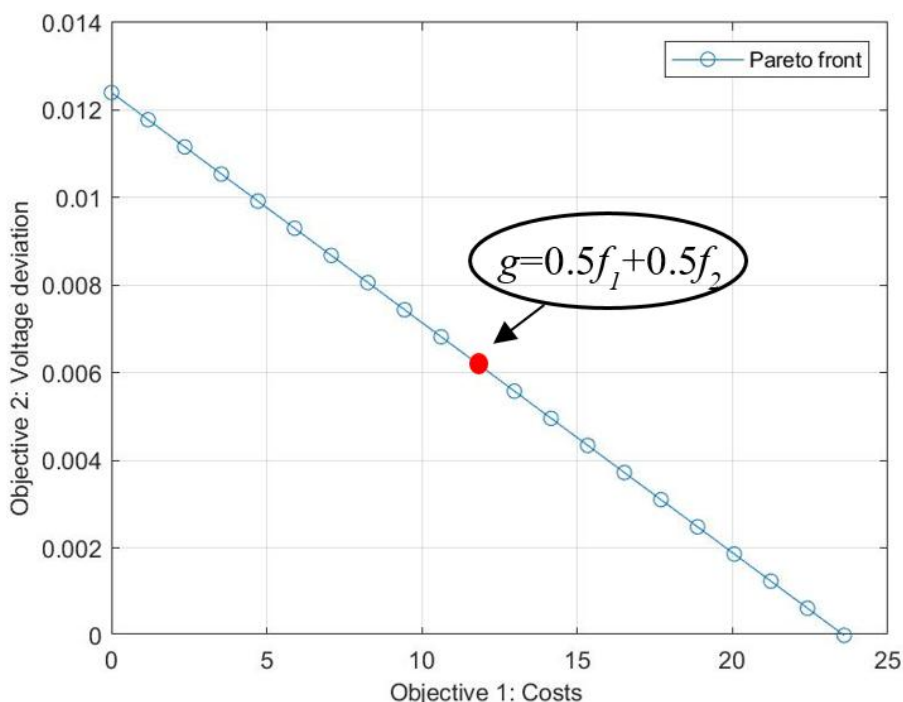


Слика 7.7 Варијации на нормализираните вредности на целната функција при примена на MGES-GA со земање предвид на промената на тежинскиот фактор

Со зголемување на тежината доделена на целната функција за трошоци, резултирчките оперативни трошоци соодветно се намалуваат, додека напонското

отстапување се зголемува, што го демонстрира очекуваниот компромис помеѓу двете цели. Точката што одговара на $w = 0,5$ е истакната и го претставува балансираниот случај во кој двете цели имаат еднаков придонес. Оваа конфигурација на тежината е избрана за понатамошна анализа, бидејќи обезбедува репрезентативно компромисно решение помеѓу економската ефикасност и квалитетот на напонот.

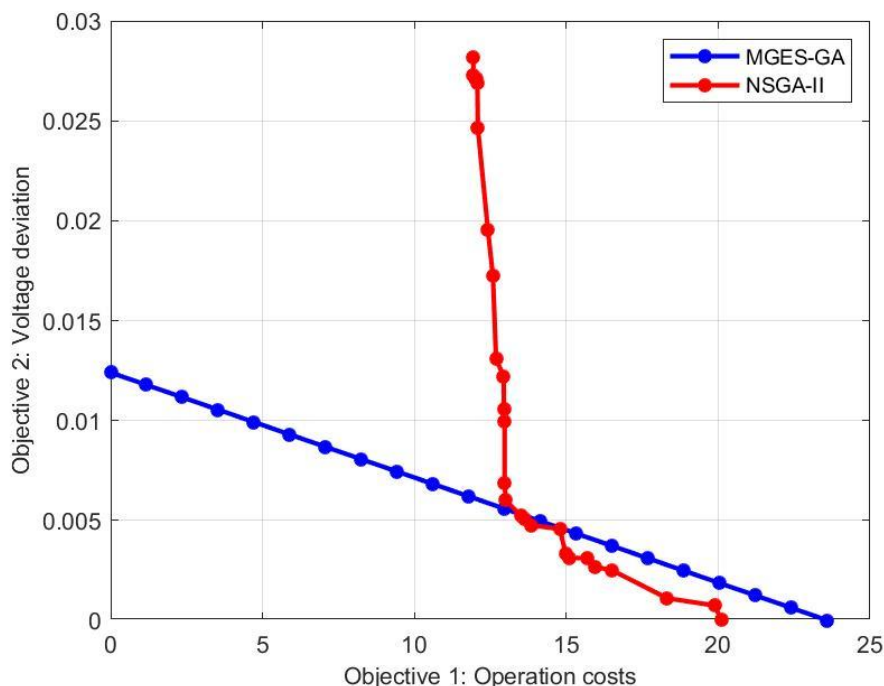
На Слика 7.8 е прикажан Парето фронтот добиен при решавање на повеќекритериумски проблем, каде што истовремено се минимизираат оперативни трошоци на микромрежата и напонските девијации во јазлите. Парето фронтот претставува множество на недоминантни решенија кај кои подобрувањето на една целна функција неизбежно доведува до влошување на другата. Од графичкиот приказ се забележува јасна компромисна зависност помеѓу трошоците и напонските девијации. Во левиот дел од графиконот се наоѓаат решенија со минимални оперативни трошоци, при што напонските варијации се релативно поголеми. Во десниот дел се наоѓаат решенија со минимални напонски девијации, но со повисоки трошоци на работа на системот. Ова укажува на спротивставена природа на целните функции, што е карактеристично за управување со микромрежи каде економската оптималност и напонската стабилност се во меѓусебна конкуренција. Црвената точка на сликата претставува избрано компромисно решение добиено со примена на методот на тежински фактор $w = 0,5$. Со избор на еднакви тежини се претпоставува еднаква важност на економскиот и техничкиот критериум. Со тоа се добива балансирано решение кое не ги минимизира екстремно ниту трошоците ниту напонските девијации, туку обезбедува оптимален компромис помеѓу двата аспекта.



Слика 7.8 Парето фронт на нормализираните вредности на оперативните трошоци и напонските варијации добиен со примена на MGES-GA

Предложениот алгоритам е спореден со NSGA-II, како еден од најчесто користените алгоритми за оптимизација на микромрежи. На Слика 7.9 е прикажан Парето фронтот

добие со независна примена на MGES-GA и NSGA-II. Двата алгоритми ја демонстрираат очекуваната компромисна зависност, при што пониските оперативни трошоци генерално се поврзани со поголеми напонски отстапувања. Сепак, забележливи се значајни разлики во обликот и мазноста на Парето фронтите, што ги одразува способностите на секој алгоритам во однос на конвергенцијата и диверзитетот.



Слика 7.9 Споредба на Парето фронтони добиени со примена на MGES-GA и NSGA-II за оптимизација на трошоци и напонски варијации

Иако NSGA-II претставува алгоритам за повеќекритериумска оптимизација, а MGES-GA користи пристап на пондериран збир, направена е индикативна споредба со цел да се оцени способноста на предложениот алгоритам да генерира компромисни решенија. За таа цел, MGES-GA е извршен за различни вредности на тежинскиот параметар, при што добиените решенија се споредени со Парето фронтот добиен со NSGA-II. Всушност, се споредува способноста на MGES-GA да генерира компромисни решенија во однос на Парето фронтот добиен со NSGA-II.

Споредбата на резултатите е извршена со нормализирани вредности за напонските отстапувања и трошоците. Резултатите покажуваат дека при користење на MGES-GA се добива пониско напонско отстапување, односно подобра напонска стабилност во споредба со NSGA-II, каде највисокото напонско отстапување достигнува 0,028. Во однос на трошоците, повисоки оперативни трошоци се добиваат при користење на MGES-GA, а пониски при примена на NSGA-II. Иако двата алгоритми даваат слични резултати при ниски девијации, MGES-GA обезбедува поширок и порамномерно распределен сет на решенија. Затоа, може да се заклучи дека MGES-GA има подобра стабилност и поквалитетен Парето фронт во однос на NSGA-II.

7.2.2.2. Модифицирана IEEE 33-bus мрежа

Предложениот алгоритам дополнително е применет и на посложена микромрежа базирана на IEEE 33-bus тест-системот, прикажана на Слика 6.3. Перформансите на

алгоритамот MGES-GA се споредени со резултатите добиени со алгоритамот MOPSO. Резултатите од симулациите се презентирани во Табела 7-6 и во Табела 7-7.

Табела 7-6 Споредба на оперативните трошоци и профитот при примена на MOPSO и MGES-GA

Метод	MOPSO	MGES-GA
Трошоци БС (€)	-384,67	-575,27
Трошоци ДГ (€)	-41,54	0
Профит (€)	18137,26	19016,46
Вкупни трошоци (€)	-443,47	-1258,9
Вкупно профит (€)	17693,79	17757,61

Од резултатите може да се забележи дека трошоците поврзани со работата на батерискиот систем се повисоки кај MGES-GA, каде тие изнесуваат -575,27 €, во споредба со -384,67 € кај MOPSO. Ова укажува дека предложениот алгоритам почесто ја користи батеријата во процесот на управување со енергијата, со цел подобро искористување на варијациите на цената на електричната енергија и оптимално балансирање на производството и потрошувачката. Позначајна разлика се забележува кај трошоците поврзани со работата на дизел генераторите. При примена на MGES-GA се забележува дека дизел генераторите воопшто не се ангажираат, додека при примена на MOPSO тие изнесуваат -41,54 €, што покажува дека предложениот алгоритам наоѓа најевтин начин за обезбедување на потребната електрична енергија до потрошувачите. Но, и покрај повисоките оперативни трошоци, MGES-GA генерира поголем приход од продажба на електрична енергија, кој изнесува 19016,46 €, во споредба со 18137,26 € кај MOPSO. Ова укажува дека алгоритамот поефикасно ја користи можноста за размена на електрична енергија со главната мрежа, односно произведува и продава поголеми количини електрична енергија кога цената на пазарот е поволна. Како резултат на оваа стратегија на управување, вкупниот профит на системот при примена на MGES-GA достигнува 17757,61 €, што е повеќе од 17693,79 € добиени со MOPSO. Ова укажува дека предложениот алгоритам обезбедува поефикасна економска експлоатација на ресурсите во микромрежата.

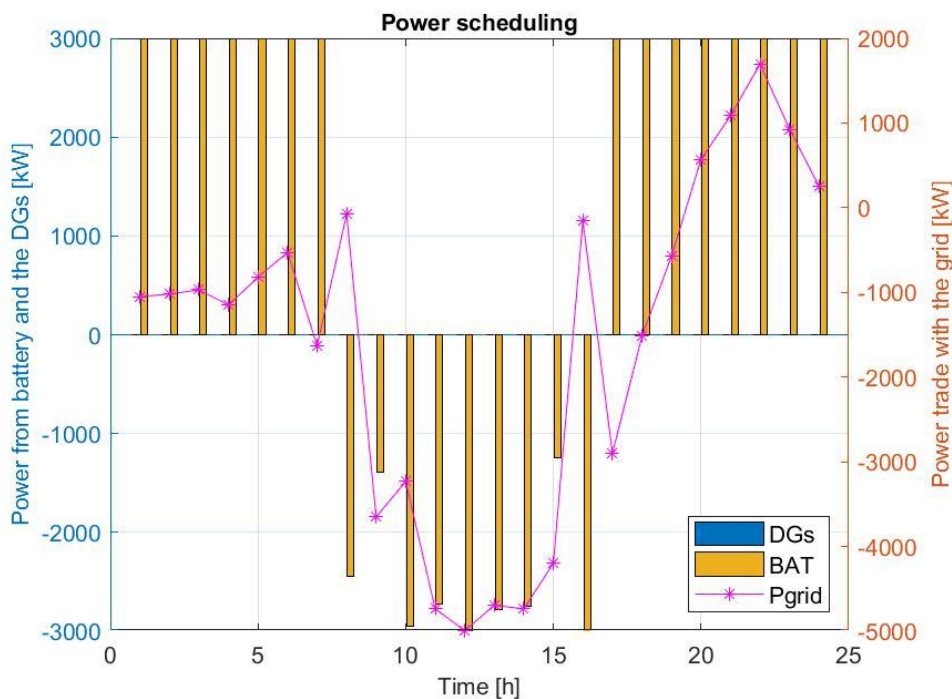
Табела 7-7 Споредба на вредностите на напонските варијации при примена на MOPSO и MGES-GA

Метод	Просечна девијација на напон (р.и.)	Стандардна девијација (р.и.)
MOPSO	0,034	0,006
MGES-GA	0,029	0,018

Од резултатите за напонските девијации може да се забележи дека MGES-GA остварува малку пониска просечна вредност на напонските девијации, која изнесува 0,029 р.и., додека кај MOPSO таа изнесува 0,034 р.и. Иако вредноста добиена со MGES-GA е пониска, двете вредности се многу мали и значително под дозволените граници на напонски варијации во нисконапонските дистрибутивни мрежи. Важно е да се напомене дека оваа вредност не е константна за сите јазли и временски интервали, туку претставува просечна нормализирана вредност. Ова укажува дека и двата алгоритми обезбедуваат соодветна контрола на напонскиот профил во микромрежата. Споредбата на стандардната девијација на напонските варијации покажува дека алгоритамот MOPSO

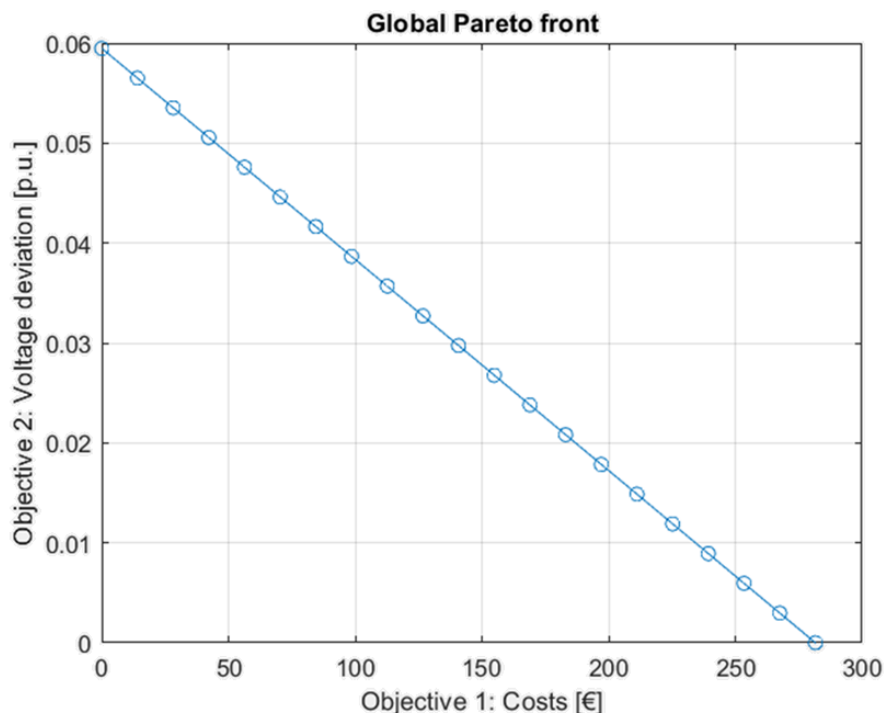
се карактеризира со пониска вредност за стандардната девијација 0,006 р.и., што укажува на постабилна распределба на напонските вредности во мрежата. Сепак, разликите меѓу алгоритмите се релативно мали и немаат значително влијание врз квалитетот на напонот во системот. Во исто време, како што се забележува во анализата на економските резултати, MGES-GA остварува значително поголем економски профит. Оттука може да се заклучи дека предложениот алгоритам MGES-GA обезбедува подобар компромис меѓу економската ефикасност и одржувањето на стабилен напонски профил во микромрежата.

Графичкиот приказ на резултатите е презентираан на Слика 7.10. Може да се забележи дека управувањето со микромрежата се одвива динамички, при што различните извори се ангажираат во зависност од расположливото производство од обновливи извори на енергија, побарувачката на потрошувачите и економските услови на пазарот. На почетокот на денот, при ниска тарифа, микромрежата продава електрична енергија од главната мрежа, што е прикажано со негативните вредности на моќноста на мрежата. Во овој период се забележува ангажирање на батеријата. Потоа се забележува значителна промена во режимот на работа на системот. Во овој интервал батерискиот систем работи со високи негативни вредности на моќност, што укажува на интензивно полнење на батеријата. Во исто време се забележува и значителен извоз на електрична енергија кон главната мрежа, што е резултат на повисоко производство од обновливите извори, кое делумно се складира во батеријата, а делумно се продава на мрежата. Во попладневните и вечерните часови (од 17 до 24 часот) повторно се забележува промена во стратегијата на управување. Батерискиот систем постепено се празни со цел да се задоволи локалната побарувачка, додека размената со мрежата се намалува и во доцните часови системот повторно увезува електрична енергија.



Слика 7.10 Оптимална распределба на оптоварувањето помеѓу генераторите во модифицираната IEEE 33-bus тест-мрежа

На Слика 7.11 е прикажан Парето фронтот кога MGES-GA е применет на модифицирана IEEE 33-bus мрежа. Вредностите од оперативните трошоци и напонските варијации се скалирани за подобра репрезентација и визуализација. Парето фронтот прикажува јасна и континуирана врска помеѓу двете оптимизациски функции, покажувајќи дека MGES-GA ја зачувува конвергентноста и способноста да ги идентификува недоминантните решенија во високодимензионален простор. Тестот на посложен систем покажува дека алгоритмот го задржува стабилниот перформанс со мали зголемувања на времето на пресметка, докажувајќи дека е применлив за примена и на поголеми и посложени оптимизациски проблеми кај микромрежи.



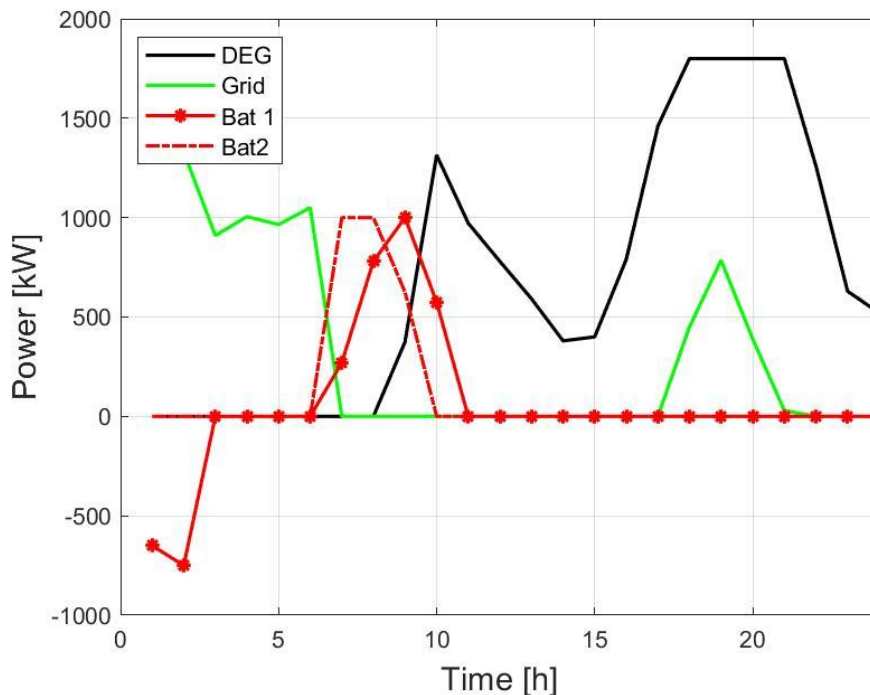
Слика 7.11 Парето фронт при примена на MGES-GA на модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа

7.2.2.3. Модифицирана IEEE 33-bus мрежа со вклучени станици за полнење на електрични возила

Симулацијата на предложениот алгоритам на IEEE 33-bus систем кој покрај генератори на ОИЕ и ДГ, вклучува и станици за полнење на електрични возила, како што е прикажано на Слика 6.5. Во овој случај се смета дека електричните возила можат само да преземат електрична енергија од мрежа, односно дека се дел од потрошувачката на електрична енергија и тоа според распоред дефиниран во §6.3. Тест-систем 3: Симулација на сложена микромрежа со вклучени електрични возила. Според тоа, оптимизацијата е извршена помеѓу батериите, ДГ и мрежата.

На Слика 7.12 е прикажана оптималната размена на електрична енергија со дистрибутивната мрежа, како и оптималното ангажирање на ДГ и на системите за складирање енергија во рамките на микромрежата. Од графичкиот приказ јасно се согледува дека предложениот MGES-GA-алгоритам става изразен акцент на локалното производство на електрична енергија преку ДГ, со што се настојува да се минимизира зависноста од главната електроенергетска мрежа. Овој пристап е особено изразен во

периоди кога цената на електричната енергија е висока, што укажува на економски рационално однесување на алгоритмот.



Слика 7.12 Оптимално ангажирање на батериите и на ДГ и размена на електрична енергија со мрежата во систем со станици за полнење на ЕВ

Дополнително, резултатите покажуваат дека купувањето на електрична енергија од мрежата е ограничено на краток временски интервал на почетокот од разгледуваниот период, кога цената на електричната енергија е најниска. Во останатиот дел од периодот, алгоритмот се потпира претежно на локалните генератори и на батериите, при што не се забележува продавање на електрична енергија кон мрежата. Ова укажува дека MGES-GA приоритет дава на стабилноста на микромрежата, почитувањето на напонските ограничувања и оптималното користење на локалните ресурси.

Ваквата стратегија за ангажирање на ДГ и управување со енергетските текови резултира со значително намалени варијации на напонот во сите јазли на мрежата. Овој заклучок произлегува од Табела 7-8, каде се прикажани резултатите од симулацијата, кои се споредени со методот опишан во [135] (OEMS), како и со основниот начин на управување со енергија во микромрежи (BEMS) за 15 % учество на електричните возила во вкупното оптоварување.

Од таблата исто така може да се забележи дека при примена на MGES-GA-алгоритмот се постигнуваат пониски нето-оперативни трошоци во споредба со резултатите добиени со конвенционалните стратегии за управување, како што се OEMS и BEMS. Ова укажува дека интеграцијата на напонските ограничувања директно во оптимизацискиот процес овозможува поефикасно и поодржливо функционирање на микромрежата.

Табела 7-8 Споредба на резултати добиени од анализа на модифицирана IEEE 33-bus тест-мрежа со вклучени станици за полнење на ЕВ

Параметар	BEMS	OEMS	MGES-GA
Вкупно продадена електрична енергија кон мрежа [kWh]	0	137 518,05	0
Вкупно преземена електрична енергија од мрежа [kWh]	56 528	52 835	16 830
Вкупно енергија генерирана од ДГ [kWh]	28 265, 12	33 659,4	33 348
Максимална вредност на варијациите на напон во текот на денот [p.u.]	0,0537	0,0486	0,0208
Нето-оперативни трошоци [\$]	1609	1397	1165,2

7.3. ДИСКУСИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Резултатите добиени со примената на MGES-GA се споредени со резултатите добиени при користење на стандарден генетски алгоритам, во кој процесот на селекција е реализиран со различни конвенционални методи, и тоа: Roulette Wheel селекција, Remainder Selection, Tournament Selection, Stochastic Universal Sampling (SUS) и Uniform Selection. Овие методи се меѓу најчесто користените селекциски стратегии во класичните генетски алгоритми и затоа претставуваат соодветна основа за објективна и релевантна споредба.

Споредбата на резултатите е прикажана во Табела 7-3 и јасно покажува дека примената на кој било од наведените стандардни методи на селекција резултира со пониска вредност на остварениот профит во споредба со профитот добиен со предложеното подобрување на генетскиот алгоритам. Ова укажува дека новиот селекциски механизам овозможува поефикасно пребарување на просторот на можни решенија и подобро искористување на достапните ресурси во микромрежата. Дополнително, резултатите покажуваат дека интеракцијата со локалната дистрибутивна мрежа е максимизирана на оптимален начин, при што произведената електрична енергија во микромрежата во најголем дел е искористена од локалните просумери, наместо да се извезува или заменува со енергија повлечена од надредената мрежа. Ова директно ја оправдува предложената модификација на генетскиот алгоритам и ја потврдува нејзината практична применливост. Од Wilcoxon signed-rank тестот се забележува дека MGES-GA демонстрира статистички значајна предност во однос на одредени класични селекциски механизми (Remainder и Roulette), додека во однос на Tournament, Uniform и SUS не се забележува значајна разлика во разгледуваното сценарио. Понатаму, анализата на динамиката на оптимизацискиот процес покажува дека предложениот алгоритам ја забрзува конвергенцијата и овозможува побрзо достигнување на квалитетни решенија, во споредба со стандардниот генетски алгоритам без подобрен селекциски механизам. Финалните резултати не само што се подобри во економска смисла, туку се и постабилни, со помала чувствителност на локални оптимуми.

Графичката презентација на резултатите дополнително потврдува дека електричната енергија во микромрежата е ефикасно распределена со цел да се задоволи потрошувачката, при што во исто време се постигнува намалување на електричната енергија купена од надредената мрежа. На овој начин се намалуваат вкупните

оперативни трошоци и зависноста на микромрежата од локалната дистрибутивна мрежа. Конечно, со вклучување на напонските нивоа во оптимизацискиот процес, се постигнува значително помала напонска варијација, што придонесува кон подобрен квалитет на напонот и посигурна работа на микромрежата. Во разгледуваните тест-системи не се забележуваат значителни напонски отстапувања, што е очекувано со оглед на присуството на повеќе дисперзирани генератори, батериски системи и можноста за размена со електроенергетската мрежа.

Резултатите од споредбата на предложениот MGES-GA-алгоритам со други релевантни методи за оптимизација со една променлива, прикажани во Табела 7-4, јасно укажуваат на неговата супериорност во однос на квалитетот на финалното решение. Анализата покажува дека MGES-GA постигнува намалување на оценката на погодност за 5,87 % во споредба со DE-H-алгоритамот. Овие резултати се особено значајни ако се земе предвид дека функцијата за оценка на погодноста директно ја рефлектира целта на оптимизацијата, односно минимизацијата на оперативните трошоци на микромрежата. Намалената оценка на погодност имплицира поефикасно управување со енергетските ресурси и подобра распределба на производството и потрошувачката.

Подеталната анализа на енергетските текови покажува дека подобрувањето во резултатите на MGES-GA е постигнато преку зголемена продажба на електрична енергија кон електродистрибутивната мрежа, додека локалната потрошувачка во најголем дел се задоволува преку дисперзираните генератори интегрирани во микромрежата. Ова укажува дека алгоритамот успешно ја користи економската предност на локалното производство, минимизирајќи ја потребата од скапа енергија повлечена од надредената мрежа. Дополнително, во споредба со IDE-алгоритамот, MGES-GA постигнува пониски трошоци за производство на електрична енергија, што укажува дека предложениот пристап не само што е конкурентен, туку и поефикасен во однос на современите алгоритми за оптимизација на една променлива. Резултатите покажуваат дека предложениот MGES-GA-алгоритам остварува значително подобри перформанси во однос на IDE, и во двата разгледувани случаи, кога постои ограничување на размената со мрежа и кога нема ограничување. Во услови без ограничување на размената со мрежата, MGES-GA постигнува вредност на целната функција од 335,229 \$, што е за 45,8 % пониско во однос на IDE (618,91 \$). Дополнително, стандардната девијација кај MGES-GA е за околу 9,6 % пониска отколку кај IDE што укажува на постабилни решенија. Во услови со ограничување на размената со мрежата, MGES-GA повторно покажува подобри резултати со подобрување од 17,7 % споредбено со IDE. Меѓутоа, во овој случај стандардната девијација кај MGES-GA е повисока во однос на IDE, што укажува дека IDE обезбедува поголема стабилност при построги ограничувања.

Иако резултатите од оптимизацијата со една променлива ја потврдуваат ефикасноста на MGES-GA, примарниот фокус на предложениот алгоритам е насочен кон истовремена оптимизација на економските и на техничките перформанси, односно минимизација на оперативните трошоци и на напонската девијација. Поради тоа, спроведена е дополнителна анализа во рамки на повеќекритериумска оптимизација, чиишто резултати се прикажани на Слика 7.9. Добиените Парето фронтови покажуваат дека MGES-GA обезбедува подобра рамнотежа помеѓу конфликтните цели, при што се постигнуваат помали напонски девијации за споредливи или дури и за пониски вредности на оперативните трошоци во однос на NSGA-II-алгоритамот.

Ова значи дека низ јазлите на микромрежата се јавуваат помал број и помал интензитет на напонски отстапувања, што директно придонесува кон подобрен квалитет на електричната енергија и поголема сигурност во снабдувањето на крајните потрошувачи. Истовремено, економската ефикасност на системот се задржува на високо ниво, што укажува дека MGES-GA не прави компромис помеѓу техничките и економските цели, туку успешно ги оптимизира и двете.

Дополнителната валидација на алгоритмот е извршена преку неговата примена на модифицирана IEEE 33-bus микромрежа, во која се вклучени повеќе фотоволтаични и ветрогенератори, дизел генератори, како и систем за складирање на енергија. Во ова сценарио, MGES-GA е спореден со MOPSO-алгоритмот, кој претставува повеќекритериумски оптимизациски алгоритам базиран на движењето на рој честички. Како што е прикажано во Табела 7-6 и Табела 7-7, предложениот алгоритам постигнува повисоки оперативни трошоци, но и повисока заработка и помали напонски девијации, што дополнително ја потврдува неговата робустност и стабилност во различни услови на работа. Кај трошоците поврзани со батерискиот систем се забележува подобрување од приближно 49,6 %, што укажува на поефикасно управување со процесите на полнење и празнење, како и подобро искористување на ценовните разлики на пазарот на електрична енергија, дополнително MGES-GA целосно го елиминира користењето на дизел генераторот, што укажува на поефикасно управување со складирањето на енергија што претставува значајна предност од економски и еколошки аспект. Во однос на профитот, при примена на MGES-GA се остварува 4,85 % поголем профитот во однос на MOPSO, а вкупниот профит се зголемува за само околу 0,36 %. Ова претставува умерено, но сепак значајно подобрување кое укажува дека системот веќе функционира блиску до оптималната точка, при што дополнителните подобрувања што ги нуди MGES-GA се суптилни, но конзистентни и важни од аспект на долгорочна оптимизација. Во однос на напонските варијации, MGES-GA обезбедува значително подобра просечна напонска регулација во однос на MOPSO, но со поголема распрнатост на девијациите.

Дополнителното тестирање на предложениот оптимизациски алгоритам на микромрежа во која се интегрирани и станици за полнење на електрични возила како посебна категорија на оптоварување уште еднаш ја потврдува неговата ефикасност и робустност. Резултатите од симулациите покажуваат дека и во услови на зголемена сложеност на системот, предизвикана од присуството на електрични возила со временски променлива побарувачка, алгоритмот повторно успева да постигне пониски вкупни оперативни трошоци, како и значително намалени напонски девијации во споредба со референтните методи. Ова укажува дека предложениот пристап успешно ги зема предвид дополнителните нелинеарности и динамики кои ги воведуваат електричните возила во системот.

Анализата на добиените резултати покажува дека алгоритмот ефективно ја следи промената на цената на електричната енергија и соодветно го адаптира начинот на користење на достапните енергетски ресурси. Во периоди со пониски тарифи, се зголемува користењето на електричната енергија од надредената мрежа или од поевтините локални извори, додека во периоди со повисоки цени се максимизира искористувањето на обновливите извори и флексибилните ресурси во микромрежата. Притоа, алгоритмот континуирано ги почитува зададените технички ограничувања,

обезбедувајќи напонските нивоа во сите јазли да останат во дозволените граници, со минимални варијации во текот на целиот анализиран период.

Во однос на размената со мрежата, MGES-GA не предвидува продажба на електрична енергија, слично како BEMS, но значително го намалува вкупното преземање од мрежата на 16 830 kWh, што е за околу 70 % помалку во споредба со BEMS и за околу 68 % помалку во однос на OEMS. Ова укажува на поефикасно искористување на локалните извори и подобро управување со батерискиот систем. Од технички аспект, максималната напонска девијација кај MGES-GA изнесува 0,0208 p.u., што е значително пониско во однос на BEMS (0,0537 p.u.) и OEMS (0,0486 p.u.). Ова претставува намалување од приближно 61 % – 62 %, што укажува на значително подобрен напонски профил и повисок квалитет на електричната енергија. Од економски аспект, MGES-GA постигнува најниски нето-оперативни трошоци од 27,6 % пониско од BEMS и за 16,6 % пониско од OEMS. Ова потврдува дека предложениот алгоритам успешно ги оптимизира трошоците без да го наруши техничкиот перформанс.

Иако конечниот оптимален распоред по однос на продадената електрична енергија во одредени временски интервали покажува сличност со основниот начин на управување со енергија (BEMS), деталната економска анализа открива дека ваквата стратегија резултира со најисплатливо целокупно решение. Ова дополнително укажува дека предложениот алгоритам не само што генерира технички прифатливи решенија, туку и успешно идентификува економски оптимални стратегии за управување со енергијата во комплексни микромрежни системи.

Севкупните резултати од ова истражување недвосмислено ја потврдуваат супериорноста и практичната вредност на предложениот Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA) како ефикасен метод за повеќекритериумска оптимизација во микромрежни системи. Алгоритмот покажува способност да обезбеди стабилни и конзистентни решенија кои истовремено ги минимизираат оперативните трошоци и напонските девијации, дури и во услови на зголемена комплексност и динамични промени во оптоварувањето и цените на електричната енергија. Постигнатата побрза конвергенција и намалената чувствителност на локални оптимуми укажуваат на значително подобрување во споредба со стандардните генетски алгоритми и нивните конвенционални селекциски механизми. Дополнително, успешната примена на MGES-GA на различни тест-системи, вклучувајќи сценарија со електрични возила и флексибилни ресурси, ја демонстрира неговата генерализабилност и потенцијал за проширување кон поголеми и пореалистични микромрежни конфигурации. Овие резултати го позиционираат MGES-GA како робуствна и практично применлива алатка за напредно управување и оптимизација на идните паметни енергетски системи.

8. ЗАКЛУЧОК

Во рамките на оваа докторска дисертација детално беше аргументирана потребата од развој и примена на подобрен генетски алгоритам, кој ќе овозможи поефикасна и посигурна оптимизација на работата на современите микромрежи. Анализата покажа дека класичните пристапи, базирани на стандардниот генетски алгоритам, не секогаш обезбедуваат доволна конвергенција, стабилност и робусност при решавање на комплексни, повеќекритериумски оптимизациски проблеми карактеристични за микромрежи поврзани на локална дистрибутивна мрежа. Особено беше нагласена потребата од интегрирање на напонските варијации како составен дел од оптимизациската функција, со цел истовремено минимизирање на оперативните трошоци и обезбедување на соодветен квалитет на електричната енергија.

Со оглед на стохастичноста на производството од обновливи извори на енергија и варијабилноста на потрошувачката, управувањето со микромрежите претставува сложен нелинеарен проблем со повеќе ограничувања. Затоа, во ова истражување беше предложено унапредување на стандардниот генетски алгоритам преку воведување на модифицирана селекција и подобрена стратегија за еволуција на популацијата, со цел избегнување на предвремена конвергенција и подобрување на истражувачките способности на алгоритмот. Предложениот пристап овозможува подобро балансирање помеѓу експлоатацијата на најдобрите решенија и истражувањето на нови потенцијално оптимални региони во просторот на решенија.

Развиениот алгоритам беше имплементиран во симулациска околина и применет врз илустративен модел на микромрежа која опфаќа дистрибуирани генератори, уреди за складирање на енергија и интеракција со дистрибутивната мрежа. Дополнително, со цел да се потврди неговата ефикасност и општа применливост, алгоритмот беше тестиран и на верифицирани тест-системи кои се користат во релевантната научна литература. Преку споредбена анализа со стандардниот генетски алгоритам беа евидентирани подобрувања во однос на вредноста на целната функција, стабилноста на напонските профили и конзистентноста на добиените резултати во повеќекратни симулации. На тој начин беше извршена валидација на предложениот пристап и беа потврдени неговите предности во однос на класичните методи.

Резултатите од истражувањето покажуваат дека интегрирањето на напонските варијации како оптимизациски критериум овозможува посеопфатно управување со микромрежата, при што не се зема предвид само економскиот аспект, туку и техничките ограничувања на системот. Со тоа се обезбедува поодржливо и посигурно функционирање на микромрежата во реални услови.

Во продолжение на ова поглавје систематски се презентирани главните научни и практични придонеси од спроведеното истражување, како и нивното значење во контекст на постојната литература и современите предизвици во областа на оптимизација на микромрежи. Дополнително, се предлагаат насоки за идна работа, кои опфаќаат проширување на моделот со дополнителни извори на неизвесност, примена на алгоритмот во реални системи, како и негова адаптација за повеќекритериумска оптимизација во реално време. Овие идни истражувачки правци имаат потенцијал да придонесат кон понатамошен развој на интелегентни, ефикасни и економски исплатливи енергетски системи.

8.1. ПРИДОНЕС НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

Резултатите од истражувањето спроведено во рамките на оваа докторска дисертација имаат значајни импликации како за енергетскиот сектор, така и за научната заедница. Во услови на интензивна енергетска транзиција, зголемена пенетрација на обновливи извори на енергија и сè поголемо учество на децентрализирани производни единици, микромрежите се јавуваат како клучен концепт за обезбедување сигурно, флексибилно и економски ефикасно снабдување со електрична енергија. Сепак, стабилната и оптимална работа на микромрежите, особено кога тие се приклучени на локалната дистрибутивна мрежа, е директно поврзана со квалитетот и со сигурноста на работата на целокупниот електроенергетски систем. Токму поради тоа, развојот на напредни методи за оптимално управување со микромрежи претставува неопходен чекор кон одржлива и сигурна енергетска иднина.

Во оваа дисертација е предложен, развиен и темелно анализиран нов оптимизациски алгоритам Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm (MGES-GA), наменет за решавање на сложени оптимизациски проблеми во микромрежи приклучени на дистрибутивната мрежа. Основната мотивација за развој на алгоритмот произлегува од ограничувањата на класичните генетски алгоритми, кои често страдаат од предвремена конвергенција, недоволна разновидност на популацијата и нестабилни решенија при повеќекритериумска оптимизација. MGES-GA воведува иновативен селекциски механизам кој, за разлика од стандардните пристапи, не се базира исклучиво на фаворизирање на најдобрите единки, туку овозможува контролирано учество и на помалку конкурентните решенија во процесот на репродукција. Со тоа се задржува генетската разновидност, се избегнува локален оптимум и се подобрува квалитетот на финалното решение.

Примената на MGES-GA во контекст на микромрежи овозможува истовремена оптимизација на економските и техничките параметри на системот. Примарните цели на оптимизацијата се насочени кон минимизација на оперативните трошоци и напонските девијации, при што дополнително се земаат предвид ограничувањата на системот, како што се капацитетите на генераторите, системите за складирање, ограничувањата на размената со мрежата и дозволените напонски граници. Резултатите од симулациите покажуваат дека предложениот алгоритам успешно ги балансира конфликтните цели, обезбедувајќи економски оптимални решенија без компромис на техничката сигурност и квалитетот на напонот.

Од практична перспектива, методот предложен во ова истражување може да се примени во системи за управување со енергетски текови, чија цел е оптимална распределба на моментално достапната електрична енергија кон потрошувачите во рамките на микромрежата, како и балансирање на потребите од електрична енергија во реално време. Дополнително, алгоритмот може да се користи и за планирачки цели, при што во процесот на оптимизација се вклучуваат предвидувања за временските услови, производство од обновливи извори на енергија и идни профили на оптоварување. Ваквиот пристап овозможува навремено донесување оптимални одлуки и има потенцијал да донесе значајни економски и оперативни бенефити, како за операторите на микромрежи, така и за дистрибутивните систем-оператори.

Главните придонеси на истражувањето спроведено во оваа докторска дисертација може да се сумираат во следните точки:

- Придонес кон унапредување на знаењето во областа на оптимална распределба на моќности кај микромрежи поврзани на локалната електрична мрежа, со посебен фокус на интеграција на обновливи извори на енергија, системи за складирање и флексибилни потрошувачи.
- Развој на подобрен генетски алгоритам (MGES-GA) со модифициран селекциски механизам и механизам за повторна евалуација, кој обезбедува подобрен баланс помеѓу истражувањето на просторот на решенија и испитување на веќе одбраните добри решенија, како и намалување на предвремената конвергенција.
- Интеграција на напонските ограничувања директно во оптимизацискиот процес, со што се обезбедува технички изводливо и практично применливо решение за управување со микромрежи.
- Сеопфатна анализа на перформансите на предложениот алгоритам е спроведена во услови на построги оперативни ограничувања, кои опфаќаат построги дозволени отстапувања на напонот во јазлите на мрежата и намалена можност за размена на електрична енергија со главната електроенергетска мрежа. Со ова се демонстрира стабилноста, робустноста и адаптивноста на алгоритмот при работа во покомплексни и поограничени работни услови.
- Валидација преку мултимодални тест-функции и споредба со алтернативни алгоритми, со што се потврдува способноста на алгоритмот за избегнување локални оптимуми и стабилна конвергенција.
- Подобрување на економската и техничката одржливост на микромрежите, преку оптимално управување со локалните ресурси, намалени оперативни трошоци и стабилизирани напонски профили.
- Предложеното подобрување на генетскиот алгоритам има поширока применливост и може да се искористи и во други научни и инженерски дисциплини, како што се транспортните системи, медицинската оптимизација, урбаното и просторното планирање, логистиката и индустриските процеси, каде што се јавуваат сложени повеќекритериумски оптимизациски проблеми.

Дополнителната анализа и интерпретација на резултатите добиени во ова истражување јасно го истакнуваат нивното суштинско значење, како од научен, така и од практичен аспект. Резултатите од споредбите со различни алгоритми за оптимизација на една променлива и повеќекритериумска оптимизација не претставуваат само квантитативна потврда на подобрувањата што ги овозможува MGES-GA, туку и квалитативен показател за начинот на кој предложениот алгоритам го менува процесот на донесување оптимизациски одлуки во микромрежни системи. Намалувањето на оценката на погодност во оптимизацијата на една променлива, како и постигнувањето на пониски оперативни трошоци и напонски девијации во повеќецелниот контекст, укажуваат дека MGES-GA не ја подобрува оптимизацијата само маргинално, туку воведува поефикасен механизам за пребарување на просторот на можни решенија.

Особено значајно е тоа што подобрените резултати не се постигнати по цена на нарушување на техничките ограничувања, туку напротив, алгоритмот систематски

обезбедува стабилни напонски профили низ сите јазли на микромрежата. Ова има директно практично значење, бидејќи напонските девијации се еден од клучните ограничувачки фактори при реалната имплементација на микромрежи со висока пенетрација на обновливи извори на енергија и флексибилни потрошувачи, како што се електричните возила. Намалениот број и интензитет на напонските отстапувања, забележани кај решенијата добиени со MGES-GA, укажуваат на подобрен квалитет на електричната енергија и повисоко ниво на сигурност за крајните корисници.

Резултатите од сценаријата со вклучување на електрични возила дополнително го нагласуваат значењето на предложениот пристап. И покрај зголемената динамичност и комплексност на системот, MGES-GA покажува способност да ја следи временската варијација на цените на електричната енергија и соодветно да ги активира најекономичните достапни ресурси. Фактот дека алгоритмот во одредени периоди генерира решенија кои наликуваат на основниот начин на управување со енергија (BEMS), но сепак резултира со пониски вкупни трошоци, има особено значење. Ова укажува дека MGES-GA не фаворизира комплексни стратегии по секоја цена, туку е способен да препознае кога поедноставен пристап е економски најисплатлив, што претставува важна карактеристика за практична примена во реални системи.

Дополнителната валидација на алгоритмот на модифициран IEEE 33-bus систем, кој вклучува различни типови распределени енергетски ресурси и системи за складирање, ја потврдува неговата поширока примена. Во споредба со MOPSO, кој покрај ГА е еден од најупотребуваните алгоритми за оптимална распределба на моќности во микромрежи, MGES-GA покажува конкурентни, а во одредени случаи и супериорни перформанси, особено во однос на искористување на достапните ресурси во услови на динамичка цена на електричната енергија и контролата на напонските девијации. Ова е од особено значење, бидејќи укажува дека еволутивните алгоритми, кога се соодветно подобрени, можат успешно да се натпреваруваат со методи од областа на вештачката интелигенција, дури и во сложени и динамични сценарија.

Значењето на резултатите се согледува и преку анализата на различни конфигурации. Иако сценаријата со дополнителни извори, како горивни ќелии и микротурбини, водат до зголемување на вкупниот профит, истовремено се забележува и пораст на оперативните трошоци и на напонските девијации. Ова јасно укажува дека максимизацијата на профитот не секогаш е усогласена со техничката стабилност на системот и ја нагласува потребата од повеќекритериумска оптимизација. MGES-GA токму во овој контекст го покажува своето најголемо значење, бидејќи овозможува идентификација на компромисни решенија кои ги балансираат економските и техничките аспекти на работата на микромрежата.

Севкупно, значењето на резултатите од ова истражување лежи во фактот дека тие не претставуваат изолирани подобрувања за конкретен тест-систем, туку демонстрираат општ принцип на ефикасна оптимизација на сложени енергетски системи. MGES-GA се покажува како алгоритам што е способен да се адаптира на различни нивоа на комплексност, да обезбеди стабилни и економски оптимални решенија и да одговори на реалните предизвици со кои се соочуваат современите микромрежи. Со тоа, резултатите од оваа дисертација имаат трајно значење како за понатамошни научни истражувања, така и за практичната имплементација на напредни системи за управување со енергија во идните паметни електроенергетски мрежи.

Истражувањето во оваа докторска дисертација докажува дека MGES-GA претставува робустен и ефикасен оптимизациски алгоритм кој успешно одговара на комплексните барања на модерните микромрежни системи. Неговата примена има потенцијал значително да придонесе кон подобрување на економската ефикасност, техничката стабилност и одржливоста на идните паметни ЕЕС, со што истражувањето остварува јасна научна и практична вредност.

8.2. НАСОКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА

Предложениот оптимизациски алгоритам ги поставува темелите на современ и флексибилен метод за оптимално управување со микромрежи, со потенцијал за директна инкорпорација во реални електроенергетски мрежи. Развиениот пристап покажува висока ефикасност и стабилност во разгледуваните сценарија, меѓутоа дополнителните анализи и проширувања би можеле дополнително да ги подобрат неговите перформанси и да ја зголемат неговата применливост во посложени и подинамични системи. Со оглед на зголемената пенетрација на ОИЕ, флексибилни потрошувачи и децентрализирани производни единици, ваквите проширувања се од особено значење за идните паметни ЕЕС.

Иако предложениот MGES-GA-алгоритам покажува добри перформанси во решавањето на разгледуваниот проблем, постојат одредени ограничувања кои треба да се земат предвид. Имено, оптимизацијата е спроведена со примена на пондериран збир (weighted-sum), при што повеќекритериумскиот проблем се трансформира во еднокритериумска функција. Овој пристап овозможува едноставна имплементација и анализа на компромисни решенија, но има ограничување во однос на способноста да ги идентификува сите делови од Парето фронтот, особено во случај на неконвексни региони. Дополнително, резултатите зависат од изборот на тежинскиот параметар, што може да влијае врз добиеното решение и бара внимателен избор или анализа за различни вредности. Исто така, споредбата со алгоритми како NSGA-II, кои се базирани на Парето доминација, е индикативна, бидејќи овие методи го решаваат проблемот со различен пристап. Овие ограничувања не ја намалуваат применливоста на предложениот алгоритам, туку укажуваат на можности за понатамошни истражувања, како што е проширување кон вистински повеќекритериумски оптимизациски пристапи.

Една од клучните насоки за идно истражување е интеграцијата на неизвесност и стохастичност во оптимизацискиот модел. Производството од обновливи извори на енергија, како и потрошувачката на електрична енергија, се карактеризираат со изразена варијабилност и непредвидливост, што бара примена на стохастички или на робусни оптимизациски техники. Вклучувањето на вакви пристапи би овозможило алгоритмот да генерира решенија кои се поотпорни на грешки во прогнозите и на неочекувани промени во системот, со што би се зголемила неговата практична вредност.

Понатаму, истражувањето може да се прошири кон анализа на системи со повеќе меѓусебно поврзани микромрежи и хиерархиски поставени системи за управување со енергија. Во вакви системи, оптимизацијата не се однесува само на локално ниво, туку и на координацијата помеѓу различни микромрежи и на нивната интеракција со дистрибутивната и преносната мрежа. Примената на предложениот алгоритам во ваков

контекст би овозможила анализа на неговата скалабилност, стабилност и комуникациски барања.

Дополнителна значајна насока за идно истражување е проширување на моделот со земање предвид на ЕВ кои, покрај тоа што претставуваат стохастично оптоварување, можат да функционираат и како дистрибуирани системи за складирање на електрична енергија преку vehicle to grid (V2G) технологии. Ова би довело нов степен на флексибилност во микромрежата и би овозможило подлабока анализа на синергијата помеѓу електричните возила, батериските системи и обновливите извори.

Конечно, тестирањето на предложениот алгоритам на дигитален симулатор во реално време (Real Time Digital Simulator) би претставувало важен чекор кон верификација на неговата примена во реални, сложени електроенергетски системи. Ваквото тестирање би овозможило анализа на динамичките перформанси, стабилноста и пресметковната изводливост на алгоритмот во услови блиски до реалните, со што би се зајакнала довербата во неговата практична примена.

ПРИЛОГ А - ПСЕВДОКОД НА ПРЕДЛОЖЕНИОТ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО МИКРОМРЕЖИ

Во овој прилог е прикажан псевдокод за предложениот MGES-GA. Кодот ја прикажува логиката за негово извршување по чекори.

Алгоритам 1 Псевдокод на предложениот алгоритам MGES-GA
<p>1) Влезни податоци за P_{load}, P_{pv}, P_{wt}, $price_{ee}$, $price_{DEG}$, $price_{FC}$, $price_{MT}$, $price_{bat}$, како и технички ограничувања на опремата и напонот,</p> <p>2) Иницијализација: генерирање на 100 случајни вредности за променливите: [P_{FC}, P_{MT}, P_{DEG}, P_{bat1}, P_{bat2}, P_{grid}]</p> <p>3) Пронаоѓање на оптимално решенија за секој час</p> <p>For $t=1:T$ do</p> <p style="padding-left: 20px;">If $P_{pv}(t) + P_{wt}(t) \geq P_{load}(t)$ then</p> <p style="padding-left: 40px;">$P_{excess}(t) = P_{pv}(t) + P_{wt}(t) - P_{load}(t)$</p> <p style="padding-left: 40px;">check $SOC_{bat}(t)$ (for each battery)</p> <p style="padding-left: 40px;">If $price_{ee}(t) \leq (price_{DEG} \ \&\& \ price_{FC} \ \&\& \ price_{MT} \ \&\& \ price_{bat})$</p> <p style="padding-left: 60px;">Buy electrical energy from the grid and store it in batteries <i>otherwise</i> sell</p> <p style="padding-left: 40px;">Else If $price_{ee}(t) > (price_{DEG} \ \&\& \ price_{FC} \ \&\& \ price_{MT} \ \&\& \ price_{bat})$</p> <p style="padding-left: 60px;">Sell electrical energy to the grid</p> <p>$[P_{FC}, P_{MT}, P_{DG}, P_{bat}, P_{grid}] = MGES_GA(P_{pv}(t), P_{wt}(t), P_{grid_sell}, P_{bat_ch}, P_{FC_max}, P_{MT_max}, P_{DG_max}, price_{ee}(t))$</p> <p style="padding-left: 40px;">update $SOC_{bat1}(t)$ (for each battery)</p> <p style="padding-left: 20px;">end If</p> <p style="padding-left: 20px;">Else If $P_{pv}(t) + P_{wt}(t) \leq P_{load}(t)$ then</p> <p style="padding-left: 40px;">$P_{needed}(t) = P_{load}(t) - (P_{pv}(t) + P_{wt}(t))$</p> <p style="padding-left: 40px;">check $SOC_{bat}(t)$ (for each battery)</p> <p style="padding-left: 40px;">If $price_{ee}(t) \leq (price_{DEG} \ \&\& \ price_{FC} \ \&\& \ price_{MT} \ \&\& \ price_{bat})$</p> <p style="padding-left: 60px;">Купи електрична енергија од мрежа и складирај ја во батериите</p> <p style="padding-left: 40px;">Else If $price_{ee}(t) > (price_{DEG} \ \&\& \ price_{FC} \ \&\& \ price_{MT} \ \&\& \ price_{bat})$</p> <p style="padding-left: 60px;">Продади го вишокот на електрична енергија во мрежа и празни ги батериите; користи ја моќноста од ГК, МТ и ДГ за да се задоволи побарувачката на електрична енергија</p>

$[P_{FC}, P_{MT}, P_{DG}, P_{bat1}, P_{grid}] = \text{MGES_GA}(P_{pv}(t), P_{wt}(t), P_{grid_sell}, P_{bat_ch}, P_{bat_dis}, P_{FC_max}, P_{MT_max}, P_{DG_max}, price_{ee}(t))$

update SOC_{bat}(t) (for each battery)

end If
end If
end For

Алгоритам 2 Псевдокод на повикувачката функција MGES-GA (оптимизациски цели)

function $[P_{FC}, P_{MT}, P_{DEG}, P_{bat}, P_{EV_bat}, P_{grid}] = \text{MGES_GA}(P_{pv}(t), P_{wt}(t), P_{grid_sell}, P_{bat_ch}, P_{bat_dis}, P_{FC_max}, P_{MT_max}, P_{DEG_max}, price_{ee}(t))$

Compute $\min g = w f_1^{norm} + (1 - w) f_2^{norm}, \forall w \in [0,1]$

end function

Алгоритам 3 Псевдокод на функцијата за оценување на индивидуи во генерацијата родители во рамки на MGES-GA

Function expectation = myfunfit(scores, nParents)

For i=1:length(scores)

expectation(i)=sum(nParents)*scores(i)/sum(scores);

end for
end function

Алгоритам 4 Псевдокод на функцијата за селекција во рамки на MGES-GA

Function parents = myfun(expectation, nParents, options)

n=length(expectation);

If n>1

maks=mean(abs(expectation));

Else

maks=max(abs(expectation));

end if

t=1;

For i=1:n

If abs(expectation(i,1))>maks(1,1)

p(t)=abs(expectation(i,1))/abs(sum(expectation(:,1)));

soodvetni_br(t)=i;

t=t+1;

Else

Вкрстување на разгледуваниот хромозом со најдобриот хромозом и испитување на перформансот на новокреираните хромозоми.

```
If новокреираните хромозоми кои имаат оценка на погодност поголема или  
еднаква на  
    најдобриот хромозом, тогаш тие го заземаат местото на родител на  
    разгледуваниот хромозом i.  
end if  
end if  
end for  
parents = randsample(soodvetni_br, nParents, true, p);  
end function
```

ПРИЛОГ В - IEEE - EUROPEAN LOW VOLTAGE FEEDER

Параметрите на оваа тест-мрежа се преземени од [134].

Табела Прилог В-1 Параметри на IEEE - European Low Voltage Feeder

Име на вод	Јазол 1	Јазол 2	Фази	Должина [m]	Код
LINE1	1	2	ABC	21,867341	4c_70
LINE2	2	3	ABC	5,9049	2c_16
LINE3	2	4	ABC	12,6224	4c_70
LINE4	3	5	ABC	5,3513	2c_16
LINE5	3	10	ABC	6,747143	2c_16
LINE6	4	6	ABC	5,7265	2c_16
LINE7	4	8	ABC	21,15538	4c_70
LINE8	6	7	ABC	6,1526	2c_16
LINE9	6	13	ABC	6,44409	2c_16
LINE10	8	9	ABC	8,2583	2c_16
LINE11	8	14	ABC	13,37622	4c_70
LINE12	9	11	ABC	4,0366	2c_16
LINE13	9	12	ABC	4,0366	2c_16
LINE14	14	15	ABC	8,79792	4c_70
LINE15	14	19	ABC	14,67517	4c_.35
LINE16	15	16	ABC	4,17271	4c_.35
LINE17	15	28	ABC	28,18684	4c_.1
LINE18	16	17	ABC	16,0946	4c_.35
LINE19	16	37	ABC	14,34716	2c_16
LINE20	17	31	ABC	11,18521	2c_16
LINE21	17	18	ABC	16,3325	4c_.35
LINE22	18	36	ABC	10,40682	2c_16

Име на вод	Јазол 1	Јазол 2	Фази	Должина [m]	Код
LINE23	31	34	ABC	6,8846	2c_16
LINE24	31	39	ABC	4,80218	2c_16
LINE25	36	40	ABC	7,11685	2c_16
LINE26	36	42	ABC	3,324801	2c_16
LINE27	19	20	ABC	12,3	4c_.35
LINE28	19	21	ABC	18,5373	2c_16
LINE29	20	22	ABC	12,4482	2c_16
LINE30	20	23	ABC	14,1361	4c_.35
LINE31	22	25	ABC	6,9136	2c_16
LINE32	22	33	ABC	8,2381	2c_16
LINE33	23	26	ABC	18,4592	2c_16
LINE34	23	24	ABC	7,3714	4c_.35
LINE35	24	27	ABC	13,6223	2c_16
LINE36	27	29	ABC	5,3022	2c_16
LINE37	27	30	ABC	5,3022	2c_16
LINE38	28	32	ABC	4,06958	4c_.1
LINE39	28	49	ABC	14,523658	2c_16
LINE40	32	35	ABC	4,9913	4c_.1
LINE41	32	46	ABC	14,96775	2c_16
LINE42	35	38	ABC	8,23019	4c_.06
LINE43	35	48	ABC	7,301714	4c_.1
LINE44	38	41	ABC	10,6794	4c_.06
LINE45	38	44	ABC	7,69863	2c_16
LINE46	44	47	ABC	5,1973	2c_16
LINE47	44	50	ABC	8,52385	2c_16

Име на вод	Јазол 1	Јазол 2	Фази	Должина [m]	Код
LINE48	41	43	ABC	6,6729	4с_.06
LINE49	41	45	ABC	12,7504	2с_16
LINE50	43	52	ABC	15,785302	2с_16
LINE51	43	53	ABC	37,66329	4с_.06
LINE52	48	51	ABC	7,37111	4с_.1
LINE53	48	54	ABC	21,23445	2с_16
LINE54	51	58	ABC	26,309	4с_.1
LINE55	51	61	ABC	10,680624	2с_16
LINE56	61	62	ABC	5,5837	2с_16
LINE57	61	64	ABC	9,8006	2с_16
LINE58	58	60	ABC	10,4722	2с_16
LINE59	58	68	ABC	2,936771	4с_.1
LINE60	53	55	ABC	13,5743	4с_.06
LINE61	53	76	ABC	16,52655	2с_16
LINE62	55	56	ABC	10,2769	2с_16
LINE63	55	59	ABC	16,05858	4с_.06
LINE64	56	57	ABC	6,6786	2с_16
LINE65	56	67	ABC	5,54817	2с_16
LINE66	59	63	ABC	10,65842	2с_16
LINE67	59	65	ABC	12,9494	4с_.06
LINE68	63	66	ABC	6,6554	2с_16
LINE69	63	72	ABC	6,37701	2с_16
LINE70	65	69	ABC	7,30091	4с_.06
LINE71	65	78	ABC	13,71347	2с_16
LINE72	78	80	ABC	5,34659	2с_16

Име на вод	Јазол 1	Јазол 2	Фази	Должина [m]	Код
LINE73	78	81	ABC	6,02494	2c_16
LINE74	69	75	ABC	15,05198	2c_16
LINE75	69	70	ABC	10,2425	4c_.06
LINE76	70	77	ABC	16,0515	2c_.0225
LINE77	68	71	ABC	4,77453	4c_.1
LINE78	68	97	ABC	15,715408	2c_16
LINE79	71	73	ABC	14,0043	2c_16
LINE80	71	74	ABC	9,089	4c_.1
LINE81	74	79	ABC	2,70115	4c_.1
LINE82	74	83	ABC	13,76873	2c_16
LINE83	79	82	ABC	9,62961	4c_.1
LINE84	79	98	ABC	15,18983	2c_16
LINE85	98	103	ABC	9,7761	2c_16
LINE86	98	105	ABC	2,29182	2c_16
LINE87	105	106	ABC	2,82	2c_16
LINE88	105	107	ABC	7,5091	2c_16
LINE89	82	84	ABC	8,1445	2c_16
LINE90	82	85	ABC	10,5254	4c_.1
LINE91	84	87	ABC	6,4573	2c_16
LINE92	84	95	ABC	7,35786	2c_16
LINE93	85	88	ABC	14,9747	2c_16
LINE94	85	86	ABC	2,1907	4c_.1
LINE95	86	89	ABC	8,7308	4c_.06
LINE96	89	90	ABC	15,2459	4c_.06
LINE97	89	111	ABC	12,748019	2c_16

Име на вод	Јазол 1	Јазол 2	Фази	Должина [m]	Код
LINE98	111	112	ABC	3,2587	2c_16
LINE99	111	115	ABC	9,6933	2c_16
LINE100	90	91	ABC	11,26017	2c_16
LINE101	90	92	ABC	17,0068	4c_.06
LINE102	91	93	ABC	6,7778	2c_16
LINE103	91	102	ABC	5,756153	2c_16
LINE104	92	94	ABC	10,8733	2c_16
LINE105	92	99	ABC	19,4603	4c_.06
LINE106	94	96	ABC	7,129	2c_16
LINE107	94	104	ABC	5,65812	2c_16
LINE108	99	100	ABC	2,8031	4C_95_SAC_XC
LINE109	100	101	ABC	13,1431	4c_.06
LINE110	101	108	ABC	10,12454	2c_.0225
LINE111	99	109	ABC	10,77222	2c_16
LINE112	108	110	ABC	7,50839	2c_.0225
LINE113	108	114	ABC	9,33893	2c_.0225
LINE114	109	113	ABC	10,3363	35_SAC_XSC
LINE115	109	116	ABC	8,09168	2c_16

Табела Прилог В-2 Параметри на водови во IEEE - European Low Voltage Feeder

Код	Фази	R ₁ [Ω]	X ₁ [Ω]	R ₀ [Ω]	X ₀ [Ω]
2c_.0225	ABC	1,257	0,085	1,257	0,085
2c_16	ABC	1,15	0,088	1,2	0,088
35_SAC_XSC	ABC	0,868	0,092	0,76	0,092
4c_.06	ABC	0,469	0,075	1,581	0,091
4c_.1	ABC	0,274	0,073	0,959	0,079
4c_.35	ABC	0,089	0,0675	0,319	0,076
4c_70	ABC	0,446	0,071	1,505	0,083
4c_95_SAC_XC	ABC	0,322	0,074	0,804	0,093

ПРИЛОГ С - IEEE 33-BUS NETWORK

Табела Прилог С-1 Параметри на IEEE 33-bus мрежа

Јазол 1	Јазол 2	R [Ω]	X [Ω]	P [kW]	Q [kVAr]
1	2	0,0922	0,0477	0	0
2	3	0,4930	0,2511	100	60
3	4	0,3660	0,1864	90	40
4	5	0,3811	0,1941	120	80
5	6	0,8190	0,7070	60	30
6	7	0,1872	0,6188	60	20
7	8	1,7114	1,2351	200	100
8	9	1,0300	0,7400	200	100
9	10	1,0400	0,7400	60	20
10	11	0,1966	0,0650	60	20
11	12	0,3744	0,1238	45	30
12	13	1,4680	1,1550	60	35
13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	15	0,5910	0,5260	120	80
15	16	0,7463	0,5450	60	10
16	17	1,2890	1,7210	60	20
17	18	0,7320	0,5740	60	20
2	19	0,1640	0,1565	90	40
19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	22	0,7089	0,9373	90	40
3	23	0,4512	0,3083	90	40
23	24	0,8980	0,7091	90	50
24	25	0,8960	0,7011	420	200
6	26	0,2030	0,1034	420	200
26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	28	1,0590	0,9337	60	25
28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	31	0,9744	0,9630	150	70
31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	33	0,3410	0,5302	0	0

ТРУДОВИ ОБЈАВЕНИ ОД ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА**ТРУДОВИ ОБЈАВЕНИ ВО СПИСАНИЈА СО ФАКТОР НА ВЛИЈАНИЕ**

- [1] Dimishkovska, N., Iliev, A. “Application of Dynamic Programming for Optimal Unit Commitment and Economic Dispatch of Distribution Networks”. *International Journal on Information Technologies and Security*, No.1 (vol. 13), 2021, pp. 17-26. (IF=1.449)
- [2] Dimishkovska Krsteski, N., Nikolova-Poceva, S., Chaushevski, A., Iliev, A. Optimal Energy Management of Hybrid Stand-Alone Power System by Using Dynamic Programming. *International Journal on Information Technologies and Security*, No SP3 (vol. 13), 2021, pp. 27-38. (IF=1.449)
- [3] Dimishkovska Krsteski, N., Iliev, A. “Modified genetic algorithm for unit commitment of grid connected microgrids under real time pricing conditions”. *International Journal on Information Technologies and Security*, vol.16, no.3, 2024, pp. 81-90. <https://doi.org/10.59035/HNVG2870> (IF=1.0)
- [4] Dimishkovska Krsteski, N., Iliev, A. Mean-Guided Elite Selection Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization of Operational Costs and Voltage Control in Grid-Connected Microgrids.” *IET Renewable Power Generation* 20, no. 1, 2026, <https://doi.org/10.1049/rpg2.70178> (IF=2.9)

ТРУДОВИ ОБЈАВЕНИ НА МЕЃУНАРОДНИ КОНФЕРЕНЦИИ

- [5] Dimishkovska, N., Iliev, A.: Application of the method of dynamic programming for solving the optimal unit commitment problem in distribution networks with local distributed generation. 9th International Scientific Conference “Techsys 2020” – Engineering, Technologies and Systems, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch 14-16 May 2020
- [6] Dimishkovska, N., Iliev, A., Dimitrov, D.: Unit Commitment of Distributed Energy Resources in Distribution Networks Using the Dynamic Programming Method. Proceedings of the 34th International Conference on Information Technologies (InfoTech-2020) IEEE Conference, Rec. # 49733, 17-18 September 2020, Bulgaria pp. 99-109.
- [7] Dimishkovska, N., Iliev, A., Nikolova- Poceva, S. Unit Commitment and Economic Dispatch of Hybrid Microgrid with Residential Load. Proceeding of the 34th International Conference on Information Technologies (InfoTech-2021), 17-18 September 2021, Bulgaria, pp. 97-106.
- [8] Dimishkovska, N., Iliev, A., Postolov, B. Selecting an Optimisation Algorithm for Optimal Energy Management in Grid-Connected Hybrid Microgrid with Stochastic Load. ETAI Conference Proceedings, Vol. 2, Issue 1. 2021

- [9] Dimishkovska Krsteski, N., Iliev, A., Dimitrov, D. "Optimization of Grid-Connected PV/Wind/Battery Microgrid Using Genetic Algorithm", Internaional Conference GREDIT 2022, University of St. Cyril and Methodius, Technical Campus, Skopje, North Macedonia, 5th-8th May 2022.
- [10] Dimishkovska Krsteski, N. and Iliev, A. "Energy Management and Voltage Regulation of Grid-Connected Microgrid Using Genetic Algorithm," 2022 International Conference on Information Technologies (InfoTech), pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/InfoTech55606.2022.9897114>, Varna, Bulgaria, 15-16 September 2022: IEEE.
- [11] Димишковска Крстески, Н., Илиев, А. Зенку И.: Оптимално управување со текови на енергија во микромрежи приклучени на дистрибутивната мрежа. Меѓународна конференција „ЕНЕРГЕТИКА 2022“. РС Македонија, 21-23 септември, 2022
- [12] Димишковска Крстески, Н., Илиев, А. Оптимизација на микромрежи поврзани на дистрибутивна мрежа со примена на подобрен генетски алгоритам. *Меѓународна конференција „ЕНЕРГЕТИКА 2024“*. РС Македонија, 2-4 октомври, 2024

ТРУД ОБЈАВЕН НА РАБОТИЛНИЦА

- [13] Dimishkovska Krsteski, N., Iliev, A. Optimization of Grid-Connected Microgrids with Residential Prosumers Using an Improved Genetic Algorithm, 1st International Workshop on Artificial Intelligence for Sustainable Development (ARISDE 2024), 2024

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. S. Thirunavukkarasu, M. Seyedmahmoudian, E. Jamei, B. Horan, S. Mekhilef и Alex Stojcevski, “Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review,” *Energy Strategy Reviews*, том 43, бр. 100899, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899>.
- [2] K. Ullah, J. Quanyuan, G. Geng, R. A. Khan, S. Aslam and W. Khan, “Optimization of Demand Response and Power-Sharing in Microgrids for Cost and Power Losses,” *Energies*, Vols. 15, 3274, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15093274>.
- [3] N. Mukesh, “Empowering Energy Evolution: The rise of microgrid autonomy,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 6-11, <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3385948>, 2024.
- [4] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu and J. M. Guerrero, “Microgrids: A review, outstanding issues and future trends,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, no. 101127, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>.
- [5] S. Katoch, S. Chauhan и V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimed Tools Appl*, том 80, pp. 8091–8126, <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>, 2021.
- [6] Y. Li, Z. Lin and R. Y. Li, “Smart Interconnected Distribution Substation Network With Integrated Tie Converter: A promising technology,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 85-91, <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3423236>, 2024.
- [7] M. González-Niño, O. Sierra-Herrera, W. Pineda-Muñoz, N. Muñoz-Galeano and J. López-Lezama, “Exploring Technology Trends and Future Directions for Optimized Energy Management in Microgrids,” *Information*, vol. 16, no. 183, 2025, <https://doi.org/10.3390/info16030183>.
- [8] N. Salehi, H. Martínez-García, G. Velasco-Quesada and J. M. Guerrero, “A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 15935-15955, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142810>, 2022.
- [9] E. Hernández-Mayoral, M. Madrigal-Martínez, J. Mina-Antonio, R. Iracheta-Cortez, J. Enríquez-Santiago, O. Rodríguez-Rivera, G. Martínez-Reyes and E. A. Mendoza-Santos, “A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources,” *Sustainability*, vol. 15, no. 9847, 2023, <https://doi.org/10.3390/su15129847>.
- [10] L. An and T. Tuan, “Dynamic Programming for Optimal Energy Management of Hybrid Wind–PV–Diesel–Battery,” *Energies*, vol. 11, no. 3039, <https://doi.org/10.3390/en11113039>, 2018, .

- [11] L. M. Costa and G. Kariniotakis, "A Stochastic Dynamic Programming Model for Optimal Use of Local Energy Resources in a Market Environment," in *IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, Switzerland, pp. 449-454, <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538359>, 2007.
- [12] H. Kanchev, B. Francois and V. Lazarov, "Unit commitment by dynamic programming for microgrid operational planning optimisation and emission reduction," in *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference*, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 502-507, <https://doi.org/10.1109/ACEMP.2011.6490650>, 2011.
- [13] X. Wang, Y. Ji, J. Wang, Y. Wang and L. Qi, "Optimal energy management of microgrid based on multi-parameter dynamic programming," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 16, no. 6, <https://doi.org/10.1177/1550147720937141>, 2020.
- [14] Y. Levron, J. M. Guerrero and Y. Beck, "Optimal Power Flow in Microgrids With Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3226-3234, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2245925>, 2013.
- [15] I. MA, A. T, A. M, M. AH and R. MB, "A Day-Ahead Dynamic Optimal Power Flow With Renewable Energy Integration in Smart Grids," *Front. Energy Res.*, vol. 9, no. 696837, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.696837>, 2021.
- [16] M. Shaterabadi, M. A. Jirdehi, V. S. Tabar and S. Galvani, "Advanced dynamic programming for optimal microgrid energy management under RER intermittency," *Renewable Energy*, Vols. 256, Part C, no. 124077, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124077>, 2026.
- [17] A. Akter, E. I. Zafi, N. H. D. R. Joysoyal, S. K. Sarker, L. Li, S. M. Muyeen, S. K. Das и I. Kamwa, "A review on microgrid optimization with meta-heuristic techniques: Scopes, trends and recommendation,," *Energy Strategy Reviews*, Vol. 51, 101298, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101298>.
- [18] A. A. Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar and A. Anpalagan, "A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids,," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1664-1683, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.259>, 2016.
- [19] K. Gao, T. Wang, C. Han, J. Xie, Y. Ma and R. Peng, "A Review of Optimization of Microgrid Operation," *Energies*, Vols. 14, 2842, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14102842>.
- [20] T. He, H. Wang and S. W. Yoon, "Comparison of Four Population-Based Meta-Heuristic Algorithms on Pick-and-Place Optimization," *Procedia Manufacturing*, vol. 17, pp. pp. 944-951, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.112>, 2018.

- [21] G. Papazoglou and P. Biskas, “Review and Comparison of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization in the Optimal Power Flow Problem,” *Energies*, vol. 16(3):1152, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16031152>.
- [22] H. Figueroa-Saavedra, D. Sanin-Villa and L. Grisales-Noreña, “A Tuned Parallel Population-Based Genetic Algorithm for BESS Operation in AC Microgrids: Minimizing Operational Costs, Power Losses, and Carbon Footprint in Grid-Connected and Islanded Topologies,” *Electricity*, vol. 6, no. 45, 2025, <https://doi.org/10.3390/electricity6030045>.
- [23] L. Grisales-Noreña, H. Vega, O. Montoya, V. Botero-Gómez и D. Sanin-Villa, “Cost Optimization of AC Microgrids in Grid-Connected and Isolated Modes Using a Population-Based Genetic Algorithm for Energy Management of Distributed Wind Turbines,” *Mathematics*, 13(5), 704, p. <https://doi.org/10.3390/math13050704>, 2025.
- [24] A. Cabrera-Tobar, A. Massi Pavan, G. Petrone and G. Spagnuolo, “A Review of the Optimization and Control Techniques in the Presence of Uncertainties for the Energy Management of Microgrids.,” *Energies*, vol. 15, no. 9114, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15239114>.
- [25] A. Elmouatamid, R. Ouladsine, M. Bakhouya, N. El Kamoun, M. Khaidar и K. Zine-Dine, “Review of Control and Energy Management Approaches in Micro-Grid Systems,” *Energies*, том 14(1): 168, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14010168>.
- [26] S. Leonori, M. Pascherno, F. M. F. Mascioli и A. Rizzi, “Optimization Strategies for Microgrid Energy Management Systems by Genetic Algorithms,” *Applied Soft Computing Journal*, , Томови %1 од %286, 105903, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105903>.
- [27] V. Guliashki и G. Marinova, “An Accelerated Genetic Single Objective Algorithm for Optimization of Energy Flows in Microgrids,” во %1 *25th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Maribor, Slovenia, 2018.
- [28] M. A. Majeed, S. Phichisawat, F. Asghar и U. Hussan, “Optimal Energy Management System for Grid-Tied Microgrid: An Improved Adaptive Genetic Algorithm,” *IEEE Access*, том 11, pp. 117351-117361, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3326505>, 2023.
- [29] A. M. Abdelshafy, J. Jurasz, H. Hassan and A. M. Mohamed, “Optimized energy management strategy for grid connected double storage (pumped storage-battery) system powered by renewable energy resources,” *Energy vol.192*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116615>..
- [30] V. V. Babu, J. P. Roselyn and P. Sundaravadivel, “Multi-objective genetic algorithm based energy management system considering optimal utilization of grid and degradation of battery storage in microgrid.,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 5992-6005, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.067>, 2023.

- [31] A. Askarzadeh, “A Memory-Based Genetic Algorithm for Optimization of Power Generation in a Microgrid,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1081-1089, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2765483>, 2018.
- [32] K. Ullah, G. Hafeez, I. Khan, S. Jan и N. Javaid, “A multi-objective energy optimization in smart grid with high penetration of renewable energy sources,” *Applied Energy*, том 299, бр. 117104, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117104>.
- [33] B. Guddanti и M. S. Ilindala, “Cost Saving Optimization Model for Energy Management System of a DC Microgrid Under Real Time Pricing,” во%1 *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Baltimore, MD, USA, 2019.
- [34] H. Z. Liang and H. B. Gooi, “Unit commitment in microgrids by improved genetic algorithm,” in *Conference Proceedings IPEC*, 2010.
- [35] S. Sen, K. D. Gupta, S. Poudyal and M. M. Ahsan, “A Genetic Algorithm Approach to Optimize Dispatching for A Microgrid Energy System with Renewable Energy Sources,” in *5th International Conference on Computer Science and Information Technology (CSTY 2019)*, vol.9, no.14, Dubai, UAE, 2019.
- [36] Y. He, Z. Han, K. Sun, X. Wu, X. Du, H. Wang и H. Lu, “Economic optimization scheduling of multi-microgrid based on improved genetic algorithm,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, том 17, бр. 23, pp. 5298-5307, <https://doi.org/10.1049/gtd2.13043>, 2023.
- [37] M. Nemati, K. Bennimar, S. Tenbohlen, L. Tao, H. Mueller and M. Braun, “Optimization of microgrids short term operation based on an enhanced genetic algorithm,” in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015.
- [38] T. Yin, C. Du, A. Chen, T. Jiang, S. Guo и H. Zhang, “Improved Genetic Algorithm-Based Optimization Approach for Energy Management Of Microgrid,” во%1 *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, Nanjing, China, 2020.
- [39] M. Dashtdar et al., “Improving the Power Quality of Island Microgrid With Voltage and Frequency Control Based on a Hybrid Genetic Algorithm and PSO,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 105352-105365, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3201819, 2022.
- [40] H. R. Sridevi, S. V. Kulkarni and H. M. Ravikumar, “Voltage Regulation in an Islanded Microgrid using a GA-based Optimization Technique,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 70, no. 4, pp. 15-20, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I4P202>, 2022.
- [41] F. Zhao, J. Yuan and N. Wang, “Dynamic Economic Dispatch Model of Microgrid Containing Energy Storage Components Based on a Variant of NSGA-II Algorithm,” *Energies*, vol. 12, no. 5: 871, p. <https://doi.org/10.3390/en12050871>, 2019.
- [42] A. O. Rousis, I. Konstantelos and G. Strbac, “A Planning Model for a Hybrid AC–DC Microgrid Using a Novel GA/AC OPF Algorithm,,” *IEEE Transactions on Power*

- Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 227-237, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2924137>, 2020.
- [43] L. Alfieri, G. Carpinelli, A. Bracale and P. Caramia, "On the optimal management of the reactive power in an industrial hybrid microgrid: A case study," in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Italy, 2018.
- [44] E. Sfikas, Y. Katsigiannis и P. Georgilakis, "Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, том 67, pp. 101-113, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.009>, 2015,.
- [45] A. Raghavan, P. Maan and A. K. B. Shenoy, "Optimization of Day-Ahead Energy Storage System Scheduling in Microgrid Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173068-173078, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025673>, 2020.
- [46] A. T. Eseye, D. Zheng, H. Li и J. Zhang, "Grid-Price Dependent Optimal Energy Storage Management Strategy for Grid-Connected Industrial Microgrids," во%1 *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, USA, 2017.
- [47] M. Ruiz-Cortés et al., "Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 468-477, doi: 10.1109/TEC.2018.2878351, 2019.
- [48] C. Li, F. d. Bosio, F. Chen, S. K. Chaudhary, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Economic Dispatch for Operating Cost Minimization Under Real-Time Pricing in Droop-Controlled DC Microgrid," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 587-595, <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2634026>, 2017.
- [49] R. Sobti и M. Anjaneyulu, "Hybrid Renewable Energy Microgrids: A Genetic Algorithm Approach to System Design," во%1 *International Conference on Multidisciplinary Research and Sustainable Development (ICMED 2024)*, 2024.
- [50] M. J. Rana, F. Zaman, T. Ray and R. Sarker, "Real-time scheduling of community microgrid," *Journal of Cleaner Production*, Vols. 286, 125419, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125419>.
- [51] R. Torkan, A. Ilinca and M. Ghorbanzadeh, "A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrids," *Renewable Energy*, vol. 197, pp. 852-863, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.055>, 2022.
- [52] A. Agarwal and K. Pal, "Optimization of Unit Commitment Problem Using Genetic Algorithm," *International Journal of System Dynamics Applications (IJSDA)*, vol. 10, no.3, pp. 21-37, <http://doi.org/10.4018/IJSDA.2021070102>, 2021.

- [53] S. Oviedo-Carranza, J. Artal-Sevil and J. Domínguez-Navarro, “Optimal Operation of a Distributed Generation Microgrid based on the Multi-Objective Genetic Algorithms,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, pp. 789-794, <https://doi.org/10.24084/repqj20.436>, 27-29 July 2022.
- [54] B. Dey, S. Dutta, S. Saikia and R. S. Kumar, “An innovative hybrid load shifting and curtailing technique for operating a plug-in hybrid electric vehicle integrated microgrid system in a clean and cost-effective manner,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 19, no. e70020, 2025, <https://doi.org/10.1049/gtd2.70020>.
- [55] B. Dey, G. Sharma and P. Bokoro, “Incentive-based demand response policies for techno-economic microgrid operation—a comparative analysis,” *Electrical Engineering*, vol. 107, pp. 14313–14336, <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03263-9>, 2025.
- [56] S. Pinninti and S. R. Sura, “An optimal demand side management for microgrid cost minimization considering renewable,” *Optim Control Appl Meth*, vol. 46, no. 1, pp. 197-214, <https://doi.org/10.1002/oca.3205>, 2025.
- [57] B. Dey, L. K. Chanu, G. Sharma, P. N. Bokoro, R. C. Bansal and R. Kumar, “Economic operation of a microgrid system with amalgamated load shifting/curtailing policy and smart PHEV charging,” *Energy*, vol. 334, no. 137824, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137824>.
- [58] B. Dey, S. Misra and A. Pal, “Efficient and economical operation of microgrid system for varying electric vehicle sizes,” *Results in Engineering*, vol. 27, no. 106583, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106583>.
- [59] A. R. Singh, B. Dey, S. Misra, R. S. Kumar, M. Bajaj and V. Blazek, “A hybrid demand-side policy for balanced economic emission in microgrid systems,” *iScience*, vol. 28, no. 112121, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112121>.
- [60] H. Kiani, K. Hesami, A. Azarhooshang, S. Pirouzi and S. Safaee, “Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, no. 100476, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100476>.
- [61] M. Veisi, D. Sahebi, M. Karimi and F. Shahnian, “Optimised Allocation of Distributed Generation and Electric Vehicles Integration in Microgrids: A Multi-Criteria Approach,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 19, no. 1, 2025, <https://doi.org/10.1049/rpg2.70042>.
- [62] S. Gheouany, H. Ouadi, F. Giri, I. Jhilifa, S. E. bakali and N. Mounir, “Optimal Supply-Side and Demand-Side Management Strategies for Energy Efficiency in Residential Buildings using Particle Swarm Optimization,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 13, pp. 188-193, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.481>, 2024.
- [63] A. Kumar, A. R. Singh, R. S. Kumar, Y. Deng, X. He, R. Bansal, P. Kumar и R. Naidoo, “An effective energy management system for intensified grid-connected microgrids,”

- Energy Strategy Reviews*, том 50, бр. 101222, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101222>.
- [64] M. J. Rana, F. Zaman, T. Ray and R. Sarker, “Heuristic Enhanced Evolutionary Algorithm for Community Microgrid Scheduling,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76500 - 76515, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989795>, 2020.
- [65] M. Ghiasi, “Detailed study, multi-objective optimization, and design of an AC-DC smart microgrid with hybrid renewable energy resources,” *Energy*, vol. 169, pp. 496-507, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.083>, 2019.
- [66] M. Ghiasi, T. Niknam, M. Dehghani, P. Siano, H. Haes Alhelou and A. Al-Hinai, “Optimal Multi-Operation Energy Management in Smart Microgrids in the Presence of RESs Based on Multi-Objective Improved DE Algorithm: Cost-Emission Based Optimization,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3661, 2021, <https://doi.org/10.3390/app11083661>.
- [67] Y. Shi, S. Cheng, C. Chen, Y. Luo, J. Zhao and M. Ghiasi, “Modified Biogeography Optimization Strategy fOptimal Sizing and Performance of Battery Energy Storage System in Microgrid Considering Wind Energy Penetration,” *Batteries* , vol. 9, no. 5: 254, p. <https://doi.org/10.3390/batteries9050254>, 2023.
- [68] A. Deansekeaw, W. Pinthurat and B. Marungsr, “Multi-Objective-Based Multi-Heterogeneous- Agent Deep Reinforcement Learning for Minimization of Voltage Deviation and Operation Cost in Active Distribution System,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 75648-75665, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3565123>, 2025.
- [69] P. A. Gbadega, Y. Sun and O. A. Balogun, “A Unified Optimization Framework for Cost-Effective and Voltage-Stable Operation of Renewable Energy-Based Microgrids Using Mixed-Integer Nonlinear Programming,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 12 (101010), 2025, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101010>.
- [70] K. Paul, B. Jyothi and R. e. a. Kumar, “Optimizing sustainable energy management in grid connected microgrids using quantum particle swarm optimization for cost and emission reduction.,” *Scientific Reports*, Vols. 15, 5843, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90040-0>.
- [71] M. Elshenawy, A. Mohamed и A. e. a. Ali, “Two-stage multi-objective framework for optimal operation of modern distribution network considering demand response program,” *Scientific Reports*, том 15 (989), 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83284-9>.
- [72] M. Ghaffari и H. H. Aly, “Voltage Deviation Improvement in Microgrid Operation through Demand Response Using Imperialist Competitive and Genetic Algorithms,” *Information* , Томови %1 од %215(10), 638, 2024, <https://doi.org/10.3390/info15100638>.
- [73] M. Agoundedemba, C. K. Kim, H.-G. Kim, R. Nyenge and N. Musila, “Modelling and optimization of microgrid with combined genetic algorithm and model predictive control

- of PV/Wind/FC/battery energy systems,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 238-255, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.008>, 2025.
- [74] Z. Majd и M. Kalantar, “A novel cost-effective voltage fluctuations management in a droop-controlled islanded microgrid,” *IET Renewable Power Generation*, том 17 (2), 2023, <https://doi.org/10.1049/rpg2.12599>.
- [75] M. Moosavi, J. Olamaei и H. Shourkaei, “Optimizing microgrid performance a multi-objective strategy for integrated energy management with hybrid sources and demand response,” *Sci Rep* 15, 17827, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00118-y>.
- [76] J. Pradeep, P. Velmurugan and V. Prabhu, “Minimization of total operational cost & voltage deviation in grid-connected unbalanced MGs using optimization approach,” *Electr Eng*, vol. 106, pp. 6649–6663, <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02368-x>, 2024.
- [77] M. Samiei Moghaddam, M. Azadikhoy, N. Salehi and M. Hosseina, “A multi-objective optimization framework for EV-integrated distribution grids using the hiking optimization algorithm,” *Sci Rep*, Vols. 15, 13324, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97271-1>.
- [78] Y. Yao, Z. Wan, T. Yang, Z. Yang, H. Xu and F. Rong, “Cooperative Operation Optimization of Flexible Interconnected Distribution Networks Considering Demand Response,” *Processes*, vol. 13, no. 9: 2809, 2025, <https://doi.org/10.3390/pr13092809>.
- [79] B. Zohuri, *Hybrid Energy Systems*, Springer, 2018.
- [80] “Focus on Providing Microgrid System Solution,” Flyfine Energy, [Online]. Available: <https://flyfinebattery.com/microgrid-system-solution/>. [Accessed 16 February 2026].
- [81] G. Shahgholian, “A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 6, 2021, <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12885>.
- [82] J. Baum, P. Curtiss, J. Lee, M. Higginson and B. Harwig, “Practical Considerations for the Design and Control of Networked Microgrids: Enabling effective operation,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 22-32, <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3385977>, 2024.
- [83] N. Khosravi, D. Çelik, H. Bevrani and S. Echalih, “Microgrid stability: A comprehensive review of challenges, trends, and emerging solutions,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 170, no. 110829, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110829>.
- [84] A. Akhavan, H. R. Mohammadi, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, “Coupling effect analysis and control for grid-connected multi-microgrid clusters,” *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 5, pp. 1059-1070, <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0632>, 2020.

- [85] M. E. T. Souza, H. T. D. M. Carvalho, D. B. Rodrigues, É. C. Guimarães, E. A. A. Coelho and L. C. G. Freitas, “Unified Control Strategy for Islanded, Seamless Transition, and Grid-Connected Operations of Inverter-Based Distributed Generation and Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 202253 - 202274, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3638146>, 2025.
- [86] S. Chakraborty, J. Wang, S. Ganguly and B. Kroposk, “A Secondary Control Framework for Microgrid Interoperability With Vendor-Agnostic Grid-Forming Units: Design, Implementation, and Demonstration via Large-Scale Hardware Setup,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 212121 - 212149, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3643737>, 2025.
- [87] S. Ishaq, I. Khan, S. Rahman, T. Hussain, A. Iqbal and R. M. Elavarasan, “A review on recent developments in control and optimization of micro grids,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4085-4103, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.080>, 2022.
- [88] F. Garcia-Torres, C. Bordons, J. Tobajas, R. Real-Calvo, I. Santiago and S. Grieu, “Stochastic Optimization of Microgrids With Hybrid Energy Storage Systems for Grid Flexibility Services Considering Energy Forecast Uncertainties,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5537 - 5547, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3071867>, 2021.
- [89] L. Shi, Z. Cen, Y. Li, F. Wu, K. Lin and D. Yang, “Distributed Optimization of Multi-Microgrid Integrated Energy System with Coordinated Control of Energy Storage and Carbon Emissions,” *Sustainability*, vol. 16, no. 3225, 2024, <https://doi.org/10.3390/su16083225>.
- [90] P. Arévalo, D. Benavides, D. Ochoa-Correa, A. Ríos, D. Torres and C. Villanueva-Machado, “Smart Microgrid Management and Optimization: A Systematic Review Towards the Proposal of Smart Management Models,” *Algorithms*, vol. 18, no. 429, 2025, <https://doi.org/10.3390/a18070429>.
- [91] H. P. Vega, L. F. Grisales-Noreña and V. Botero-Gómez., “Optimizing Energy Management in AC Microgrids: A Comparative Study of Metaheuristic Algorithms for Minimizing Energy Losses and CO2 Emissions,” *Emissions. Statistics, Optimization & Information Computing*, vol. 14, no. 2, pp. 636-662, <https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-2455>, 2025.
- [92] X. Zhu, G. Ruan, H. Geng, H. Liu, M. Bai and C. Peng, “Multi-Objective Sizing Optimization Method of Microgrid Considering Cost and Carbon Emissions,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 60, no. 4, pp. 5565-5576, <https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3395570>, 2024.
- [93] S. Phommixay, M. Doumbia and D. Lupien St-Pierre, “Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 11, pp. 73–89, <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00332-1>, 2020.
- [94] S. Shezan, I. Kamwa, M. Ishraque, S. Muyeen, K. Hasan, R. Saidur, S. Rizvi, M. Shafiullah and F. Al-Sulaiman, “Evaluation of Different Optimization Techniques and

- Control Strategies of Hybrid Microgrid: A Review,” *Energies*, vol. 16, no. 1792, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16041792>.
- [95] G. Verbič, S. Mhanna and A. C. Chapman, “Chapter 5 - Energizing Demand Side Participation,” in *Pathways to a Smarter Power System*, Academic Press, 2019, <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03015-X>, pp. 115-181.
- [96] A. Bouaouda and Y. Sayouti, “Hybrid Meta-Heuristic Algorithms for Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy System: A Review of the State-of-the-Art,” *Arch Comput Methods Eng.*, vol. 16, no. 29(6), pp. 4049–4083, <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09730-x>, 2022.
- [97] G. Yadav, D. Joshi, G. Leena and M. K. Soni, “Application of Genetic Algorithm in Sensor Networks and Smart Grid,” in *Optimization Techniques in Engineering: Advances and Applications*, Scrivener Publishing LLC, 2023, <https://doi.org/10.1002/9781119906391.ch7>.
- [98] K. Siau, “E-Creativity and E-Innovation,” *The International Handbook on Innovation*, pp. 258-264, <https://doi.org/10.1016/B978-008044198-6/50017-6>, 2003.
- [99] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, “Online management genetic algorithms of microgrid for residential application,” *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 562-568, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.010>, 2012.
- [100] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book The MIT Press, 1999.
- [101] T. Pencheva, K. Atanassov and A. Shannon, “Modelling of a stochastic universal sampling selection operator in genetic algorithms using generalized nets,” in *Proceedings on the Tenth International Workshop on Generalized Nets*, Sofia, Bulgaria, 5 December, 2009.
- [102] E. ul Haq, I. Ahmad, A. Hussain and I. Almanjahie, “A Novel Selection Approach for Genetic Algorithms for Global Optimization of Multimodal Continuous Functions,” *Computational Intelligence and Neuroscience*, no. 8640218, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1155/2019/8640218>, 2019.
- [103] R. L. Haupt and S. E. Haupt, “2 The Binary Genetic Algorithm,” in *Practical Genetic Algorithms (second edition)*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2004, pp. 27-51.
- [104] M. Furqan, Hartono, E. Ongko and M. Ikhsan, “Performance of Arithmetic Crossover and Heuristic Crossover in Genetic Algorithm Based on Alpha Parameter,” *Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, vol. 19, no. 5, pp. 31-36, <https://doi.org/10.9790/0661-1905013136>, 2017.
- [105] K. Deep, K. P. Singh, M. Kansal and C. Mohan, “A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems,” *Applied Mathematics and*

- Computation*, vol. 212, no. 2, pp. 505-518, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.02.044>, 2009.
- [106] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs* (third edition), University of North Carolina, Charlotte, USA: Springer, 1995.
- [107] J. McCall, “Genetic algorithms for modelling and optimisation,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, том 184, p. 205–222, 2005.
- [108] W. Ongsakul and D. N. Vo, *Artificial Intelligence in Power System Optimization*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [109] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, *Introduction to genetic Algorithm*, New York: Springer, 2008.
- [110] A. H. Slama, L. Saidi, M. Saidi and M. Benbouzid, “Metaheuristic Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems Under Asymmetric Cost-Reliability Objectives: NSGA-II and MOPSO Approaches,” *Symmetry*, Vols. 7(9), 1412, 2025, <https://doi.org/10.3390/sym17091412>.
- [111] E.-u. Haq, I. Ahmad, A. Hussain and I. M. Almanjahie, “Novel Selection Approach for Genetic Algorithms for Global Optimization of Multimodal Continuous Functions,” *Comput Intell Neurosci*, vol. 5, no. 8640218, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/8640218>.
- [112] A. Hussain and S. A. Cheema, “A new selection operator for genetic algorithms that balances between premature convergence and population diversity,” *Croatian Operational Research Review*, vol. 11, pp. 107-119, <https://doi.org/10.17535/corr.2020.0009>, 2020.
- [113] A. Hussain, S. Riaz, M. S. Amjad and E. u. Haq, “Genetic algorithm with a new round-robin based tournament selection: Statistical properties analysis,” *PLoS ONE*, vol. 17, no. 9, p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274456>, 2022.
- [114] B. Meniz and F. Tiryaki, “Genetic Algorithm Optimization with Selection Operator Decider,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 50, pp. 6931–6941, <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09068-5>, 2024.
- [115] P. B. Myszowski and M. Laszczyk, “Diversity based selection for many-objective evolutionary optimisation problems with constraints,” *Information Sciences*, vol. 546, pp. 665-700, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.08.118>, 2021.
- [116] D. Xia, X. Wu, M. Yan and C. Xiong, “An adaptive stochastic ranking-based tournament selection method for differential evolution,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 80, pp. 20–49, <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05390-1>, 2024.
- [117] Y. Xue, J. Zha, M. Wahib, T. Ouyang and X. Wang, “Neural architecture search via similarity adaptive guidance,” *Applied Soft Computing*, vol. 162, no. 111821, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111821>.

- [118] F. A. Kassab, R. Rodriguez, B. Celik, F. Locment and M. Sechilariu, “A Comprehensive Review of Sizing and Energy Management Strategies for Optimal Planning of Microgrids with PV and Other Renewable Integration,” *Appl. Sci.*, Vols. 14(22), 10479, 2024, <https://doi.org/10.3390/app142210479>.
- [119] J. Rahul, R. K. Pachar, J. Singh, S. Sharma and B. Modi, “Review on Optimization of Microgrid Using Various Optimization Techniques,” *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, vol. 10, no. 3, pp. 47-52, <http://dx.doi.org/10.22161/ijaems.103.7>, 2024.
- [120] L. Jiao, R. Shang, F. Liu and W. Zhang, “Chapter 3 - Theoretical basis of natural computation,” in *Brain and Nature-Inspired Learning Computation and Recognition*, Elsevier, 2020, pp. 81-95, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819795-0.00003-7>.
- [121] J. S. Arora, “17 - Multiobjective Optimum Design Concepts and Methods,” in *Introduction to Optimum Design (Second Edition)*, Academic Press, 2004, pp. 543-563, <https://doi.org/10.1016/B978-012064155-0/50017-3>.
- [122] A. Khan and A. R. Baig, “Multi-Objective Feature Subset Selection using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm,” *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 13, pp. 145-159, [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(15\)30013-4](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(15)30013-4), 2015.
- [123] S. Prayudani, A. Hizriadi, E. B. Nababan and S. Suwilo, “Analysis Effect of Tournament Selection on Genetic Algorithm Performance in Traveling Salesman Problem (TSP),” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1566, no. 012131, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1566/1/012131>, 2020.
- [124] C. Li, J. Liu, Q. Liu, Y. Li, Y. Cao and Y. Li, “Voltage regulation in PV-rich distribution networks: an edge pipelined intelligent computing approach,” *Communications Engineering*, Vols. 4, 202, 2025, <https://doi.org/10.1038/s44172-025-00535-x>.
- [125] A. Koirala, T. V. Acker, R. D’hulst and D. V. Hertem, “Hosting capacity of photovoltaic systems in low voltage distribution systems: A benchmark of deterministic and stochastic approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, no. 111899, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111899>.
- [126] Електродистрибуција ДООЕЛ Скопје, Друштво за дистрибуција на електрична енергија, “Мрежни правила за дистрибуција на електрична енергија,” Службен весник на РМ, бр. 191 од 17.9.2019 година .
- [127] M. F. Ali, M. R. I. Sheikh, R. Akter, K. M. N. Islam and A. I. Ferdous, “Grid-connected hybrid microgrids with PV/wind/battery: Sustainable energy solutions for rural education in Bangladesh,” *Results in Engineering*, Vol. 25, 103774, p. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103774>, 2025.
- [128] T. K. Roy, M. A. Mahmudb and A. M. T. Oo, “Techno-economic feasibility of stand-alone hybrid energy systemsfor a remote Australian community:Optimization and

- sensitivity analysis,” *Renewable Energy*, Vol. 241, 122286, p. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122286>, 2025.
- [129] V. Morozov, V. Deineha and D. Kovalchuk, “Multi-Criteria Method for Comparing the Effectiveness of Gradient Descent Modifications on Benchmark Functions,” in *CEUR Workshop Proceedings*, Kyiv, 2024.
- [130] X. Ying, W. Zhu, D. Ying, Y. Lou and X. Zhou, “Research on power balance calculation of flexible resources based on adaptive genetic algorithm in smart grid framework,” *International Journal for Housing Science and Its Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 103-116, <https://doi.org/10.70517/ijhsa46408>, 2025.
- [131] J. J. Al-zamili, “Mathematical modeling and optimization of intelligent systems using a hybrid PSO-GWO algorithm: A minx J(x) approach,” *Results in Nonlinear Analysis*, vol. 8, no. 2, pp. 33–147, <https://doi.org/10.31838/rna/2025.08.02.012>, 2025.
- [132] V. Plevris and G. Solorzano, “A Collection of 30 Multidimensional Functions for Global Optimization Benchmarking,” *Data*, vol. 7, no. 4:46, 2022, <https://doi.org/10.3390/data7040046>.
- [133] M. Naser, M. Al-Bashiti, A. Tapeh, A. Naser, V. Kodur, R. Hawileh, J. Abdalla, N. Khodadadi, A. Gandomi and A. Eslamlou, “A Review of Benchmark and Test Functions for Global Optimization Algorithms and Metaheuristics,” *WIREs Comput Stat*, vol. 17, no. 2, 2025, <https://doi.org/10.1002/wics.70028>.
- [134] M. A. Khan и B. Hayes, “For paper "A Reduced Electrically-Equivalent Model of the IEEE European Low Voltage Test Feeder",” *IEEE*, 2020, <https://doi.org/10.21227/0d2n-j565>.
- [135] P. Sharma, P. Mishra and H. D. Mathur, “Optimal energy management in microgrid including stationary and mobile storages based on minimum power loss and voltage deviation,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, pp. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13182>, 2021.
- [136] A. Al-Zuheri, H. S. Ketan and L. L. Alwan, “Analysis Effect of Parameters of Geneticalgorithm on a Model For Optimization Design of Sustainable Supply Chain Network Under Disruption Risks,” *Management Systems in Production Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 252-264, <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0025>, 2024.
- [137] K. Cabana-Jiménez, J. E. Candelo-Becerra and V. S. Santos, “Comprehensive Analysis of Microgrids Configurations and Topologies,” *Sustainability*, vol. 14 , no. 1056, 2022, <https://doi.org/10.3390/su14031056>.