



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Дарио Д. Јавор

**ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА
ОПТИМИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖЕ
КОРИШЋЕЊЕМ V2G ТЕХНОЛОГИЈЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2024.



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Дарио Д. Јавор

**ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА
ОПТИМИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖЕ
КОРИШЋЕЊЕМ V2G ТЕХНОЛОГИЈЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2024.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Dario D. Javor

**MULTICRITERIA OPTIMIZATION
OF THE MICROGRID USING
V2G TECHNOLOGY**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2024.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације

Ментор и члан комисије:

Проф. др Небојша Раичевић, редовни професор,
Електронски факултет у Нишу, Универзитет у Нишу

Председник и члан комисије:

Проф. др Дејан Крстић, редовни професор,
Факултет заштите на раду у Нишу, Универзитет у Нишу

Члан комисије:

Проф. др Мирјана Перић, ванредни професор,
Електронски факултет у Нишу, Универзитет у Нишу

Члан комисије:

Проф. др Ана Вучковић, ванредни професор,
Електронски факултет у Нишу, Универзитет у Нишу

Члан комисије:

Проф. др Бојана Златковић, ванредни професор,
Факултет заштите на раду у Нишу, Универзитет у Нишу

Датум одбране докторске дисертације: _____

Захвалност аутора

На овом нимало лаком путу до остварења веома захтевног циља имао сам искрену подршку свог ментора, професора Небојше Раичевића, коме се захваљујем за успешну сарадњу у току истраживања у оквиру ове дисертације и спремност да се ухватимо у коштац са интересантним научним проблемима и иновативним технологијама. Хвала професору Раичку!

Професору Дејану Крстићу захваљујем се за заједнички научноистраживачки рад, енергију коју несебично дели и ентузијазам који преноси, а који у тренуцима напорног рада пуно значе.

Велику захвалност дугујем колегама са Катедре за системска истраживања безбедности и ризика који су ме срдачно прихватили од првог дана на послу, само пар дана пре увођења ванредног стања изазваног пандемијом Covid-19, у тренуцима веома тешким, како за академску, тако и за друштвену заједницу.

Професорки Бојани Златковић овом приликом пуно захваљујем на корисним саветима, подршци и речима које много значе на путу до овог за мене великог успеха.

Веома сам захвалан професорки Мирјани Перић, као и професорки Ани Вучковић са Електронског факултета у Нишу за добронамерне савете и сугестије који су допринели квалитету ове докторске дисертације.

Од толико научних скупова и конференција на којима сам учествовао, некако посебно место заузима тај 15. март, тренутак и дан када сам упознао једне дивне људе, људе какве човек не сретне у животу тако често, људе због којих човек остаје на правом путу, јер су и они на њему, па је задовољство заједно са њима наставити даље...

Подршка која ме је чекала кући и која је била дежурна од 00 до 24h, била је увек и стално ту за мене. Некада само поглед или рука на рамену мојих најдражих који са мном деле све, у тренуцима када је снага или боље рећи стање напуњености батерија на минимуму, брзо враћају у оптимално стање.

На том путу, појавила се наша мала најсјајнија звезда, мој најдражи сестрић, мали Мирко, који у тренутку писања ове странице има укупно 11 зубића. Хвала ти од срца драга сестро, хвала ти мој драги дадо!!!

Хвала ти неизмерно тата, хвала ти бескрајно мама, хвала на свему!!!

Даћу све од себе и потрудићу се да оправдам и узвратим то што сте ми пружили... Не знам још увек како је то уопште могуће, али на мени је да и то пробам...

Дарио Јавор

Подаци о докторској дисертацији

Ментор: др Небојша Раичевић, редовни професор,
Универзитет у Нишу, Електронски факултет у Нишу

Наслов: Вишекритеријумска оптимизација микромреже коришћењем
V2G технологије

Резиме:

Предмет истраживања ове докторске дисертације је примена вишекритеријумске оптимизације (ВКО) и реализација рачунарских програма који се могу имплементирати у pamетно управљање микромрежама са коришћењем обновљивих извора енергије (ОИЕ), електричних возила и V2G технологије, уз постизање компромиса између економских и еколошких циљева. Тежински коефицијенти критеријума одређени су применом субјективних метода BWM и АНР, а затим су применом метода ВКО (PROMETHEE, ELECTRE, ВИКОР и TOPSIS) рангирани различити типови извора енергије у микромрежи. Анализирани су резултати добијени коришћењем програма Lingo, Excel и PROMETHEE-GAIA. Развијена је нова двостепена процедура ВКО која омогућава управљање потрошњом у случају да постоје предвиђена неодложна потрошња у току дана, експериментално измерена или процењена интермитентна производња ОИЕ на локацији микромреже, одложива потрошња, као и познате сатне цене на тржишту електричне енергије. Оптимизована је дневна крива потрошње микромреже чиме је постигнуто смањење трошкова за електричну енергију и инвестиционих трошкова. Оптимизован је и дневни распоред пуњења/пражњења електричних возила на станици за пуњење у микромрежи са V2G технологијом у циљу смањења трошкова енергије, при чему су узете у обзир карактеристике возила и њихових батерија, као и дневни распоред коришћења возила и њихова расположивост за пуњење/пражњење. Разматрани су сценарији микромрежа за различити број возила, снаге пуњача и температуре околине. При томе су узети у обзир економски захтеви корисника микромреже, власника возила, дистрибутивне компаније, као и еколошки захтеви за смањење емисија штетних гасова и ситних честица ради очувања квалитета животне средине. Развијен је и примењен метод ВКО за рангирање опасности од пожара возила на основу биолошких и еколошких критеријума чији су тежински коефицијенти одређени методама BWM и АНР. Резултати добијени применом савремених научних принципа и методологије научног рада представљају оригинални допринос анализи и решавању сложених еколошких и економских проблема који прате производњу електричне енергије и функционисање електроенергетских система у складу са савременом стратегијом чисте енергије.

Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина:	Електротехника и рачунарство
Кључне речи:	Микромрежа, Обновљиви извори енергије, Електрична возила, V2G технологија, Управљање потрошњом, Пожари возила
УДК:	(621.316:620.92)+004.4
CERIF класификација:	T190 Електроинжењеринг
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr. Nebojša Raičević, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering in Niš
Title:	Multicriteria optimization of the microgrid using V2G technology
Abstract:	<p>The subject of the research of this doctoral dissertation is the application of multicriteria optimization (MCO) and the realization of computer programs that can be implemented in the smart management of microgrids with the use of renewable energy sources (RES), electric vehicles and V2G technology, while achieving a compromise between economic and environmental goals. The weighting coefficients of the criteria were determined using the subjective BWM and AHP methods, and then different types of energy sources in the microgrid were ranked using the MCO methods (PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR and TOPSIS). The results obtained using Lingo, Excel and PROMETHEE-GAIA programs were analyzed. A new two-stage MCO procedure was developed that enables consumption management in case there are predicted non-deferrable loads during the day, experimentally measured or estimated intermittent RES production at the microgrid location, deferrable consumption, as well as known hourly prices on the electricity market. The daily consumption curve of the microgrid was optimized, which achieved a reduction in electricity costs and investment costs. The daily charging/discharging schedule of electric vehicles at the microgrid charging station with V2G technology was also optimized in order to reduce energy costs, taking into account the characteristics of vehicles and their batteries, as well as the daily schedule of vehicle use and their availability for charging/discharging. Microgrid scenarios for different number of vehicles, charger power and ambient temperature are considered. In doing so, the economic requirements of microgrid users, vehicle owners, and distribution companies were taken into account, as well as environmental requirements for the reduction of emissions of harmful gases and particle matter in order to preserve the quality of the environment. The MCO method was developed and applied to rank the fire hazard of vehicles based on biological and ecological criteria whose weight coefficients were determined by the BWM and AHP methods. The results obtained through the application of modern scientific principles and the methodology of scientific work represent an original contribution to the analysis and solution of complex environmental and economic problems that follow the production of electricity and the functioning of power systems in accordance with the modern strategy of clean energy.</p>

Scientific Field:	Electrical Engineering and Computing
Scientific Discipline:	Electrical Engineering and Computer Science
Key Words:	Microgrid, Renewable energy sources, Electric vehicles, V2G technology, Demand side management, Vehicle fires
UDC:	(621.316:620.92)+004.4
CERIF Classification:	T190 Electrical engineering
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

Садржај

1. Увод	1
Литература за Главу 1.....	8
2. Технологије производње и складиштења електричне енергије у микромрежи.....	10
2.1 Техничка еволуција електроенергетских система.....	11
2.2 Микромрежа.....	18
2.3 Технологије за производњу електричне енергије у микромрежи.....	23
2.3.1 Генератори покретани моторима са унутрашњим сагоревањем.....	25
2.3.2 Индустијске турбине са унутрашњим сагоревањем.....	27
2.3.3 Микротурбине.....	28
2.3.4 Соларни генератори са концентраторима.....	29
2.3.5 Фотонапонски панели.....	30
2.3.6 Микро и мале хидроелектране.....	32
2.3.7 Мали ветрогенератори.....	33
2.3.8 Горивне ћелије	35
2.4 Системи за складиштење електричне енергије.....	38
2.4.1 Механички системи за складиштење енергије.....	39
2.4.2 Електрохемијски системи за складиштење енергије.....	41
2.4.3 Хемијски системи за складиштење енергије.....	43
2.4.4 Електрични системи за складиштење енергије.....	43
2.4.5 Термички системи за складиштење енергије.....	44
2.5 Пример микромреже.....	45
Литература за Главу 2.....	52
3. Примена оптимизационих метода у управљању микромрежама.....	56
3.1 Контрола рада микромреже.....	57
3.2 Системи за управљање микромрежама.....	59

3.3	Примена оптимизације у планирању, контроли и управљању микромрежом....	60
3.4	Циљне функције оптимизационих проблема у микромрежама.....	61
3.5	Методе за решавање оптимизационих проблема.....	62
	Литература за Главу 3.....	64
4.	Оптимизација избора генератора у микромрежи у циљу заштите животне средине.....	67
4.1	Проблем вишекритеријумске оптимизације избора генератора у микромрежи.....	68
4.2	Емисије штетних гасова и ситних честица као еколошки критеријуми.....	69
4.3	Инвестициони, оперативни, трошкови одржавања и горива као економски критеријуми.....	70
4.4	Рангирање генератора применом методе PROMETHEE за различите микромреже.....	71
4.5	Рангирање генератора применом методе PROMETHEE према еколошким критеријумима.....	78
4.6	Рангирање генератора применом методе PROMETHEE према економским и еколошким критеријумима.....	84
4.7	Рангирање генератора у микромрежи применом методе ELECTRE.....	90
4.8	Рангирање генератора у микромрежи применом методе TOPSIS.....	97
4.9	Рангирање генератора у микромрежи применом методе ВИКОР.....	100
4.10	Методе одређивања тежинских коефицијената.....	104
4.10.1	Анализа одређивања тежинских коефицијената применом методе ентропије.....	105
4.10.2	Анализа одређивања тежинских коефицијената применом методе ВWM.....	109
4.10.3	Анализа одређивања тежинских коефицијената применом методе АНР.....	110
4.11	Рангирање генератора комбиновањем АНР и метода PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР.....	115
4.11.1	Рангирање генератора применом метода АНР и PROMETHEE II....	115
4.11.2	Рангирање генератора применом метода АНР и TOPSIS.....	117
4.11.3	Рангирање генератора применом метода АНР и ВИКОР.....	118
4.12	Рангирање генератора комбиновањем ВWM и метода PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР.....	120

4.12.1 Рангирање генератора применом метода BWM и PROMETHEE.....	120
4.12.2 Рангирање генератора применом метода BWM и TOPSIS.....	121
4.12.3 Рангирање генератора применом метода BWM и ВИКОР.....	123
Литература за Главу 4.....	125
5. Оптимизација потрошње у микромрежи.....	129
5.1 Варијабилна цена електричне енергије као критеријум оптимизације.....	130
5.2 Методе управљања потрошњом.....	134
5.3 Дефинисање циљних функција за проблем оптимизације потрошње.....	139
5.4 Ограничења типа једнакости и типа неједнакости за проблем оптимизације...	140
5.5 Пример оптимизације трошкова коришћењем DSM техника.....	145
5.6 Нова процедура двостепене оптимизације уз примену техника управљања потрошњом.....	152
Литература за Главу 5.....	161
6. Вишекритеријумска оптимизација примене V2G технологије у микромрежи.....	163
6.1 Оптимизација трошкова микромреже за фиксне и варијабилне цене електричне енергије	164
6.2 Величина флоте електричних возила и снага фотонапонских панела у микромрежи као критеријуми оптимизације.....	173
6.3 Капацитет батерија електричних возила и снага пуњача као критеријуми оптимизације.....	178
6.4 Утицај амбијенталне температуре на трошкове пуњења батерија електричних возила.....	194
6.5 Вишекритеријумска оптимизација коришћења V2G технологије са становишта власника микромреже, агрегатора и главне мреже.....	200
Литература за Главу 6.....	210
7. Вишекритеријумска оптимизација примене V2G технологије у микромрежи.....	214
7.1 Батерије електричних возила.....	215
7.2 Узроци настанка пожара електричних возила.....	222
7.2.1 Термички утицај на батерије електричних возила.....	222
7.2.2 Механички утицај на батерије електричних возила.....	229
7.2.3 Електрични утицај на батерије електричних возила.....	230

7.3 Типични пожари електричних возила.....	230
7.3.1 Пожари спонтаног паљења.....	231
7.3.2 Пожари приликом пуђења.....	232
7.3.3 Пожари услед саобраћајних удеса.....	233
7.3.4 Пожари поновног паљења.....	233
7.3.5 Пожари услед спољашњих фактора.....	234
7.4 Процена опасности од пожара.....	235
7.5 Стратегије гашења пожара електричних возила.....	237
7.6 Примена метода вишекритеријумске оптимизације за одређивање најопаснијег пожара електричног возила са еколошког становишта.....	243
7.6.1 Одређивање тежинских коефицијената критеријума применом BWM.....	243
7.6.2 Рангирање опасности од пожара возила применом метода BWM и PROMETHEE	250
Литература за Главу 7.....	253
8. Закључак.....	256
Списак слика.....	261
Списак таблица.....	269
Биографија аутора.....	271
Изјава о ауторству.....	272
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторске дисертације.....	273
Изјава о коришћењу.....	274

1

Увод

Обновљиви извори енергије (ОИЕ) и савремени транспортни системи, заједно са софистицираним управљањем енергијом и иновацијама у постојећој инфраструктури, представљају ефикасне начине за ублажавање проблема глобалног загревања, загађења животне средине и емисије гасова стаклене баште (енг. Green House Gasses – GHG). Ови проблеми су повезани са производњом и потрошњом енергије која је неопходна за развој човечанства. Да би тај развој био одржив, потребан је низ обавезујућих мера и глобалних стратегија у транспортном и енергетском сектору у циљу транзиције ка чистој енергији. Неопходно је и знатно веће учешће ОИЕ у производњи електричне енергије, као и рационално коришћење свих ресурса и модерних технологија. ОИЕ су повећали свој удео у глобалној производњи електричне енергије са 27% у 2019. на 29% у 2020. години [1]. Само у 2022. години капацитети ОИЕ у Европској унији повећани су за више од 50 GW, што је повећање од 42% у односу на 2021. годину [2].

Још увек је веома дуг пут до остварења циља дугорочне стратегије Европске уније и Међународне агенције за енергију (енг. International Energy Agency – IEA) да се постигне нулта нето емисија угљен-диоксида (CO₂) до 2050. године. У 2019. години глобална емисија CO₂ износила је 33.4 Gt CO₂, а у 2020. години 31.5 Gt CO₂ због пандемије изазване вирусом Ковид-19, што је за 5.8% мање у односу на 2019. годину [3]. Ипак, глобалне емисије CO₂ повезане са производњом енергије додатно су порасле због опоравка економије у свету у 2021. години. У атмосферу се стално испуштају и велике количине других штетних гасова, као што су оксиди азота, сумпор-диоксид, угљен-моноксид, метан, итд. Европска комисија је 2019. године усвојила нови пакет мера, како би се смањила употреба фосилних горива и ублажиле климатске промене. Упркос напретку технологија и умањењу трошкова производње енергије из ОИЕ, цене енергије на тржишту електричне енергије су значајно

порасле у последњих неколико година, а нарочито 2022. године. У циљу решавања еколошких и економских проблема, интензивирани су истраживања у областима паметних уређаја, микромрежа, паметних мрежа и паметних градова, у којима посебну улогу имају системи за управљање и контролу који су засновани на савременим информационо-комуникационим технологијама [4]. Решавање ових изазовних глобалних проблема захтева мултидисциплинарни приступ.

Значајну улогу у развоју будућих флексибилних и децентрализованих енергетских система имају микромреже. Микромрежа је локализована енергетска мрежа која се састоји од извора електричне енергије (обновљивих и конвенционалних), система за складиштење енергије и оптерећења, као и одговарајуће информационо-комуникационе инфраструктуре. Микромрежа обично ради повезано и синхронизовано са традиционалном централизованом електричном мрежом, али се може и одвојити и функционисати самостално (у острвском режиму рада). Микромреже су мреже ниског или средњег напона које се налазе на местима потрошње енергије или близу њих. Из економских и еколошких разлога власници микромрежа су универзитетски кампуси (енг. CampusGrid) [5], туристички комплекси, стамбена насеља (енг. ConGrid), компаније, пословни и научно-технолошки паркови, индустријска предузећа, комунална и друга предузећа која могу имати и своја електрична возила и одговарајућу инфраструктуру. Постоје и такозване наномреже, веома малих снага и димензија, које омогућавају еколошки прихватљиво управљање енергијом уз детаљно праћење, контролу и обраду података у реалном времену о свим операцијама. Тако се економично, даљински, комфортно и безбедно управља потрошњом у складу са захтевима одрживог развоја локалне средине. Неки од специфичних типова микромрежа су и лабораторијске инфраструктуре које се користе за тестирања и научна истраживања.

IEC (енг. International Electrotechnical Commission) и IEEE SA (енг. Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association) су међународна удружења која су донела стандарде IEC 62898 и IEEE 2030 у области мрежног повезивања и рада микромрежа. Специфични стандарди су: IEC 62898-1 стандард техничких спецификација, део 1: Смернице за планирање и спецификацију микромрежних пројеката; IEC 62898-2 део 2: Смернице за рад микромрежа; IEEE 2030.7 стандард за спецификацију контролера

микромрежа; IEEE 2030.8 стандард за тестирање контролера микромрежа, IEEE 2030.9 стандард препоручене праксе за планирање и дизајн микромрежа.

Трансформацији енергетског сектора у свету важан допринос дају дистрибуирани ресурси који се укључују у микромреже као дистрибуирани извори енергије, системи за складиштење енергије, електрична возила и њихови системи за пуњење. Сваки тип дистрибуираног ресурса има своје специфичне карактеристике, па се у зависности од очекиваног утицаја и понашања у мрежи морају применити различити захтеви за добијање дозволе мреже за повезивање. IEEE 1547 стандард бави се техничким спецификацијама за испитивање интерконеције и интероперабилности између електроенергетског система и дистрибуираног ресурса, утврђује критеријуме за перформансе, разматрање безбедности и одржавања интерконеције, спецификације за острвски рад и квалитет електричне енергије, као и опште захтеве у условима изван нормалног режима рада и захтеве за пројектовање, прорачун производње, процену инсталације, пуштање у рад и периодично тестирање. Неки региони (посебно у Европи) имају додатне захтеве у складу са IEC стандардима.

Трансформацији транспортног сектора у циљу одрживог развоја значајно доприносе електрична возила и напредне технологије као што су: V2G (Vehicle-to-Grid), V2B (Vehicle-to-Building), V2H (Vehicle-to-Home) и V2V (Vehicle-to-Vehicle) [6]. Ова дисертација даје допринос паметном управљању енергетским ресурсима у микромрежи уз коришћење V2G технологије при пуњењу/пражњењу електричних возила и постизање компромиса између економских и еколошких захтева корисника и власника микромрежа.

При томе су узети у обзир параметри као што су:

- дневне криве неодложне и одложиве потрошње у микромрежи,
- капацитети система за складиштење енергије у микромрежи,
- производња и трошкови управљивих дистрибуираних генератора (дизел генератора, микротурбина, горивних ћелија), као и њихове емисије штетних гасова,
- дневне криве интермитентне производње електричне енергије фотонапонским панелима и ветрогенераторима на локацији микромреже,
- потрошња енергије електричним возилима и деградација њихових батерија, као и утицај амбијенталне температуре,

- распоред коришћења и расположивост возила за пуњење/пражњење на станици микромреже са V2G технологијом,
- променљиве цене на тржишту електричне енергије, као и променљиве цене енергената.

На примерима појединих типова микромрежа примењени су поступци оптимизације економских параметара са становишта корисника микромреже, власника електричних возила, дистрибутивне компаније, као и оптимизације емисије штетних гасова ради очувања квалитета животне средине. У циљу постизања оптимизације управљања микромрежом са применом нових технологија реализовани су одговарајући рачунарски програми.

Да би се добило оптимално решење економских и еколошких проблема, неопходна је примена поступака вишекритеријумске оптимизације [7-11]. Више циљева оптимизације могуће је остварити свођењем на резултантну функцију циља према MAUT (енг. Multi-Attribute Utility Theory) [12], коришћењем тежинских коефицијената чија се вредност може изабрати тако да решење буде економски повољно са становишта корисника микромреже, власника електричних возила и дистрибутивне компаније, али и еколошки прихватљиво са становишта заштите животне средине. Избор тежинских коефицијената зависи од значаја појединачних критеријума који могу бити и међусобно конфликтни, што проблем чини специфичним. За одређивање тежинских коефицијената критеријума примењене су субјективне методе: BWM (енг. Best-Worst Method) [13] и метода аналитичког хијерархијског процеса AHP (енг. Analytic Hierarchy Process) [14]. Методе вишекритеријумске оптимизације примењене у овој дисертацији у циљу избора оптималног извора енергије у микромрежи су PROMETHEE (енг. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) [15], [16], ELECTRE (франц. ELimination Et Choix Traduisant la REalité, енг. Elimination and Choice Translating Reality) [17-19], ВИКОР (Вишекритеријумска анализа са оптималним решењем) [20] и TOPSIS (енг. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [21]. За добијање резултата коришћени су и програми Excel, MATLAB и Lingo. У програму Lingo реализовани су програми за минимизацију трошкова и емисија штетних гасова који обезбеђују оптимални временски

распоред пуњења и пражњења електричних возила са коришћењем V2G технологије за разматране структуре микромрежа.

Субјективне методе одређивања тежинских коефицијената критеријума и методе вишекритеријумске оптимизације примењене су у овој дисертацији и за рангирање еколошке опасности од пожара различитих типова возила, што је оригинални допринос ове дисертације, а може се применити у сличним сценаријима пожара и других катастрофалних догађаја.

Након Увода, у Другој глави је дат приказ техничке еволуције електроенергетских система са посебним освртом на концепт микромрежа, њихове предности и недостатке. Анализирани су технологије за производњу електричне енергије у микромрежи (генератори са моторима са унутрашњим сагоревањем, индустријске турбине, микротурбине, соларни генератори са концентраторима, фотонапонски панели, мали ветрогенератори, горивне ћелије, микро и мале хидроелектране), као и модерни системи за складиштење енергије у микромрежи (механички, електрохемијски, хемијски, електрични и термички системи).

Дат је детаљни приказ примера микромреже Универзитетског кампуса у Савони, Универзитета у Ђенови, Италија, јер су у истраживањима коришћени експериментални подаци за ову микромрежу добијени у току боравка аутора ове дисертације 2018/19. године на факултету DIBRIS (енг. Department of Informatics, Bioengineering, Robotics and Systems Engineering), Универзитета у Ђенови, Италија. Анализирани су примењене технологије за производњу и складиштење енергије у овој микромрежи, станице за пуњење електричних возила, паметна зграда у саставу микромреже, електроенергетска и информационо-комуникациона инфраструктура, као и контролни и управљачки систем микромреже.

У Трећој глави анализирани су могућности примене оптимизације у планирању, контроли и управљању микромрежом. Приказане су циљне функције које се користе при решавању оптимизационих проблема у микромрежама. Дат је и преглед метода које омогућавају решавање оваквих проблема.

У Четвртој глави анализиран је проблем вишекритеријумске оптимизације избора извора енергије у микромрежи. Разматрани су еколошки аспекти проблема (емисије штетних гасова и ситних честица) и економски аспекти проблема (инвестициони, операциони, трошкови одржавања и горива). Оригинални допринос ове дисертације

представља рангирање управљивих дистрибуираних генератора у микромрежи и главне електроенергетске мреже за напајање применом субјективних тежинских метода BWM и АНР за одређивање тежинских коефицијената, а затим применом метода вишекритеријумске оптимизације PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS и ВИКОР. Реализација одговарајућих рачунарских програма омогућава избор оптималног извора енергије за измењене преференције критеријума. Анализирани су резултати рангирања генератора добијени изабраним методама, као и предности и недостаци појединих метода.

У Петој глави приказане су директне и индиректне методе управљања потрошњом у микромрежи. У циљу минимизације трошкова микромреже могуће је применити преуређење временског распореда оптерећења, складиштење топлотне енергије, ефикасне технологије крајње употребе, тарифне системе и друге напредне технологије. Након дефинисања циљних функција за решавање проблема, уз разматрања ограничења типа једнакости и типа неједнакости, анализирани су примери оптимизације коришћењем DSM (енг. Demand Side Management). DSM технике су: попуњавање долина, пребацивање оптерећења, одсецање врхова, повећање оптерећења и уштеда енергије. У овој глави приказана је нова процедура двостепене оптимизације уз примену техника попуњавања долина и пребацивања оптерећења у циљу управљања потрошњом, при чему је постигнута корист за потрошаче (због смањења трошкова за електричну енергију) и за дистрибутивну компанију (због “равнања” дневне криве оптерећења и смањења инвестиционих трошкова).

У Шестој глави приказана је оптимизација трошкова микромреже за фиксне и варијабилне цене електричне енергије уз примену V2G технологије. Разматране су величина флоте електричних возила и снага фотонапонских панела у микромрежи као критеријуми оптимизације, капацитет батерија електричних возила и снага пуњача као критеријуми оптимизације, као и утицај амбијенталне температуре на трошкове пуњења батерија електричних возила. У овој глави дат је значајан допринос ове дисертације применом вишекритеријумске оптимизације трошкова микромреже са становишта власника електричних возила, власника микромреже, агрегатора и главне мреже, уз коришћење V2G технологије.

У Седмој глави анализиране су батерије електричних возила и њихови параметри који су важни за одређивање опасности од пожара. Анализирани су термички, механички и

електрични утицаји на батерије електричних возила, као и типични пожари електричних возила: пожари спонтаног паљења, пожари приликом пуњења, пожари услед саобраћајних удеса, пожари поновног паљења, као и пожари услед спољашњих фактора. Приказани су нивои опасности и ефекти пожара батерија електричних возила, као и стратегије гашења пожара електричних возила. Посебан допринос ове дисертације представља примена методе вишекритеријумске оптимизације за одређивање најопаснијег пожара возила са еколошког становишта. Тежински коефицијенти критеријума опасности од пожара одређени су применом BWM при чему је разматрано 30 критеријума подељених у 4 групе (штетни гасови, параметри сагоревања и ослобађања топлоте, токсични метали и анјони халогених елемената у чађи и пепелу). Затим је примењена метода PROMETHEE за рангирање опасности од пожара возила и утврђено је да су, са биоеколошког становишта, опаснији пожари електричних од пожара конвенционалних возила.

У Закључку је дат преглед резултата докторске дисертације који представљају оригинални допринос аутора анализи и решавању еколошких проблема и економских захтева потрошача и произвођача електричне енергије, власника електричних возила, агрегатора, власника микромрежа и дистрибутивних компанија.

Оптимално управљање ресурсима у микромрежама и рангирање опасности од пожара возила применом метода вишекритеријумске оптимизације представља значајан теоријски и практични допринос ове дисертације одрживом развоју.

Литература за Главу 1

- [1] “Our world in data,” *Global Change Data Lab*. [Онлајн]. Доступно на: <https://ourworldindata.org/co2-emissions> [Приступљено 15.08.2022.]
- [2] “Photovoltaics Report,” *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), PSE AG*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html> [Приступљено 22.06.2023.]
- [3] “Energy Independence and Security Act of 2007,” *International Energy Agency*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.iea.org/policies/910-energy-independence-and-security-act-of-2007> [Приступљено 15.08.2022.]
- [4] S. Youli, Z. Litifu, K. Nagasaka, “Efficiency of micro grid with storage battery in reliability, economy and environment assessments,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 3, pp. 154–162, 2009.
- [5] F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi, S. Bracco, M. Brignone, M. Robba, *Microgrid design and operation – Toward smart energy in cities*, Artech House, 2018.
- [6] C. Liu, K. T. Chau, D. Wu, S. Gao, “Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies,” *Proceedings of IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2409–2427, 2013, doi: 10.1109/JPROC.20132271951.
- [7] M. A. Abido, “Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1529–1537, November 2003.
- [8] J. H. Talaq, F. El-Hawary, M. E. El-Hawary, “A summary of environmental/economic dispatch algorithms,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 1508–1516, August 1994.
- [9] J. Nanda, D. P. Kothari, K. S. Lingamurthy, “Economic emission load dispatch through goal programming technique,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 3, pp. 26–32, March 1988.
- [10] C. M. Huang, H. T. Yang, C. L. Huang, “Bi-objective power dispatch using fuzzy satisfaction-maximizing decision approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, pp. 1715–1721, November 1997.
- [11] F. Mohamed, H. Koivo, “Online Management of MicroGrid with Battery Storage Using Multiobjective Optimization,” *The First International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG07)*, 12–14 April 2007, Setubal, Portugal.

-
- [12] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, “Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 1, pp. 138 – 148, 2011,
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610001823>
- [13] J. Rezaei, “Best-worst multi-criteria decision-making method,” *Omega*, vol. 53, pp. 49–57, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- [14] L. T. Saaty, *Decision Making: The Analytical Hierarchy Process*, New York, USA: McGraw-Hill, 1980.
- [15] J. P. Brans, *L'ingénierie de la décision: élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE*, Presses de l'Université Laval, 1982.
- [16] B. Mareschal, J. P. Brans, “Geometrical representations for MCDA, the GAIA module,” *European Journal of Operational Research*, 1988.
- [17] B. Roy, “Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE),” *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)*, vol. 8, pp. 57–75, 1968.
- [18] J. Figueira, V. Mousseau, B. Roy, “Electre Methods. In: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys,” *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, NY, vol. 78, pp. 133–153, 2005, https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_4
- [19] B. O. Saracoglu, “An Experimental Research Study on the Solution of a Private Small Hydropower Plant Investments Selection Problem by ELECTRE III/IV, Shannon's Entropy, and Saaty's Subjective Criteria Weighting,” *Advances in Decision Sciences*, pp. 1–20, 2015, <https://doi.org/10.1155/2015/548460>
- [20] S. Opricović, T. Gwo-Hshiung, “Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods,” *European Journal of Operational Research*, vol. 178 (2), pp. 514–529, 2007.
- [21] E. K. Zavadskas, A. Mardani, Z. Turskis, A. Jusoh, K. M. D. Nor, “Development of TOPSIS Method to Solve Complicated Decision-Making Problems — An Overview on Developments from 2000 to 2015,” *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(3), 645–682, 2016, doi:10.1142/S0219622016300019
-

2

Технологије производње и складиштења електричне енергије у микромрежи

2.1 Техничка еволуција електроенергетских система

2.2 Микромрежа

2.3 Технологије за производњу електричне енергије у микромрежи

2.4 Системи за складиштење електричне енергије

2.5 Пример микромреже

2.1 Техничка еволуција електроенергетских система

Пораст потрошње електричне енергије и пораст цена енергије у свету, потреба за смањењем коришћења енергије добијене из фосилних горива, тежња ка већој аутономији енергетских система, либерализација тржишта електричне енергије, као и прилагођавање захтевима за заштиту животне средине, утицали су на интензиван развој и трансформацију енергетских система, начина производње, дистрибуције и коришћења електричне енергије. Томе је значајно допринело и усавршавање дистрибуираних извора енергије, као и система за складиштење електричне енергије, али и потрошача као што су електрична возила, LED расвета, паметни уређаји, електричне топлотне пумпе, итд. Побољшања у енергетској електроници, савремене комуникационе и управљачке технологије омогућавају флексибилнију потражњу и ефикаснију потрошњу електричне енергије.

Традиционални електроенергетски систем представља сложену инфраструктуру која се састоји од производње, преноса, дистрибуције и потрошње електричне енергије. Производња електричне енергије се обавља трансформацијом различитих облика енергије у електричну енергију, често на веома великим удаљеностима од места потрошње. Пренос и дистрибуција обављају се водовима и кабловима који уносе губитке и смањују енергетску ефикасност система. Чулови губици су пропорционални квадрату струје, док снага која се преноси зависи од производа између напона и струје, па смањење јачине струје уз повећање напона повећава енергетску ефикасност целе инфраструктуре. Највиша могућа вредност напона зависи од техничких карактеристика на специфичном делу мреже и од захтева безбедности и заштите. Веома високи напонски нивои користе се у преносном систему, а ниски напонски нивои у дистрибутивном систему. Због тога је неопходно повезивање различитих делова електричне мреже са различитим напонским нивоима, а понекад и различитим фреквенцијама и типовима система који се повезују на местима конекција.

Пренос се врши за наизменични систем или једносмерни систем. Од прага електрана врши се пренос електричне енергије помоћу трофазне преносне мреже у Србији на високом напону од 400 kV и 220 kV преко преносних трансформаторских станица (ТС 400/220 kV и ТС 220/110 kV) до дистрибутивне мреже којом се енергија испоручује корисницима на средњем и ниском напонском нивоу. Дистрибутивним водовима се дистрибуира електрична енергија на средњим и ниским напонским нивоима 110 kV, 35 kV, 20 kV, 10 kV и преко

трансформаторских станица (ТС 110/35/10 kV, ТС 110/(20)10 kV, ТС 35/10 kV, ТС 20/0.4 kV, ТС 10/0.4 kV) до потрошача. Електрична енергија се испоручује индустријским потрошачима на напонским нивоима 35 kV и 10 kV, а домаћинствима, односно, широкој потрошњи на напонском нивоу 0.4 kV. На месту испоруке врши се мерење, а на основу тог мерења се обрачунава утрошак електричне енергије.

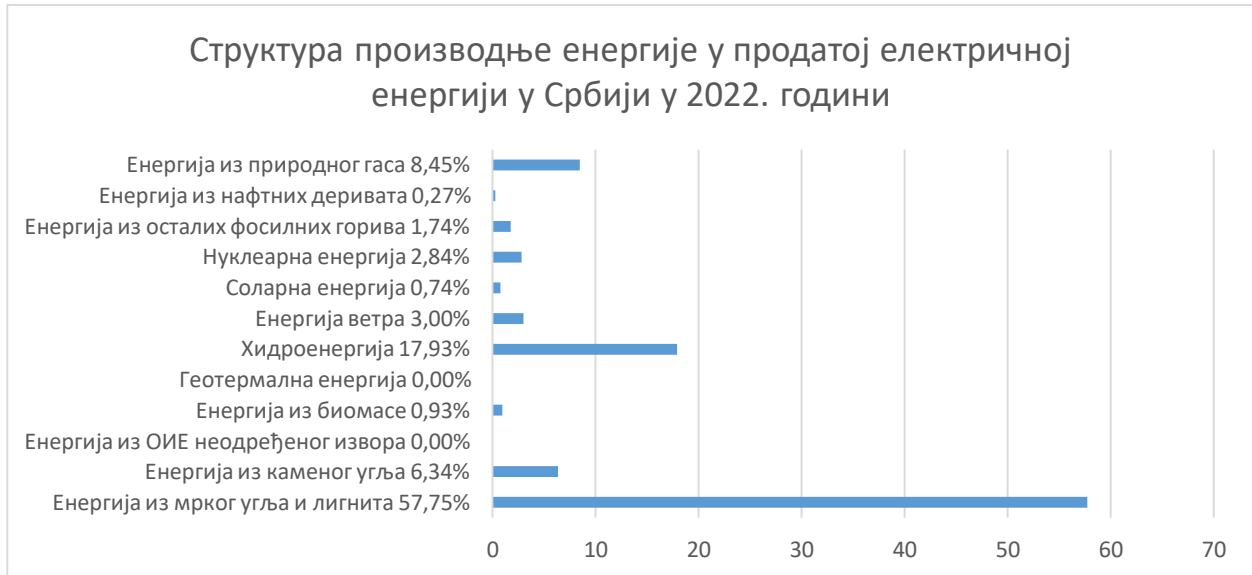
Први корак у еволуцији традиционалних енергетских система ка модерним енергетским системима представља развој енергетске електронике од краја осамдесетих година прошлог века. Претварачи и други уређаји енергетске електронике су омогућили претварање извора наизменичне струје (енг. Alternate Current – AC) у изворе једносмерне струје (енг. Direct Current – DC), што је утицало на промене и у преносним и у дистрибутивним системима. Уређаји као што су: FACTS (енг. Flexible AC Transmission Systems), SSSC (енг. Static Synchronous Series Compensation), STATCOM (енг. STATic synchronous COMpensation) и други, обезбедили су решење многих проблема квалитета електричне енергије (смањење падова напона, корекцију фактора снаге, активно и пасивно филтрирање, итд.) и флексибилност енергетских система.

Други корак представља даљи развој дистрибуираних извора енергије. Њима је иначе и започео историјски развој електроенергетских система 1882. године, када је Томас Алва Едисон конструисао прву електричну централу у Њујорку. До 1886. године његова компанија инсталирала је 58 микромрежа једносмерне струје у САД. Заслугом Николе Тесле и Џорџа Вестингхауса после 1895. године почео је прелаз на централизоване трофазне AC системе. Централизовани енергетски системи (са током енергије од централизоване производне јединице према потрошачима) били су од тада доминантни због мањих трошкова производње, преноса и дистрибуције, док су дистрибуирани извори енергије коришћени на удаљеним локацијама где није могла бити обезбеђена инфраструктура или као резервно напајање. То је почело да се значајно мења почетком XXI века.

Дистрибуирани извори енергије (енг. Distributed Energy Sources – DES) могу се поделити на две групе: обновљиви (енг. Renewable Energy Sources – RES) и конвенционални (енг. Conventional Energy Sources – CES). Прва група не утиче негативно на околину, а примарни извор енергије је бесплатан, али има стохастичку природу. Због тога није могуће произвести електричну енергију овим изворима кад год, колико год и где год је то потребно

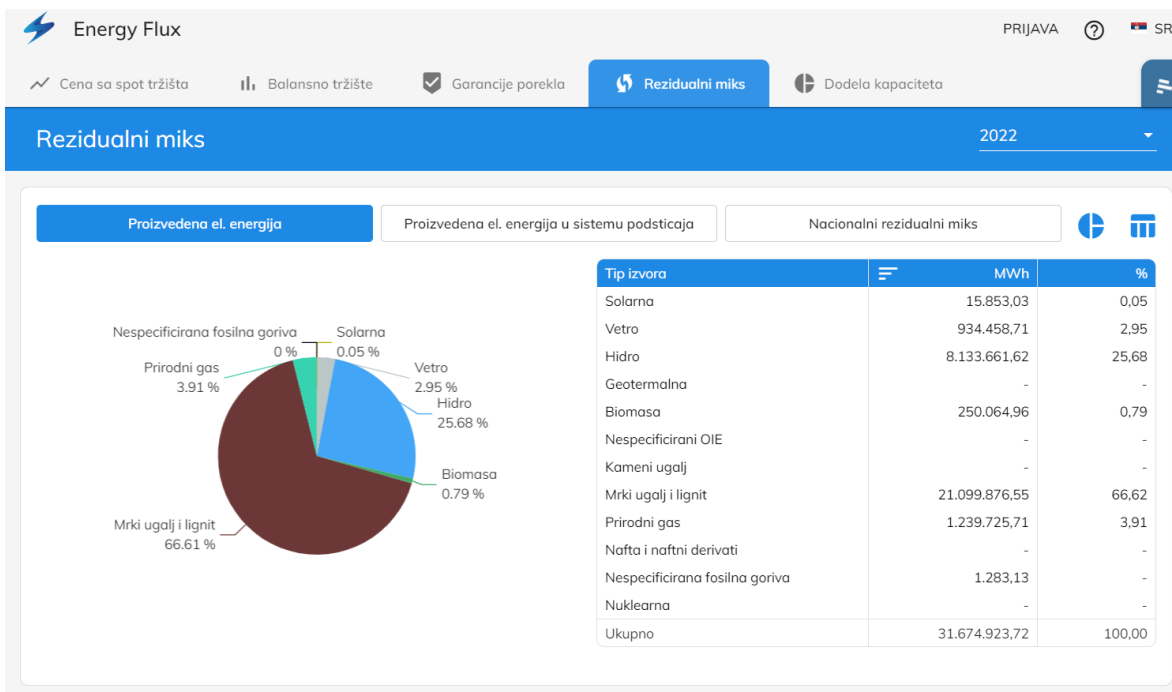
потрошачима. Њихов већи удео и интеграција у традиционалну електричну мрежу доноси бројне проблеме контроли, менаџменту и заштити система.

У циљу одрживог развоја неопходно је стално повећавати удео обновљивих извора енергије (хидроенергија, сунчева енергија, енергија ветра, геотермална енергија, енергија плиме и осеке) у производњи електричне енергије у односу на удео необновљивих извора чије коришћење негативно утиче на животну средину. Структура производње различитим изворима енергије [1] у продатој електричној енергији у Србији у 2022. години дата је на Сл. 2.1, а структура произведене енергије дата је на Сл. 2.2. У Србији је произведено око 2/3 електричне енергије из необновљивих извора, а око 1/3 из обновљивих извора енергије.

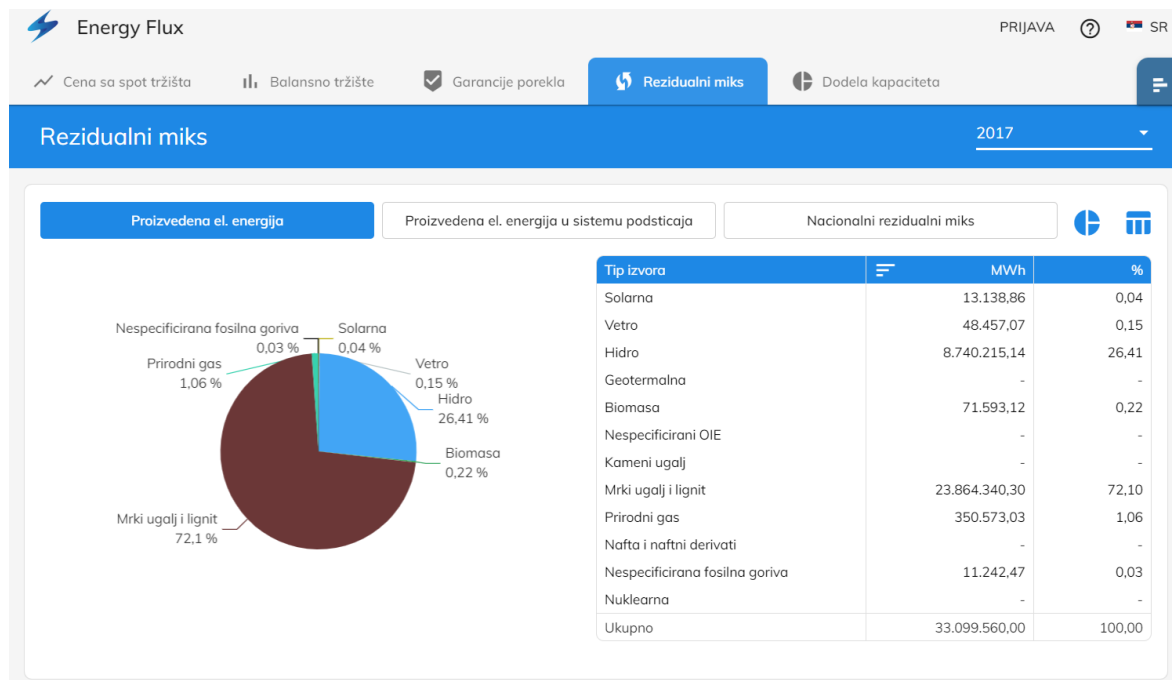


Сл. 2.1 Структура производње енергије различитим врстама извора у продатој електричној енергији у Србији у 2022. години

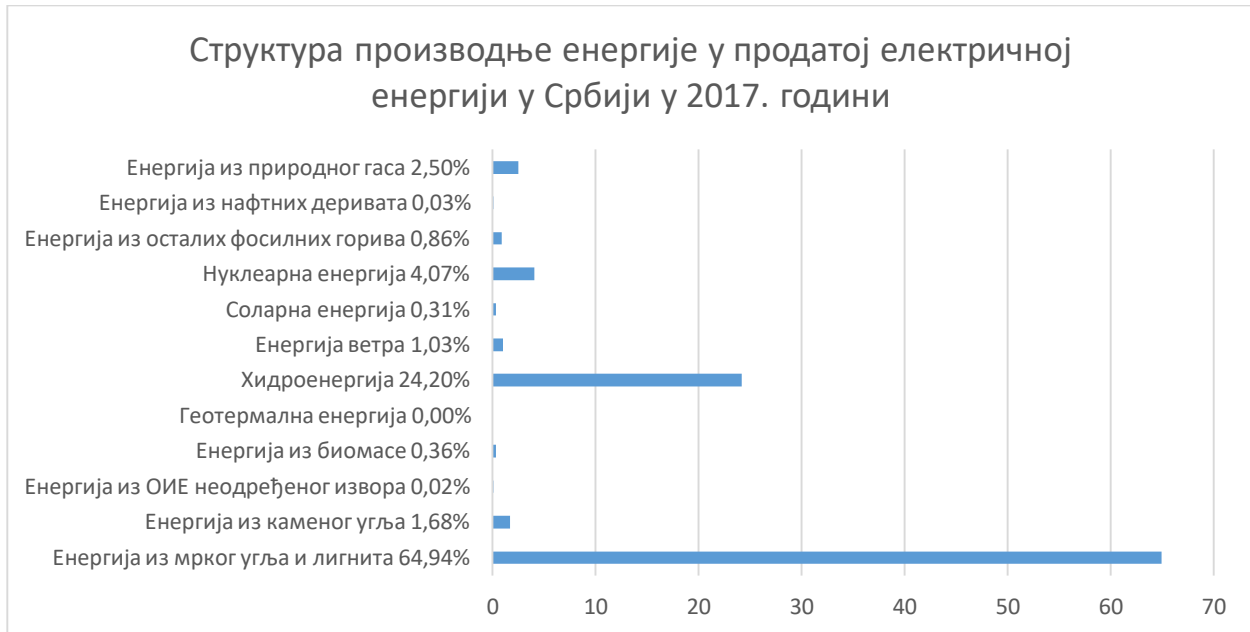
У 2017. години, удео необновљивих извора енергије био је за 10% већи у односу на 2022. годину (Сл. 2.3). Удео различитих врста извора енергије у укупној продатој електричној енергији у Србији 2017. године [1] приказан је на Сл. 2.4.



Сл. 2.2 Структура произведене електричне енергије у Србији у 2022. години [2]



Сл. 2.3 Структура произведене електричне енергије у Србији у 2017. години [2]



Сл. 2.4 Структура производње енергије различитим врстама извора у продатој електричној енергији у Србији у 2017. години

Од 2006. године Србија је део Енергетске заједнице коју чине земље Европске Уније, земље Југоисточне Европе и земље Црноморског региона (Украјина, Молдавија и Грузија). Разлика између потребне и произведене електричне енергије у Србији се увози или извози у оквиру Енергетске заједнице. Као пример, структура произведене електричне енергије у Србији, планирана и стварна потрошња, планирани и стварни увоз и извоз електричне енергије на дан 06.08.2023. год. у 17 h дати су на Сл. 2.5.

У Србији је, према важећој регулативи, максимална снага дистрибуираног извора који се може прикључити у једној тачки на дистрибутивну мрежу 10 MW.

Дистрибуирани ресурси (енг. Distributed Energy Resources – DER) обухватају не само дистрибуиране енергетске изворе (DES), већ и резервно напајање, системе за акумулирање енергије (SAE) и мере за управљање потрошњом (енг. Demand Side Management – DMS).

Трећи корак у еволуцији енергетских система од централизованих монодирекционих система ка бидирекционим системима (са токовима енергије у оба смера) са интегрисаним DER представља развој паметних мрежа (енг. Smart Grids) и микромрежа (енг. Microgrids).



Сл. 2.5 Структура производње енергије у Србији на дан 06.08.2023. год. у 17h [1]

Паметна мрежа је електрична мрежа која укључује обновљиве изворе енергије и друге енергетски ефикасне изворе енергије, системе за складиштење енергије, паметне уређаје, паметна бројила, електричне и термалне потрошаче, као и инфраструктуру

информационо-комуникационих технологија (енг. Information and Communications Technologies – ICT) која омогућава контролу и паметно управљање мрежом. Систем за управљање мрежом (енг. Energy Management System – EMS) користи ICT инфраструктуру, одређује производњу CES и усклађује је са производњом RES, управља системима за складиштење енергије и потрошњом управљивих потрошача (енг. Deferrable Loads) у складу са потрошњом неуправљивих потрошача (енг. Non-Deferrable Loads).

Према EISA-2007 (енг. Energy Independence and Security Act of 2007), [3] „паметну мрежу карактеришу:

- (1) Повећана употреба дигиталних информационих и контролних технологија за побољшање поузданости, сигурности и ефикасности електричне мреже;
- (2) Динамичка оптимизација рада мреже и ресурса, уз пуну сајбер безбедност;
- (3) Распоређивање и интеграција дистрибуираних ресурса и генератора, укључујући обновљиве изворе енергије;
- (4) Развој и инкорпорација одговора на потражњу, ресурса на страни потражње и енергетски ефикасних ресурса;
- (5) Примена паметних технологија (у реалном времену, аутоматизованих, интерактивних технологија које оптимизују рад апарата и потрошачких уређаја) за мерење, комуникације у вези са радом и статусом мреже, и аутоматизацију дистрибуције;
- (6) Интеграција паметних уређаја и потрошачких уређаја;
- (7) Распоређивање и интеграција напредних технологија за складиштење електричне енергије и смањење вршних оптерећења, укључујући електрична и хибридна електрична возила, као и уређаје за климатизацију са термалним складиштењем енергије;
- (8) Пружање правовремених информација и опција контроле потрошачима;
- (9) Развој стандарда за комуникацију и интероперабилност уређаја и опреме прикључених на електричну мрежу, укључујући инфраструктуру која опслужује мрежу;
- (10) Идентификација и смањење неразумних или непотребних баријера за усвајање технологије, праксе и услуга паметних мрежа.”

У оквиру истраживања, а у циљу усавршавања нових енергетских система и развоја паметних мрежа, посебно место заузимају микромреже.

2.2 Микромрежа

Микромрежа се дефинише као локални енергетски систем (Сл. 2.6) који укључује дистрибуиране изворе енергије, резервне генераторе, системе за складиштење енергије, групу повезаних електричних и термалних потрошача и централни EMS. Може бити повезана на главну мрежу у тачки међусобног повезивања са мрежом (енг. Point of Common Coupling – PCC), а може да ради и у острвском режиму.



Сл. 2.6 Шема микромреже

Постоје дистрибуирани извори енергије чија се излазна снага не може у потпуности предвидети и контролисати, као што су фотонапонске електране, ветроелектране, проточне хидроелектране и когенерациона постројења. Ако се користе у микромрежи, а претерано производе енергију у време мале потражње, енергија се мора ускладиштити у систему за складиштење. Ако они недовољно производе у време велике потражње, то морају да надокнаде контролабилни извори: генератори које покрећу парне турбине, хидроелектране

са акумулацијом, микротурбине, горивне ћелије, геотермална постројења, постројења која сагоревају биомасу, дизел генератори, мали модуларни нуклеарни реактори, итд. Микромрежа укључује контролабилне и неконтролабилне изворе енергије.

Микромрежа има тачно дефинисане границе које је одређују као електричну целину која се може прикључити и/или искључити са главне електричне мреже. Постоје резиденцијалне микромреже (једнофазне, најчешће снаге мање од 10 kW), мање комерцијалне (типично трофазне, снаге од 10 kW до 50 kW) и комерцијалне (снаге веће од 50 kW, па до 10 MW), [4].

Микромреже омогућавају поступну, поуздану и прихватљиву транзицију од централизованих ка децентрализованим енергетским системима.

Микромреже имају дугу историју која је започела 1882. године. Након много година доминације АС система у производњи и преносу, а DC система у преносу на велике даљине, DC системи поново добијају значајнију улогу и у производњи и у преносу електричне енергије захваљујући развоју енергетске електронике и RES.

Микромреже могу бити корисне у случају отказа и прекида напајања у главној мрежи из разлога угрожавања безбедности система, као и због ванредних ситуација или временских неприлика. Корисници микромрежа најчешће су: удаљена острва, руралне средине у земљама где не постоји развијена енергетска инфраструктура, индустријска предузећа, компаније, пословни паркови, универзитетски центри, стамбени и туристички комплекси, комунална предузећа, болнице, војне базе, итд.

Због све веће потребе за ширењем здравствених установа и болничких капацитета, болничке микромреже биће све бројније. Болнице троше око три пута више енергије од комерцијалних зграда исте величине, а њихова енергетска сигурност је веома важна.

Универзитети, истраживачке установе и универзитетски кампуси реализују микромреже које користе за своје потребе из економских разлога, због енергетске сигурности и независности, ради заштите животне средине и у циљу истраживања нових технологија. Универзитетима је важна употреба обновљивих извора енергије ради истицања циљева ублажавања климатских промена, као и за обуку студената за примену савремених технологија. Пошто универзитетски кампуси и универзитети користе велике

количине енергије за грејање и хлађење, за њих су погодне комбиноване топлотне и електричне микромреже које су енергетски ефикасније.

Микромреже јавне намене служе за снабдевање електричном енергијом у ванредним ситуацијама (ратно стање, природне катастрофе) за службе за спасавање, ватрогасно-спасилачке и полицијске службе, склоништа, комуникационе торњева, постројења за пречишћавање вода, итд.

Комунална предузећа развијају микромреже на подручју са својим купцима, јер имају заједничке циљеве као што су: ниже цене, боља поузданост енергетског система и “чистија” енергија.

Војска инсталира микромреже за своје потребе како би обезбедила независно снабдевање енергијом и побољшала сајбер безбедност. Војне микромреже потребне су у ратној ситуацији, јер се могу брзо инсталирати на одређеној локацији. Пошто користе RES и батерије овакве мреже смањују потребе за доставом горива на удаљене локације.

Микромреже за трговинске ланце, бензинске и сервисне станице омогућавају уштеде у редовним, као и рад у ванредним ситуацијама.

Многе компаније и предузећа су спремни да инвестирају у микромреже, како би обезбедили енергетску сигурност и дугорочну уштеду трошкова. Прекид напајања електричном енергијом је посебно скуп за велике дата центре у којима се складиште подаци.

За индустријски објекат, чак и тренутни прекид рада може бити изузетно скуп. У случају производње хране може се десити да је због губитка напајања произвођач приморан да заустави читав производни погон како би очистио опрему према хигијенским и безбедносним прописима, а то може трајати и неколико сати.

Микромрежа у пословном парку чини га знатно атрактивнијим за фирме које су посебно осетљиве на нестанак напајања електричном енергијом, као и за оне фирме које у свом пословању истичу еколошке вредности у први план. Микромреже су погодне и за индустријске зоне и индустријске паркове.

Микромреже су и даље прескупе за појединачне стамбене објекте, али могу бити исплативе за више стамбених јединица. Могуће је и прикључење стамбених микромрежа у виртуелне електране.

Коришћење микромрежа има многе предности у односу на централизоване електроенергетски систем, али има и много нерешених проблема [5], [6].

Предности микромрежа су:

1. Микромреже користе енергију ближе месту на коме се она производи, чиме се значајно смањују и електрични и топлотни губици при преносу енергије, за разлику од централизованих електроенергетских система. Такође, топлотна енергија која се ослобађа при производњи електричне енергије може се искористити за грејање воде или просторија у оближњим објектима уместо да се ослобађа у атмосферу;

2. Коришћење обновљивих извора енергије у микромрежи доприноси смањењу емисија штетних гасова који изазивају ефекат стаклене баште и убрзавају климатске промене;

3. Повећана сигурност снабдевања енергијом и отпорност на сајбер нападе на електроенергетски систем;

4. Могућност регулације напона и фреквенције;

5. Оптимизација потрошње енергије кроз боље усклађивање понуде са потражњом, уштеде због смањивања вршне потрошње и пребацивања потрошње у периоде са мањом потражњом. Допринос ове дисертације у тој области приказан је у Глави 5;

6. Могуће је оптимизовати избор контролабилних и неконтролабилних генератора узимајући у обзир економске и еколошке критеријуме, што је урађено у овој дисертацији у Глави 4;

7. Микромреже користе различите системе за складиштење енергије, а у те сврхе могу се додатно употребити и батерије електричних возила уз примену V2G технологије. Оптимизација њиховог коришћења у микромрежи приказана је у Глави 6 ове дисертације. Усавршавање нових система за складиштење енергије значајно ће допринети ефикасности микромрежа;

8. Микромреже доприносе смањењу трошкова, као и одлагању капиталних инвестиција и крупних улагања у енергетску инфраструктуру и повећање капацитета (нпр. „вршне” електране, подстанице, далеководи, системи за складиштење енергије, итд.);

9. Обезбеђено напајање у случају преоптерећења главне мреже. Минимизирање времена без напајања у случају ванредних ситуација и могућност алоцирања напајања за потребе високог приоритета током периода поремећаја.

Недостаци микромрежа су:

1. Технички проблеми у раду са главном мрежом као што су стабилност, транзијентни режими са варијацијама напона, поднапонима и пренапонима у тачки повезивања са главном мрежом, као и други проблеми са квалитетом електричне енергије;

2. Поновна синхронизација са главном мрежом након преласка на острвски рад микромреже;

3. Могућа велика одступања фреквенције у острвском режиму рада;

4. Проблеми заштите, који се разликују за случај острвског режима рада и мрежног режима рада. Пошто је циљ микромреже да обезбеди квалитетно и поуздано снабдевање енергијом, ако се квар догоди у главној мрежи, неопходно је изоловати микромрежу, а у случају да се квар догоди унутар микромреже треба изоловати минимални неисправни део);

5. Проблеми контроле;

6. Проблеми складиштења електричне енергије у батеријама које захтевају простор и одржавање, а још увек су скупе;

7. Обрачун и мерење електричне енергије који нису једноставни због двосмерних токова снага у микромрежи (док се у конвенционалном централизованом систему одвија једносмерни ток снаге од подстанице до оптерећења);

8. Економска несигурност у случају великих улагања у микромрежу;

9. Недовољно развијена регулатива односно законски прописи и стандарди за међусобно повезивање микромреже и главне мреже, као и за односе између оператора главне мреже, власника микромреже, агрегатора и потрошача електричне енергије. Могуће правне препреке за развој микромрежа су и закони који забрањују или ограничавају одређене активности, закони који повећавају трошкове пословања и неизвесност да ли ће нови закон бити примењен за регулисање микромрежа и наметање ограничења или трошкова који нису били предвиђени у време развоја или изградње микромреже.

2.3 Технологије за производњу електричне енергије у микромрежи

Микромреже могу својим корисницима обезбеђивати електричну енергију, али често постоје и захтеви за обезбеђивањем топлотне енергије, као и енергије за хлађење. Разлика између једноставне инсталације дистрибуираних извора и микромреже је у томе што микромрежа користи систем за контролу и управљање енергијом како би се минимизирали трошкови, смањиле штетне емисије гасова и оптимизовала производња енергије. Постројења која обезбеђују и електричну и топлотну енергију су когенерациона постројења (енг. Combined Heat and Power – CHP), а постоје и тригенерациона или полигенерациона постројења која обезбеђују електричну, топлотну енергију и енергију за хлађење. Њихов коефицијент ефикасности је знатно већи него у случају производње искључиво електричне енергије.

Дистрибуирани извор електричне енергије укључује било који генератор снаге од неколико kW до десетине MW прикључен на ниво дистрибутивног напона.

Дистрибуирани извори имају могућности да пруже исте услуге као централизовани ресурси, али због своје дистрибуиране и модуларне природе могу да пруже ове услуге на локацијама у електричној мрежи где су те услуге најпотребније. Важна карактеристика неких дистрибуираних извора је њихова модуларност која омогућава да се мање јединице стандардне величине могу интегрисати са другим јединицама истог типа. Модуларни системи се могу креирати од елемената као што су фотонапонски низови, соларни термални панели, ветротурбине, горивне ћелије, па чак и модуларни нуклеарни реактори. Предности флексибилног дизајна које нуди модуларност су: велики опсег излазне снаге која се може добити додавањем потребног броја модула, могућност проширења капацитета у случају повећане потражње за енергијом, већа поузданост у случају квара дела система (јер се може наставити рад са модулима који су остали на располагању) или престанка рада ради одржавања, скраћено време до пуштања у рад ако су додатни модули доступни.

Ако се налазе на правој локацији и раде у право време, дистрибуирани извори могу да обезбеде и боље могућности од централизованих ресурса. Иако је електрична енергија често скупља него у случају централизованог система, дистрибуирани извори нуде бројне могућности планерима електроенергетских система и регулаторима енергетског тржишта. Доносиоци одлука треба да размотре све предности и додатне трошкове и направе распоред

на друштвено најкориснији начин. Исти ресурс може бити ефикасније распоређен на некој другој локацији у систему, уз мање трошкове.

Дистрибуирани извори производе енергију у близини потрошача чиме се смањују губици приликом преноса енергије и повећава аутономија система [7-10]. Постојећи централизовани електроенергетски системи са великим производним јединицама не искључују паралелну употребу малих дистрибуираних капацитета који првенствено користе обновљиве изворе енергије, тако да они могу значајно допринети очувању стабилности и поузданости електроенергетског система.

Према функционалној улози, дистрибуирани извори могу бити:

- дистрибуирани извори за резервно напајање (енг. standby) који служе као резерва главном мрежном напајању код индустријских и приоритетних потрошача. За такве потребе најчешће се користе дизел-електрични агрегати, горивне ћелије и акумулаторске батерије.
- аутономни извори напајања (енг. stand-alone) који снабдевају појединачне потрошаче који нису прикључени на дистрибутивну мрежу. Најчешће се користе дизел-електрични агрегати, фотонапонски извори и ветрогенератори.
- извори за напајање удаљених потрошачких центара који раде као аутономни или као подршка мрежном напајању. Најчешће се користе мале хидроелектране, ветрогенератори, дизел-електрични агрегати и електране на биомасу.
- извори за когенеративну производњу топлотне и електричне енергије као што су термоелектране-топлане са гасним и парним микротурбинама, дизел-електрични агрегати, геотермалне електране и горивне ћелије.
- извори за покривање вршног оптерећења (енг. peak load shaving sources) који се користе у спреси са великим потрошачима за смањивање трошкова услед вршног оптерећења, као и за регулацију напона.
- извори за покривање базне производње (енг. base load sources) који су стално прикључени на дистрибутивну мрежу, а могу учествовати и у регулацији токова снага и напонских прилика. Такви извори су најчешће проточне мале хидроелектране, ветрогенератори и соларне електране.

Према инсталисаној снази, дистрибуирани извори енергије се могу поделити на микро, мале, средње и велике.

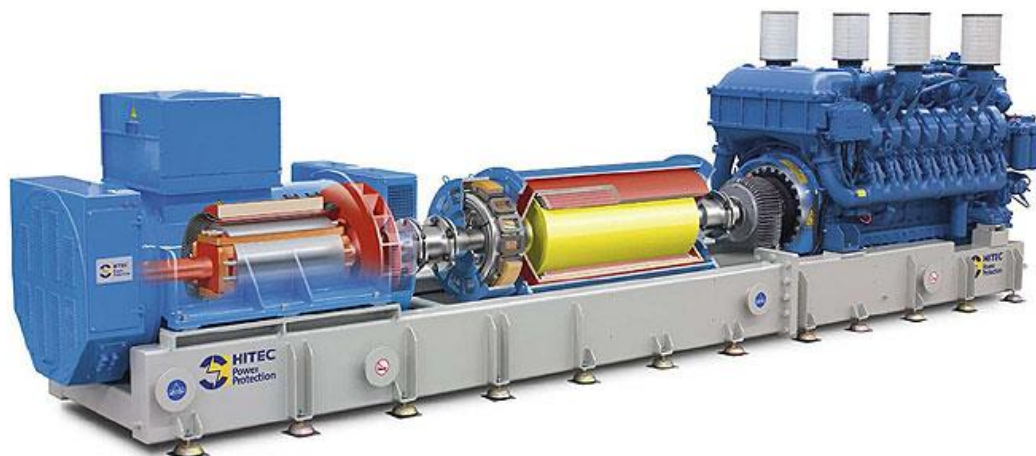
Према могућности управљања, дистрибуирани извори могу бити управљиви (енг. dispatchable) или неуправљиви (енг. non-dispatchable).

Према врсти примарног енергента који користе, дистрибуирани извори се могу поделити на обновљиве (ветрогенератори, соларне електране, мале хидроелектране, геотермалне електране, електране на биомасу и биогаз, горивне ћелије, електране које користе енергију морских таласа, плиму и осеку) и необновљиве у које спадају електране на фосилна горива (угаљ, нафта и природни гас). Због специфичности локација на којима се могу постављати, као извори у микромрежи овде нису разматране електране које користе енергију морских таласа, плиму и осеку, геотермалне електране, ни електране на биомасу.

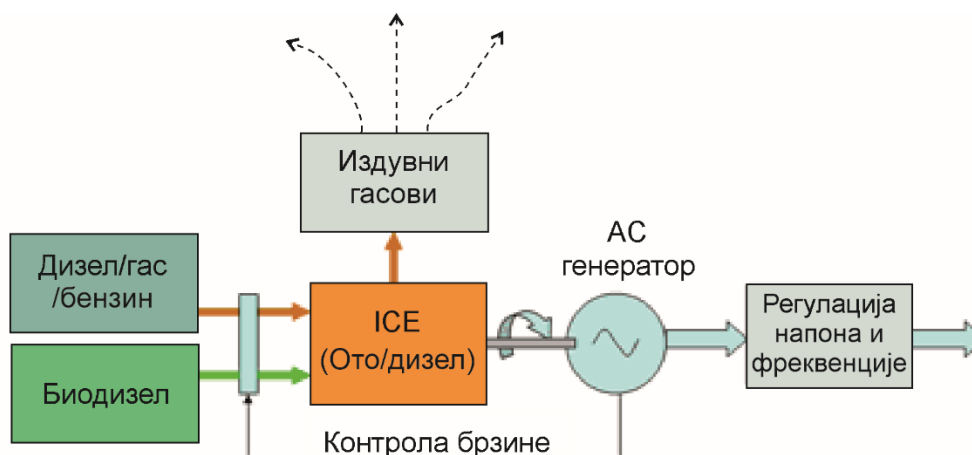
2.3.1 Генератори покретани моторима са унутрашњим сагоревањем

Мотори са унутрашњим сагоревањем – СУС мотори (енг. Internal Combustion Engine – ICE) у широкој су употреби због економичности, једноставности коришћења и доступности горива (бензин, природни гас, биогаз, дизел и биодизел). Ефикасност ранијих ICE је била релативно ниска и износила је око 30%, а новији ICE имају просечну ефикасност око 50%. Њихова технологија развијена је пре више од сто година. Могу се користити за механички погон, као и за покретање генератора за производњу електричне енергије. Спадају у необновљиве изворе. Снаге су им од неколико kW до 50 MW. За мање снаге користи се бензин као гориво, а за веће дизел. Овакви генератори могу се брзо пустити у рад (за време од неколико секунди до једног минута) и имају добар одговор на промену оптерећења. Вредност фактора снаге може се подешавати. Захтевају одређени простор за смештај генератора, управљачке опреме и система за хлађење.

На Сл. 2.7 приказана је спрега синхроног генератора и ICE на дизел гориво тј. дизел генератор. Овакав дизел генератор може имати снагу од 500 kW до 3 MW. Може се паралелно везати до 12 модула [11]. Принцип рада приказан је шемом на Сл. 2.8.



Сл. 2.7 Дизел генератор [11]



Сл. 2.8 Генератор са ICE

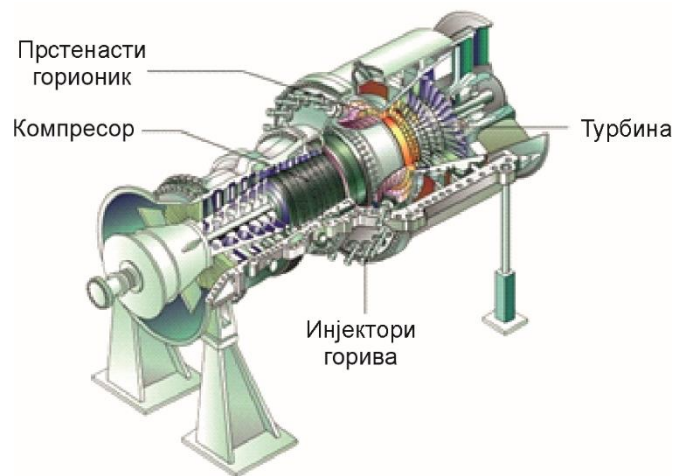
У микромрежама могу представљати допунске и резервне генераторе, а нарочито су потребни за оптерећења код којих би дуготрајни прекиди напајања имали озбиљне последице. Могуће је уградити ICE у системе когенерације, пошто се може користити топлота за загревање флуида доступна од расхлађивања металних делова и уља за подмазивање, као и од издувних гасова. У таквим случајевима, ефикасност је 85% до 90%.

Коришћење таквих генератора ствара еколошке проблеме, јер се приликом рада производи NO_x при процесу сагоревања, као и CO , CO_2 и PM честице због неправилне смеше горива и ваздуха и хлађења цилиндара. Још један њихов недостатак је што њихов

рад производи буку. Предност им је висока ефикасност, преносивост и једноставни начин складиштења горива. Постоје и захтеви одржавања који су ипак мањи за дизел моторе, него за моторе на природни гас. Могу бити корисни као подршка производњи електричне енергије у тренуцима вршних оптерећења. Одличан потенцијал за смањење емисија CO₂ имају ICE који веома ефикасно користе биодизел као гориво.

2.3.2 Индустијске турбине са унутрашњим сагоревањем

У индустријским турбинама са унутрашњим сагоревањем се компримује ваздух и пали гасовито или течено гориво, а производи сагоревања пролазе кроз аксијалне лопатице турбине и покрећу електрични генератор. Главни елементи овог извора електричне енергије су: вишестепени компресор, комора за сагоревање, вишестепена турбина и генератор. Гасна турбина приказана је на Сл. 2.9.

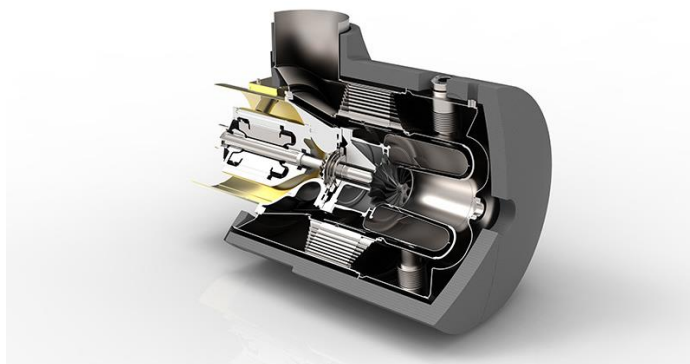


Сл. 2.9 Гасна турбина [12]

Турбине са унутрашњим сагоревањем користе се за производњу електричне енергије већ деценијама. Снаге су им у опсегу од око 1 MW до преко 100 MW [13]. Предност су им релативно ниски инсталациони трошкови, рекулерација топлоте кроз пару, мање емисије NO_x него у случају ICE и мањи трошкови одржавања, али је њихов недостатак мања електрична ефикасност од око 30%. Са овим особинама, гасне турбине се обично користе као дистрибуирани извори у когенерационим системима.

2.3.3 Микротурбине

Микротурбине су мали гасни генератори код којих су компресор и турбина монтирани на истој осовини и у једној комори.



Сл. 2.10 Пресек микротурбине [14]

Предност микротурбина је у томе што је њихова излазна снага веома велика у односу на запремину коју заузимају. Екстремно велика брзина обртања, у распону од 50000 о/min до 200000 о/min, омогућава да величина генератора буде и до 100 пута мања у односу на величину ICE исте снаге. Пресек микротурбине је приказан на Сл. 2.10. Микротурбине могу користити различита горива на високом и ниском притиску, укључујући природни гас, отпадни (кисели) гас, депонијски гас и пропан. Водоник, који је много реактивнији од природног гаса, био би још погоднији за каталитичко сагоревање. Уколико микротурбина користи биогориво, потребна је мала пумпа високог притиска да би гориво доспело у комору за сагоревање. Снаге микротурбина су од 1 kW до 1 MW, а неки примери микротурбина су дати на Сл. 2.11 а) и б). Микротурбине су погодне за когенерацију. Њихова електрична ефикасност је у опсегу од 25 до 33%, док је термичка ефикасност око 50%. Постоје проблеми са температуром топлоте која се емитује из издувних гасова, па је могуће искористити само око две трећине израчене топлоте. Без обзира на погонско гориво, микротурбине имају значајно нижи ниво емисија штетних гасова, а посебно емисија NO_x у односу на дизел ICE. Микротурбине емитују знатно ниже нивое буке и стварају далеко мање вибрација од ICE. Два главна недостатка су већи капитални трошкови и краћи животног век у односу на ICE. Постоји и могућност да буду инсталисане индивидуално или неколико њих у микромрежи.



Сл. 2.11 Микротурбине

а) снаге 65 kW и б) снаге 1000 kW [15]

2.3.4 Соларни генератори са концентраторима

Различите врсте концентратора соларне енергије се употребљавају како би се концентрисало сунчево зрачење и конвертовало у топлоту која се користи да произведе пару или топлу воду, као и за покретање турбине или Стирлингове машине. У микромрежама се често користе тањирасти концентратори [16] који усмеравају зрачење у тачку фокуса параболичног рефлектора у којој се налази Стирлингова машина (Сл. 2.12). Произведена топлота преноси се на радни флуид машине, најчешће хелијум или водоник и претвара у механичку енергију експанзијом и компресијом флуида. Механичка енергија се затим конвертује у електричну енергију помоћу синхроног генератора са сталним магнетом.

Типични тањирасти соларни генератор са Стирлинговом машином има електричну снагу од 1 kW и термалну снагу од 3 kW, док је електрична ефикасност око 14% и термална ефикасност око 42% [17], [18]. Стирлингова машина је чистија технологија него ICE, јер ограничено или уопште не емитује NO_x.



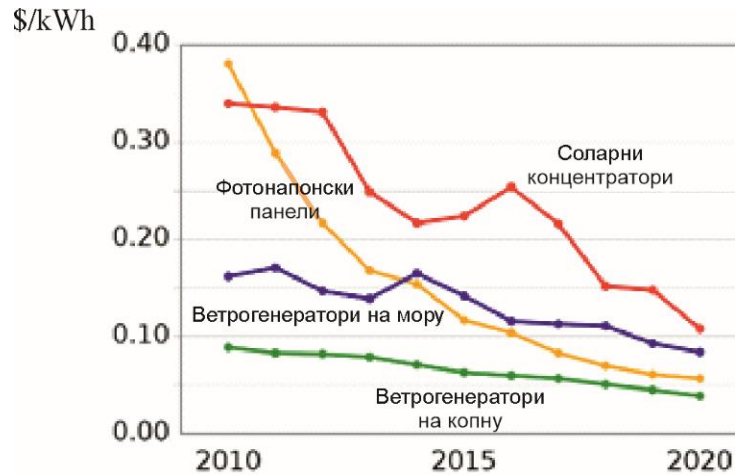
Сл. 2.12 Тањирасти соларни концентратор са Стирлинговом машином [16]

2.3.5 Фотонапонски панели

Фотонапонски (енг. Photovoltaic – PV) системи претварају светлосно зрачење у електричну енергију. Соларне ћелије се повезују редно и паралелно и групишу у модуле, а модули у низове и панеле који производе једносмерну струју која се по потреби може конвертовати у наизменичну струју помоћу претварача (инвертора). Сл. 2.13 приказује фотонапонске панеле инсталиране на крову стамбеног објекта [19]. Фотонапонски системи не производе емисије штетних гасова у току рада, поуздани су и имају занемарљиве оперативне трошкове. Трошкови за производњу електричне енергије овом технологијом опадали су у периоду од 2010. до 2020. године, као што је приказано на Сл. 2.14. Максимална ефикасност коју постижу комерцијални PV модули је око 25%, а најновије технологије [20] омогућавају ефикасност модула и до 40%.



Сл. 2.13 Фотонапонски панели на крову стамбеног објекта [19]



Сл. 2.14 Трошкови различитих технологија за производњу електричне енергије у периоду од 2010. до 2020. године

Тржиште соларних система је у сталном успону, са годишњим растом од 40% у периоду од 2000. до 2016. године [20]. Крајем 2016. године пет земаља са највећим инсталираним соларним капацитетима биле су Кина (77.4 GW), Јапан (42.8 GW), Немачка (41.3 GW), САД (40.9 GW) и Италија (19.3 GW). Трошкови за производњу електричне енергије опадају најбрже у односу на трошкове других технологија обновљивих извора енергије, па чак брже и од трошкова соларних система са концентраторима, као и од трошкова ветрогенератора на мору (енг. off-shore) и на копну (on-shore), као што је приказано на Сл. 2.14. Ова технологија постала је незаобилазни извор енергије у микромрежама.

2.3.6 Микро и мале хидроелектране

Хидроенергија је водећи обновљиви извор електричне енергије у свету, јер има удео од око 45% у капацитету свих обновљивих извора, а учествује са 17% у укупно произведеној електричној енергији свим изворима енергије у свету, према подацима за 2020. годину [21]. Хидротурбине претварају хидроенергију у механичку енергију, а затим у електричну енергију. Хидроелектране представљају веома поуздане и економски оправдане изворе електричне енергије који могу доприносити стабилности електроенергетског система и ублажити последице интермитентности других обновљивих извора енергије као што су соларна енергија и енергија ветра [22].

Након интензивне изградње великих хидроелектрана (снага већих од 10 MW) у развијеним земљама у првој половини двадесетог века, последњих деценија се оне граде углавном у земљама са убрзаним развојем, као што су нпр. Кина, Индија и Бразил, док се у развијенијим земљама чешће граде мале хидроелектране (снага до 10 MW). Посебна пажња се све више посвећује захтевима минималног утицаја на екосистеме, захтевима заштите човекове околине и одржању еколошки неопходних водених протока. Малe хидроелектране (од 100 kW до 10 MW) већих снага обично користе синхроне генераторе, а мале хидроелектране мањих снага обично асинхроне генераторе. У употреби су и двострано напајани асинхрони генератори да би се добила боља регулација брзине обртања. Мини хидроелектране имају снаге од 100 kW до 500 kW, а микро хидроелектране имају снаге до 100 kW. У микромрежама се најчешће користе деривационе проточне хидроелектране (Сл. 2.15), код којих нема потребе за браном и акумулацијом, што им даје и еколошко оправдање. Вода из горњег тока скреће се у систем цеви и води се до турбине у машинској згради. Машинска зграда је смештена уз реку на нижем нивоу у односу на горњи ток и у њој се могу налазити и акумулаторске батерије које се допуњавају једносмерном струјом [23], [24].

У деривационим хидро електранама се углавном користе акцијске турбине, чији су најпознатији типови: Pelton, Turgo и Cross-flow турбине за мале падове (типа Banki-Mitchell-Osseberger), а за мале падове и велике протоке користе се реакцијске турбине пропелерног типа (Bulb, Straflo, Tube, Kaplan), Francis-ова, као и хидрокинетичке турбине [25].

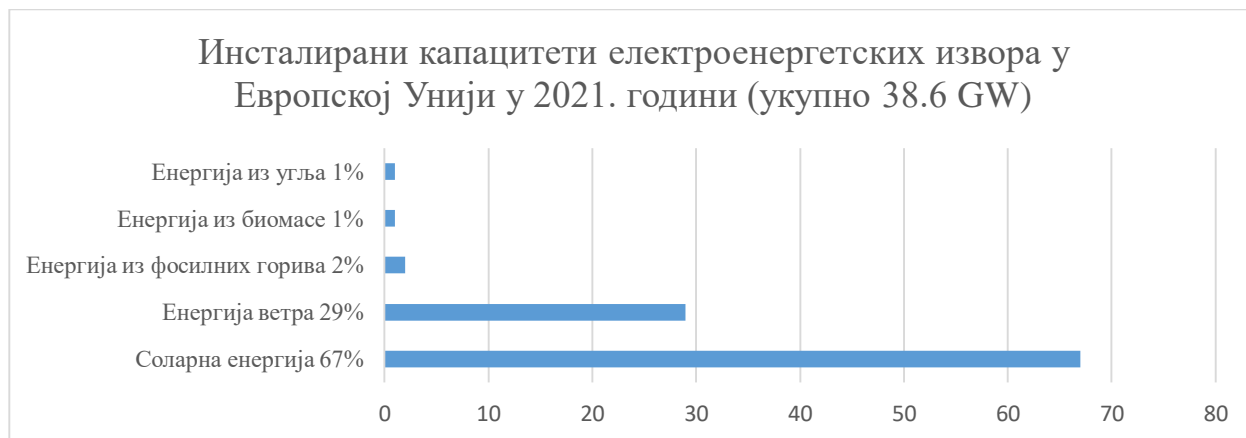


Сл. 2.15 Деривациона хидроелектрана [23]

2.3.7 Мали ветрогенератори

Енергија произведена обновљивим изворима у Европској Унији у 2021. години је била 21.8% од укупно потрошене енергије произведене свим технологијама [26]. Трошкови за производњу електричне енергије из енергије ветра опадају (Сл. 2.14), инсталирани капацитети ветрогенератора се повећавају у свету, а најбржи раст капацитета је у Европи. На Сл. 2.16 приказани су новоинсталирани капацитети извора електричне енергије у земљама Европске уније у 2021. години. Око 97% додатних капацитета је из обновљивих извора, односно, 37.3 GW од укупно 38.6 GW (у поређењу са 91% 2020. године). Фотонапонски генератори предњаче са 67% новоинсталираних капацитета у 2021. години, док ветрогенератори учествују са 29%, постројења на биомасу са 1%, а генератори на фосилна горива, угаљ и гас заједно са 3% и нема додатних нуклеарних капацитета.

Генератори који користе енергију ветра и соларну енергију се веома често користе и у микромрежама, а њихова стохастичка природа захтева инсталацију додатних управљивих извора и система за складиштење енергије из разлога поузданости и стабилности система, као и побољшања квалитета електричне енергије.



Сл. 2.16 Инсталирани капацитети електроенергетских извора у ЕУ у 2021. години

Ветрогенератори великих снага на копну (onshore), ветрогенератори великих снага у мору (offshore) и велики ветропаркови прикључују се на мрежу на високонапонском нивоу и не могу се сматрати дистрибуираним генераторима. Повољне локације за ветрогенераторе малих снага су ветровите локације као што су узвишења на земљи, брда, обале река и мора. Ветрогенератори мањих димензија могу се постављати и на крововима зграда, у двориштима, у вртovima, па чак и интегрисани у конструкцију објекта (први такав објект у свету је Светски трговински центар у Манами, главном граду Бахреина, висине 240 m, чије су две куле повезане са три моста на којима су уграђене три ветротурбине, пречника 29 m и појединачне снаге 225 kW, приказан на Сл. 2.17).



Сл. 2.17 Светски трговински центар у Манами, Бахреин [27]

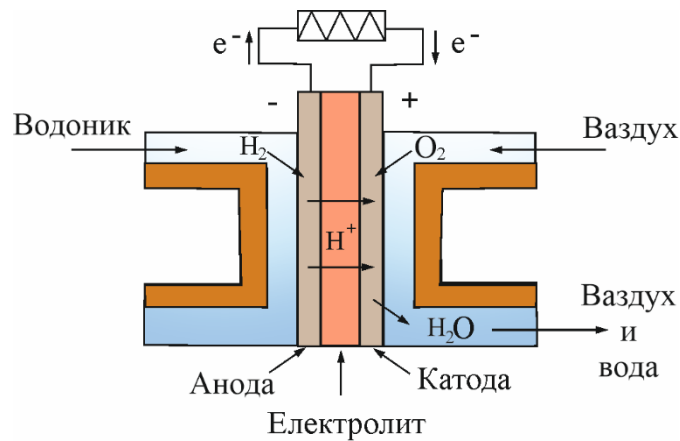
Малим ветротурбинама се сматрају ветротурбине снаге мање од 100 kW (према NREL – The U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory). Према Стандарду SRPS EN 61400-2:2017 мала ветротурбина је она чија је површина ротора мања од 200 m², односно, пречник мањи од 16 m, а називна снага мања од 75 kW.

Мале ветротурбине могу бити са вертикалном или са хоризонталном осовином. Ветротурбине са вертикалном осовином су типа Savonius, Darrieus, Gorlov, Giromill-Darrieus (H-турбина), и друге. Ветротурбине са хоризонталном осовином могу имати ротор са једним, два или три крака.

2.3.8 Горивне ћелије

У горивним ћелијама се хемијска енергија директно конвертује у електричну енергију, а као нуспроизводи се добијају топлотна енергија и вода. Горивне ћелије имају веома ниске емисије штетних гасова (и то само при раду на високим температурама), а осим тога не емитују буку и не производе вибрације. Због тога су веома погодне и еколошки оправдане као додатни управљиви извор енергије у микромрежама. Ефикасне су и поуздане, а ослобођена топлота може се користити у когенерационим и тригенерационим системима. Ефикасност горивних ћелија је од 25% до 60%, а у когенерационом моду од 70% до 90%. Основни недостаци ове технологије су: складиштење водоника (који мора да има веома низак ниво нечистоћа, јер оне негативно утичу на век трајања горивних ћелија) и његова експлозивност у реакцији са ваздухом, као и још увек висока цена производње по kWh електричне енергије. Због тога је практичније искористити водоник издвајањем из бензина, пропана или природног гаса реформовањем, гасификацијом биомасе или електролизом воде. У хибридни системима за процес електролизе воде користи се вишак произведене енергије из обновљивих извора (PV панела или ветрогенератора) након испуњења захтева потрошње и капацитета за складиштење енергије. У овом процесу се производи водоник који се ускладишти у главном или помоћном резервоару и користи за производњу енергије горивним ћелијама, онда када производња PV панелима или ветрогенераторима није довољна.

Основни делови горивне ћелије су две електроде (анода и катода), катализатор и електролит (Сл. 2.18). На аноду се доводи гориво (најчешће водоник, или метан, метанол, сирћетна киселина, раствор глукозе). Анода је обложена платином или паладијумом као катализатором и раздваја водоник на позитивне јоне и негативне електроне. На электроду се обично наноси катализатор у количини 5 g/m^2 .



Сл. 2.18 Горивна ћелија типа PEMFC

Као електролити се користе базе, киселине, керамички материјали, карбонати, или мембране, па се разликују следећи типови горивних ћелија: алкалне горивне ћелије (Alkaline Fuel Cells – AFC), горивне ћелије са фосфорном киселином (Phosphoric Acid Fuel Cells – PAFC), са чврстим оксидом (Solid Oxide Fuel Cells – SOFC), са растопљеним карбонатом (Molten Carbonate Fuel Cells – MCFC) и са протонски проводном мембраном (Proton Exchange Membrane Fuel Cells – PEMFC). Електролит или мембрана допуштају само позитивним јонима да прођу према катоди, док електрони стварају једносмерну струју пролазећи кроз спољашње коло у коме је потрошач. На катоду се доводи оксидационо средство (најчешће кисеоник) које се редукује, а затим се у реакцији са позитивним јонима водоника добија вода. Емисије штетних гасова и ефикасност појединих типова горивних ћелија дати су у Таблици 2.1.

Таблица 2.1 Ефикасност и емисије штетних гасова различитих типова горивних ћелија [9]

Тип горивне ћелије	Ефикасност	Ефикасност у CHP	Емисија CO ₂ [g/kWh]	Емисија NO _x [g/kWh]	Емисија CO [g/kWh]
PEMFC	25 – 45%	70 – 80%	520 – 620	0.007 – 0.05	0.01 – 0.04
PAFC	35 – 45%	80 – 90%	430 – 520	0.007 – 0.03	0.01 – 0.03
MCFC	40 – 60%	80 – 90%	400 – 450	0.02 – 0.03	0.01 – 0.02
SOFC	40 – 60%	80 – 90%	400 – 430	0.004 – 0.025	0.01 – 0.02

Електрични напон зависи од врсте горива и квалитета ћелије, а износи око 1 V. Да би се добио виши напон, ћелије се редно везују у низове. Редно-паралелним везивањем добијају се пакети горивних ћелија захтеване снаге, од неколико kW до неколико MW. Минимални број ћелија пакета је 50, а могуће је повезати и више хиљада ћелија.

Системи са горивним ћелијама састоје се од подсистема за обезбеђивање горива, пакета горивних ћелија, подсистема за регулисање и праћење параметара система (вентили, сензори, вентилатори, итд.), уређаја енергетске електронике и контролно-мерних уређаја. Генератор са горивним ћелијама (Сл. 2.19) у микромрежи може бити примарни извор, резервни извор (ако се користи у комбинацији са другим обновљивим изворима енергије), део когенерационог или тригенерационог система [28]. У случају да је потребно користити овакве генераторе као резервне, треба знати да се време стартовања генератора може значајно разликовати, нпр. за PEMFC је од 50 s до 5 min, а за PAFC од 50 min до 4 h.



Сл. 2.19 Генератор са горивним ћелијама [29]

2.4 Системи за складиштење електричне енергије

Производња обновљивим изворима електричне енергије који нису у потпуности управљиви не зависи само од капацитета и карактеристика генератора, него и од услова који се тешко могу прецизно предвидети (за PV генераторе од осунчаности, облачности, температуре, као и од запрљаности панела, а за ветрогенераторе од брзине ветра, броја сати са технички употребљивим ветром, итд.). Неки од услова могу се релативно добро проценити на основу локације и годишњег доба, а још боље уколико се процењују за релативно кратак период унапред. У периодима смањене производње треба користити додатне изворе енергије, а у периодима повећане производње треба ускладиштити вишак електричне енергије. Системи за складиштење електричне енергије (енг. Electrical Storage Systems – ESS) морају бити економски исплативи и морају испуњавати захтеве законске регулативе што се тиче опасности од пожара и угрожавања животне средине. Њихова употреба омогућава побољшавање поузданости напајања и квалитета електричне енергије, одлагање инвестиција у нове капацитете, управљање потрошњом, могућност продаје вишка енергије из микромреже у периодима високе потражње у главној мрежи, учешће у компензацији снаге, регулацији напона и регулацији фреквенције. ESS конвертују вишак електричне енергије у облик погодан за акумулирање из кога се касније користи енергија по потреби. Поуздан рад система обезбеђује се управљачким и контролним компонентама, у чему важну улогу имају уређаји енергетске електронике, контролер напуњености и електронске компоненте у постизању координације са осталим компонентама мреже.

Најважније карактеристике ESS су: капацитет ESS изражен у J или Wh (количина енергије која се може акумулирати), специфична енергија изражена у Wh/kg (капацитет по јединици масе ESS), специфична снага изражена у W/kg (снага која се може добити по јединици масе ESS), границе при пуњењу и пражњењу које зависе од начина пуњења и пражњења, минимално стање напуњености, животни век (период експлоатације у задатим радним условима), број циклуса пуњења и пражњења после кога систем не мења значајно своје акумулационе способности, називни и радни напон и струја, радна температура, брзина самопражњења, инвестициони и погонски трошкови. У случају акумулатора и батерија често се капацитет изражава и у Ah, односно, преко количине наелектрисања која се може пренети при пражњењу сталном струјом у току периода датог у часовима.

Анализа ESS погодних за коришћење у микромрежама дата је у [30], [31].

Према [32] ESS се могу класификовати у две категорије:

- динамичке ESS са малим капацитетом и могућношћу веома брзог пуњења и пражњења (инерционе масе, системи са суперпроводним магнетним материјалима, двослојни кондензатори);
- споре ESS за дуготрајно складиштење енергије, најчешће са великим капацитетом и малом брзином пуњења и пражњења (реверзибилне хидроелектране, системи са компримованим ваздухом).

Према облику акумулиране енергије ESS могу бити:

- Механички системи (реверзибилне хидроелектране, системи са компримованим ваздухом, инерционе масе, гравитациони системи);
- Електрохемијски системи (оловни акумулатори, акумулатори на бази никла, проточни акумулатори, литијум-јонски акумулатори, натријум-сулфидни акумулатори, итд.);
- Хемијски системи (системи за акумулирање водоника);
- Електрични системи (ултра-кондензатори, системи са суперпроводним магнетним материјалима);
- Термички системи (растопи соли, криогенски системи, итд.).

2.4.1 Механички системи за складиштење енергије

Реверзибилне хидроелектране омогућавају складиштење потенцијалне енергије воде тако што се у периоду повећане производње електричне енергије пумпама пребацује вода из доње акумулације (на нивоу реке или језера) у горњу акумулацију и тада раде у пумпном режиму рада. У периоду повећане потражње за електричном енергијом у мрежи, пропушта се вода из горње у доњу акумулацију и хидроелектрана ради у генераторском режиму. Степен искоришћења реверзибилне хидроелектране је у опсегу од 0.7 до 0.85. Од капацитета за складиштење електричне енергије у свету око 90% чине капацитети реверзибилних хидроелектрана, јер је ова технологија економичнија у односу на остале.

Системи са компримованим ваздухом омогућавају складиштење механичке енергије (у дијабатском систему који није топлотно изолован у односу на околину) или складиштење механичке и топлотне енергије (у адијабатском систему који је топлотно изолован у односу на околину). У оба случаја електрична енергија се користи за рад компресора који компримује ваздух који се складишти у подземном резервоару (природном или вештачком). У току пражњења компримовани ваздух се загрева, меша са природним гасом и сагорева у процесу експанзије у турбини. Степен искоришћења система је мањи од 0.5. Ови системи имају велики капацитет складиштења енергије, али имају високе инвестиционе трошкове и тешко је наћи повољну локацију за изградњу подземног резервоара.

Системи са инерционим масама омогућавају складиштење електричне енергије њеним претварањем у кинетичку енергију обртне масе која се покреће преко групе мотор-генератор. У спреси са електричном машином систем може да преда вишак енергије убрзавањем осовине и да касније ту енергију преузме успоравањем осовине. Количина ускладиштене енергије може се оптимизовати променом момента инерције и променом брзине обртања инерционе масе. Могуће је коришћење спороходних инерционих маса брзине обртања до 10 000 обртаја/min или брзоходних инерционих маса брзине обртања до 100 000 обртаја/min. Инерционе масе се користе за реализацију система за непрекидно напајање у комбинацији са акумулаторским батеријама при чему оне служе за премошћавање кратких, док акумулаторске батерије служе за премошћавање дужих прекида напајања. Недостаци система са инерционим масама су велики инвестициони трошкови, мали капацитет и велика брзина самопражњења система од 0.4 до 0.8% по сату.

Гравитациони системи се заснивају на претварању вишка електричне енергије из обновљивих извора у потенцијалну енергију масивних блокова, на складиштењу енергије, а затим на коришћењу гравитације за спуштање тих блокова од композитних материјала ради поновне производње електричне енергије. На Сл. 2.20 приказан је први светски гравитациони систем за складиштење енергије у Рудонгу, у близини Шангаја, Кина, који се налази поред ветроелектране. Систем је снаге 25 MW, капацитета 100 MWh, са очекиваних 35 година техничког века трајања. Циклусима пуњења и пражњења управљају компјутерски систем и софтвер система машинског вида.



Сл. 2.20 Гравитациони систем за складиштење енергије у Рудонгу, у близини Шангаја, Кина [33]

2.4.2 Електрохемијски системи за складиштење енергије

Оловни акумулатори састоје се од ћелија у којима су две електроде и електролит. Позитивна електрода је од олово-диоксида PbO_2 , негативна од олова (Pb), док је електролит раствор сумпорне киселине, са 20% до 40% H_2SO_4 и дестиловане воде. Напон између електрода потпуно напуњене ћелије је 2.12 V, па се више ћелија везује редно да би се добио већи напон акумулатора. Ефикасност пуњења, као и пражњења, је око 95%, па је степен искоришћења једног циклуса око 90%. Постоје акумулатори са плитким пражњењем (који се могу испразнити до 75% од њиховог укупног капацитета) и акумулатори са дубоким пражњењем (који се могу испразнити до 20% од њиховог укупног капацитета). За оловне акумулаторе важно је да раде на температури близу назначене, јер то значајно утиче на животни век акумулатора. Просечни век трајања је око 20 година ако ради на назначеној радној температури 25 °C, а може бити 44% краћи ако ради на 35 °C [9]. Назначени број циклуса пуњења – пражњења је од 500 до 2000. Специфична енергија оловног акумулатора је око 40 Wh/kg. Губици због самопражњења су око 0.2% дневно при температури од 25 °C.

Акумулатори на бази никла (Ni) састоје се од ћелија у којима су две електроде и електролит. Носећи део електрода направљен је од челичног перфорираног лима или челичне плетене мреже, па се називају и челичним акумулаторима. Позитивна електрода је од Ni или од једињења Ni. Ако је негативна електрода од кадмијума (Cd), то су Ni-Cd

акумулатори. Они имају значајне предности у односу на оловне, јер имају већи опсег радних температура и не могу се препунити, а век трајања мање зависи од дубине пражњења. Напон потпуно напуњене ћелије је 1.29 V. У условима без екстремних варијација температуре амбијента може се очекивати око 2000 циклуса пуњења – пражњења и век трајања око 25 година. У екстремним условима век трајања може се смањити на 8 година. Због токсичности кадмијума све чешће се користе никл-металхидридни (Ni-MH) акумулатори и натријум-никлхлоридни (Na-NiCl₂) акумулатори (Zebra). Ni-MH акумулатори имају специфичну густину енергије око 90 Wh/kg, мању цену од Ni-Cd акумулатора и краћи век трајања. Њихова мана је висок интензитет самопражњења (20% у току 24 h након пуњења, а затим 10% месечно [9]). Na-NiCl₂ имају специфичну густину енергије око 120 Wh/kg.

Проточни акумулатори (редукционо – оксидационе или хибридне батерије) имају електроде уроњене у електролит као класични акумулатори. За разлику од њих, хемијски реагенти и субпродукти реакције смештени су у засебним резервоарима из којих се упумпавају или испумпавају као код горивних ћелија, због чега се називају хибридним батеријама. Век трајања је од 5 до 30 година, а број циклуса пуњења – пражњења од 3 000 до 10 000.

Литијум-јонски (Li-Ion) акумулатори имају високу специфичну густину енергије од око 170 Wh/kg, а низак ниво самопражњења од 5% месечно, назначени број циклуса пуњења-пражњења од око 4000 и век трајања око 10 година. Иако су Li-Ion батерије скупље од осталих, често се користе у микромрежама и електричним возилима. Могу се користити у електричној мрежи за регулацију учестаности ради подршке интеграцији ветроелектрана.

Натријум-сулфидни (Na-S) акумулатори одликују се степеном искоришћења од 0.85 до 0.92 и високом специфичном густином енергије од 150 до 240 Wh/kg, али су им радне температуре око 300 °C. Због високе радне температуре потребна је употреба грејача и топлотне изолације.

На Сл. 2.21 приказан је највећи европски електрохемијски (акумулаторски) систем за складиштење енергије у Пилсвуду, Енглеска, капацитета 196 MWh.



Сл. 2.21 Акумулаторски систем за складиштење енергије у Пилсвуду, Енглеска [34]

2.4.3 Хемијски системи за складиштење енергије

Системи за акумулирање водоника за горивне ћелије исплативи су уколико се водоник добија електролизом воде или из горива богатих угљоводонцима. Енергија за процес електролизе може се добити из фотонапонских генератора или из ветрогенератора. Водоник се најчешће складишти у гасовитом стању, али се може складиштити и у течном стању и у виду металних хидрида. Водоник има велики топлотни капацитет, а енергија потребна за сагоревање водоника је 10 до 15 пута мања од енергије паљења бензина и природног гаса. Енергија која се ослобађа сагоревањем водоника је око 2.4 пута већа од енергије која се ослобађа сагоревањем бензина или природног гаса, на нормалној температури и притиску, а продукт сагоревања је вода. Ако водоник сагорева у ваздуху ради покретања парних турбина у електранама, вода има мали садржај оксида азота.

2.4.4 Електрични системи за складиштење енергије

Ултра-кондензатори или електрохемијски двослојни супер-кондензатори, псеудо-супер-кондензатори и хибридни супер-кондензатори имају могућност складиштења знатно веће енергије по јединици масе него класични електрични кондензатори. Електроде ултра-кондензатора обложене су активним угљеником, између њих је танак изолатор од порозног материјала, а читава конструкција налази се у чврстом или течном диелектрику. У односу на батерије, супер-кондензатори су бољи системи за складиштење енергије, јер имају дужи

век трајања, већи број циклуса пуњења-пражњења, мању температурну зависност, већу специфичну снагу, брже пражњење, нису осетљиви на ударце и вибрације, а не садрже тешке метале.

Суперпроводни системи за складиштење магнетне енергије (енг. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES) имају ефикасност већу од 95%. Ови системи могу да акумулирају велике количине енергије (преко 20 MWh) и имају екстремно кратко време одзива. SMES складишти магнетну енергију створену протицањем једносмерне струје кроз суперпроводни намотај који је криогенски охлађен на температуру испод његове критичне суперпроводне температуре. Суперпроводници се праве од легуре ниобијума и титанијума. Криогенски хладњак се састоји од неколико компресора и вакуумираног кућишта, а као расхладни медијум користи се хелијум за ниско-температурне системе (чије су радне температуре испод - 250 °C) или течни азот за високо-температурне системе (чије су радне температуре око - 160 °C). На радној температури интензитет самопражњења је 0%. Ускладиштена магнетна енергија може се вратити у мрежу као електрична енергија пражњењем намотаја. Конвертор и појачавач трансформишу наизменичну струју у једносмерну при пуњењу намотаја, а после складиштења једносмерну струју у наизменичну при пражњењу, због чега се губи укупно око 5% енергије. Специфична енергија SMES је од 1 до 10 Wh/kg, а специфична снага од 10 000 до 100 000 kW/kg. Број циклуса пуњења-пражњења је неограничен. Због високих трошкова хлађења на суперпроводне температуре, SMES се користи за краткотрајно складиштење енергије. У микромрежама SMES се користи за одржавање напонске стабилности и квалитета електричне енергије, равнање криве оптерећења, контролу фреквенције, изворе непрекидног напајања, у FACTS системима, као спининг резерва, у суперпроводним лимитерима струје квара.

2.4.5 Термички системи за складиштење енергије

Термички системи за складиштење енергије користе загревање или хлађење погодног материјала (воде, камена, базалтних стена, растопа соли, чврстог или течног силицијума, растопљеног алуминијума, течног ваздуха, течног азота, материјала са променом фазе, различитих легура, ...), ради каснијег коришћења ове енергије.

Постоји много различитих уређаја који складиште и обезбеђују термичку енергију (за грејање или хлађење) у микромрежама, као што су соларни термички системи, бојлери, топлотне пумпе, компресиони расхладни уређаји, апсорпциони расхладни уређаји, итд.

2.5 Пример микромреже

У свету постоји велики број инсталација микромрежа [4, 35-37] које се могу разврстати према:

- карактеристикама дистрибутивног система (АС, DC, напонски ниво) и конфигурацији мреже (радијална, прстенаста, петљаста);
- типу и уделу обновљивих извора енергије;
- типовима система складиштења;
- режиму рада;
- врсти контролера (централизовани, дистрибуирани);
- присуству комбиноване топлотне и електричне енергије (енг. Combined Heat and Power – CHP) и полигенерације;
- просторним димензијама и величини оптерећења.

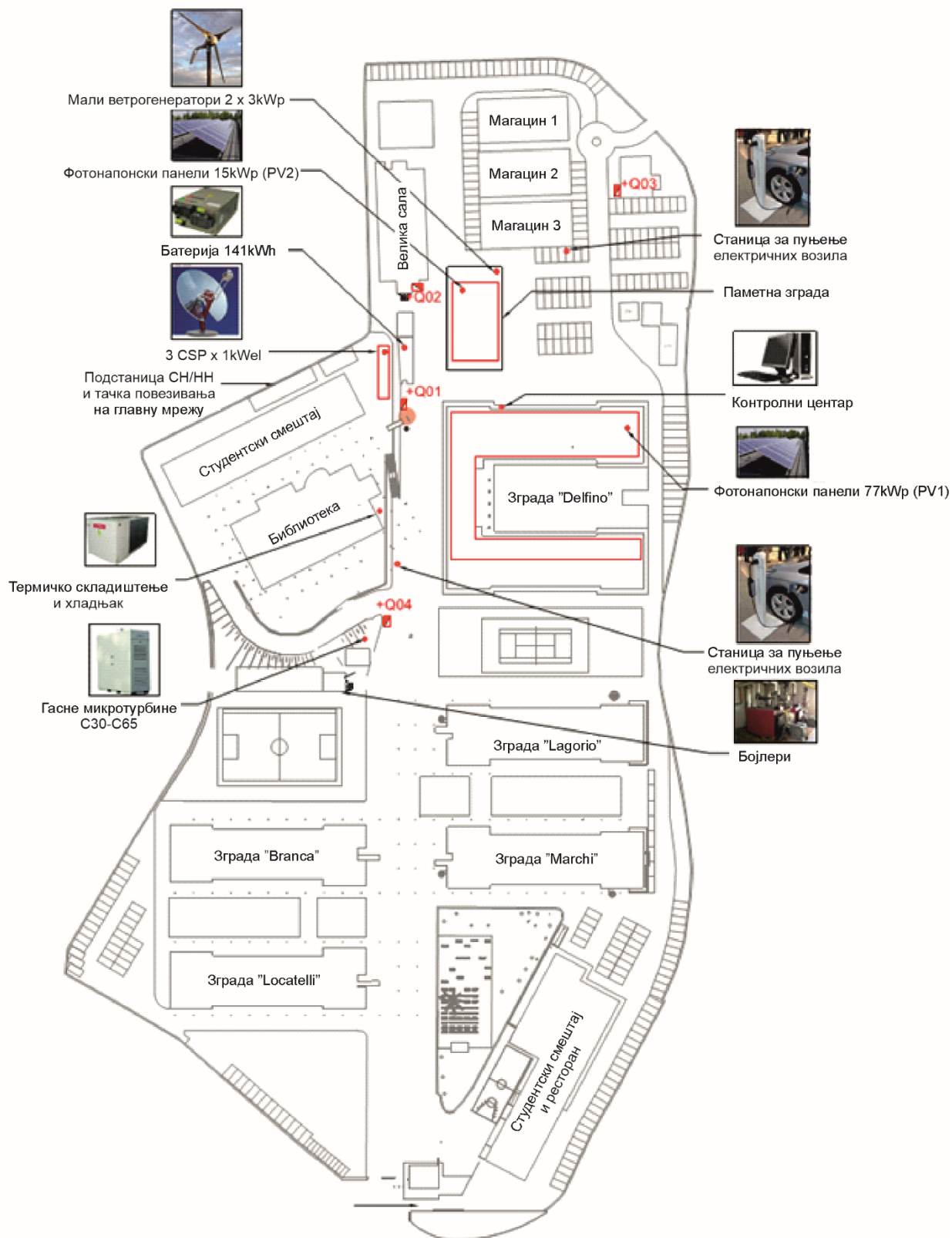
Микромреже обухватају нисконапонске дистрибутивне системе инсталиране у ограниченим областима, али се и појединачни индустријски погони и зграде са паметним управљањем енергијом и дистрибуираним изворима енергије могу сматрати микромрежама.

Многи национални и интернационални истраживачки пројекти које су финансирале европске земље са циљем развоја иновативних технологија и нових стратегија управљања енергијом допринели су развоју микромрежа у Данској, Немачкој, Аустрији, Француској, Холандији, Шпанији, Португалији, Грчкој, Норвешкој, Великој Британији, Италији, итд. Један пример микромреже је Паметна полигенерациона микромрежа [38-40], развијена на 60000 m² кампуса са 2000 студената у Савони, Универзитета у Ђенови, у Италији (Сл. 2.22).

Ова микромрежа обухвата истраживачке лабораторије универзитета, истраживачке центре, мале и средње компаније, Центар за мониторинг животне средине CIMA Research Foundation (итал. Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale, енг. International Center

in Environmental Monitoring [37]), као и библиотеку, кафетерију, спортске објекте, студентски дом и ресторан. У оквиру истраживачког и развојног пројекта Energia 2020 Универзитета у Ђенови инсталиран је овај иновативни енергетски систем у циљу одрживог развоја, уштеде енегије, смањења оперативних трошкова и емисија штетних гасова, као и истраживања у области обновљивих извора и система за складиштење енергије, моделовања, планирања, контроле и управљања паметним микромрежама, симулације и оптимизације енергетских система.

Пројекат је обухватио три потпројекта: Smart Polygeneration Microgrid (SPM), Smart Energy Building (SEB) и Energy Efficiency Measures (EEM). Реализација SPM потпројекта почела је 2011. године, завршена 2014. године и финансирана од стране италијанског Министарства за образовање, универзитет и истраживачки рад (енг. Italian Ministry for Education, University and Research) са 2.4 милиона евра. Реализација SEB потпројекта почела је такође 2011. године, изградња одрживе паметне енергетске зграде почела је 2016. године, завршена 2017. године и финансирана од стране италијанског Министарства за животну средину и заштиту копна и мора (енг. Italian Ministry of the Environment and Protection of Land and Sea) са 2.7 милиона евра. Реализацију EEM потпројекта са циљем побољшања енергетске ефикасности и сигурности система финансирао је регион Лигурије 2017. године са 1.5 милиона евра.



Сл. 2.22 Паметна полигенерациона микромрежа у Савони, Италија [41]

Паметна полигенерациона микромрежа (енг. Smart Polygeneration Microgrid - SPM) представља интелигентни дистрибутивни систем спојен са топлотном мрежом и обухвата трофазну, нисконапонску мрежу прстенасте конфигурације која садржи и електрична и термална оптерећења, као и дистрибуиране генераторе.

У микромрежи су:

- три когенерационе микротурбине на природни гас (две микротурбине Capstone C65 појединачне електричне снаге 65 kW, термичке снаге 112 kW, електричне ефикасности 29%, термичке ефикасности 50% и једна микротурбина Capstone C30 електричне снаге 28 kW, термичке снаге 54 kW, електричне ефикасности 25% и термичке ефикасности 48%);
- два бојлера на природни гас појединачне термичке снаге 450 kW;
- два апсорпциона расхладна уређаја (која напајају две Capstone C65 микротурбине), од којих један термичке улазне снаге 105 kW, расхладне излазне снаге 70 kW и други термичке улазне снаге 130 kW, расхладне излазне снаге 150 kW;
- два мала ветрогенератора: један са хоризонталном осом (енг. Horizontal axis wind turbine – HAWT) вршне електричне снаге 3 kW и други са вертикалном осом (енг. Vertical axis wind turbine – VAWT) вршне електричне снаге 3 kW;
- два фотонапонска поља (PV1 вршне снаге 80.64 kW са 336 модула од 240 W и PV2 вршне снаге 15 kW са 60 модула од 250 W) инсталирана на крову зграде (Сл. 2.23);
- три соларна генератора CSP (енг. Concentrated Solar Power) са тањирастим концентратором пречника 3.75 m и Стирлинговом машином (која има хелијум као радни флуид) који раде као когенерационе јединице, појединачне електричне снаге 1 kW и термичке снаге 3 kW у називним условима, електричне ефикасности 14% и термичке ефикасности 41%;
- два система за складиштење електричне енергије (један састављен од 15 јединица Li-Ion батерија везаних редно, укупног капацитета 25 kWh, максималне снаге пуњења/пражњења 70 kW на АС страни, и други састављен од 6 јединица Na-NiCl₂ батерија везаних паралелно, укупног капацитета 141 kWh, максималне снаге пуњења/пражњења око 36 kW на АС страни);

- четири станице за пуњење електричних возила (од којих две станице са једносмерним током енергије, максималне снаге пуњења 22 kW и две станице са двосмерним током енергије (V2G), максималне снаге пуњења 10 kW и максималне снаге пражњења 9 kVA);
- два електрична аутомобила (један Renault Twizy капацитета батерије 6.1 kWh, домета вожње 80 km, просечне потрошње 87 Wh/km, максималне брзине 80 km/h и један Nissan Leaf Tekna капацитета батерије 40 kWh, домета вожње 389 km, просечне потрошње 102 Wh/km, максималне брзине 144 km/h) и два електрична бицикла;
- остали електрични уређаји (инвертори, паметни мерни системи, паметна бројила);
- електроенергетска, ICT и управљачка инфраструктура (Сл. 2.24) која укључује локалне контролере, комуникациону мрежу и централни контролер, а користи комуникационе протоколе Modbus и RS485, као и протокол IEC 61850.

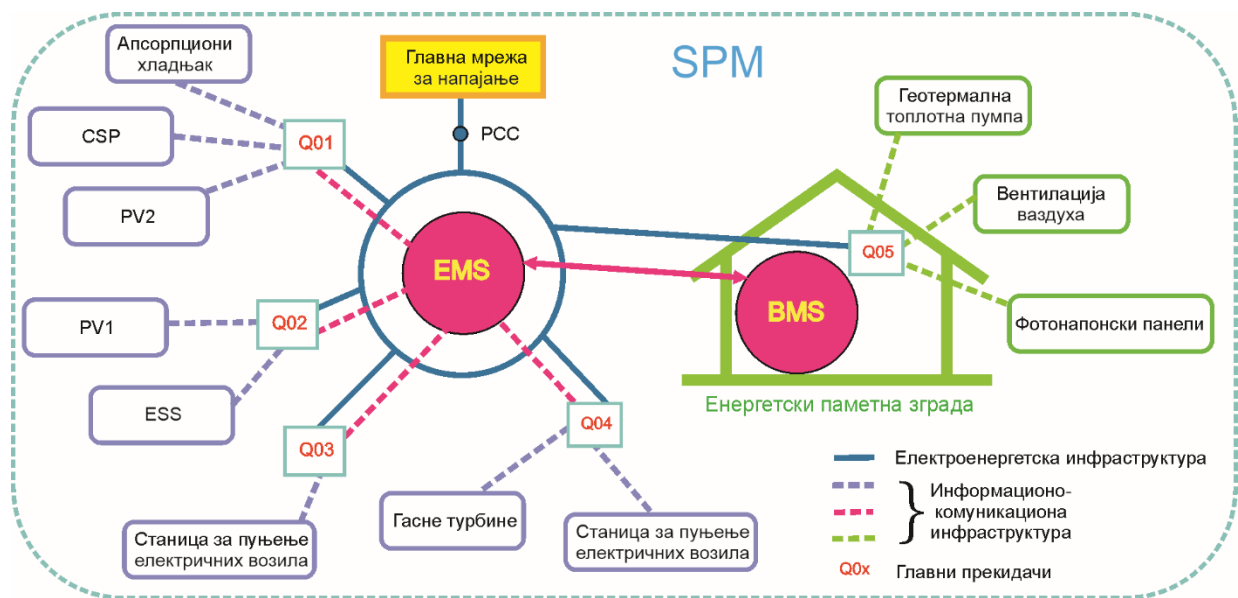


Сл. 2.23 Фотонапонски панели у SPM у Савони, Италија [42]

Подсистем локалних контролера обухвата прикупљање информација са терена од уређаја који директно комуницирају са електричном мрежом (енг. Remote Terminal Units – RTUs) и раде на мерењу релевантних параметара (струје, напона, температуре, итд.) различитих елемената у мрежи, сензорима и актуаторима.

SCADA (енг. Supervisory Control and Data Acquisition) системи (SIMATIC WinCC [43] и Desigo [44]) и децентрализовани систем управљања енергијом (енг. Decentralized Energy Management System – DEMS), фирме Siemens, инсталирани су на два идентична сервера лоцирана у контролној соби чије је напајање обезбеђено извором непрекидног напајања (енг. Uninterruptible Power Supply – UPS). Контролна соба обезбеђује интелигентно управљање енергијом. Захваљујући систему управљања микромрежом, токови енергије се могу поуздано предвидети, а ресурси се могу правилно распоредити и оптимизовати у реалном времену. Ово омогућава кориснику да флексибилно и брзо реагује на променљиве услове производње и потрошње енергије.

SCADA и BMS (енг. Building Management System) шаљу команде или постављају радне тачке уређаја преко комуникационих веза и протокола. Они визуелизују стање система и његове главне податке у реалном времену, дају аларме и упозорења, архивирају податке за даљу обраду и коришћење, за приказ историјских података, прављење извештаја и евидентирање догађаја у систему, омогућавају интегрисано управљање корисничким приступима, итд. Могуће је и додавање нових компонената, модела и алата за оптимизацију и контролу. Подржане су и функције као што су напредне апликације за дневно, недељно и годишње распоређивање опреме. SCADA и BMS нуде и веб-базирану и даљинску контролу апликација.



Сл. 2.24 Електроенергетска и комуникациона инфраструктура у SPM

Савона кампус има одрживо снабдевање енергијом и може ефикасно да управља енергијом коју производе сопствени дистрибуирани извори балансирајући производњу и потрошњу енергије. Пројекат је већ имао позитиван утицај на животну средину, јер се укупно смањење емисија CO₂ процењује на 120 t годишње.

Паметна енергетска зграда (SEB) има нулту емисију CO₂, опремљена је обновљивим изворима енергије и понаша се у SPM као прозјумер (енг. producer/consumer – prosumer) који карактеришу мере енергетске ефикасности (ЕЕМ). Зграда је двоспратна (Сл. 2.25), површине 510 m² по спрату, висине 10 m, а у њој се налазе три лабораторије, технолошка спортска сала, две учионице и неколико канцеларија. Опрему SEB чине: геотермална топлотна пумпа, соларни термални колектори, јединица за климатизацију, топлотна пумпа за топлу воду, фотонапонско поље, LED лампе изузетно ниске потрошње, систем за прикупљање кишнице и хидропонски систем.



Сл. 2.25 SEB у Савони, Италија [45]

Литература за Главу 2

- [1] “Извештаји”, *Електропривреда Србије*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.eps.rs/cir/snabdevanje/Pages/izvestaji.aspx> [Приступљено 24.06.2023.]
- [2] “Energy Flux,” *Електромрежа Србије*. [Онлајн]. Доступно на: <https://ems.energyflux.rs/#/dashboard> [Приступљено 10.08.2023.]
- [3] “Energy Independence and Security Act of 2007,” *International Energy Agency*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.iea.org/policies/910-energy-independence-and-security-act-of-2007> [Приступљено 15.08.2022.]
- [4] F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi, S. Bracco, M. Brignone, M. Robba, *Microgrid Design and Operation: Toward Smart Energy in Cities*, Boston: Artech House, 2018.
- [5] “Microgrids,” *Center for Climate and Energy Solutions*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.c2es.org/content/microgrids/> [Приступљено 24.01.2023.]
- [6] Md. A. Hossain, H. R. Pota, Md. J. Hossain, F. Blaabjerg, “Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 160-186, 2019, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.038>
- [7] N. Rajaković, D. Tasić, *Distributivne i industrijske mreže*, Beograd: Akademska misao, 2008.
- [8] R. Sabzehgar, *Overview of Technical Challenges, Available Technologies and Ongoing Developments of AC/DC Microgrids. Development and Integration of Microgrids*. InTech. DOI: 10.5772/intechopen.69400, 2017.
- [9] A. L'Abbate, G. Fulli, F. Starr, S. D. Peteves, “Distributed Power Generation in Europe: technical issues for further integration,” *JRC Scientific and Technical Reports*, EUR 23234 EN – 2007.
- [10] V. Mijailović, *Distribuirani izvori i sistemi za distribuciju električne energije*, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [11] “Diesel Rotary UPS,” *Hitachi*. [Онлајн]. Доступно на: <https://hitachi-hirel.com/products/ups/diesel-rotary-ups-drups> [Приступљено 13.06.2023.]
- [12] “Power Generation,” *Prismecs*. [Онлајн]. Доступно на: <https://prismecs.com/power-generation> [Приступљено 14.06.2023.]

- [13] M.T. Schobeiri, *Introduction, Gas Turbines, Applications, Types*. In: *Gas Turbine Design, Components and System Design Integration*. Springer, Cham, 2018, https://doi.org/10.1007/978-3-319-58378-5_1
- [14] “Microturbines useful in commercial and industrial applications,” *Power*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.powermag.com/tag/capstone-turbine-corp> [Приступљено 20.06.2023.]
- [15] “Capstone microturbines,” *Capstone Green Energy*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.capstonegreenenergy.com/products> [Приступљено 20.06.2023.]
- [16] “Technology and the future,” *Australian Academy of Science*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/concentrating-solar-thermal> [Приступљено 21.06.2023.]
- [17] S. Bracco, F. Delfino, F. Pampararo, M. Robba, M. Rossi, “A pilot facility for analysis and simulation of smart microgrids feeding smart buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 58, pp. 1247-1255, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.225
- [18] S. Bracco, F. Delfino, F. Pampararo, M. Robba, M. Rossi, “The University of Genoa Smart Polygeneration Microgrid Test-Bed Facility: The Overall System, the Technologies and the Research Challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 442–459, 2013.
- [19] “Solarna energija: Struja na Sunce,” *PC Press*. [Онлајн]. Доступно на: <https://pcpress.rs/solarna-energija-struja-na-sunce> [Приступљено 22.06.2023.]
- [20] “Photovoltaics Report,” *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), PSE AG*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html> [Приступљено 22.06.2023.]
- [21] “Hydropower Data Explorer,” *International Energy Agency*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/hydropower-data-explorer> [Приступљено 25.08.2022.]
- [22] “Small Hydropower Roadmap: Condensed Research Data for EU-27,” *ESHA*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/138208/small-hydropower-roadmap-condensed-research-data-EU-27.pdf> [Приступљено 22.06.2023.]
- [23] “A Guide to UK Mini-Hydro Developments,” *The British Hydropower Association (BHA)*. [Онлајн]. Доступно на: <https://british-hydro.org/hydropower-in-the-uk> [Приступљено 26.08.2022.]
-

- [24] J. L. Fuentes-Bargues, P. S. Ferrer-Gisbert, “Selecting a small run-of-river hydropower plant by the analytic hierarchy process (AHP): A case study of Miño-Sil river basin, Spain,” *Ecological Engineering*, vol. 85, pp. 307-316, ISSN 0925-8574, 2015,
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.020>
- [25] “Types of Hydropower Turbines,” *Energy Efficiency & Renewable Energy*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines> [Приступљено 05.09.2022.]
- [26] “RES Barometers,” *EurObserv’ER*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.eurobserv-er.org/category/all-annual-overview-barometers> [Приступљено 05.09.2022.]
- [27] “Bahrain World Trade Center,” *Wikipedia*. [Онлајн]. Доступно на: https://en.wikipedia.org/wiki/Bahrain_World_Trade_Center [Приступљено 10.09.2022.]
- [28] Z. Li, Z. Zheng, L. Xu, X. Lu, “A review of the applications of fuel cells in microgrids: opportunities and challenges,” *BMC Energy* vol. 1 (8), 2019,
<https://doi.org/10.1186/s42500-019-0008-3>
- [29] “Market Progress: Fuel Cells for Port Applications,” *ERG*. [Онлајн]. Доступно на: <https://cleanairnortheast.epa.gov/pdf/2019partnersmeeting/g-wilcox-c-myers.pdf> [Приступљено 10.09.2022.]
- [30] K. C. Divya, J. Østergaard, “Battery Energy Storage Technology for Power Systems – An Overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 511–520, 2009.
- [31] X. Tan, Q. Li, H. Wang, “Advances and Trends of Energy Storage Technology in Microgrid,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, pp. 179–191, 2013.
- [32] M. Jarnut, S. Wermiski, B. Wakowicz, “Comparative Analysis of Selected Energy Storage Technologies for Prosumers-Owned Microgrids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 925–937, 2017.
- [33] “Električna energija”, *Balkan Green Energy News*. [Онлајн]. Доступно на: <https://balkangreenenergynews.com/rs/energy-vault-u-kini-dovrsava-prvi-gravitacioni-sistem-za-skladistenje-energije-na-svetu> [Приступљено 18.11.2023.]
- [34] “Ekologija”, *Energija Balkana*. [Онлајн]. Доступно на: <https://energijabalkana.net/poceo-sa-radom-najveci-evropski-sistem-za-baterijsko-skladistenje-energije-u-kotingemu> [Приступљено 10.05.2023.]
-

- [35] M. Soshinskaya, W. Crijns-Graus, J. Guerrero, J. Vasquez, C. Juan, “Microgrids: Experiences, barriers and success factors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 659-672, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.198.
- [36] E. Hossain, et al., “Microgrids Testbeds Around the World: State of the Art,” *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 132–153, 2014.
- [37] T. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, “Recent Developments in Microgrids and Example Cases Around the World-A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4030–4041, 2011.
- [38] S. Bracco, F. Delfino, F. Pampararo, M. Robba, M. Rossi, “The University of Genoa Smart Polygeneration Microgrid Test-Bed Facility: The Overall System, the Technologies and the Research Challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 442–459, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.009>
- [39] S. Bracco, F. Delfino, P. Laiolo, M. Rossi, “The Smart City Energy Infrastructures at the Savona Campus of the University of Genoa,” *Proc. of AEIT 2016 - International Annual Conference: A Sustainable Development in the Mediterranean Area, Energy and ICT Networks of the Future*, Capri (Naples), Italy, October 5–7, 2016, pp. 1-6, doi: [10.23919/AEIT.2016.7892774](https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892774)
- [40] CIMA. [Онлајн]. Доступно на: <http://www.cimafoundation.org> [Приступљено 23.06.2023.]
- [41] “The Energy2020 project-Savona Campus,” *UniGe Sostenibile*. [Онлајн]. Доступно на: https://unigesostenibile.unige.it/smart_grid_savona [Приступљено 15.08.2022.]
- [42] “Recensioni di Smart Polygeneration Microgrid,” *Altra Opinione*. [Онлајн]. Доступно на: <https://altraopinione.org/universita/savona/smart-polygeneration-microgrid> [Приступљено 15.08.2022.]
- [43] “SIMATIC SCADA Systems,” *Siemens*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/scada.html> [Приступљено 15.08.2022.]
- [44] “Desigo system – build the future today,” *Siemens*. [Онлајн]. Доступно на: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/buildings/automation/desigo.html> [Приступљено 15.08.2022.]
- [45] “Sustainable Energy Building (SEB),” *UniGe*. [Онлајн]. Доступно на: <https://campus-savona.unige.it/en/progetti/Energia2020/SEB> [Приступљено 18.08.2022.]
-

3

Примена оптимизационих метода у управљању микромрежама

3.1 Контрола рада микромреже

3.2 Системи за управљање микромрежама

3.3 Примена оптимизације у планирању, контроли и управљању микромрежом

3.4 Циљне функције оптимизационих проблема у микромрежама

3.5 Методе за решавање оптимизационих проблема

3.1 Контрола рада микромреже

У току различитих радних режима микромреже, неопходна је контрола и управљање свим ресурсима, уређајима и компонентама микромреже. Структура контроле зависи од типа микромреже, расположивости опреме, коришћених елемената, локације микромреже и одговорности различитих ентитета који управљају мрежом или је користе.

Контролна структура може бити централизована или децентрализована. Централизована контрола прикупља податке од сваког елемента у микромрежи како би обављала неопходне прорачуне и дефинисала контролне процедуре и акције управљања [1], [2]. Овај приступ захтева комуникацију између главног контролера и свих елемената мреже. Децентрализована контрола подразумева локалне контролере који управљају радом појединачних елемената мреже.

Рад микромреже може бити мрежни (када је микромрежа прикључена на главну мрежу) или острвски (када је микромрежа искључена са главне мреже), при чему се очекује да свака микромрежа може да функционише самостално у случају потребе одвајања од главне мреже [3]. Осим тога, постоје и прелазни режими у којима се врши синхронизација и поновно повезивање на мрежу ако је то потребно. У неким случајевима острвски рад представља нормално радно стање (на удаљеним острвима или другим локацијама веома удаљеним од главне мреже). Мрежни рад се често зове и паралелни рад.

У случају да је микромрежа била у мрежном (енг. on-grid) режиму рада и да је дошло до губитка напајања у микромрежи (Сл. 3.1), треба покренути и успоставити острвски (енг. off-grid) режим рада, па тек након синхронизације (провере фреквенције, напона и фазе) обавити поновно повезивање на главну мрежу. До прекида напајања могло је доћи и због нестабилног рада у острвском режиму. Неопходно је да микромрежа у острвском режиму рада има контролу фреквенције и напона, одговарајућу заштиту од кварова у микромрежи, као и брзу детекцију острвског рада.

Стандарди који се односе на микромреже су: група стандарда IEEE 2030 за спецификације и примере добре праксе за микромреже, IEC TS 62898 за планирање пројеката микромрежа, спецификације и функционисање микромрежа, и IEEE 1547 за дизајн, функционисање и интеграцију DER са електроенергетском мрежом. На спецификације за контролере микромрежа односи се стандард IEEE 2030.7-2017.



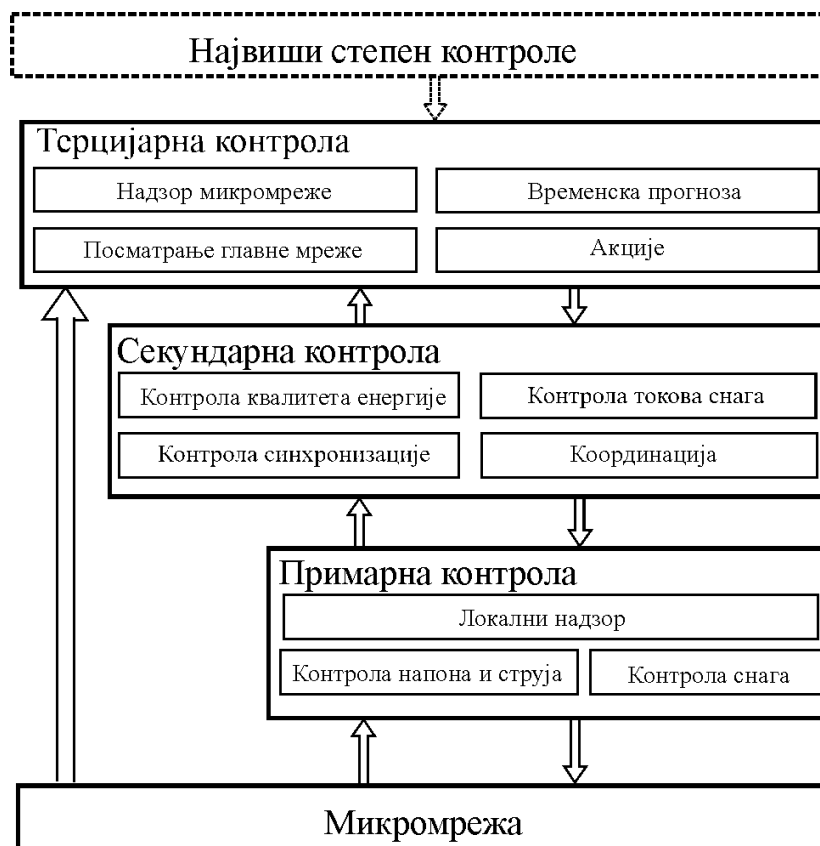
Сл. 3.1 Режији рада микромреже

Контрола активне снаге односно фреквенције и контрола реактивне снаге односно напона организују се према хијерархијској структури (Сл. 3.2) у којој виши нивои дају референтне сигнале за ниже нивое [4].

Примарна контрола (контрола најнижег нивоа) базира се на мерењу напона и фреквенције у систему и има за циљ да их стабилизује, успостави баланс активне и реактивне снаге, избегне лутајуће струје у компонентама енергетске електронике и уништење DC кондензатора за спрегу. Различити елементи и друге категорије “droop“ контроле на овом нивоу не захтевају међусобну комуникацију.

Секундарна контрола је контрола коју најчешће реализује централни контролер због недостатака примарне контроле, и она треба да регулише и фреквенцију и напон после поремећаја. Овај ниво познат је и као EMS ниво, а има за циљ побољшање квалитета електричне енергије, рестаурацију система, елиминацију девијација напона и фреквенције, минимизацију трошкова, оптимизацију производње обновљивим изворима и побољшање стабилности микромреже. На овом нивоу је важна брза комуникација.

Терцијарна контрола је контрола вишег нивоа од секундарне, која треба да очува оптимално управљање ресурсима микромреже и ефикасност система, као и да временски распореди рад управљивих генератора, узимајући у обзир предикцију економских и метеоролошких података. При томе се користе различите напредне методе, као што су методе машинског учења, методе неуралних мрежа, итд.



Сл. 3.2 Хијерархијска шема контроле микромреже

3.2 Системи за управљање микромрежама

Софтверска решења за управљање микромрежама развијају различити универзитети, истраживачке организације и компаније. Нека од решења су VERA (енг. Versatile Energy Resource Allocation) фирме Honeywell, DEMS (енг. Decentralized Energy Management System) фирме SIEMENS, DER-CAM (Distributed Energy Resources – Customer Adoption Model) развијен у Berkeley лабораторијама, Microgrid Plus фирме ABB, EcoStruxure Microgrid Advisor фирме Schneider, Micro Energy Management System фирме TOSHIBA, Grid IQ Microgrid Control System фирме General Electric, итд.

3.3 Примена оптимизације у планирању, контроли и управљању микромрежом

У комплексном процесу планирања микромреже неопходна је примена оптимизације при разматрању и испуњавању постављених техничких, економских, еколошких и друштвених циљева, ограничења и алтернатива, захтева за потрошњом енергије и квалитетом електричне енергије, при анализи услова одабране локације, типа и капацитета генератора и система за складиштење у микромрежи. Минимизација економских трошкова и емисија штетних гасова, максимизација позитивних ефеката на функционисање, поузданост и стабилност система, као и побољшање квалитета електричне енергије, могу се постићи математичким моделирањем и применом оптимизационих модела у процесу дизајнирања микромреже [5], [6], као и у процесу контроле и управљања радом микромреже [7], [8]. Оптимизациони модели морају бити применљиви и у случају промене конфигурације, додавања капацитета, повећања захтева за енергијом, промене законске регулативе и еколошких захтева. При постављању оптимизационих проблема треба разматрати параметре, ограничења, функцију циља и варијабле одлучивања.

Параметри оптимизационог проблема су фиксне вредности процењене за неки временски период унапред (нпр. година, месец, дан, петнаестоминутни интервал), као што су цена електричне енергије, енергетска ефикасност, производња обновљивим изворима енергије, расположивост управљивих извора енергије и система за складиштење, електрични и термички захтеви за потрошњом.

Ограничења представљају техничке, еколошке и законске лимите оптимизационог проблема, као што су нпр. одређена површина крова при планирању постављања фотонапонских панела, површина земљишта на располагању при планирању инсталације ветрогенератора, максимална снага која се може преузети из мреже договорена уговором, максимална снага која се може преносити водовима, а да не буде угрожена термичка стабилност, минимум и максимум стања напуњености батерија, итд.

Функција циља је математичка функција параметара и варијабли одлучивања која се односи на један или више циљева које треба остварити при раду микромреже.

Варијабле одлучивања представљају величине које треба одредити како би се решио оптимизациони проблем и донеле одговарајуће одлуке.

Често је неопходно решити више оптимизационих проблема и потпроблема.

3.4 Циљне функције оптимизационих проблема у микромрежама

Циљне функције оптимизационих проблема у микромрежама могу се математички формулисати са различитих становишта: техничког, еколошког, економског, друштвеног и политичког [9].

Са техничког становишта може бити циљ оптимизације максимална енергетска ефикасност, максимална ексергија (доступна енергија, најчешће неког когенерационог система, за дате услове животне средине), минимална потрошња примарних енергената, максимална флексибилност система, максимална поузданост снабдевања енергентима, максимални квалитет електричне енергије, итд.

Са еколошког становишта циљ оптимизације може бити минимална емисија неког штетног гаса, минимални утицај на животну средину, минимално загађење ваздуха ситним честицама, минимално загађење воде или земљишта, минимално заузимање површине земљишта, минимални утицај на водене токове, минимални утицај на живи свет, итд.

Са економског становишта могу се захтевати минимални инвестициони трошкови, минимални операциони трошкови, минимални трошкови одржавања микромреже, минимални губици у микромрежи, минимални период отплате инвестиција, максимални животни век компонената, уређаја и система у микромрежи, минимални трошкови због кварова, итд.

Са друштвеног аспекта циљ оптимизације може бити максимално задовољство потрошача и шире друштвене заједнице, максимална друштвена прихватљивост пројекта микромреже због производње обновљивим изворима енергије и енергетске независности, максимални друштвено корисни утицај, максимални друштвени бенефити (нови послови, повећање запослености, коришћење домаћих производа и опреме при инсталацији и коришћењу микромреже), итд.

Могу постојати и политички циљеви као што су максимално задовољење националне политике, максимално задовољење захтева енергетске сигурности, максимална енергетска самосталност, итд.

Могуће је задовољење више циљева применом вишекритеријумске оптимизације, што је један од доприноса ове докторске дисертације.

3.5 Методе за решавање оптимизационих проблема

Методе за решавање оптимизационих проблема деле се на конвенционалне (класичне), хеуристичке, метахеуристичке и хибридне методе [10-13], за које је доступан велики број референци.

Конвенционалне методе користе диференцијални рачун за одређивање оптималних решења у случајевима у којима су циљне функције диференцијабилне и/или континуалне. Такве методе су градијентна метода, Њутнова метода, метода унутрашње тачке итд.

Метод линеарног програмирања (енг. Linear Programming Method - LPM), метод нелинеарног програмирања (енг. Non-Linear Programming Method - NLP) и динамичко програмирање (енг. Dynamic Programming - DP) су примери класичних алгоритама који се користе за оптимизацију. LPM се користи у случајевима у којима је функција циља линеарна, а ограничења дата линеарним једнакостима и неједнакостима. NLP се користи у случајевима у којима су функција циља и/или ограничења нелинеарни. Велики број итерација за нумеричке методе повећава компјутерско време рачунања. DP се користи у случајевима у којима се оптимизација проблема заснива на разлагању на мање потпроблеме. Овај метод погодан је за решавање узастопних фаза или вишестепених проблема. Једна од предности DP је могућност оптимизације сваке фазе, због чега се може применити на сложене системе.

Технике метахеуристичког претраживања се користе за оптимизацију веома сложених система, јер ефикасно доводе до најбољег могућег решења. Ови алгоритми су развијени на основу понашања у природи. Метахеуристички методи су генетски алгоритам (енг. Genetic Algorithm - GA), оптимизација ројем честица (енг. Particle Swarm Optimization - PSO), симулирано каљење (енг. Simulated Annealing - SA) и алгоритам колоније мравца (енг. Ant Colony - AC), итд.

GA је еволутивни алгоритам заснован на популацији, који укључује неколико операција као што су иницијализација, мутација, укрштање и селекција, како би се обезбедило проналажење оптималног решења за дати проблем. GA може довести само до локалног оптималног решења, ако није иницијализован или дизајниран како треба.

PSO симулира друштвено понашање како се рој креће да пронађе храну у одређеном подручју. То је итеративни алгоритам са циљем да се нађе решење за дату циљну функцију

унутар датог простора. PSO је ефикасан у решавању проблема расејања и оптимизације. Међутим, захтева неколико модификација због своје сложене и конфликтне природе.

SA алгоритам се заснива на процесу обраде метала каљењем. Метал се топи на веома високој температури, затим се охлади и коначно пређе у кристално стање са минималном количином енергије. Као резултат, метал развија веће величине кристала са минималном количином дефеката у својој металној структури.

АС алгоритам се заснива на понашању мравља који користе одређени феромон да обележе пут другим мрављима. Више феромона остаје на путу док више мравља иде истим путем. С друге стране, ако се пут не користи, онда ће мирис последњег феромона нестати. Мравље више привлаче стазе са највише мириса феромона и то их обично води до места са највише хране. Пратећи ову методу, мрављи означавају најкраћи пут до хране. АС симулира ово понашање како би се пронашло оптимално решење за дату циљну функцију. Ови алгоритми имају велику брзину конвергенције, али захтевају и велики меморијски простор рачунара.

Хибридне технике су комбинација две или више техника оптимизације и могу да превазиђу ограничења појединачних техника како би се обезбедила ефикаснија и поузданија решења. Примери таквих техника су SA-Tabu претраживање [14]; Монте Карло симулација (енг. Monte Carlo Simulation) MCS-PSO [15]; хибридни итеративни поступак GA [16]; вишециљно дизајнирана оптимизација (енг. Multi Objective Design Optimization) MODO-GA [17], [18]; вештачка неуронска мрежа (енг. Artificial Neural Network) ANN-GA-MCS [19]; вештачки неуронски фази систем (енг. Artificial Neural Fuzzy Interface System) ANFIS; PSO-DE диференцијална еволуција (енг. Differential Evolution) [20]; еволуциони алгоритми – MCS [21], [22], итд. Иако хибридне технике побољшавају укупне перформансе оптимизације, оне могу имати и нека ограничења.

Литература за Главу 3

- [1] S. K. Swarup, “Graph theoretic approach for preventive control of power systems,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32 (4), pp. 254–261, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2009.09.010
- [2] O. Palizban, K. Kauhaniemi, J. M. Guerrero, “Microgrids in Active Network Management-Part II: System Operation, Power Quality and Protection,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 440-451, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.048>
- [3] J. F. C. Castro, R. A. Roncolato, A. R. Donadon, V. E. M. S. Andrade, P. Rosas, R. G. Bento, J. G. Matos, F. A. Assis, F. C. R. Coelho, R. Quadros, J. I. Y. Ota, L. C. P. Silva, R. K. Carneiro, “Microgrid Applications and Technical Challenges—The Brazilian Status of Connection Standards and Operational Procedures,” *Energies*, vol. 16, no. 6 (2893), 2023, <https://doi.org/10.3390/en16062893>
- [4] Y. Zahraoui, I. Alhamrouni, S. Mekhilef, M. R. Basir Khan, M. Seyedmahmoudian, A. Stojcevski, B. Horan, “Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review,” *Sustainability*, vol. 13, no. 19 (10492), 2021, <https://doi.org/10.3390/su131910492>
- [5] H. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, A. Talebi, “Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system,” *Energy*, vol. 115, pp. 1022-1041, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.09.007
- [6] F. Magrassi, A. Del Borghi, M. Gallo, C. Strazza, M. Robba, “Optimal Planning of Sustainable Buildings: Integration of Life Cycle Assessment and Optimization in a Decision Support System (DSS),” *Energies*, vol. 9, no. 7, pp. 490–502, 2016, <https://doi.org/10.3390/en9070490>
- [7] S. Bracco, F. Delfino, F. Pampararo, M. Robba, M. Rossi, “A dynamic optimization-based architecture for polygeneration microgrids with tri-generation, renewables, storage systems and electrical vehicles,” *Energy Conversion and Management*, vol. 96, pp. 511-520, ISSN 0196-8904, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.013>
- [8] R. Minciardi, M. Robba, “A Bi-Level Approach for the Stochastic Optimal Operation of Interconnected Microgrids,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 482–493, 2017.

- [9] J. Hao, Y. Yang, C. Xu, X. Du, “A comprehensive review of planning, modeling, optimization, and control of distributed energy systems,” *Carb. Neutrality*, vol. 1, no. 28, 2022, <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00029-1>
- [10] J. A. Momoh, *Electric Power System Application of Optimization*, Marcel Dekker, New York, 2009.
- [11] M. Ghofrani, N. N. Hosseini, “Optimizing Hybrid Renewable Energy Systems: A Review,” *Sustainable Energy - Technological Issues, Applications and Case Studies*, InTech, December 2016. doi: 10.5772/65971
- [12] M. Şahin, “A comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 1591–1616, 2021, <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02922-7>
- [13] S. Sunanda, S. S. Chandel, “Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 775–769, 2015.
- [14] Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis, E. S. Karapidakis, “Hybrid simulated annealing Tabu search method for optimal sizing of autonomous power systems with renewables,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3 (3), pp. 330–338, 2012.
- [15] M. Bashir, J. Sadeh, “Optimal sizing of hybrid wind/photovoltaic/battery considering the uncertainty of wind and photovoltaic power using Monte Carlo simulation,” *Proceedings of IEEE International Conference*, IEEE, Venice, Italy, 2012.
- [16] T. Khatib, A. Mohameda, K. Sopian, “Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: case study of Kuala Terengganu, Malaysia,” *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 321–333, 2012.
- [17] D. Abbas, A. Martinez, G. Champions, “Life cycle cost embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 98, pp. 46–62, 2014.
- [18] R. K. Rajkumar, V. K. Ramchandaramurthy, B. L. Yong, D. B. Chia, “Techno-economical optimization of hybrid PV/wind/battery system using neuro-fuzzy,” *Energy*, vol. 36 (8), pp. 5148–5153, 2011.

- [19] J. M. Lujano-Rojas, R. Dufo-Lopez, L. José, B. Agustin, “Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems,” *Energy*, vol. 63, pp. 19–27, 2013.
- [20] V. M. Sanchez, A. U. Chavez-Ramirez, S. M. Duron-Torres, J. Hernandez, L. G. Arriaga, J. M. Ramirez, “Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39 (29), pp. 1646–1655, 2014.
- [21] A. Maleki, F. Pourfayaz, “Optimal sizing of autonomous hybrids photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms,” *Solar Energy*, vol. 115, pp. 471–483, 2015.
- [22] K. Chang, G. Lin, “Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 52, pp. 40–51, 2015.

4

Оптимизација избора генератора у микромрежи у циљу заштите животне средине

- 4.1 Проблем вишекритеријумске оптимизације избора генератора у микромрежи
- 4.2 Емисије штетних гасова и ситних честица као еколошки критеријуми
- 4.3 Инвестициони, оперативни, трошкови одржавања и горива као економски критеријуми
- 4.4 Рангирање генератора применом методе PROMETHEE за различите микромреже
- 4.5 Рангирање генератора применом методе PROMETHEE према еколошким критеријумима
- 4.6 Рангирање генератора применом методе PROMETHEE према економским и еколошким критеријумима
- 4.7 Рангирање генератора у микромрежи применом методе ELECTRE
- 4.8 Рангирање генератора у микромрежи применом методе TOPSIS
- 4.9 Рангирање генератора у микромрежи применом методе ВИКОР
- 4.10 Методе одређивања тежинских коефицијената
- 4.11 Рангирање генератора комбиновањем АНР и метода PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР
- 4.12 Рангирање генератора комбиновањем ВWM и метода PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР

4.1 Проблем вишекритеријумске оптимизације избора генератора у микромрежи

Еколошки/економски (енг. Environomic – Environmental/economic) избор генератора у микромрежи може се третирати као проблем вишекритеријумске оптимизације (ВКО). Операциони трошкови са трошковима одржавања и трошкови горива за производњу електричне енергије (енг. Operational & Maintenance and Fuel Costs – OMF costs), као и емисије штетних гасова и честица који потичу од унутрашње производње електричне енергије микромреже и екстерне производње из главне мреже, треба да буду минимизирани. Емисије CO₂, SO₂, CO, NO_x, других штетних гасова и честица (PM), као нуспроизвода производње електричне енергије, првенствено су одговорне за глобално загревање. Ради заштите животне средине треба да буду што је могуће мањих вредности. Ови параметри проблема оптимизације су анализирани у следећем одељку.

Дизел генератор, микротурбина, горивна ћелија и главна мрежа, као могући произвођачи електричне енергије за микромрежу, представљају скуп алтернатива за проблем оптимизације избора генератора. Операциони трошкови са трошковима одржавања и трошкови горива, као и емисије CO₂, SO₂, CO, NO_x и PM чине скуп критеријума за оцењивање.

За решавање оваквих проблема вишекритеријумске оптимизације може се користити нпр. метода PROMETHEE (енг. Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations). Ј. П. Бранс је развио PROMETHEE I методу за делимично рангирање и PROMETHEE II методу за потпуно рангирање [1]. Исти аутор је касније развио PROMETHEE III методу за интервално рангирање и PROMETHEE IV методу [2] за континуирани случај.

Аутори рада [2] су 1988. године развили и визуелни интерактивни софтвер PROMETHEE – GAIA (енг. Graphical Analysis for Interactive Aid) [3] који омогућава графички приказ резултата PROMETHEE методе. Постоји и метода PROMETHEE V [4] која укључује ограничења сегментације, као и метода PROMETHEE VI (репрезентација људског мозга). Резултати у овом поглављу су добијени применом PROMETHEE I и PROMETHEE II методе и софтвера PROMETHEE – GAIA.

4.2 Емисије штетних гасова и ситних честица као еколошки критеријуми

Емисије штетних гасова и честица из производње електричне енергије доприносе: глобалном загревању, стварању токсичних хемикалија, приземног озона, смога, појави киселих киша, погоршању квалитета воде, атмосферском таложењу, пропадању спољашњих површина објеката и споменика, слабљењу видљивости, респираторним и кардиоваскуларним проблемима, негативним утицајима на нервни систем и другим здравственим проблемима, итд. Сви гасови се могу преносити ветровима на веома велике удаљености кроз атмосферу, па ово представља глобални проблем загађења животне средине.

Угљен-диоксид (CO_2) настаје када сагорева гориво које садржи угљеник. Угљен-моноксид (CO) настаје приликом непотпуног сагоревања горива. Сумпор диоксид (SO_2) настаје када сагорева гориво које садржи сумпор. Ако гориво сагорева на веома високим температурама, онда се формирају оксиди азота (NO_x). Ови оксиди су високо реактивна једињења. Честице (PM) се односе на ситне честице у ваздуху као што су прашина, прљавштина, чађ, дим и капљице течности.

Неки подаци за емисије различитих генератора током производње електричне енергије могу се наћи у [5]. Подаци за емисије CO_2 , SO_2 и NO_x за дизел генератор, микротурбину и горивну ћелију преузети су из [6] и дати у Таблици 4.1. Процењене вредности емисија су: 0.5 g/kWh за NO_x , 697 g/kWh за CO_2 и 0.22 g/kWh за SO_2 , мада за дизел генераторе емисије значајно зависе и од типа и карактеристика генератора. Емисије CO процењене су на 1 g/kWh, а емисије PM на 0.2 g/kWh [7].

Микротурбине су погодне за производњу електричне и топлотне енергије у микромрежи. Емисије штетних гасова и PM честица у g/kWh су мање него код дизел генератора. Они производе емисије 670 g/kWh за CO_2 , 0.0036 g/kWh за SO_2 , 0.186 g/kWh за NO_x , 0.4 g/kWh за CO и имају нулту емисију PM честица (Таблица 4.1).

Електрична енергија у горивној ћелији се производи без сагоревања или механичког рада. Већина емисија потиче из система за прераду горива. Горивне ћелије имају емисије NO_x , SO_2 , CO и PM мање од 0.01 g/kWh. Емисије CO_2 варирају у распону од 218–623 g/kWh [7]. За главну мрежу подаци су преузети из [8].

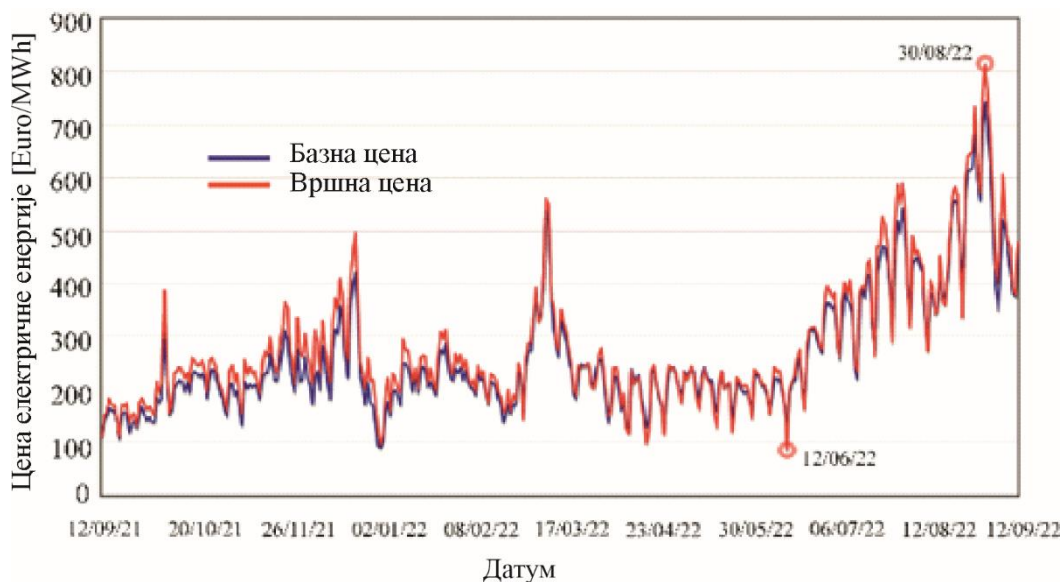
Таблица 4.1 Емисије штетних гасова и честица за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи [5-8]

Емисије генератора	Дизел генератор (DG)	Микротурбина (MT)	Горивна ћелија (FC)	Главна мрежа (MG)
CO ₂ [g/kWh]	697	670	441	889
SO ₂ [g/kWh]	0.22	0.0036	0.0022	1.8
NO _x [g/kWh]	0.5	0.186	0.0136	1.6
CO [g/kWh]	1	0.4	0.01	0.01
PM [g/kWh]	0.2	0	0.01	0.3

4.3 Инвестициони, оперативни, трошкови одржавања и горива као економски критеријуми

Операциони трошкови са трошковима одржавања обично износе око 10% од укупних операционих трошкова са трошковима одржавања и трошкова горива (OMF трошкова), тако да вредности из [7] за дизел генератор, микротурбину и горивну ћелију треба помножити са десет.

OMF трошкови за главну мрежу (Таблица 4.2) узети су релативно у односу на OMF трошкове других генератора у микромрежи. OMF трошкови за главну мрежу значајно зависе од удела угља, дизела или другог горива које се користи за производњу електричне енергије, што одређује и емисије штетних гасова. На пример, цена на тржишту електричне енергије је била 556.65 €/MWh \approx 0.555 \$/kWh, 28. августа 2022. [9], због глобалне енергетске кризе, али је релативни однос према OMF трошковима за друге алтернативе остао приближно исти, тако да то нема утицаја на резултате рангирања генератора. Промена тржишних цена електричне енергије у протеклих годину дана дата је на Сл. 4.1.



Сл. 4.1 Дијаграм промене цена електричне енергије на тржишту SEEPEX [9] за период 12/09/2021 – 12/09/2022

Таблица 4.2 Операциони трошкови са трошковима одржавања и трошкови горива за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи

	Дизел генератор (DG)	Микротурбина (MT)	Горивна ћелија (FC)	Главна мрежа (MG)
OMF трошкови [\$/kWh]	0.15	0.11	0.242	0.20

4.4 Рангирање генератора применом методе PROMETHEE за различите микромреже

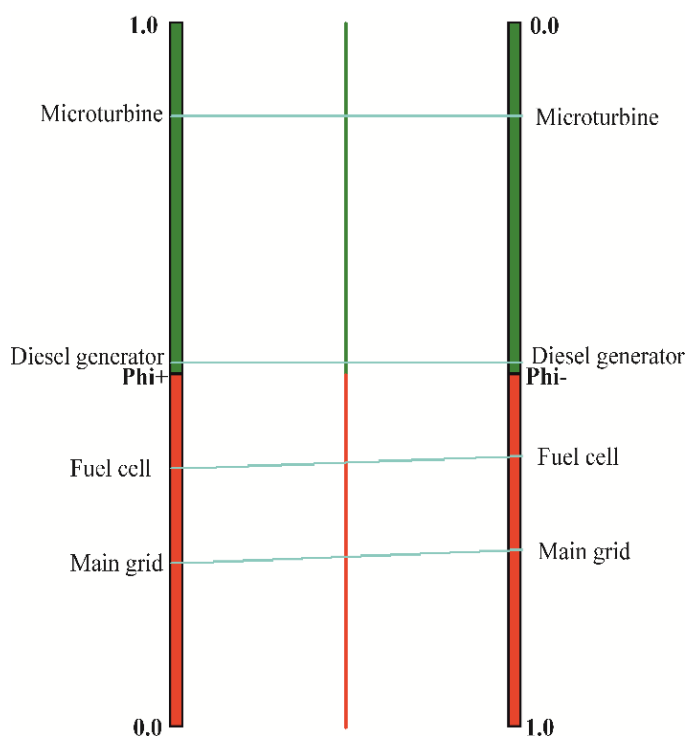
Ако су у микромрежи на располагању следећи извори електричне енергије: дизел генератор, микротурбина, горивна ћелија и главна мрежа, треба размотрити који је оптималан избор са економског/еколошког становишта. Разматрана су три различита сценарија у овом случају.

У Сценарију 1, коефицијенти тежине су: 60% за OMF трошкове (као најважнији критеријум), 10% за емисије CO₂, SO₂ и NO_x, а 5% за емисије CO и PM.

У Сценарију 2, коефицијент тежине за OMF трошкове је 40% (вредност је мања него у Сценарију 1). Коефицијенти тежине за емисије су повећани на 15% за CO₂, SO₂ и NO_x и на 7.5% за CO и PM.

У Сценарију 3, OMF трошкови за главну мрежу су 0.14 \$/kWh уместо 0.2 \$/kWh у Сценарију 1 и 2, а сви остали евалуациони критеријуми имају исте тежинске коефицијенте као у Сценарију 2. Ово је размотрено зато што су у току протекле године постојале брзе и велике варијације цена на тржишту електричне енергије. Цена електричне енергије се мењала у опсегу 0.085 – 0.816 \$/kWh.

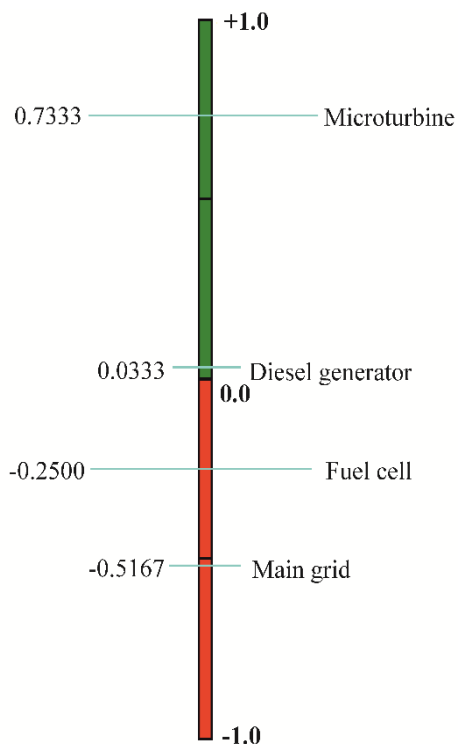
Оптимални избор генератора извршен је применом софтвера PROMETHEE-GAIA.



Сл. 4.2 Парцијално рангирање генератора применом методе PROMETHEE I за Сценарио 1

Резултати коришћења PROMETHEE I методе за парцијално рангирање генератора у Сценарију 1 дати су на Сл. 4.2, према излазном току Φ^+ и улазном току Φ^- за i -ту алтернативу. Резултати коришћења PROMETHEE II методе за комплетно рангирање генератора у Сценарију 1 дати су на Сл. 4.3. Поређење алтернатива је извршено на основу релације чистог тока:

$$\Phi = \Phi^+ - \Phi^- . \quad (4.1)$$

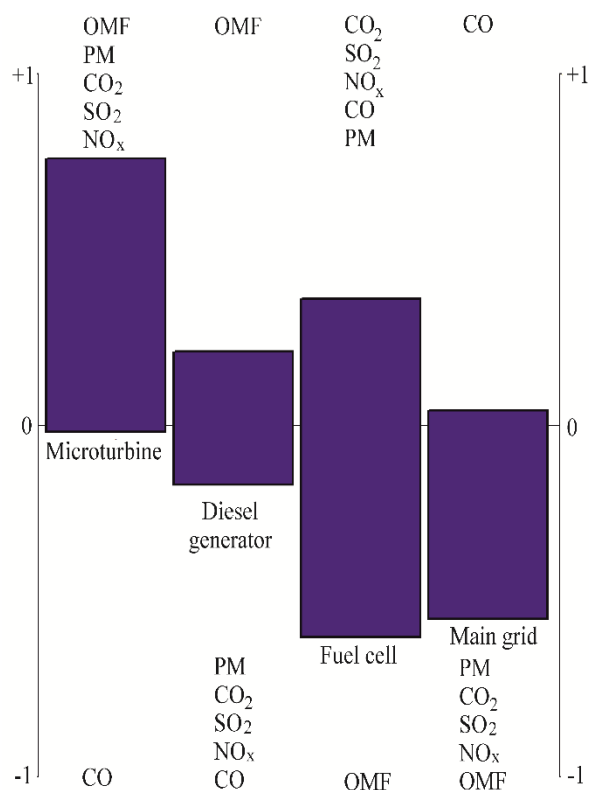


Сл. 4.3 Комплетно рангирање генератора применом методе PROMETHEE II за Сценарио 1

На PROMETHEE-Rainbow на Сл. 4.4 дати су резултати међусобног поређења за све евалуационе критеријуме и за све алтернативе. Микротурбина представља најбољи избор на основу виšekритеријумске оптимизације. Редослед њених предности у односу на друге алтернативе је: OMF, PM, CO₂, SO₂, NO_x, док је емисија CO њен недостатак. Главна предност дизел генератора је ниска вредност OMF трошкова, док је највећа мана горивне ћелије висока вредност OMF трошкова.

У комплетном рангирању алтернатива за Сценарио 1, микротурбина је најбољи избор, као што је приказано у Таблици 4.3, а затим следе дизел генератор, горивна ћелија и главна мрежа.

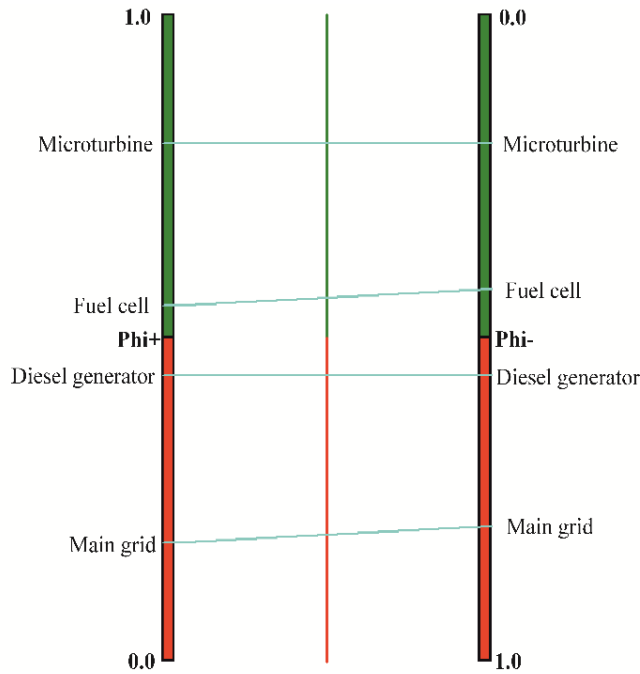
OMF трошкови у Сценарију 2 узети су са мањим тежинским коефицијентом (40%) него у Сценарију 1 (60%), а емисије са већим тежинским коефицијентима. Резултати коришћења PROMETHEE I методе за делимично рангирање генератора у Сценарију 2 дати су на Сл. 4.5.



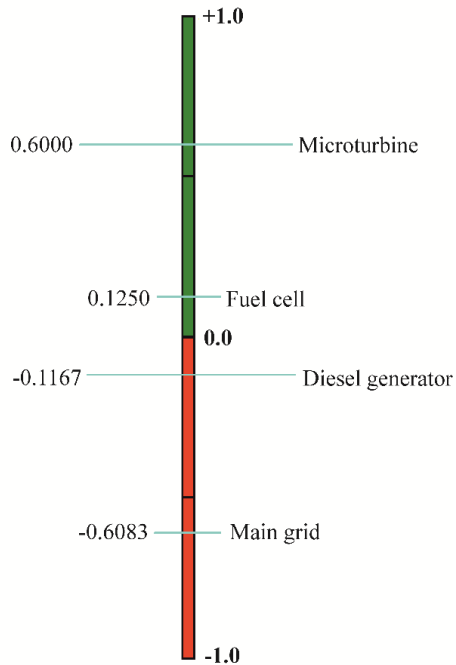
Сл. 4.4 PROMETHEE-Rainbow за Сценарио 1

Таблица 4.3 Рангирање генератора на основу Phi за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи за Сценарио 1

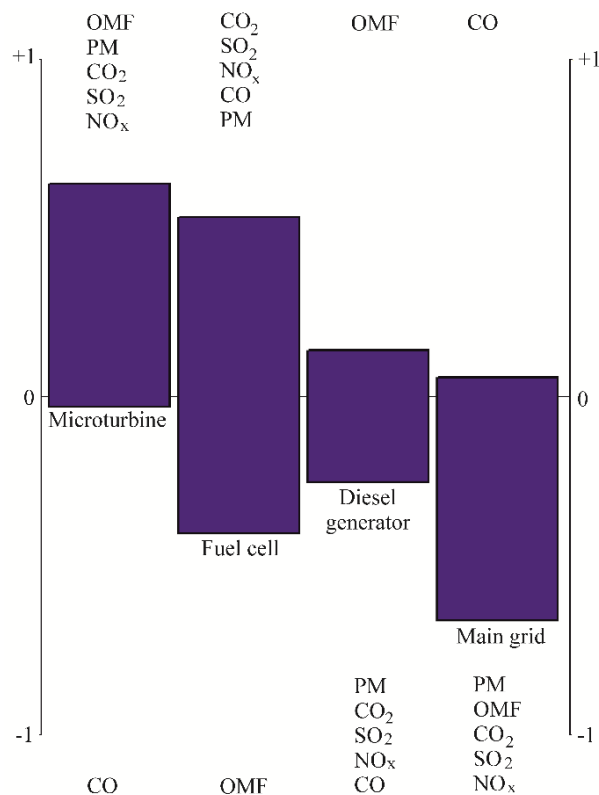
Ранг	Алтернатива	Phi	Phi ⁺	Phi ⁻
1	Микротурбина (MT)	0.7333	0.8667	0.1333
2	Дизел генератор (DG)	0.0333	0.5167	0.4833
3	Горивна ћелија (FC)	-0.2500	0.3667	0.6167
4	Главна мрежа (MG)	-0.5167	0.2333	0.7500



Сл. 4.5 Парцијално рангирање генератора применом методе PROMETHEE I за Сценарио 2



Сл. 4.6 Комплетно рангирање генератора применом методе PROMETHEE II за Сценарио 2



Сл. 4.7 PROMETHEE-Rainbow за Сценарио 2

Таблица 4.4 Рангирање генератора на основу Phi за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи за Сценарио 2

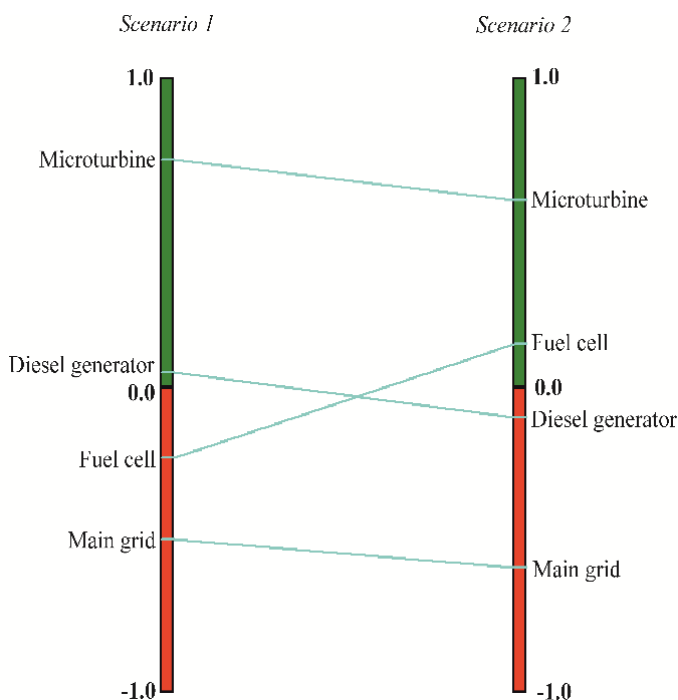
Ранг	Алтернатива	Phi	Phi ⁺	Phi ⁻
1	Микротурбина (MT)	0.6000	0.8000	0.2000
2	Горивна ћелија (FC)	0.1250	0.5500	0.4250
3	Дизел генератор (DG)	-0.1167	0.4417	0.5583
4	Главна мрежа (MG)	-0.6083	0.1833	0.7917

Резултати добијени применом PROMETHEE II методе за комплетно рангирање дати су на Сл. 4.6, а PROMETHEE-Rainbow за Сценарио 2 на Сл. 4.7. На основу резултата рангирања добија се да је микротурбина најбољи избор као и у Сценарију 1. У Сценарију 2, друго место у рангирању заузима горивна ћелија, док је дизел генератор на трећем месту.

Главна мрежа је на четвртом месту у рангирању генератора, као што је приказано у Таблици 4.4, где су дате и вредности чистих токова Φ_i , излазних токова Φ_i^+ и улазних токова Φ_i^- за све алтернативе.

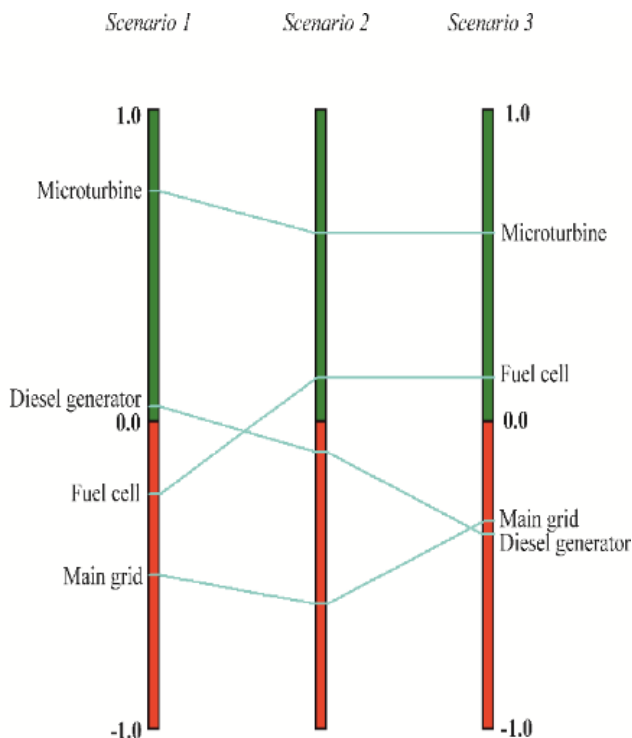
Поређење резултата рангирања за Сценарије 1 и 2 дато је на Сл. 4.8.

У Сценарију 3 промењена је само вредност OMF трошкова за главну мрежу на 0.14 \$/kWh у односу на Сценарио 2 у коме су OMF трошкови за главну мрежу 0.2 \$/kWh, а сви остали евалуациони критеријуми имају исте тежинске коефицијенте као у Сценарију 2. У Сценарију 3, главна мрежа је бољи избор од дизел генератора у комплетном рангирању алтернатива. На Сл. 4.9 дато је поређење сва три сценарија.



Сл. 4.8 Поређење резултата рангирања генератора за Сценарио 1 и Сценарио 2

Ако би оптимално задовољили искључиво еколошке критеријуме, горивна ћелија би била најбољи избор, али је анализа резултата показала да је микротурбина најбољи избор при рангирању генератора у случају оптималног задовољавања економских/еколошких критеријума за разматране тежинске коефицијенте. Због тога је за оптималан рад микромреже неопходна примена метода вишекритеријумске оптимизације и рангирања генератора.



Сл. 4.9 Поређење резултата рангирања генератора за три сценарија

4.5 Рангирање генератора применом методе PROMETHEE према еколошким критеријумима

Ако су у микромрежи на располагању следећи извори електричне енергије: дизел генератор (Diesel ICE), генератор на природни гас (Gas ICE), микротурбина (MT), гасна турбина (GT) и горивна ћелија (FC), треба размотрити који је оптималан избор са еколошког становишта. С обзиром на то да је производња електричне енергије одговорна за приближно 2/3 емисија сумпор диоксида [10], 2/5 емисија угљен-диоксида, 1/4 емисија оксида азота, као и за емисије других гасова који изазивају ефекат стаклене баште, изабрани су коефицијенти тежине: 40% за емисије SO₂, 25% за емисије CO₂, 15% за емисије NO_x, 10% за емисије CO, 5% за емисије PM и 5% за HC, а вредности емисија преузете из [10] дате су у Таблици 4.5.

Оптимални избор генератора извршен је применом софтвера PROMETHEE-GAIA. На Сл. 4.10 дат је приказ екрана у овом програму са матрицом одлучивања.

Таблица 4.5 Емисије штетних гасова и честица за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи [10]

Емисије генератора	Генератор на природни гас (Gas ICE)	Дизел генератор (Diesel ICE)	Микротурбина (MT)	Горивна ћелија (FC)	Гасна турбина (GT)
CO ₂ [g/kWh]	625	695	725	477	625
SO ₂ [g/kWh]	0.032	1.25	0.037	0.024	0.032
NO _x [g/kWh]	0.5	2.13	0.2	0.015	0.29
CO [g/kWh]	1.8	2.8	0.47	0	0.42
PM ₁₀ [g/kWh]	0.014	0.36	0.041	0	0.041
HC [g/kWh]	0.54	1.65	0.14	0	0.42

Резултати коришћења PROMETHEE I методе за парцијално рангирање генератора према еколошким критеријумима дати су на Сл. 4.11, према излазном току Φ_i^+ и улазном току Φ_i^- за i -ту алтернативу генератора, $i=1,2,3,4,5$. Резултати коришћења PROMETHEE II методе за комплетно рангирање генератора дати су на Сл. 4.12. Поређење алтернатива је извршено на основу релације (4.1).

У Таблици 4.6 дато је рангирање генератора на основу Φ_i .

Visual PROMETHEE Academic - Generators choice environmental.vpg (saved)

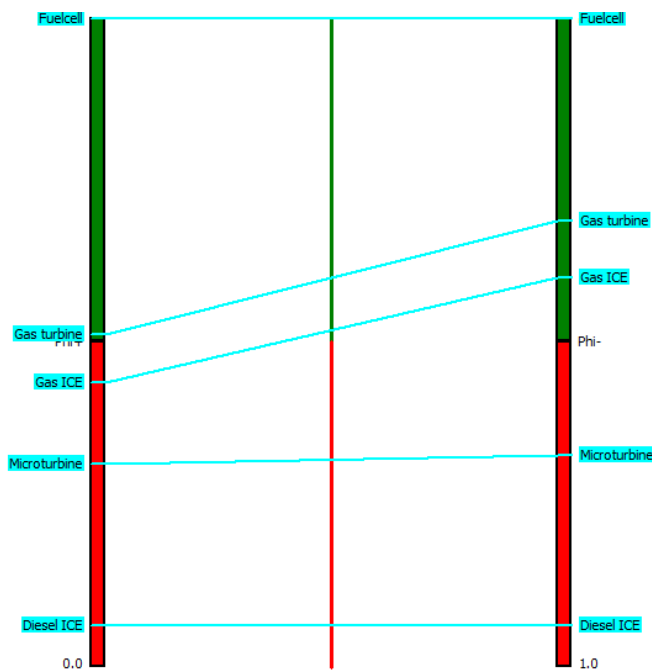
File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

Scenario1	HC	CO2	SO2	NOX	CO	PM
Unit	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	min	min	min	min	min	min
Weight	0.05	0.25	0.40	0.15	0.10	0.05
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	0.00000	477.00000	0.02400	0.01500	0.00000	0.00000
Maximum	1.65000	725.00000	1.25000	2.13000	2.80000	0.36000
Average	0.55000	629.40000	0.27500	0.62700	1.09800	0.09120
Standard Dev.	0.58268	85.68220	0.48752	0.76754	1.04396	0.13533
Evaluations						
<input checked="" type="checkbox"/> Diesel ICE	1.65000	695.00000	1.25000	2.13000	2.80000	0.36000
<input checked="" type="checkbox"/> Microturbine	0.14000	725.00000	0.03700	0.20000	0.47000	0.04100
<input checked="" type="checkbox"/> Fuelcell	0.00000	477.00000	0.02400	0.01500	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> Gas turbine	0.42000	625.00000	0.03200	0.29000	0.42000	0.04100
<input checked="" type="checkbox"/> Gas ICE	0.54000	625.00000	0.03200	0.50000	1.80000	0.01400

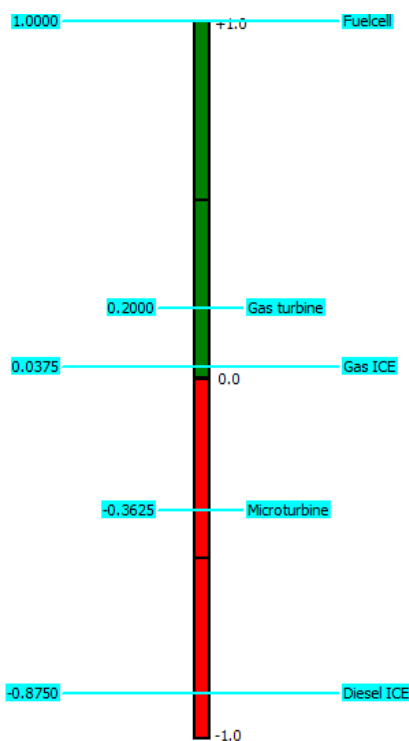
All Scenario1

Actions: 5 (5 active) Criteria: 6 (6 active) Scenarios: 1 (1 active) Locale: USA [\$/] Saved

Сл. 4.10 Матрица одлучивања у програму PROMETHEE-GAIA



Сл. 4.11 Парцијално рангирање генератора према еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE I

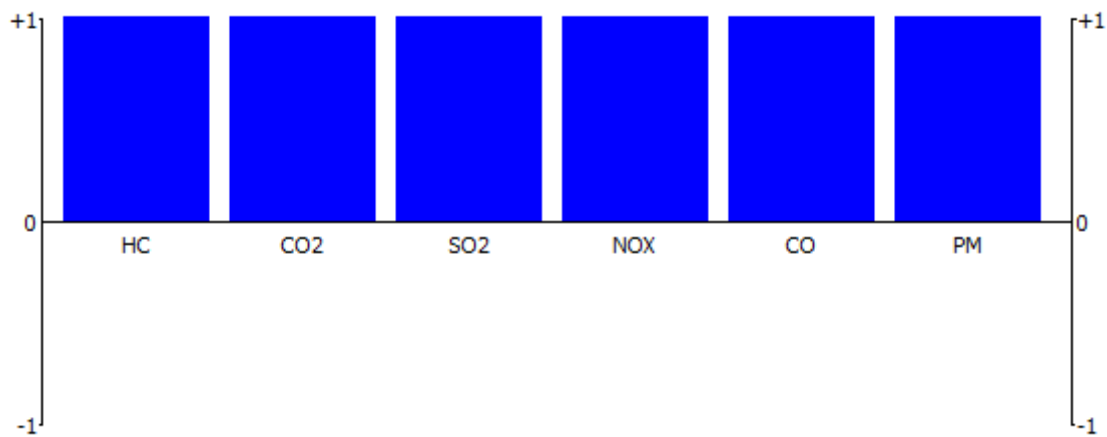


Сл. 4.12 Комплетно рангирање генератора према еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE II

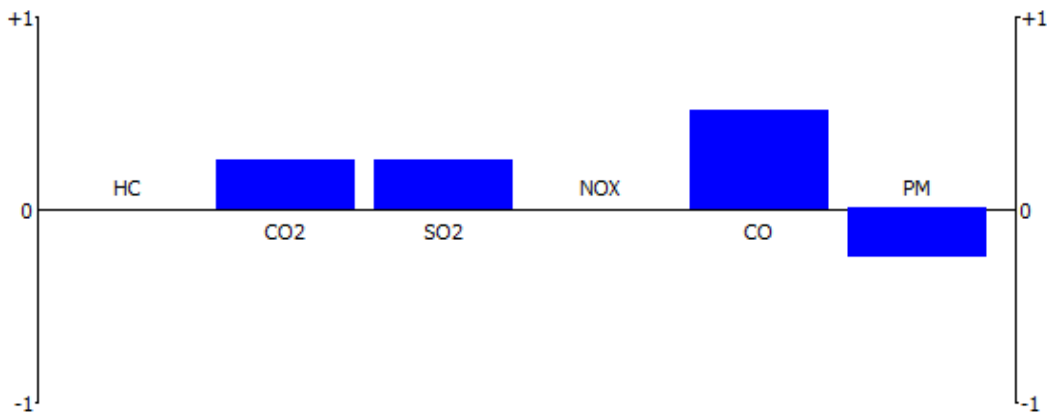
Таблица 4.6 Рангирање на основу Phi за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи

Ранг	Алтернатива	Phi	Phi +	Phi -
3	Генератор на природни гас (Gas ICE)	0.0375	0.4375	0.4000
5	Дизел генератор (Diesel ICE)	-0.8750	0.0625	0.9375
4	Микротурбина (MT)	-0.3625	0.3125	0.6750
1	Горивна ћелија (FC)	1.0000	1.0000	0.0000
2	Гасна турбина (GT)	0.2000	0.5125	0.3125

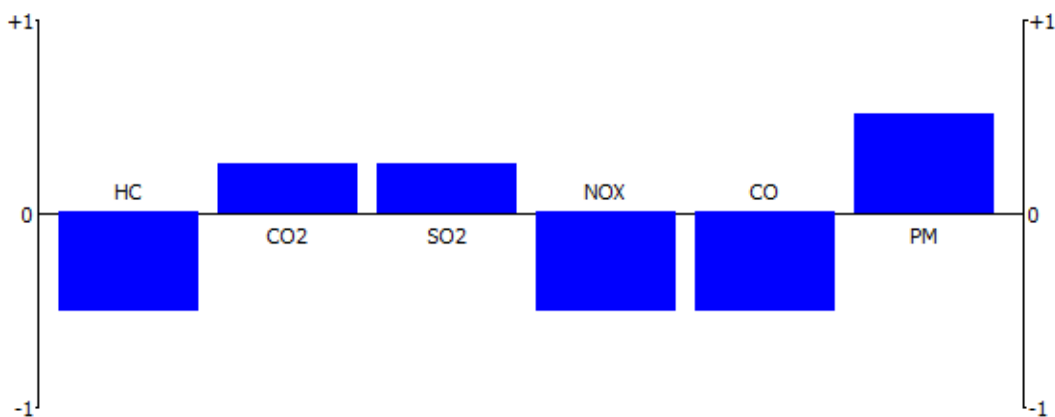
Сл. 4.13 – 4.17 приказују оцене емисионих параметара свих генератора за све евалуационе критеријуме у редоследу од најбоље до најгоре алтернативе. Горивна ћелија представља оптимални избор на основу вишекритеријумске оптимизације.



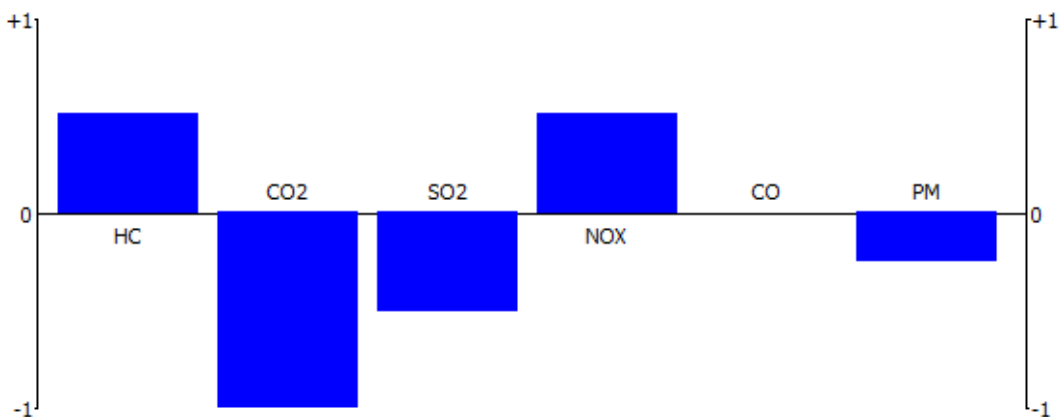
Сл. 4.13 Оцене емисионих параметара горивне ћелије



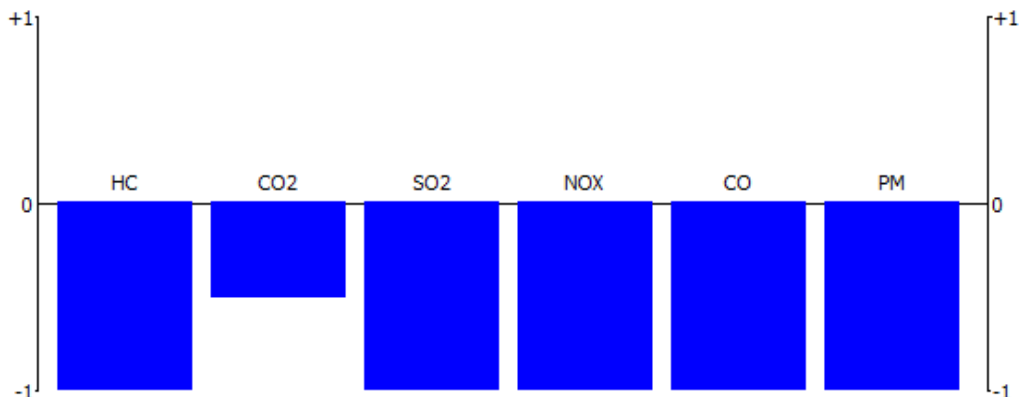
Сл. 4.14 Оцене емисионих параметара гасне турбине



Сл. 4.15 Оцене емисионих параметара генератора на природни гас



Сл. 4.16 Оцене емисионих параметара микротурбине



Сл. 4.17 Оцене емисионих параметара дизел генератора

4.6 Рангирање генератора применом методе PROMETHEE према економским и еколошким критеријумима

У овом поглављу разматра се рангирање генератора и према економским и према еколошким критеријумима (енг. *enviroeconomic ranking*), ако су у микромрежи на располагању извори електричне енергије: дизел генератор (Diesel ICE), генератор на природни гас (Gas ICE), микротурбина (MT), гасна турбина (GT) и горивна ћелија (FC). Економски критеријуми су: инвестициони трошкови [\$/kW], оперативни трошкови и трошкови одржавања (O&M) који могу бити фиксни [\$/kW] и варијабилни [\$/kWh], као и трошкови горива [\$/kWh].

Инвестициони трошкови укључују дугорочна улагања као што су куповина зграде, улагање у опрему или пријављивање патената.

Оперативни трошкови и трошкови одржавања производње електричне енергије имају фиксни и варијабилни део. Фиксни део O&M трошкова се састоји од трошкова рада запослених у електрани, трошкова редовног и повремениг одржавања, али и трошкова закупа, пореза на имовину, осигурања и системских накнада за коришћење електроенергетске мреже. Варијабилни део O&M трошкова обухвата трошкове услед сталног уговора о одржавању, периодичних прегледа, замене, поправки компоненти система, потрошног материјала, одлагања отпада, остатака и помоћних материјала (воде, мазива, адитива за гориво), итд.

Трошкови горива за одређени тип генератора зависе од цене одговарајућег горива, утроска горива и ефикасности генератора.

За економске критеријуме изабрани су коефицијенти тежине: 20% за инвестиционе трошкове, 10% за фиксне О&М трошкове, 10% за варијабилне О&М трошкове и 10% за трошкове горива. За еколошке критеријуме изабрани су коефицијенти тежине 20% за емисије SO₂, 12% за емисије CO₂, 7% за емисије NO_x, 5% за емисије CO, 3% за емисије PM и 3% за емисије HC, а подаци су преузети из [10] и дати у Таблици 4.7. Има десет критеријума, а рангира се пет алтернатива применом вишекритеријумске оптимизације и софтвера PROMETHEE-GAIA.

На Сл. 4.18 дат је приказ матрице одлучивања.

Таблица 4.7 Економски критеријуми за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи [10]

Економски критеријуми	Генератор на природни гас (Gas ICE)	Дизел генератор (Diesel ICE)	Микротурбина (MT)	Горивна ћелија (FC)	Гасна турбина (GT)
Инвестициони трошкови [\$ /kW]	750	700	800	3000	480
Фиксни О&М трошкови [\$ /kW]	15	15	15	15	15
Варијабилни О&М трошкови [¢ /kWh]	1	1	0.6	0.6	0.55
Трошкови горива [¢ /kWh]	0.89	1.02	0.89	0.89	0.89

Visual PROMETHEE Academic - Generators choice environomic.vpg (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

Scenario1	HC	CO2	SO2	NOX	CO	PM	Cap. cost	Fix. OM	Var. OM	Fuel cost
Unit	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	\$/kW	\$/kW	€/kWh	€/kWh
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences										
Min/Max	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min
Weight	0.03	0.12	0.20	0.07	0.05	0.03	0.20	0.10	0.10	0.10
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics										
Minimum	0.00000	477.00000	0.02400	0.01500	0.00000	0.00000	480.00000	15.00000	0.55000	0.89000
Maximum	1.65000	725.00000	1.25000	2.13000	2.80000	0.36000	3000.00000	15.00000	1.00000	1.02000
Average	0.55000	629.40000	0.27500	0.62700	1.09800	0.09120	1146.00000	15.00000	0.75000	0.91600
Standard Dev.	0.58268	85.68220	0.48752	0.76754	1.04396	0.13533	933.41523	0.00000	0.20494	0.05200
Evaluations										
<input checked="" type="checkbox"/> Diesel ICE	1.65000	695.00000	1.25000	2.13000	2.80000	0.36000	700.00000	15.00000	1.00000	1.02000
<input checked="" type="checkbox"/> Microturbine	0.14000	725.00000	0.03700	0.20000	0.47000	0.04100	800.00000	15.00000	0.60000	0.89000
<input checked="" type="checkbox"/> Fuelcell	0.00000	477.00000	0.02400	0.01500	0.00000	0.00000	3000.00000	15.00000	0.60000	0.89000
<input checked="" type="checkbox"/> Gas turbine	0.42000	625.00000	0.03200	0.29000	0.42000	0.04100	480.00000	15.00000	0.55000	0.89000
<input checked="" type="checkbox"/> Gas ICE	0.54000	625.00000	0.03200	0.50000	1.80000	0.01400	750.00000	15.00000	1.00000	0.89000

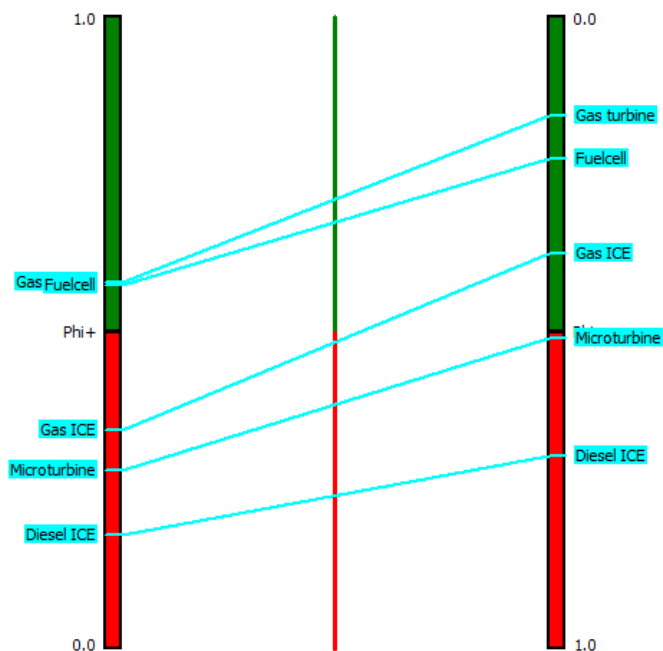
\\All\Scenario1\

Actions: 5 (5 active) Criteria: 10 (10 active) Scenarios: 1 (1 active) Locale: USA [S./] Saved

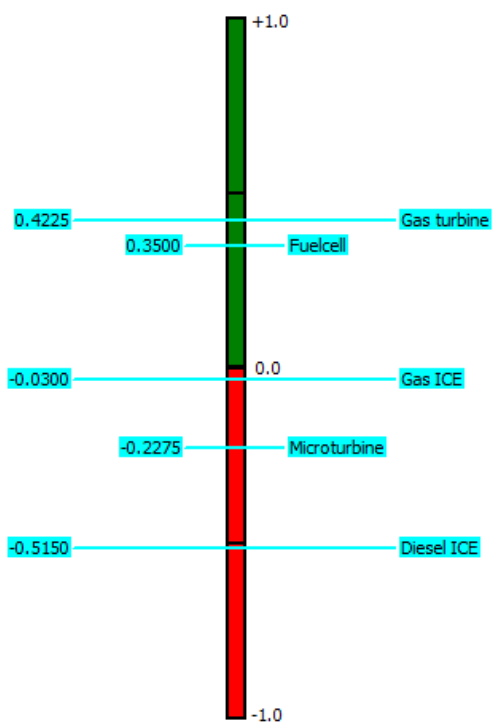
Сл. 4.18 Матрица одлучивања у програму PROMETHEE-GAIA

Резултати коришћења PROMETHEE I методе за парцијално рангирање генератора према економским и еколошким критеријумима дати су на Сл. 4.19, према излазном току Φ_i^+ и улазном току Φ_i^- за i -ту алтернативу генератора, $i=1,2,3,4,5$. Резултати коришћења PROMETHEE II методе за комплетно рангирање генератора дати су на Сл. 4.20.

У Таблици 4.8 дато је рангирање генератора на основу Φ_i .



Сл. 4.19 Парцијално рангирање генератора према економским и еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE I



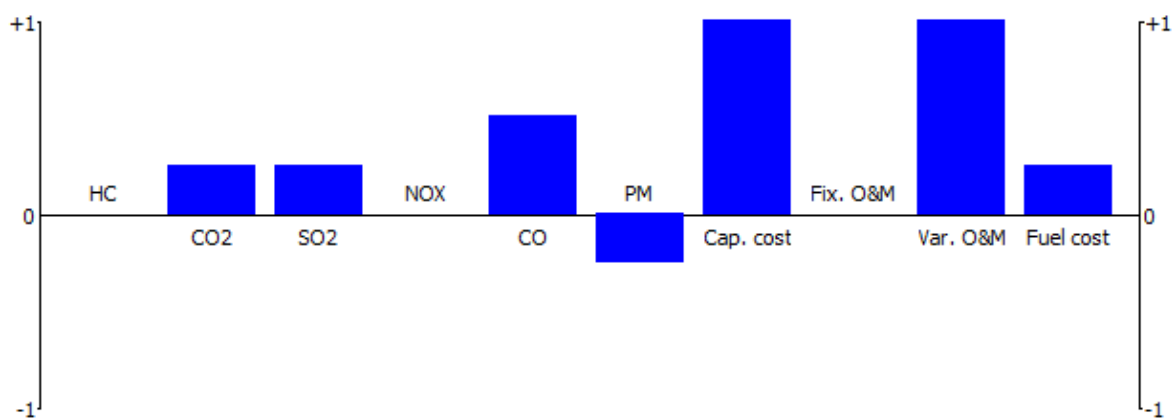
Сл. 4.20 Комплетно рангирање генератора према економским и еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE II

Таблица 4.8 Рангирање на основу Phi за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи

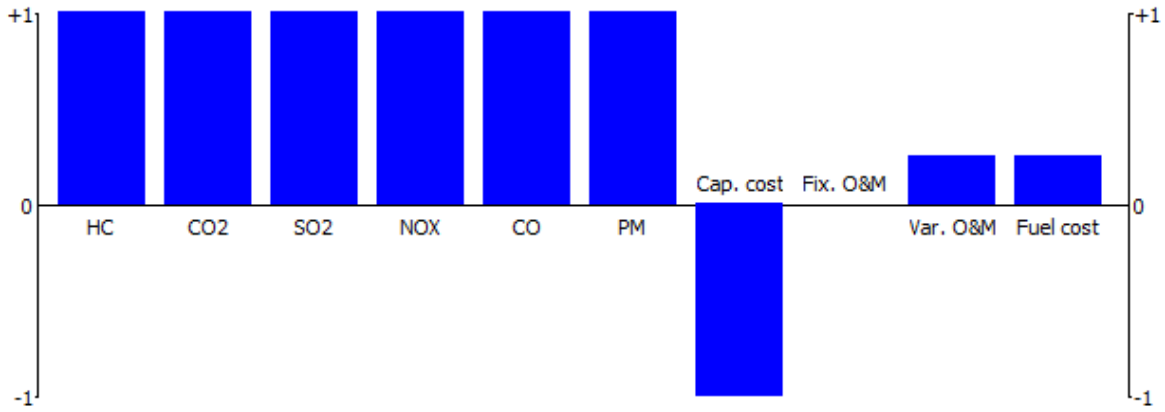
Ранг	Алтернатива	Phi	Phi ⁺	Phi ⁻
3	Генератор на природни гас (Gas ICE)	-0.0300	0.3450	0.3750
5	Дизел генератор (Diesel ICE)	-0.5150	0.1800	0.6950
4	Микротурбина (MT)	-0.2275	0.2825	0.5100
2	Горивна ћелија (FC)	0.3500	0.5750	0.2250
1	Гасна турбина (GT)	0.4225	0.5800	0.1575

Сл. 4.21 – 4.25 приказују оцене трошковних и емисионих параметара свих генератора за све евалуационе критеријуме у редоследу од најбоље до најгоре алтернативе.

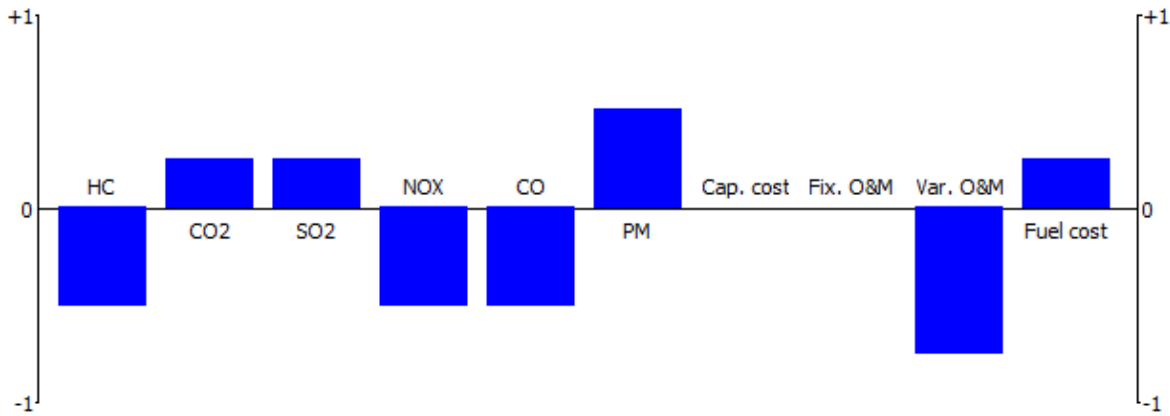
Гасна турбина представља оптимални избор на основу вишекритеријумске оптимизације са економског и еколошког аспекта. Најнеповољнији избор је дизел генератор.



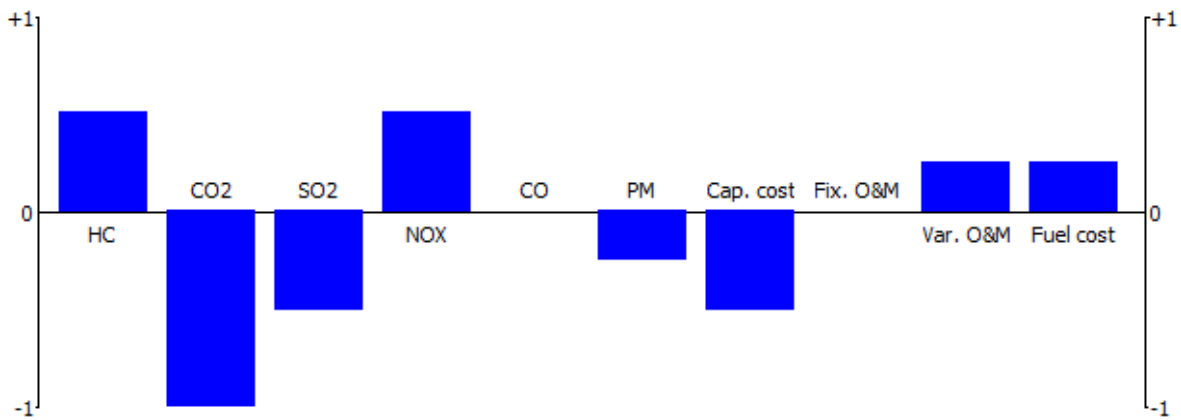
Сл. 4.21 Оцене трошковних и емисионих параметара гасне турбине



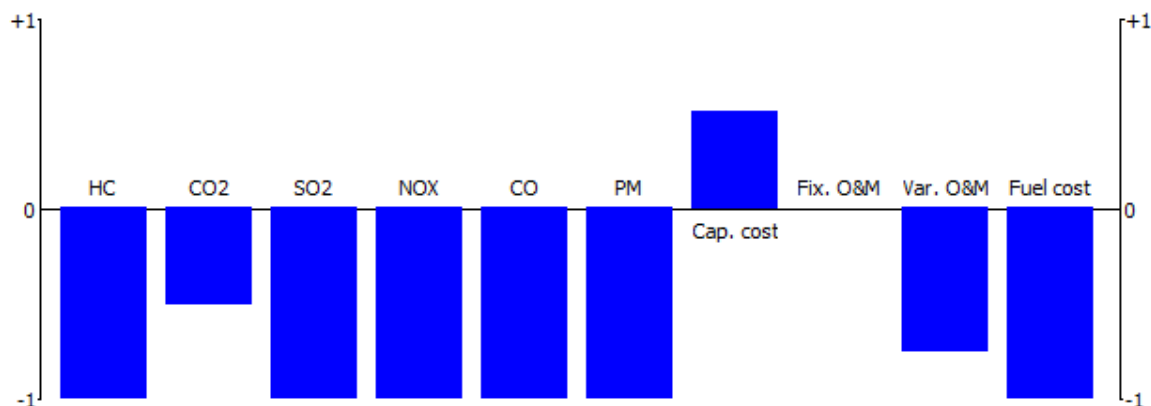
Сл. 4.22 Оцене трошковних и емисионих параметара горивне ћелије



Сл. 4.23 Оцене трошковних и емисионих параметара генератора на природни гас



Сл. 4.24 Оцене трошковних и емисионих параметара микротурбине



Сл. 4.25 Оцене трошковних и емисионих параметара дизел генератора

4.7 Рангирање генератора у микромрежи применом методе ELECTRE

ELECTRE (франц. ELimination Et Choix Traduisant la REalité, енг. Elimination and Choice Translating Reality) је група метода којима се врши вишекритеријумско одлучивање (енг. Multi-Criteria Decision Making - MCDM), настала на основу методе коју је предложио Bernard Roy у Француској 1965. године. Ова метода приказана је у радовима [11-13].

У првом кораку формира се матрица одлучивања (енг. Decision-Making Matrix – DMM) димензија $m \times n$, чији редови одговарају алтернативама a_i , за $i = 1, 2, \dots, m$, док колоне одговарају критеријумима тј. атрибутима A_j , за $j = 1, 2, \dots, n$.

За претходно дефинисани проблем чији су параметри дати у Таблицама 4.1 и 4.2 формира се матрица одлучивања (4.2) чији су параметри приказани у Таблици 4.9. Елемент матрице одлучивања је x_{ij} , за $i = 1, 2, 3, 4$, $j = 1, 2, \dots, 6$.

$$X = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ a_1 & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} \end{bmatrix} \\ a_2 & \begin{bmatrix} x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} \end{bmatrix} \\ a_3 & \begin{bmatrix} x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{35} & x_{36} \end{bmatrix} \\ a_4 & \begin{bmatrix} x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ a_1 & \begin{bmatrix} 0.15 & 697 & 0.22 & 0.5 & 1 & 0.2 \end{bmatrix} \\ a_2 & \begin{bmatrix} 0.11 & 670 & 0.0036 & 0.186 & 0.4 & 0 \end{bmatrix} \\ a_3 & \begin{bmatrix} 0.242 & 441 & 0.0022 & 0.0136 & 0.01 & 0.01 \end{bmatrix} \\ a_4 & \begin{bmatrix} 0.2 & 889 & 1.8 & 1.6 & 0.01 & 0.3 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.2)$$

Таблица 4.9 Параметри који дефинишу матрицу одлучивања [5-8]

Тежински коэффицијенти → критеријума	0.6	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05
Критеријуми→ Алтернативе ↓	OMF трошкови [\$/kWh]	CO ₂ [g/kWh]	SO ₂ [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	CO [g/kWh]	PM [g/kWh]
Дизел генератор (DG)	0.15	697	0.22	0.5	1	0.2
Микротурбина (MT)	0.11	670	0.0036	0.186	0.4	0
Горивна ћелија (FC)	0.242	441	0.0022	0.0136	0.01	0.01
Главна мрежа (MG)	0.20	889	1.8	1.6	0.01	0.3

У другом кораку вршимо векторску нормализацију тако да се добија нормализована матрица N (енг. Normalized Matrix):

$$N = [n_{ij}]_{m \times n}, \quad (4.3)$$

чији су елементи:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n. \quad (4.4)$$

У изабраном примеру нормализована матрица је:

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} & n_{16} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} & n_{25} & n_{26} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} & n_{35} & n_{36} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} & n_{45} & n_{46} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.411053 & 0.50308 & 0.121319 & 0.296446 & 0.928397 & 0.554487 \\ 0.301439 & 0.483592 & 0.001985 & 0.110278 & 0.371359 & 0 \\ 0.663166 & 0.318305 & 0.001213 & 0.008063 & 0.009284 & 0.027724 \\ 0.548071 & 0.641662 & 0.992611 & 0.948627 & 0.009284 & 0.83173 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Тежинска нормализована матрица V (енг. Weighted Normalized Matrix) је:

$$V = N \cdot W = \begin{bmatrix} n_{11}w_1 & n_{12}w_2 & n_{13}w_3 & n_{14}w_4 & n_{15}w_5 & n_{16}w_6 \\ n_{21}w_1 & n_{22}w_2 & n_{23}w_3 & n_{24}w_4 & n_{25}w_5 & n_{26}w_6 \\ n_{31}w_1 & n_{32}w_2 & n_{33}w_3 & n_{34}w_4 & n_{35}w_5 & n_{36}w_6 \\ n_{41}w_1 & n_{42}w_2 & n_{43}w_3 & n_{44}w_4 & n_{45}w_5 & n_{46}w_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.246632 & 0.050308 & 0.012132 & 0.029645 & 0.04642 & 0.027724 \\ 0.180863 & 0.048359 & 0.000199 & 0.011028 & 0.018568 & 0 \\ 0.397899 & 0.03183 & 0.000121 & 0.000806 & 0.000464 & 0.001386 \\ 0.328842 & 0.064166 & 0.099261 & 0.094863 & 0.000464 & 0.041587 \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

где је W матрица тежинских коефицијената критеријума, димензија $n \times n$. За дати пример је:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

У трећем кораку се одређују скупови сагласности и несагласности за све парове алтернатива a_p и a_r , за $p \neq r$ и $p, r \in I = \{i | i = 1, 2, \dots, m\}$. Прво се формира скуп сагласности C_{pr} (енг. Concordance Interval Set) за алтернативе a_p и a_r , који се састоји од оних критеријума (атрибута) за које је a_p пожељније од a_r :

$$C_{pr} = \{j | x_{pj} \geq x_{rj}\}, \quad (4.8)$$

а затим и комплементарни скуп несагласности D_{pr} (енг. Discordance Interval Set):

$$D_{pr} = \{j | x_{pj} < x_{rj}\} = J / C_{pr}, \quad (4.9)$$

где је $J = \{j | j = 1, 2, \dots, n\}$ скуп свих критеријума (атрибута).

У четвртном кораку се одређује матрица сагласности C (енг. Concordance Interval Matrix). Елементе те матрице чине индекси сагласности c_{pr} који се рачунају као сума преференција (тежина) које одговарају припадајућим елементима скупова сагласности. Индекс сагласности алтернатива a_p и a_r је:

$$c_{pr} = \sum_{j \in C_{pr}} w_j, \quad (4.10)$$

тако да је $0 \leq c_{pr} \leq 1$. Већа вредност индекса c_{pr} значи већу пожељност алтернативе a_p у односу на алтернативу a_r . Матрица сагласности има нуле на дијагонали, а у изабраном примеру је:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & 0 & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & 0 & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0.4 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.05 \\ 0.6 & 0.65 & 0 & 0.65 \\ 0.95 & 0.95 & 0.35 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

У петом кораку се одређује матрица несагласности D (енг. Discordance Interval Matrix). Елементе те матрице чине индекси несагласности d_{pr} који се рачунају према обрасцу:

$$d_{pr} = \frac{\max_{j \in D_{pr}} \{|v_{pj} - v_{rj}|\}}{\max_{j \in J} \{|v_{pj} - v_{rj}|\}}, \quad (4.12)$$

тако да је $0 \leq d_{pr} \leq 1$. Већа вредност индекса d_{pr} значи мању пожељност алтернативе a_p у односу на алтернативу a_r . Матрица несагласности има нуле на дијагонали, а у изабраном примеру је:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0.303804 & 0.083414 & 0 & 1 \\ 0.527443 & 0.12234 & 0.696561 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

У шестом кораку се одређује праг сагласности, односно, просечни индекс сагласности (енг. Average Concordance Index):

$$\bar{c} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq r}}^m \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq p}}^m c_{pr}. \quad (4.14)$$

За избрани пример $\bar{c} = 0.5$. Елементи e_{pr} матрице сагласне доминације E (енг. Concordance Index Matrix) добијају се на основу критеријума:

$$e_{pr} = \begin{cases} 1, & c_{pr} \geq \bar{c} \\ 0, & c_{pr} < \bar{c} \end{cases}, \quad (4.15)$$

тако да је матрица сагласне доминације у избраном примеру:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

У седмом кораку се одређује праг несагласности, односно, просечни индекс несагласности (енг. Average Discordance Index):

$$\bar{d} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq r}}^m \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq p}}^m d_{pr}. \quad (4.17)$$

За избрани пример $\bar{d} = 0,644463$. Елементи f_{pr} матрице несагласне доминације F (енг. Discordance Index Matrix) добијају се на основу критеријума:

$$f_{pr} = \begin{cases} 1, & d_{pr} \leq \bar{d} \\ 0, & d_{pr} > \bar{d} \end{cases}, \quad (4.18)$$

тако да је матрица несагласне доминације:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

У осмом кораку се одређује матрица агрегатне доминације G (енг. Aggregate Dominance Matrix). Елементи матрице агрегатне доминације рачунају се по обрасцу:

$$g_{pr} = e_{pr} \cdot f_{pr}, \quad (4.20)$$

па је за избрани пример матрица агрегатне доминације:

$$G = \begin{matrix} & \begin{matrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (4.21)$$

На основу ове матрице може се закључити да трећа алтернатива (горивна хелија) и четврта алтернатива (главна мрежа) имају веће емисије и трошкове него друге две алтернативе. Најмање емисије и трошкове има друга алтернатива (микротурбина) што се закључује на основу резултата из друге врсте матрице G .

На основу елемената матрице сагласности може се добити нето супериорна вредност (енг. Net Superior Value) за сваку алтернативу p по обрасцу:

$$c_p = \sum_{r=1}^n c_{pr} - \sum_{r=1}^n c_{rp}, \quad (4.22)$$

а на основу елемената матрице несагласности нето инфериорна вредност (енг. Net Inferior Value) за сваку алтернативу p по следећем обрасцу:

$$d_p = \sum_{r=1}^n d_{pr} - \sum_{r=1}^n d_{rp}. \quad (4.23)$$

Таблице 4.10 и 4.11 дају нето супериорне и нето инфериорне вредности и ранг алтернатива.

Таблица 4.10 Нето супериорне вредности и ранг алтернатива

Алтернатива	Нето супериорна вредност	Позитивни ранг	Негативни ранг
Дизел генератор (DG)	-0.1	3	2
Микротурбина (MT)	-2.2	4	1
Горивна ћелија (FC)	0.8	2	3
Главна мрежа (MG)	1.5	1	4

Таблица 4.11 Нето инфериорне вредности и ранг алтернатива

Алтернатива	Нето инфериорна вредност	Позитивни ранг	Негативни ранг
Дизел генератор (DG)	0.168754	3	2
Микротурбина (MT)	2.794247	4	1
Горивна ћелија (FC)	-1.30934	2	3
Главна мрежа (MG)	-1.65366	1	4

Позитивни ранг алтернатива односи се на максимизацију, а негативни ранг на минимизацију свих критеријума.

4.8 Рангирање генератора у микромрежи применом методе TOPSIS

TOPSIS (енг. The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) је метод којим се одређује редослед преференција по сличности са идеалним решењем. То је један од метода одлучивања на основу више критеријума. TOPSIS се заснива на идеји да изабрана алтернатива треба да има најкраћу удаљеност од најбољег идеалног решења и најдужу од најгорег идеалног решења [14-16].

У првом кораку се формира матрица одлучивања (DMM) димензија $m \times n$, чији редови одговарају алтернативама a_i , $i = 1, 2, \dots, m$, а колоне атрибутима A_j , $j = 1, 2, \dots, n$. Алтернативе су: a_1 (дизел генератор), a_2 (микротурбина), a_3 (горивна ћелија) и a_4 (главна мрежа), а атрибути (критеријуми чије вредности треба минимизирати) су: A_1 (операциони трошкови са трошковима одржавања), A_2 (емисије CO₂), A_3 (SO₂), A_4 (NO_x), A_5 (CO) и A_6 (PM честице). За претходно дефинисани проблем чији су параметри дати у Таблицама 4.1 и 4.2 формира се матрица одлучивања (4.24). Елемент матрице одлучивања је x_{ij} , за $i = 1, 2, 3, 4$, $j = 1, 2, \dots, 6$.

$$X = \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} & x_{26} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{35} & x_{36} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & x_{45} & x_{46} \end{bmatrix} = \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ 0.15 & 697 & 0.22 & 0.5 & 1 & 0.2 \\ 0.11 & 670 & 0.0036 & 0.186 & 0.4 & 0 \\ 0.242 & 441 & 0.0022 & 0.0136 & 0.01 & 0.01 \\ 0.2 & 889 & 1.8 & 1.6 & 0.01 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

У другом кораку формира се нормализована матрица N :

$$N = [n_{ij}]_{m \times n}, \quad (4.25)$$

чији су елементи:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad \text{за } i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (4.26)$$

У изабраном примеру нормализована матрица је:

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} & n_{16} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} & n_{25} & n_{26} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} & n_{35} & n_{36} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} & n_{45} & n_{46} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.411053 & 0.50308 & 0.121319 & 0.296446 & 0.928397 & 0.554487 \\ 0.301439 & 0.483592 & 0.001985 & 0.110278 & 0.371359 & 0 \\ 0.663166 & 0.318305 & 0.001213 & 0.008063 & 0.009284 & 0.027724 \\ 0.548071 & 0.641662 & 0.992611 & 0.948627 & 0.009284 & 0.83173 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Тежинска нормализована матрица одлучивања V добија се множењем нормализоване матрице N и дијагоналне матрице W тежинских коефицијената критеријума, димензија $n \times n$, на чијој су дијагонали тежине: $w_1 = 0.6$, $w_2 = 0.1$, $w_3 = 0.1$, $w_4 = 0.1$, $w_5 = 0.05$ и $w_6 = 0.05$, па је:

$$V = N \cdot W = \begin{bmatrix} n_{11}w_1 & n_{12}w_2 & n_{13}w_3 & n_{14}w_4 & n_{15}w_5 & n_{16}w_6 \\ n_{21}w_1 & n_{22}w_2 & n_{23}w_3 & n_{24}w_4 & n_{25}w_5 & n_{26}w_6 \\ n_{31}w_1 & n_{32}w_2 & n_{33}w_3 & n_{34}w_4 & n_{35}w_5 & n_{36}w_6 \\ n_{41}w_1 & n_{42}w_2 & n_{43}w_3 & n_{44}w_4 & n_{45}w_5 & n_{46}w_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} & v_{16} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} & v_{25} & v_{26} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} & v_{35} & v_{36} \\ v_{41} & v_{42} & v_{43} & v_{44} & v_{45} & v_{46} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.246632 & 0.050308 & 0.012132 & 0.029645 & 0.04642 & 0.027724 \\ 0.180863 & 0.048359 & 0.000199 & 0.011028 & 0.018568 & 0 \\ 0.397899 & 0.03183 & 0.000121 & 0.000806 & 0.000464 & 0.001386 \\ 0.328842 & 0.064166 & 0.099261 & 0.094863 & 0.000464 & 0.041587 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

У трећем кораку одређују се идеално најбоља A_j^+ и идеално најгора вредност A_j^- . Ако је пожељно да вредност неког атрибута буде што већа, онда се идеално најбоља вредност одређује као максимум одговарајуће колоне у тежинској нормализованој матрици одлучивања V . Ако је пожељно да вредност неког атрибута буде што мања, онда се идеално најгора вредност одређује као минимум одговарајуће колоне у матрици V . У разматраном проблему није пожељно да трошкови буду што већи, нити да емисије гасова и честица буду што веће, него да буду што мање, па зато треба одредити минимуме свих колона у случају

идеално најбољих вредности, а максимуме свих колона у матрици V у случају идеално најгорих вредности.

Идеално најбоље вредности су: $A_1^+ = 0.180863$, $A_2^+ = 0.03183$, $A_3^+ = 0.000121$, $A_4^+ = 0.000806$, $A_5^+ = 0.000464$ и $A_6^+ = 0$, а идеално најгоре вредности: $A_1^- = 0.397899$, $A_2^- = 0.064166$, $A_3^- = 0.099261$, $A_4^- = 0.094863$, $A_5^- = 0.04642$ и $A_6^- = 0.041587$.

У четвртом кораку одређују се растојања S_i^+ од идеално најбољег решења на основу средњеквадратних вредности разлика између вредности елемената матрице V и идеално најбољих вредности:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.29)$$

и растојања S_i^- од идеално најгорег решења:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.30)$$

Ова растојања дата су у Таблици 4.12.

Таблица 4.12 Растојања од идеално најбољег и од идеално најгорег решења

i	Алтернатива a_i	S_i^+	S_i^-
1	Дизел генератор (DG)	0.092322	0.187379
2	Микротурбина (MT)	0.02656	0.258266
3	Горивна ћелија (FC)	0.21704	0.15313
4	Главна мрежа (MG)	0.208202	0.08295

У петом кораку одређују се коефицијенти приближности за сваку алтернативу:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.31)$$

Ови коефицијенти имају вредност између 0 и 1, а дати су у Таблици 4.13.

Таблица 4.13 Коефицијенти приближности алтернатива CC_i

i	Алтернатива a_i	CC_i
1	Дизел генератор (DG)	0.669926053
2	Микротурбина (MT)	0.906750358
3	Горивна ћелија (FC)	0.413674762
4	Главна мрежа (MG)	0.284903661

У шестом кораку рангирају се алтернативе на основу коефицијената приближности, од највећег до најмањег коефицијента, при чему се за изабрани проблем добија резултат као у Таблици 4.14.

Таблица 4.14 Ранг алтернатива

i	Алтернатива a_i	Ранг
1	Дизел генератор (DG)	2
2	Микротурбина (MT)	1
3	Горивна ћелија (FC)	3
4	Главна мрежа (MG)	4

4.9 Рангирање генератора у микромрежи применом методе ВИКОР

Основе методе **ВИКОР** (Вишекритеријумска оптимизација и компромисно решење) је развио Серафим Оприцовић у својој докторској дисертацији 1979. године за проблеме одлучивања у случају конфликтних и разнородних критеријума, под претпоставком да доносилац одлуке тражи решење које је најближе идеалном, а затим и у низу радова [17-20]. Једна примена методе ВИКОР у области електроенергетике дата је у [21].

У првом кораку приликом примене овог метода формира се матрица одлучивања (DMM) димензија $m \times n$ чији су елементи дати у Таблици 4.15. Алтернативе a_i одговарају редовима матрице $i = 1, 2, \dots, m$. У изабраном примеру постоје 4 алтернативе ($m = 4$): a_1 је дизел генератор, a_2 микротурбина, a_3 горивна ћелија и a_4 главна мрежа. Критеријуми A_j

одговарају колонама матрице $j = 1, 2, \dots, n$. У изабраном примеру постоји $n = 6$ критеријума (атрибута). A_1 представља операционе трошкове заједно са трошковима одржавања, A_2 представља емисије CO_2 , A_3 емисије SO_2 , A_4 емисије NO_x , A_5 емисије CO и A_6 емисије PM честица. Елемент матрице одлучивања је x_{ij} , за $i=1, 2, 3, 4$ и $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$.

У другом кораку одређују се најбоља f_j^+ и најгора f_j^- вредност по j -том критеријуму. При томе се најбоља вредност одређује као највећа вредност свих алтернатива за j -ти критеријум $f_j^+ = \max_i x_{ij}$, ако је пожељна што већа вредност, или као најмања вредност свих алтернатива за j -ти критеријум $f_j^+ = \min_i x_{ij}$, ако је пожељна што мања вредност за тај критеријум. Најгора вредност f_j^- одређује се као најмања вредност свих алтернатива за j -ти критеријум $f_j^- = \min_i x_{ij}$, ако је пожељна што већа вредност, или као највећа вредност свих алтернатива за j -ти критеријум $f_j^- = \max_i x_{ij}$, ако је пожељна што мања вредност. Ове вредности дате су у последња два реда Таблице 4.15.

Таблица 4.15 Матрица одлучивања и вредности f_j^+ и f_j^-

	A_1 (OMF)	A_2 (CO ₂)	A_3 (SO ₂)	A_4 (NO _x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
a_1 (DG)	0.15	697	0.22	0.5	1	0.2
a_2 (MT)	0.11	670	0.0036	0.186	0.4	0
a_3 (FC)	0.242	441	0.0022	0.0136	0.01	0.01
a_4 (MG)	0.2	889	1.8	1.6	0.01	0.3
f_j^+	0.11	441	0.0022	0.0136	0.01	0
f_j^-	0.242	889	1.8	1.6	1	0.3

У трећем кораку одређују се вредности S_i као нормализована Manhattan растојања помножена одговарајућим тежинама:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} w_j \right), \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.32)$$

и вредности R_i као нормализована Chebyshev растојања помножена одговарајућим тежинама:

$$R_i = \max_j \left(\frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} w_j \right), \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.33)$$

где су w_j тежине критеријума $j = 1, 2, \dots, n$, које изражавају преференције доносиоца одлука. У изабраном примеру тежине су: $w_1 = 0.6$, $w_2 = 0.1$, $w_3 = 0.1$, $w_4 = 0.1$, $w_5 = 0.05$ и $w_6 = 0.05$. Ова растојања дата су у Таблици 4.16 за $i=1, 2, 3, 4$.

У четвртом кораку одређују се вредности Q_i :

$$Q_i = v \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} + (1 - v) \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.34)$$

где су $S^+ = \min_j S_j$ и $S^- = \max_j S_j$, а $R^+ = \min_j R_j$ и $R^- = \max_j R_j$.

У изабраном примеру добијају се $S^+ = 0.081758$, $S^- = 0.759091$, $R^+ = 0.051116$ и $R^- = 0.6$. Коефицијент v означава тежину стратегије максимума групне користи, док је $1-v$ тежина индивидуалног незадовољства. Коефицијент v има вредност између 0 и 1, али се најчешће бира вредност 0.5, јер ова вредност омогућава добијање компромисног решења. За $v = 0.5$ вредности Q_i дате су у Таблици 4.16.

Таблица 4.16 Вредности S_i , R_i и Q_i за $i=1, 2, 3, 4$, и ранг алтернатива

a_i	S_i	R_i	Q_i за $v = 0.5$	Ранг
a_1 (DG)	0.36507	0.181818	0.328199	2
a_2 (MT)	0.081758	0.051116	0	1
a_3 (FC)	0.601667	0.6	0.883791	4
a_4 (MG)	0.759091	0.409091	0.826093	3

Према Q – листи за $v = 0.5$ најбоље решење је алтернатива a_2 , тј. микротурбина. За различите вредности коефицијента v дате у Таблици 4.17 добија се исти резултат за најбоље

компромисно решење, али је редослед алтернатива 2 – 1 – 4 – 3 за $v = \{0, 0.2, 0.4, 0.5\}$, а редослед 2 – 1 – 3 – 4 за $v = \{0.6, 0.8, 1\}$.

Таблица 4.17 Q – листе за различите вредности коефицијента v

	Q – листа						
a_i	$v = 0$	$v = 0.2$	$v = 0.4$	$v = 0.5$	$v = 0.6$	$v = 0.8$	$v = 1$
a_1 (DG)	0.238123	0.274154	0.310184	0.328199	0.346215	0.382245	0.418275
a_2 (MT)	0	0	0	0	0	0	0
a_3 (FC)	1	0.953516	0.907033	0.883791	0.860549	0.814066	0.767582
a_4 (MG)	0.652187	0.721749	0.791312	0.826093	0.860875	0.930437	1

У петом кораку рангирају се алтернативе према вредностима S , R и Q , почев од минималних вредности, и тако се добијају три ранг листе. Добијено компромисно решење може бити прихваћено од доносиоца одлуке ако обезбеђује максимум задовољења групне користи (помоћу $\min S$), као и минимум индивидуалног незадовољења за опонента (помоћу $\min R$). Показатељи S и R су интегрисани у Q за компромисно решење које је основа за споразум постигнут помоћу узајамних уступака.

Нека алтернатива се предлаже као компромисно решење према Q – листи ако су испуњена следећа два критеријума.

Први критеријум: прихватљива предност алтернативе је ако важи:

$$Q(a_d) - Q(a_p) \geq DQ, \quad (4.35)$$

за

$$DQ = \frac{1}{m-1}, \quad (4.36)$$

где је a_d алтернатива друга по рангу после a_p према Q – листи, а m број алтернатива. У

изабраном примеру $DQ = \frac{1}{3}$ и за $v \leq 0.5$ важи:

$$Q(a_d) - Q(a_p) = Q(a_1) - Q(a_2) < DQ, \quad (4.37)$$

а за $v \geq 0.6$ важи:

$$Q(a_d) - Q(a_p) = Q(a_1) - Q(a_2) > DQ. \quad (4.38)$$

Други критеријум: прихватљива стабилност у одлучивању за неку алтернативу постоји ако важи да је та алтернатива рангирана најбоље и према S – листи и/или према R – листи. Ово компромисно решење је стабилно у процесу одлучивања према стратегији максимума групне користи ако је $v > 0.5$, или “по консензусу” за $v = 0.5$, или “са ветом” за $v < 0.5$.

Ако неки од критеријума није испуњен, тада се предлаже скуп компромисних решења који се састоји од алтернатива a_p и a_d ако није задовољен само други критеријум, или од алтернатива a_p, a_d, \dots, a_l ако није задовољен први критеријум, при чему је a_l одређен помоћу релације:

$$Q(a_l) - Q(a_p) < DQ, \quad (4.39)$$

за максимално l (позиције ових алтернатива су “у близини”). У изабраном примеру такве алтернативе су a_1 и a_2 .

4.10 Методе одређивања тежинских коефицијената

У процесу одлучивања применом вишекритеријумске оптимизације важну улогу има одређивање тежина критеријума. За њихово одређивање постоји велики број метода које се могу груписати у субјективне, објективне и интегрисане или хибридне [22].

Субјективне методе користе само субјективне процене критеријума које дефинише доносилац одлуке. У ове методе спадају:

- Технике линеарног програмирања за вишедимензионалну анализу преференција (енг. Linear programming techniques for multidimensional analysis of preferences – LINMAP) [23],
- Delphi метод [24],
- Процес аналитичке хијерархије (енг. The analytic hierarchy process – АHP) [25],
- Једноставна мултиатрибутна техника оцењивања (енг. The simple multi-attribute rating technique – SMART) [26],
- Алокација тачака (енг. Point allocation) [27],
- Директан рејтинг (енг. Direct rating) [28],
- Метода најбољи–најгори (енг. Best–worst method – BWM) [29],
и други.

Објективне методе могу спречити грешке у процени критеријума. Оне користе математичке моделе и податке без узимања у обзир преференција доносиоца одлуке. У ове методе спадају:

- Важност критеријума кроз међукритеријумску корелацију (енг. The criteria importance through inter-criteria correlation (CRITIC) [30],
- Метода максимизирања девијације (енг. Maximizing deviation method) [31],
- Стандардна девијација (енг. Standard deviation) [32],
- Средња тежина (енг. Mean weighting),
- Ентропија (енг. Entropy) [33],
и други.

Хибридне или интегрисане методе комбинују преференције доносиоца одлуке са резултатом објективног метода за добијање тежина критеријума и користе предности оба типа метода, нпр. [34-38].

4.10.1 Анализа одређивања тежинских коефицијената применом методе ентропије

На изабраном примеру приказана је анализа примене једне од објективних метода. **Метода ентропије** примењује се када су познати подаци матрице одлучивања. Ентропија је мера несигурности у информацијама изражена у терминима теорије вероватноће. На основу математичке теорије коју је предложио С. Е. Shannon 1948. године [39], метода

ентропије процењује очекивани садржај информација на основу датих података. Шенонов ентропијски приступ интерпретира релативне интензитете важности критеријума у зависности од дискриминације међу подацима и тако омогућава процену релативних тежина [40]. Као објективна метода, ентропијска метода обезбеђује резултате у случају када резултати субјективних метода могу бити погрешни због неискуства, неадекватних одлука или предрасуда доносиоца одлука. Ово је једна од главних предности објективне методе. Међутим, зависност од вредности података може бити и недостатак методе. Ентропијска метода има неколико корака.

У изабраном примеру (Таблица 4.18) позната је матрица одлучивања, али нису задати тежински коефицијенти и треба их одредити ентропијском методом. Пожељно је да вредности свих критеријума (атрибута) буду минималне. Уместо вредности 0 за атрибут A_6 алтернативе a_2 претпостављена је вредност 0.000001 како би се могла применити метода.

Таблица 4.18 Матрица одлучивања

	A_1 (OMF)	A_2 (CO ₂)	A_3 (SO ₂)	A_4 (NO _x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
a_1 (DG)	0.15	697	0.22	0.5	1	0.2
a_2 (MT)	0.11	670	0.0036	0.186	0.4	0.000001
a_3 (FC)	0.242	441	0.0022	0.0136	0.01	0.01
a_4 (MG)	0.2	889	1.8	1.6	0.01	0.3

У првом кораку матрица одлучивања се нормализује по свим атрибутима. Ако се разматра бенефитни атрибут (чија већа вредност је пожељнија него мања вредност) који представља j – ти критеријум, онда је елемент нормализоване матрице:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.40)$$

а ако се разматра трошковни атрибут (чија мања вредност је пожељнија него већа вредност) и он представља j – ти критеријум, онда је елемент нормализоване матрице:

$$n_{ij} = \frac{\frac{1}{x_{ij}}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{x_{ij}}}, \quad \text{за } i=1, 2, \dots, m. \quad (4.41)$$

У изабраном примеру сви атрибути су трошковног типа, јер је пожељно да буду минимални, па треба применити образац (4.41). Добија се нормализована матрица дата Таблицом 4.19.

Таблица 4.19 Нормализована матрица одлучивања

	A₁ (OMF)	A₂ (CO₂)	A₃ (SO₂)	A₄ (NO_x)	A₅ (CO)	A₆ (PM)
a₁ (DG)	0,267847261	0,227023808	0,006163961	0,02453062	0,004914005	4,99946E-06
a₂ (MT)	0,365246265	0,236172528	0,376686528	0,065942527	0,012285012	0,999891678
a₃ (FC)	0,166021029	0,35881087	0,616396137	0,901861034	0,491400491	9,99892E-05
a₄ (MG)	0,200885445	0,177992794	0,000753373	0,007665819	0,491400491	3,33297E-06

У другом кораку коефицијенти ентропије се израчунавају користећи следећи израз:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m n_{ij} \ln n_{ij}, \quad \text{за } j=1, 2, \dots, n. \quad (4.42)$$

У трећем кораку тежине сваког од критеријума се добијају коришћењем следећег израза:

$$w_j = \frac{1-e_j}{n-\sum_{j=1}^n e_j}, \quad \text{за } j=1, 2, \dots, n. \quad (4.43)$$

Ниска вредност коефицијента ентропије значи да је степен неуређености у систему мали, а тежина велика [41].

Таблица 4.20 Коефицијенти ентропије e_j и тежине критеријума w_j за $x_{26} = 0.000001$

	A_1 (OMF)	A_2 (CO ₂)	A_3 (SO ₂)	A_4 (NO _x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
e_j	0.967511	0.975576	0.506973	0.289079	0.561528	0.000816796
w_j	0.01204	0.009051	0.182703	0.263449	0.162486	0.370271369
w_j (%)	1.204	0.9051	18.2703	26.3449	16.2486	37.0271369

Таблица 4.21 Коефицијенти ентропије e_j и тежине критеријума w_j за $x_{26} = 0.001$

	A_1 (OMF)	A_2 (CO ₂)	A_3 (SO ₂)	A_4 (NO _x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
e_j	0.967511	0.975576	0.506973	0.289079	0.561528	0.253673282
w_j	0.013284	0.009987	0.201593	0.290687	0.179286	0.30516379
w_j (%)	1.3284	0.9987	20.1593	29.0687	17.9286	30.516379

На основу анализе резултата може се закључити:

- Тежински коефицијенти добијени ентропијском методом нису поуздани у случају разнородних критеријума различите важности за доносиоца одлуке.
- Приликом примене методе ентропије ниједан податак x_{ij} у матрици одлучивања не сме бити вредности нула, јер у том случају ентропија e_j (4.42) није дефинисана. Уколико се тај податак у разматраном сценарију замени неком малом вредношћу, тежински коефицијенти значајно зависе од тога која је вредност изабрана. Нпр. ако се уместо вредности $x_{26} = 0$ произвољно изаберу вредности $x_{26} = 0.000001$ (Таблица 4.20) или $x_{26} = 0.001$ (Таблица 4.21), тежине се разликују за 10% до 20%, што може значајно утицати на резултате избора генератора. Међутим, за неке критеријуме могуће је да је податак тачне вредности нула, па метод ентропије није применљив.
- Објективне методе нису погодне уколико исте критеријуме треба разматрати са различитих становишта, као што је разматрано у Глави 5 и Глави 6 ове дисертације.

4.10.2 Анализа одређивања тежинских коефицијената применом методе BWM

BWM (енг. Best-Worst Method) спада у групу субјективних метода за одређивање тежинских коефицијената критеријума. Методу је предложио Jafar Rezaei 2015. године [29]. BWM се заснива на систематском упоређивању критеријума за одлучивање, при чему доносилац одлуке одређује најбољи критеријум (најпожељнији/најважнији), најгори критеријум (најнепожељнији/најмање важан) и међусобне односе критеријума. Постоје нелинеарна и линеарна BWM метода [42] чија је конзистентност доказана у [43].

У **првом кораку** се формира матрица одлучивања димензија $m \times n$, чији редови одговарају алтернативама $a_i, i=1, 2, \dots, m$, а колоне атрибутима $A_j, j=1, 2, \dots, n$. Алтернативе су: a_1 (дизел генератор), a_2 (микротурбина), a_3 (горивна хелија) и a_4 (главна мрежа). Дефинишу се називи критеријума (атрибута) и њихове вредности. Критеријуми чије вредности треба минимизирати у изабраном примеру су: A_1 (операциони трошкови са трошковима одржавања), A_2 (емисије CO_2), A_3 (емисије SO_2), A_4 (емисије NO_x), A_5 (емисије CO) и A_6 (емисије PM честица).

У **другом кораку** се изабере најважнији критеријум, у овом случају A_1 – операциони трошкови са трошковима одржавања (OMF) и најмање важан критеријум A_5 – емисија CO .

У **трећем кораку** доносилац одлуке одређује преференције за све остале критеријуме у односу на најважнији критеријум, коришћењем оцена од 1 до 9.

У **четвртном кораку** одређују се преференције осталих критеријума у односу на најгори тј. најмање важан критеријум, коришћењем оцена од 1 до 9.

Значење оцена од 1 до 9:

Оцена 1: Једнако важно

Оцена 2: Нешто између једнако важног и умерено важнијег

Оцена 3: Умерено важније

Оцена 4: Нешто између умерено и знатно важнијег

Оцена 5: Знатно важније

Оцена 6: Нешто између знатно важнијег и значајно важнијег

Оцена 7: Значајно важније

Оцена 8: Нешто између значајно важнијег и апсолутно важнијег

Оцена 9: Апсолутно важније.

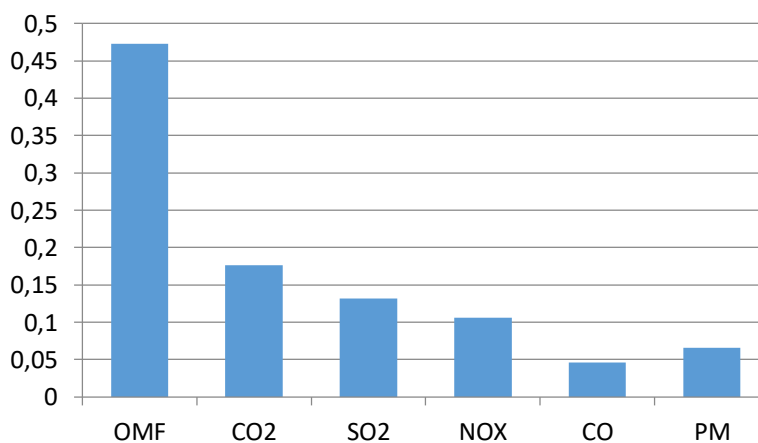
У петом кораку примењује се BWM Linear Solver v2.0 у оквиру програма у Excel-у [44] и добијају резултати за тежине критеријума приказани на Сл. 4.26 и Сл. 4.27, при чему је конзистентност решења остварена.

Најбољи према осталима	OMF	CO2	SO2	NOX	CO	PM
OMF	1	3	4	5	9	8

Остали према најгорем	CO
OMF	9
CO2	5
SO2	4
NOX	3
CO	1
PM	2

Тежински коефицијенти	OMF	CO2	SO2	NOX	CO	PM
	0,47320807	0,1762932	0,1322199	0,10577592	0,04639295	0,06610995

Сл. 4.26 Оцене критеријума и тежине критеријума



Сл. 4.27 Дијаграм тежина критеријума

4.10.3 Анализа одређивања тежинских коефицијената применом методе АНР

АНР (енг. The Analytic Hierarchy Process) омогућава одређивање тежинских коефицијената критеријума на основу субјективних оцена и поређења атрибута различитих алтернатива. Методу је развио Thomas L. Saaty 1977. године. Користи се у многим

областима. Уколико постоји веома велики број алтернатива, АНР може бити компликован за примену, јер захтева од доносиоца одлуке велики број међусобних поређења алтернатива.

Предности АНР [45] у односу на остале методе су:

1. Омогућава поређења у пару која побољшавају тачност одлучивања у поређењу са истовременим вредновањем свих алтернатива, а омогућава и проверу конзистентности решења.

2. Не очекује се да доносилац одлуке даје бројчану процену. Уместо тога, довољне су описне оцене.

3. Омогућава хијерархијску структуру критеријума која обезбеђује да се доносилац одлука боље фокусира на специфичне критеријуме и поткритеријуме приликом додељивања тежина.

4. Користи скалу односа, што значи да не захтева јединице мере приликом поређења.

5. Омогућава процену и квалитативних и квантитативних критеријума и алтернатива применом исте скале преференција.

Недостаци АНР су:

1. Могућност неконзистентности матрице због међусобног поређења парова алтернатива, што може довести до погрешних резултата.

2. У случају да је број критеријума или алтернатива велики, захтевна поређења у пару могу повећати сложеност проблема и смањити конзистентност међусобних поређења.

3. Број индиректних поређења расте са бројем алтернатива тако да прорачун захтева више времена за обраду података.

Према АНР методи успоставља се хијерархија у којој највиши ниво представља коначни циљ. Средњи ниво се састоји од атрибута одлуке (критеријума), односно средњи нивои се састоје од поткритеријума, ако их има. Доњи ниво се састоји од алтернатива одлучивања.

У првом кораку врше се поређења критеријума за алтернативе по паровима, на основу скале са оценама од 1 до 9 дате у Таблици 4.22, и одређује се релативни значај атрибута на сваком нивоу.

Таблица 4.22 Скала преференција, опис и објашњење [46]

Нумеричка вредност	Опис	Објашњење
1	Једнаке важности	Оба елемента доприносе једнако
3	Умерене важности	Искуствено и процењено један елемент је важнији од другог
5	Значајније важности	Један елемент је много важнији од другог
7	Знатно веће важности	Један елемент је знатно доминантнији од другог
9	Изузетне важности	Један елемент је важнији од другог бар за један ред величине
2, 4, 6, 8	Средње вредности важности	Користи се за процену између две суседне вредности важности

За одређивање тежине атрибута применом АНР методе треба формирати матрицу поређења по паровима (енг. Pair wise comparison matrix). Матрица A је димензија $n \times n$ ако има n критеријума. Сваки елемент матрице a_{ij} означава релативну преференцију i – тог критеријума у односу на j – ти критеријум. За изабрани пример има 6 критеријума чије тежине треба одредити применом АНР методе. Критеријуми су: A_1 (операциони трошкови са трошковима одржавања), A_2 (емисије CO_2), A_3 (емисије SO_2), A_4 (емисије NO_x), A_5 (емисије CO) и A_6 (емисије PM честица). Матрица поређења ових критеријума је димензија 6×6 и дата је у Таблици 4.23.

Таблица 4.23 Матрица поређења критеријума A

	A_1 (OMF)	A_2 (CO_2)	A_3 (SO_2)	A_4 (NO_x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
A_1 (OMF)	1	3	4	5	9	8
A_2 (CO_2)	0.333	1	2	3	7	6
A_3 (SO_2)	0.250	0.500	1	2	5	3
A_4 (NO_x)	0.200	0.333	0.500	1	4	3
A_5 (CO)	0.111	0.143	0.200	0.250	1	0.500
A_6 (PM)	0.125	0.167	0.333	0.333	2	1

У другом кораку формира се нормализована матрица поређења критеријума A^N . Сваки елемент a_{ij} матрице поређења критеријума A подели се сумом елемената матрице A одговарајуће j -те колоне како би се добио елемент a_{ij}^N нормализоване матрице A^N (Таблица 4.24).

Таблица 4.24 Нормализована матрица поређења критеријума A^N

	A_1 (OMF)	A_2 (CO ₂)	A_3 (SO ₂)	A_4 (NO _x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
A_1 (OMF)	0.495	0.583	0.498	0.432	0.321	0.372
A_2 (CO ₂)	0.165	0.194	0.249	0.259	0.250	0.279
A_3 (SO ₂)	0.124	0.097	0.124	0.173	0.179	0.140
A_4 (NO _x)	0.099	0.065	0.062	0.086	0.143	0.140
A_5 (CO)	0.055	0.028	0.025	0.022	0.036	0.023
A_6 (PM)	0.062	0.032	0.041	0.029	0.071	0.047

У трећем кораку одређују се тежине критеријума CW_i , за $i = 1, \dots, 6$, као средње вредности елемената i – тог реда матрице A^N .

У четвртном кораку проверава се конзистентност решења. Сваки елемент a_{ij} матрице A подели се тежином критеријума CW_j и тако се добијају елементи a_{ij}^C матрице конзистентности A^C , који су дати у Таблици 4.25.

Таблица 4.25 Матрица конзистентности A^C

	A_1 (OMF)	A_2 (CO ₂)	A_3 (SO ₂)	A_4 (NO _x)	A_5 (CO)	A_6 (PM)
A_1 (OMF)	0.450	0.698	0.558	0.496	0.282	0.377
A_2 (CO ₂)	0.150	0.233	0.279	0.297	0.220	0.283
A_3 (SO ₂)	0.113	0.116	0.139	0.198	0.157	0.141
A_4 (NO _x)	0.090	0.078	0.070	0.099	0.125	0.141
A_5 (CO)	0.050	0.033	0.028	0.025	0.031	0.024
A_6 (PM)	0.056	0.039	0.046	0.033	0.063	0.047

Пондерисане збирне вредности WSV_i добијају се као суме елемената i – тог реда матрице A^C , за $i = 1, \dots, 6$, (Таблица 4.26). Односи конзистентности CR_i добијају се из израза:

$$CR_i = WSV_i / CW_i, \quad (4.44)$$

Таблица 4.26 Пондерисане збирне вредности WSV_i , тежине критеријума CW_i и односи конзистентности критеријума CR_i , за $i = 1, \dots, 6$

	WSV_i	CW_i	CR_i
A_1 (OMF)	2.861	0.450	6.357
A_2 (CO ₂)	1.461	0.233	6.271
A_3 (SO ₂)	0.865	0.139	6.221
A_4 (NO _x)	0.603	0.099	6.093
A_5 (CO)	0.191	0.031	6.157
A_6 (PM)	0.284	0.047	6.051

Средња вредност односа конзистентности критеријума:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^6 CR_i \quad (4.45)$$

одређује индекс конзистенције CI (енг. Consistency Index):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (4.46)$$

где је n број критеријума. У изабраном примеру $n = 6$, $\lambda_{\max} = 6.192$, па је $CI = 0.038$.

Ако су поређења у паровима потпуно конзистентна, матрица A има ранг један и $\lambda_{\max} = n$. У том случају тежине се могу одредити нормализацијом било које од колона или редова матрице A . Тачност резултата зависи углавном од конзистентности процене поређења по паровима.

Релативни индекс конзистенције CR (енг. Consistency Ratio) се одређује дељењем индекса конзистенције CI индексом случајности RI (енг. Random Index) према релацији:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (4.47)$$

где се RI узима из Таблице 4.27 коју су одредили аутори метода АНР, на основу броја критеријума n .

Таблица 4.27 Број критеријума n и индекс случајности RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Према АНР методи 0.1 је горња граница прихватљивог индекса CR. У изабраном примеру је $n = 6$, па је $RI = 1.24$. Како је $CI = 0.038$, добија се релативни индекс конзистенције $CR = 0.031$ мањи од 0.1, па се може сматрати да је решење прихватљиво. У случају да CR превазилази ту границу, процедура би се морала поновити како би се добило конзистентно решење.

Тежински коефицијенти критеријума који се добијају применом методе АНР у изабраном примеру су: 45% за OMF трошкове, 23.3% за емисије CO₂, 13.9% за емисије SO₂, 9.9% за емисије NO_x, 3.1% за емисије CO и 4.7% за емисије PM.

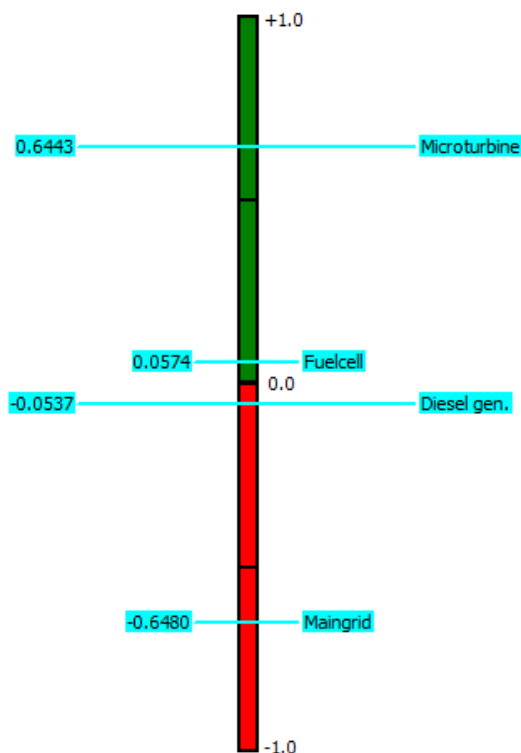
Ове тежине критеријума могу се искористити за рангирање генератора у микромрежи приликом примене било које од претходно наведених метода.

4.11 Рангирање генератора комбиновањем АНР и метода PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР

Тежине критеријума могу се добити субјективним или објективним методама, али се могу проценити и на основу искуства доносиоца одлука. Тако добијени тежински коефицијенти могу се искористити за рангирање генератора у микромрежи при примени било које од метода (ELECTRE, WSM, WPM, ORESTE, PROMETHEE, TOPSIS, ВИКОР, ...).

4.11.1 Рангирање генератора применом метода АНР и PROMETHEE II

За тежинске коефицијенте добијене АНР методом у Поглављу 4.10.3 може се применити PROMETHEE II метода за рангирање алтернатива генератора у микромрежи изабраних у примерима у Поглављима 4.4 – 4.9. Ако се примени PROMETHEE II метода, добија се исти резултат рангирања као у Сценарију 2 у Поглављу 4.4, за који су изабрани тежински коефицијенти: 40% за OMF трошкове, 15% за емисије CO₂, 15% за SO₂, 15% за NO_x, 7.5% за CO и 7.5% за емисије PM. Резултат рангирања алтернатива је приказан на Сл. 4.28. Микротурбина је најбољи избор, као што је приказано и у Таблици 4.28, а затим следе горивна хелија, дизел генератор и главна мрежа.



Сл. 4.28 Комплетно рангирање генератора применом метода АНР и PROMETHEE II

Резултат рангирања разликује се од резултата за Сценарио 1 у Поглављу 4.4, за који су тежински коефицијенти: 60% за ОМФ трошкове, 10% за емисије CO₂, 10% за SO₂, 10% за NO_x, 5% за CO и 5% за емисије PM, иако је микротурбина и у овом случају најбољи избор. За Сценарио 1 је дизел генератор био бољи од горивне ћелије, а главна мрежа је била такође најнеповољнији избор.

Таблица 4.28 Рангирање генератора применом АНР и методе PROMETHEE II

Ранг	Алтернатива	Phi	Phi ⁺	Phi ⁻
1	Микротурбина (MT)	0.6443	0.8222	0.1778
2	Горивна ћелија (FC)	0.0574	0.5235	0.4661
3	Дизел генератор (DG)	-0.0537	0.4731	0.5269
4	Главна мрежа (MG)	-0.6480	0.1708	0.8188

4.11.2 Рангирање генератора применом метода АНР и TOPSIS

За тежинске коефицијенте добијене АНР методом у Поглављу 4.10.3 може се применити и TOPSIS метода као што је приказано у Поглављу 4.8. Тежинска нормализована матрица одлучивања V , добијена множењем нормализоване матрице N (4.27) и дијагоналне матрице W тежинских коефицијената добијених АНР методом, димензија 6 x 6, на чијој су дијагонали тежине: $w_1 = 0.450$, $w_2 = 0.233$, $w_3 = 0.139$, $w_4 = 0.099$, $w_5 = 0.031$ и $w_6 = 0.047$, је:

$$V = N \cdot W = \begin{bmatrix} n_{11}w_1 & n_{12}w_2 & n_{13}w_3 & n_{14}w_4 & n_{15}w_5 & n_{16}w_6 \\ n_{21}w_1 & n_{22}w_2 & n_{23}w_3 & n_{24}w_4 & n_{25}w_5 & n_{26}w_6 \\ n_{31}w_1 & n_{32}w_2 & n_{33}w_3 & n_{34}w_4 & n_{35}w_5 & n_{36}w_6 \\ n_{41}w_1 & n_{42}w_2 & n_{43}w_3 & n_{44}w_4 & n_{45}w_5 & n_{46}w_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} & v_{16} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} & v_{25} & v_{26} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} & v_{35} & v_{36} \\ v_{41} & v_{42} & v_{43} & v_{44} & v_{45} & v_{46} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.184974 & 0.117218 & 0.016863 & 0.029348 & 0.02878 & 0.026061 \\ 0.135647 & 0.112677 & 0.000276 & 0.010918 & 0.011512 & 0 \\ 0.298424 & 0.074165 & 0.000169 & 0.000798 & 0.000288 & 0.001303 \\ 0.246632 & 0.149507 & 0.137973 & 0.093914 & 0.000288 & 0.039091 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Идеално најбоље вредности су: $A_1^+ = 0.135647$, $A_2^+ = 0.074165$, $A_3^+ = 0.000169$, $A_4^+ = 0.000798$, $A_5^+ = 0.000288$ и $A_6^+ = 0$, а идеално најгоре вредности: $A_1^- = 0.298424$, $A_2^- = 0.149507$, $A_3^- = 0.137973$, $A_4^- = 0.093914$, $A_5^- = 0.02878$ и $A_6^- = 0.039091$.

Растојања S_i^+ од идеално најбољег решења и растојања S_i^- од идеално најгорег решења су дата у Таблици 4.29.

Таблица 4.29 Растојања од идеално најбољег и од идеално најгорег решења

i	Алтернатива a_i	S_i^+	S_i^-
1	Дизел генератор (DG)	0.082894	0.181438
2	Микротурбина (MT)	0.041371	0.235644
3	Горивна ћелија (FC)	0.162782	0.188618
4	Главна мрежа (MG)	0.217216	0.059113

Коефицијенти приближности за сваку алтернативу дата су у Таблици 4.30.

Таблица 4.30 Коефицијенти приближности алтернатива CC_i

i	Алтернатива a_i	CC_i
1	Дизел генератор (DG)	0.686402
2	Микротурбина (MT)	0.850654
3	Горивна ћелија (FC)	0.536761
4	Главна мрежа (MG)	0.213922

Алтернативе су рангиране на основу коефицијената приближности, а резултат је приказан у Таблици 4.31.

Таблица 4.31 Ранг алтернатива

i	Алтернатива a_i	Ранг
1	Дизел генератор (DG)	2
2	Микротурбина (MT)	1
3	Горивна ћелија (FC)	3
4	Главна мрежа (MG)	4

Применом АНР и TOPSIS методе добија се исти резултат рангирања као за избрани пример у Поглављу 4.8, за који су тежински коефицијенти: 60% за ОМФ трошкове, 10% за емисије CO_2 , 10% за SO_2 , 10% за NO_x , 5% за CO и 5% за емисије PM .

4.11.3 Рангирање генератора применом метода АНР и ВИКОР

За тежинске коефицијенте добијене АНР методом у Поглављу 4.10.3 може се применити и ВИКОР метода као што је приказано у Поглављу 4.9. У изабраном примеру добијају се $S^+ = 0.14218$, $S^- = 0.824818$, $R^+ = 0.1191$ и $R^- = 0.45$. За $v = 0.5$ вредности Q_i дате су у Таблици 4.32.

Таблица 4.32 Вредности S_i , R_i и Q_i за $i=1, 2, 3, 4$, и ранг алтернатива

a_i	S_i	R_i	Q_i за $v = 0.5$	Ранг
a_1 (DG)	0.379033	0.136364	0.199569	2
a_2 (MT)	0.14218	0.1191	0	1
a_3 (FC)	0.451567	0.45	0.726611	3
a_4 (MG)	0.824818	0.306818	0.783648	4

Према Q – листи за $v = 0.5$ најбоље решење је алтернатива a_2 , тј. микротурбина. За различите вредности коефицијента v дате у Табlici 4.33 добија се исти резултат за најбоље компромисно решење, али је редослед алтернатива $2 - 1 - 3 - 4$ за $v = \{0.5, 0.6, 0.8, 1\}$, а редослед $2 - 1 - 4 - 3$ за $v = \{0, 0.2, 0.4\}$.

Таблица 4.33 Q – листе за различите вредности коефицијента v

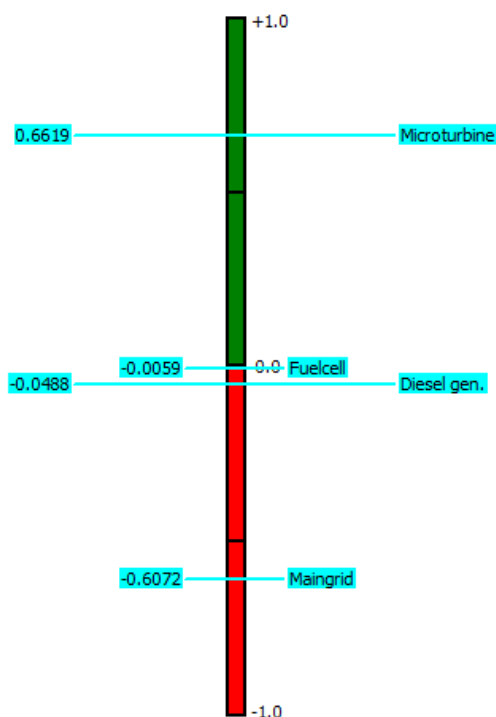
a_i	Q – листа						
	$v = 0$	$v = 0.2$	$v = 0.4$	$v = 0.5$	$v = 0.6$	$v = 0.8$	$v = 1$
a_1 (DG)	0.05217	0.11113	0.17009	0.199569	0.229049	0.288009	0.346968
a_2 (MT)	0	0	0	0	0	0	0
a_3 (FC)	1	0.890644	0.781289	0.726611	0.671933	0.562578	0.453222
a_4 (MG)	0.567295	0.653836	0.740377	0.783648	0.826918	0.913459	1

4.12 Рангирање генератора комбиновањем BWM и метода PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР

У овом поглављу су коришћене тежине критеријума добијене методом BWM у Поглављу 4.10.2 у комбинацији са методама PROMETHEE, TOPSIS и ВИКОР, за рангирање алтернатива генератора у микромрежи изабраних у примерима у Поглављима 4.4 – 4.9. Тежински коефицијенти критеријума који се добијају применом методе BWM су: 47.32% за OMF трошкове, 17.63% за емисије CO₂, 13.22% за емисије SO₂, 10.58% за емисије NO_x, 4.64% за емисије CO и 6.61% за емисије PM.

4.12.1 Рангирање генератора применом метода BWM и PROMETHEE

Резултат рангирања четири алтернативе генератора применом PROMETHEE II методе је приказан на Сл. 4.29. Микротурбина је најбољи избор, као што је приказано и у Таблици 4.34, а затим следе горивна ћелија, дизел генератор и главна мрежа.



Сл. 4.29 Комплетно рангирање генератора применом метода BWM и PROMETHEE II

Таблица 4.34 Рангирање генератора применом BWM и методе PROMETHEE II

Ранг	Алтернатива	Phi	Phi +	Phi -
1	Микротурбина (MT)	0.6619	0.8310	0.1690
2	Горивна ћелија (FC)	-0.0059	0.4893	0.4952
3	Дизел генератор (DG)	-0.0488	0.4756	0.5244
4	Главна мрежа (MG)	-0.6072	0.1887	0.7959

4.12.2 Рангирање генератора применом метода BWM и TOPSIS

За тежинске коефицијенте добијене методом BWM у Поглављу 4.10.2 може се применити и TOPSIS метода као што је приказано у Поглављу 4.8. Тежинска нормализована матрица одлучивања V , добијена множењем нормализоване матрице N (4.27) и дијагоналне матрице W тежинских коефицијената добијених методом BWM, димензија 6×6 , на чијој су дијагонали тежине: $w_1 = 0.4732$, $w_2 = 0.1763$, $w_3 = 0.1322$, $w_4 = 0.1058$, $w_5 = 0.0464$ и $w_6 = 0.0661$, је:

$$\begin{aligned}
 V = N \cdot W &= \begin{bmatrix} n_{11}w_1 & n_{12}w_2 & n_{13}w_3 & n_{14}w_4 & n_{15}w_5 & n_{16}w_6 \\ n_{21}w_1 & n_{22}w_2 & n_{23}w_3 & n_{24}w_4 & n_{25}w_5 & n_{26}w_6 \\ n_{31}w_1 & n_{32}w_2 & n_{33}w_3 & n_{34}w_4 & n_{35}w_5 & n_{36}w_6 \\ n_{41}w_1 & n_{42}w_2 & n_{43}w_3 & n_{44}w_4 & n_{45}w_5 & n_{46}w_6 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} & v_{15} & v_{16} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} & v_{25} & v_{26} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} & v_{35} & v_{36} \\ v_{41} & v_{42} & v_{43} & v_{44} & v_{45} & v_{46} \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 0.19451 & 0.088693 & 0.016038 & 0.031364 & 0.043078 & 0.036652 \\ 0.142641 & 0.085257 & 0.000262 & 0.011667 & 0.017231 & 0 \\ 0.31381 & 0.056117 & 0.00016 & 0.000853 & 0.000431 & 0.001833 \\ 0.259347 & 0.113125 & 0.131223 & 0.100365 & 0.000431 & 0.054977 \end{bmatrix}. \quad (4.49)
 \end{aligned}$$

Идеално најбоље вредности су: $A_1^+ = 0.142641$, $A_2^+ = 0.056117$, $A_3^+ = 0.00016$, $A_4^+ = 0.000853$, $A_5^+ = 0.000431$ и $A_6^+ = 0$, а идеално најгоре вредности: $A_1^- = 0.31381$, $A_2^- = 0.113125$, $A_3^- = 0.131223$, $A_4^- = 0.100365$, $A_5^- = 0.043078$ и $A_6^- = 0.054977$.

Растојања S_i^+ од идеално најбољег решења и растојања S_i^- од идеално најгорег решења су дата у Таблици 4.35.

Коефицијенти приближности за сваку алтернативу дати су у Таблици 4.36.

Таблица 4.35 Растојања од идеално најбољег и од идеално најгорег решења

i	Алтернатива a_i	S_i^+	S_i^-
1	Дизел генератор (DG)	0.089982	0.182192
2	Микротурбина (MT)	0.035332	0.242454
3	Горивна ћелија (FC)	0.171179	0.187011
4	Главна мрежа (MG)	0.216732	0.069173

Таблица 4.36 Коефицијенти приближности алтернатива CC_i

i	Алтернатива a_i	CC_i
1	Дизел генератор (DG)	0.669395
2	Микротурбина (MT)	0.872808
3	Горивна ћелија (FC)	0.5221
4	Главна мрежа (MG)	0.241945

Алтернативе су рангиране на основу коефицијената приближности, а резултат је приказан у Таблици 4.37.

Таблица 4.37 Ранг алтернатива

i	Алтернатива a_i	Ранг
1	Дизел генератор (DG)	2
2	Микротурбина (MT)	1
3	Горивна ћелија (FC)	3
4	Главна мрежа (MG)	4

Применом BWM и TOPSIS методе добија се исти резултат рангирања као за изабрани пример у Поглављу 4.8, за који су тежински коефицијенти: 60% за OMF трошкове, 10% за емисије CO₂, 10% за SO₂, 10% за NO_x, 5% за CO и 5% за емисије PM. Исти резултат добијен је и применом АНР и TOPSIS методе у Поглављу 4.11.2.

4.12.3 Рангирање генератора применом метода BWM и ВИКОР

За тежинске коефицијенте добијене методом BWM у Поглављу 4.10.2 може се применити и ВИКОР метода као што је приказано у Поглављу 4.9. У изабраном примеру добијају се: $S^+ = 0.119997$, $S^- = 0.803036$, $R^+ = 0.090118$ и $R^- = 0.4732$. За $v = 0.5$ вредности Q_i дате су у Таблици 4.38.

Таблица 4.38 Вредности S_i , R_i и Q_i за $i = 1, 2, 3, 4$, и ранг алтернатива

a_i	S_i	R_i	Q_i за $v = 0.5$	Ранг
a_1 (DG)	0.383058	0.143394	0.262103	2
a_2 (MT)	0.119997	0.090118	0	1
a_3 (FC)	0.475403	0.4732	0.760165	3
a_4 (MG)	0.803036	0.322636	0.803484	4

Таблица 4.39 Q – листе за различите вредности коефицијента v

a_i	Q – листа						
	$v = 0$	$v = 0.2$	$v = 0.4$	$v = 0.5$	$v = 0.6$	$v = 0.8$	$v = 1$
a_1 (DG)	0.139073	0.188285	0.237497	0.262103	0.286709	0.335921	0.385133
a_2 (MT)	0	0	0	0	0	0	0
a_3 (FC)	1	0.904066	0.808132	0.760165	0.712198	0.616265	0.520331
a_4 (MG)	0.606968	0.685574	0.764181	0.803484	0.842787	0.921394	1

Према Q – листи за $v = 0.5$ најбоље решење је алтернатива a_2 , тј. микротурбина. За различите вредности коефицијента v дате у Таблици 4.39 добија се исти резултат за најбоље компромисно решење, али је за $v = \{0.5, 0.6, 0.8, 1\}$ редослед алтернатива $2 - 1 - 3 - 4$, а за $v = \{0, 0.2, 0.4\}$ редослед је $2 - 1 - 4 - 3$.

Литература за Главу 4

- [1] J. P. Brans, “L’ingénierie de la décision; Elaboration d’instruments d’aide à la décision. La méthode PROMETHEE,” In: Nadeau R., Landry M., (Eds.), *L’aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d’Avenir*, Québec, Canada. Presses de l’Université Laval, pp. 183–213, 1982.
- [2] J. P. Brans, B. Mareschal, Ph. Vincke, “PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis,” In: Brans, J. P., (Ed.), *Operational Research*, North-Holland, Amsterdam, pp. 477–490, 1984.
- [3] “Visual PROMETHEE,” B. Mareschal. [Online]. Доступно на: <http://en.promethee-gaia.net> [Приступљено: 12.08.2022.]
- [4] J. P. Brans, B. Mareschal, “PROMETHEE methods,” In: Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer Science + Business Media Inc., pp. 163–196, 2005.
- [5] B. Marti, *Emissions of Power Delivery Systems*, Semester Thesis PSL0502 EEH – Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2005.
- [6] V. V. S. N. Murty, A. Kumar, “Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems,” *Protection and Control of Modern Power Systems* 5, Article number: 2, 2020, <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0147-z>
- [7] EPRI report: Installation, Operation, and Maintenance Costs for Distributed Generation Technologies, *EPRI, Palo Alto, CA: 2003. 1007675*, 2003.
- [8] H. Wu, X. Liu, M. Ding, “Dynamic economic dispatch of a microgrid: mathematical models and solution algorithm,” *Int. J. Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 336–346, 2014.
- [9] “SEE Power EXchange,” Adex. [Online]. Доступно на: <https://seepex-spot.rs/day-ahead-auction> [Приступљено: 26.08.2022.]
- [10] N. D. Strachan, A. E. Farrell, “Emissions from distributed generation,” *CEIC working paper 02-04*, pp. 1-14, 2002.
- [11] B. Roy, “Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE),” *La Revue d’Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)* (8): pp. 57–75, 1968.

- [12] J. Figueira, V. Mousseau, B. Roy, “Electre Methods. In: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys,” *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, NY, vol. 78, pp. 133–153, 2005, https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_4
- [13] B. O. Saracoglu, “An Experimental Research Study on the Solution of a Private Small Hydropower Plant Investments Selection Problem by ELECTRE III/IV, Shannon's Entropy, and Saaty's Subjective Criteria Weighting,” *Advances in Decision Sciences*, pp. 1–20, 2015, <https://doi.org/10.1155/2015/548460>
- [14] C. L. Hwang, K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, New York: Springer-Verlag, 1981.
- [15] C. L. Hwang, Y. J. Lai, T. Y. Liu, “A new approach for multiple objective decision making,” *Computers and Operational Research*, vol. 20 (8), pp. 889–899, 1993, doi:10.1016/0305-0548(93)90109-v
- [16] I. B. Huang, J. Keisler, I. Linkov, “Multi-criteria decision analysis in environmental science: ten years of applications and trends,” *Science of the Total Environment*, vol. 409 (19), pp. 3578–3594, 2011, PMID 21764422, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.06.022
- [17] L. Duckstein and S. Opricović, “Multiobjective Optimization in River Basin Development,” *Water Resources Research*, vol. 16, no. 1, pp. 14–20, 1980.
- [18] S. Opricović, G.-H. Tzeng, “The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS,” *European Journal of Operational Research*, vol. 156, no. 2, pp. 445–455, 2004.
- [19] S. Opricović, G.-H. Tzeng, “Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods,” *European Journal of Operational Research*, vol. 178, no. 2, pp. 514–529, 2007.
- [20] S. Opricović, “Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 12983–12990, 2011.
- [21] J. R. San Cristóbal, “Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method,” *Renewable Energy*, vol. 36, Issue 2, pp. 498–502, 2011, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>
- [22] M. A. Şahin, “Comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy,” *Int. J. of Environmental Science and Technology*, vol. 18, pp. 1591–1616, 2021, <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02922-7>

- [23] V. Srinivasan, A. D. Shocker, "Linear programming techniques for multidimensional analysis of preferences," *Psychometrika*, vol. 38, pp. 337–369, 1973.
- [24] C.-L. Hwang, K. Yoon, "Methods for multiple attribute decision making," In: C.-L. Hwang, K. Yoon (Eds) *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, Springer, Berlin, pp. 58–191, 1981.
- [25] T. L. Saaty, "Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process," *Management Science*, vol. 32, pp. 841–855, 1986.
- [26] W. Edwards, F. H. Barron, "SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement," *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 60, pp. 306–325, 1994.
- [27] J. R. Doyle, R. H. Green, P. A. Bottomley, "Judging relative importance: direct rating and point allocation are not equivalent," *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 70, pp. 65–72, 1997.
- [28] P. A. Bottomley, J. R. Doyle, "A comparison of three weight elicitation methods: good, better, and best," *Omega*, vol. 29, pp. 553–560, 2001.
- [29] J. Rezaei, "Best-worst multi-criteria decision-making method," *Omega*, vol. 53, pp. 49–57, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- [30] D. Diakoulaki, G. Mavrotas, L. Papayannakis, "Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method," *Computers and Operations Research*, vol. 22, pp. 763–770, 1995.
- [31] W. Yingming, "Using the method of maximizing deviation to make decision for multiindices," *J. System Engineering and Electronics*, vol. 8, pp. 21–26, 1997.
- [32] H. Deng, C.-H. Yeh, R. J. Willis, "Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights," *Computers and Operations Research*, vol. 27, pp. 963–973, 2000.
- [33] X. Xu, "A note on the subjective and objective integrated approach to determine attribute weights," *European Journal of Operational Research*, vol. 156, pp. 530–532, 2004, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00146-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00146-2)
- [34] J. Ma, Z.-P. Fan, L.-H. Huang, "A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights," *European Journal of Operational Research*, vol. 112, pp. 397–404, 1999.

- [35] Z.-P. Fan, J. Ma, Q. Zhang, “An approach to multiple attribute decision making based on fuzzy preference information on alternatives,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 131, pp. 101–106, 2002.
- [36] Y.-M. Wang, C. Parkan, “A general multiple attribute decisionmaking approach for integrating subjective preferences and objective information,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 157, pp. 1333–1345, 2006.
- [37] R. V. Rao, B. K. Patel, M. Parnichkun, “Industrial robot selection using a novel decision making method considering objective and subjective preferences,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, pp. 367–375, 2011.
- [38] Z. Pei, “Rational decision making models with incomplete weight information for production line assessment,” *Information Sciences*, vol. 222, pp. 696–716, 2013.
- [39] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 1948, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6773024>
- [40] S. Monghasemi, M. R. Nikoo, M. A. Khaksar Fasaee, J. Adamowski, “A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects,” *Expert Systems with Applications*, vol. 42, pp. 3089–3104, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.032>
- [41] O. Mohsen, N. Fereshteh, “An extended VIKOR method based on entropy measure for the failure modes risk assessment: a case study of the geothermal power plant (GPP),” *Safety Science*, vol. 92, pp. 160–172, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.10.006>
- [42] J. Rezaei, “Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model,” *Omega*, vol. 64, pp. 126-130, 2016.
- [43] F. Liang, M. Brunelli, J. Rezaei, “Consistency issues in the Best Worst Method: Measurements and thresholds,” *Omega*, vol. 96, pp. 102-175, 2020.
- [44] “Best Worst Method,” J. Rezaei. [Online]. Доступно на: <https://bestworstmethod.com>
[Приступљено: 07.07.2023.]
- [45] A. Ishizaka, A. Labib, “Review of the main developments in the analytic hierarchy process,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 14336–14345, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
- [46] R. W. Saaty, “The analytic hierarchy process—what it is and how it is used,” *Mathematical Modelling*, vol. 9, pp. 161–176, 1987, [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
-

5

Оптимизација потрошње у микромрежи

5.1 Варијабилна цена електричне енергије као критеријум оптимизације

5.2 Методе управљања потрошњом

5.3 Дефинисање циљних функција за проблем оптимизације потрошње

5.4 Ограничења типа једнакости и типа неједнакости за проблем оптимизације

5.5 Пример оптимизације трошкова коришћењем DSM техника

5.6 Нова процедура двостепене оптимизације уз примену техника управљања потрошњом

5.1 Варијабилна цена електричне енергије као критеријум оптимизације

Цена је вредност производа на тржишту добијена деловањем закона понуде и потражње, док је тарифа [1] “административно (регулаторно) утврђена вредност неког елемента производа или услуга због сложене природе и различитости трошкова које поједини елемент изазива или због несавршености тржишта (монопола).” Пошто су електроенергетска предузећа најчешће монополска предузећа, регулаторне агенције одобравају цене електричне енергије према потрошачима. Кораци у одређивању цене електричне енергије у Србији су следећи: агенција за енергетику утврђује методологију за одређивање цене, затим енергетска предузећа обрачунавају и предлажу цене, после чега агенција за енергетику даје сагласност на предложене цене. Потрошач електричну енергију плаћа сразмерно трошковима које изазива у систему, према снази и месту прикључења на систем, као и према количини и начину потрошње електричне енергије. Код електричне енергије, тарифни елементи су: снага, активна енергија, реактивна енергија и мерно место. На основу тарифа се врши обрачун преузете енергије за појединачне купце, категорије и групе потрошача за обрачунски период (један месец).

Категорије купаца одређују се на основу: називног напона мреже из које се испоручује електрична енергија, врсте мерних уређаја, односно методе мерења и других критеријума утврђених тарифним системом [2]. Категорије купаца су:

1) потрошња на високом напону (место испоруке електричне енергије је на напонском нивоу 110 kV или више);

2) потрошња на средњем напону (место испоруке електричне енергије је на напонском нивоу од 1 kV до 110 kV);

3) потрошња на ниском напону (место испоруке електричне енергије је на напонском нивоу до 1 kV и то су купци којима се активна снага, као и активна и реактивна енергија одређују мерењем);

4) широка потрошња (место испоруке електричне енергије је на напонском нивоу до 1 kV и то су купци којима се активна снага утврђује према одобреној снази прикључка, примљена активна енергија се утврђује мерењем, а реактивна енергија се не мери);

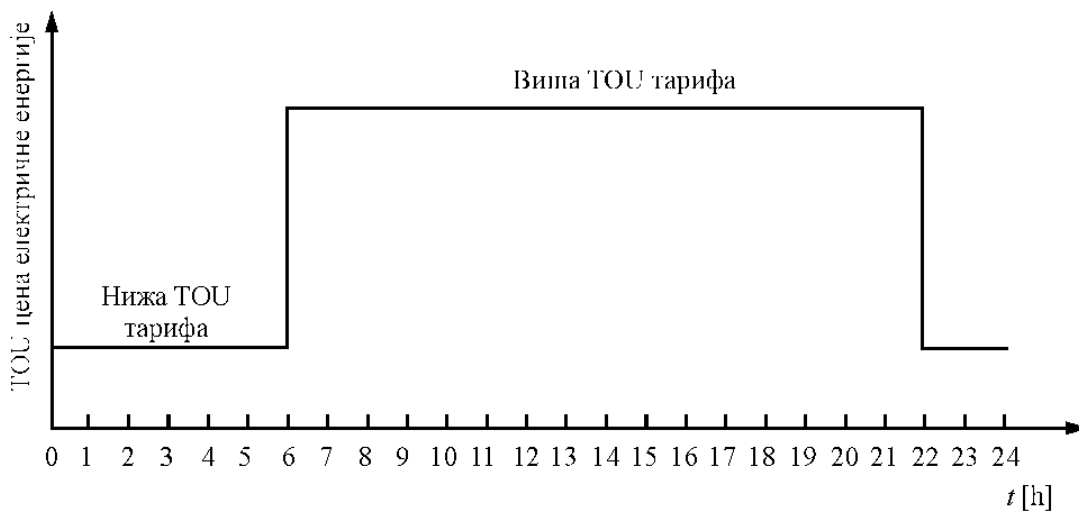
5) јавно осветљење (купци који користе електричну енергију за улично осветљење, за осветљење тргова, тунела, пешачких пролаза, паркова, путева, историјских и других

знаменитости, за уређаје за путну сигнализацију, за осветљење јавних површина и јавних објеката, као и купци који користе електричну енергију за осветљавање рекламних паноа; то су купци којима се преузета активна енергија одређује мерењем или обрачуном према времену преузимања, а активна снага и реактивна енергија се не мере).

Цене су другачије за велике комерцијалне и индустријске потрошаче у односу на цене за резиденцијалне и мале комерцијалне потрошаче.

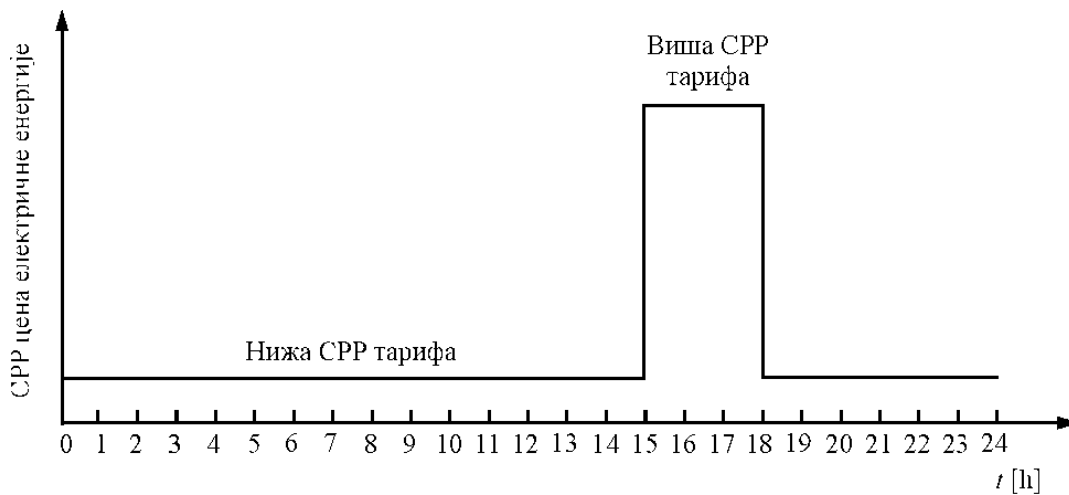
Постоје и различити начини **временски заснованог тарифирања**.

1. Најједноставнији начин тарифирања је примена дневне и ноћне тарифе зависно од доба дана (енг. Time of use pricing – TOU), као што је приказано на Сл. 5.1. Са становишта система повољније је да се повећа потрошња у ноћним сатима, па се зато примењује нижа тарифа за обрачунату електричну енергију, док је у дневним сатима повољније да се смањи потрошња, па се зато примењује виша тарифа за обрачунату електричну енергију. Виша тарифа је за домаћинства око четири пута већа од ниже тарифе. Овај начин тарифирања користи се у конвенционалним системима, при чему се дан подели на два периода у којима је цена фиксна без обзира на реалну цену на тржишту електричне енергије. У Србији нижа (ноћна) тарифа не почиње истовремено за све потрошаче, јер је Србија подељена на три зоне: Војводина, Београд и централна Србија. У Војводини је нижа тарифа од 23 до 7 часова ујутру, у Београду од поноћи до осам ујутру, а у централној Србији од 22 до 6 часова ујутру. Потрошња у преосталом делу дана обрачунава се по вишој (дневној) тарифи.



Сл. 5.1 TOU тарифирање у току 24-часовног периода

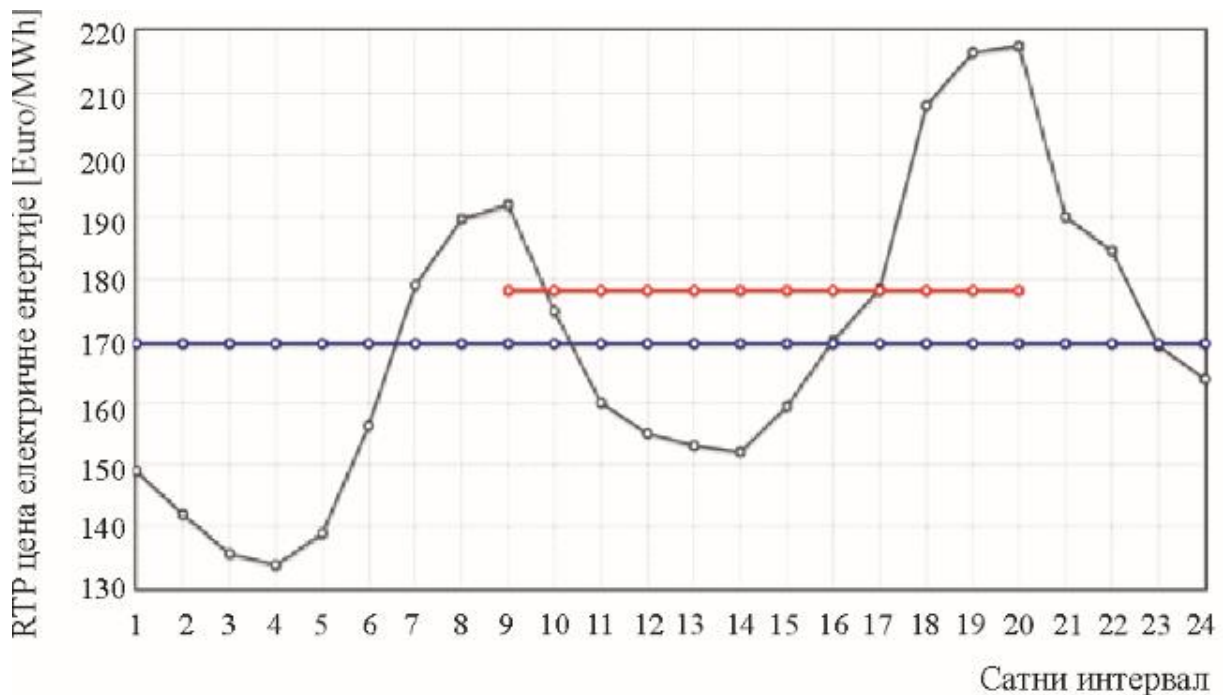
2. Тарифирање са значајним повећањем цене у периоду критичног оптерећења (енг. Critical peak pricing – CPP) је облик тарифирања који дистрибутивна предузећа одређују када предвиде ванредне ситуације у електроенергетском систему, периоде када се очекује вршна потрошња (нпр. од 15:00 до 18:00 врелог летњег радног дана) или високе цене на тржишту електричне енергије у одређеном временском периоду (Сл. 5.2). Постоје две варијанте: прва, када су време и трајање увећане тарифе унапред одређени и друга, када и време и трајање увећане тарифе могу да варирају у зависности од потребе електричне мреже да смањи оптерећење у периоду од нпр. петнаестак дана. Потрошачи треба да буду обавештени најкасније дан унапред о повећању цена и у том случају су бољи ефекти оваквог начина тарифирања у односу на TOU. Цена електричне енергије у периоду високе тарифе може бити и седам до осам пута већа у односу на нижу тарифу [3];



Сл. 5.2 CPP тарифирање у току 24-часовног периода

3. Тарифирање са одобрењем рабата у периоду критичног оптерећења (енг. Critical peak rebates – CPR) је облик тарифирања који дистрибутивна предузећа одређују када предвиде ванредне ситуације у електроенергетском систему, периоде када се очекује вршна потрошња или високе цене на тржишту електричне енергије у одређеном временском периоду, али тада не мењају цену електричне енергије, него потрошачу одобравају рабат у унапред одређеној вредности за смањење потрошње у односу на његову предвиђену потрошњу [4].

4. Тарифирање у реалном времену (енг. Real time pricing – RTP) је облик тарифирања који се односи на променљиве цене електричне енергије у току дана са неком временском резолуцијом (Сл. 5.3). Временски интервал за промену цене је најчешће сат, али то може бити и петнаестоминутни временски интервал. Овај начин тарифирања је нарочито погодан у случају развијених паметних мрежа и паметних уређаја, јер омогућава управљање потрошњом и оптимизацију рада свих елемената електроенергетског система. При томе је важно да домаћинства, комерцијални и индустријски потрошачи буду информисани о сатним ценама електричне енергије дан унапред како би испланирали своју потрошњу у складу са својим потребама и активностима. Локални контролер микромреже на основу 24-часовног дијаграма цена електричне енергије може оптимално управљати контролабилним потрошачима, као и контролабилним генераторима у микромрежи.



Сл. 5.3 RTP у току 24-часовног периода на тржишту SEEPEX 17.02.2023. [6]

(базна цена - обележена плавом бојом, вршна цена – црвеном бојом, променљива сатна цена – црном бојом)

5. Тарифирање са варијабилном ценом у периоду критичног оптерећења (енг. Variable peak pricing – VPP) је комбинација TOU и RTP код кога су различити периоди за одређивање цена унапред дефинисани (нпр. период вршног оптерећења у трајању од 6 сати летњег радног дана и период ван вршног оптерећења – сви остали сати у летњим месецима), али цена за период вршног оптерећења варира у зависности од услова на тржишту електричне енергије.

Сви начини тарифирања, осим TOU, могу се назвати динамичким. Код TOU тарифирања временски распоред више и ниже тарифе је унапред дат и статичан. Временски засновани начини тарифирања омогућени су уградњом паметних бројила. Различити начини динамичког тарифирања омогућавају потрошачима да искористе погодности паметних уређаја и могућности управљања у паметној мрежи.

5.2 Методе управљања потрошњом

Традиционални електроенергетски систем се може поделити на четири подсистема који обављају функције производње, преноса, дистрибуције и потрошње, са циљем да обезбеде поуздано, квалитетно и безбедно снабдевање потрошача електричном енергијом. Обновљиви извори енергије у модерним системима могу производити више енергије када је то потрошачима мање потребно, али и мање енергије у време вршне потрошње, па су зато неопходни системи за складиштење електричне енергије. Како би се и у традиционалним и у модерним електроенергетским системима обезбедио баланс између производње и потрошње, још од почетка развоја електроенергетских система развијали су се и различити начини управљања потрошњом.

Код директног управљања потрошњом, потрошачи омогућавају оператору система да директно управља њиховом потрошњом на основу склопљеног уговора који обухвата права и обавезе обе стране, а најчешће потрошачу омогућава смањење трошкова енергије. Овакав начин управљања је погодан за оператора система, јер му омогућава брзу интервенцију у случају дебаланса производње и потрошње. У директне начине управљања спадају: искључивање потрошача са мреже, повећавање или смањивање напона потрошача, и директно управљање уређајима потрошача.

Искључивање потрошача са мреже је најједноставнији начин, али је максимални непрекидни период искључења у сатима уговорен, а одређен је и временски интервал када потрошач може бити без напајања и неопходно је обавештавање потрошача о могућем искључењу.

Повећавање или смањивање напона потрошача омогућава управљање потрошњом. Снага потрошње у чвору мреже није константна и мада се може приближно проценити, она ипак зависи од напона потрошача везаних за тај чвор и типа тих потрошача. Постоје три типа потрошача: потрошачи са константном снагом код којих је активна снага константна независно од напона (нпр. асинхрони мотори и електронски уређаји), потрошачи са константном струјом код којих је струја константна независно од напона, и потрошачи са константном импедансом (најчешће термогени потрошачи). Могуће је да оператор система смањи потрошњу смањењем напона у чвору. Међутим, у случају термогених потрошача то може продужити њихово време укључења и касније довести до нестабилности система [3].

Начин индиректног управљања потрошњом је промена цене електричне енергије тако да потрошачи буду стимулирани да је троше онда када је то најповољније за електроенергетски систем. Предност оваквог начина управљања потрошњом је да се потрошачима оставља избор када и на који начин ће трошити електричну енергију, па чак они могу и свесно пребацивати ону потрошњу из вршног оптерећења која се у случају директног управљања може сматрати неуправљивом. Зато су и развијени различити начини тарифирања описани у поглављу 5.1 ове дисертације. У наредним поглављима су разматрани TOU и RTP начини тарифирања у циљу минимизације трошкова електричне енергије, као и различите методе управљања потрошњом.

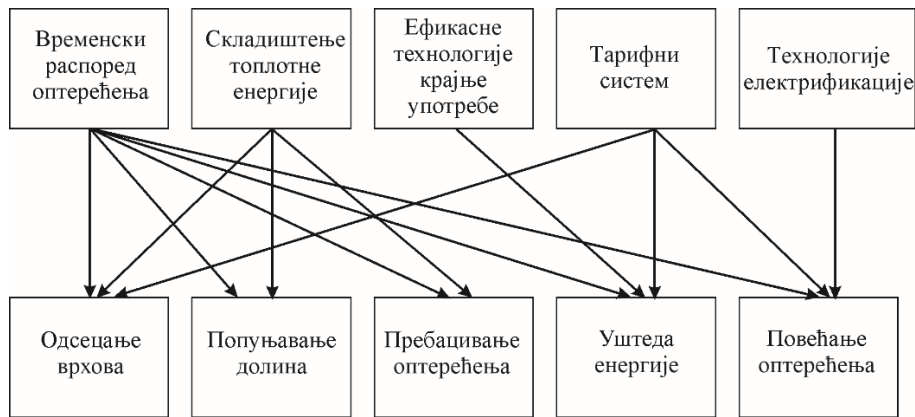
Паметне мреже и паметни уређаји пружају нове могућности појединачним купцима електричне енергије, прозјумерима (произвођач-купац скраћено од енг. producer-consumer), агрегаторима, власницима микромрежа и дистрибутивним предузећима да управљају електроенергетским системом, доносе одлуке о потрошњи енергије и времену потражње како би контролисали трошкове уз примену нових информационо-комуникационих технологија. Ове могућности се користе применом различитих техника управљања на страни потражње. Управљање потражњом за електричном енергијом обухвата активности крајњих корисника да модификују своју потрошњу на најбољи могући начин и за

дистрибутивну компанију и за купца, али то не мора нужно довести до смањења укупне потрошње енергије. Управљање потражњом за електричном енергијом (енг. Demand Side Management – DSM) је савремено решење које се користи ради превазилажења проблема са загађењем животне средине, проблема енергетске независности, проблема индустријског развоја земаља са недовољним капацитетом за производњу електричне енергије, као и ради смањења употребе фосилних горива и смањења економских трошкова. Ово такође захтева детаљне информације о динамици потрошње електричне енергије, функционисању и планирању електроенергетског система, познавање варијације цена на тржишту електричне енергије, познавање вршних оптерећења и варијација потрошње услед фактора околине, као и друштвених фактора. Управљање потражњом се остварује кроз спровођење активности у циљу добијања жељених дневних, месечних или сезонских крива оптерећења [5], [6] и побољшања фактора оптерећења. Нови метод управљања потрошњом, образложен у овој дисертацији у Поглављу 5.6, предлаже двостепену процедуру оптимизације.

За дистрибутивне компаније, DSM значи избегавање или одлагање потребе за улагањем у нове капацитете, побољшање квалитета електричне енергије, обезбеђивање ефикасне производње, преноса и дистрибуције енергије [7]. За резиденцијалне кориснике то значи смањење износа на рачуну и искоришћавање финансијских подстицаја које пружа њихова дистрибутивна компанија. За комерцијалне и индустријске купце то значи ниже трошкове укључене у цене њихових производа, што их чини конкурентнијим на тржишту. DSM даје корисницима нову улогу и слободу у пребацивању захтева на периоде ван вршног оптерећења како би се смањили износи на њиховим рачунима за електричну енергију, уз истовремено обезбеђивање нижих трошкова по kWh дистрибутивној компанији.

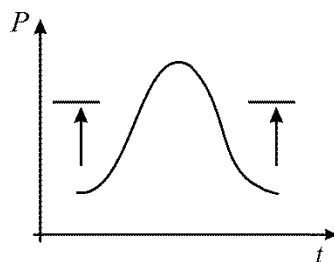
Главне технике DSM су: попуњавање долина (енг. valley filing), пребацивање оптерећења (енг. load shifting), одсецање врхова (енг. peak clipping), повећање оптерећења (енг. load building) и уштеда енергије (енг. energy conservation). Примена ових техника се разликује код различитих дистрибутивних компанија [8], јер зависи од броја купаца, врсте оптерећења (резиденцијално, комерцијално, индустријско), бенефита од примене технике, реакције корисника и њиховог задовољства примењеном техником, итд. Међутим, предности од примене технике су обостране (и за потрошача и за дистрибутивну компанију), тако да су такве активности порасле током протеклих деценија.

На Сл. 5.4 су приказане DSM методе које примењују дистрибутивне компаније. То су: преуређење временског распореда оптерећења, складиштење топлотне енергије, ефикасне технологије крајње употребе, примена тарифног система и технологије електрификације. Ове методе могуће је спровести применом одговарајућих DSM техника, као што је приказано везама на Сл. 5.4.



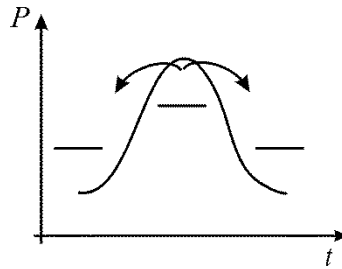
Сл. 5.4 DSM методе и одговарајуће DSM технике

Попуњавање долина (Сл. 5.5) је једна од могућих DSM техника која се примењује да би се промениле криве оптерећења како би се добили што већи фактори оптерећења у унапред дефинисаним временским интервалима. На тај начин дистрибутивна компанија може повећати свој профит, а снижити трошкове по kWh енергије. Већа потражња у временским интервалима изван вршног оптерећења постиже се подстицањем крајњих купаца да троше енергију уз плаћање нижих тарифа или да мењају временски распоред расподеле потражње током дана. Ово је могуће ако неки контролисани уређаји могу да раде у различитим временским интервалима током дана и изабрани временски интервал није релевантан за купца. За резиденцијалне и индустријске потрошаче такви уређаји су нпр. бојлери и термоакумулационе пећи.



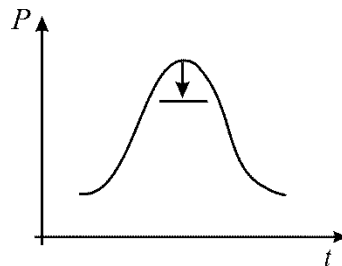
Сл. 5.5 DSM техника попуњавања долина

Пребацивање оптерећења (Сл. 5.6) је најбоље решење са становишта дистрибутивне компаније. Применом ове DSM технике, део потрошње се помера са периода вршне потрошње на преостале временске интервале. Купце на то охрабрује јефтинија тарифа у временским интервалима ван периода вршне потрошње.



Сл. 5.6 DSM техника пребацивања оптерећења

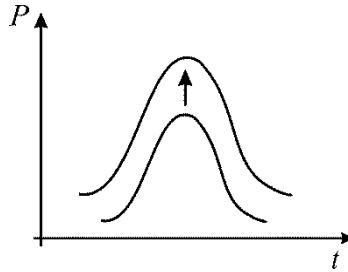
Одсецање врхова (Сл. 5.7) такође има за циљ смањење потражње током периода вршног оптерећења, посебно ако инсталирани капацитет није довољан да покрије вршну потражњу. Ово је веома важно у земљама у развоју, ако постоји проблем са инвестицијама за нова постројења или са производним капацитетима.



Сл. 5.7 DSM техника одсецања врхова

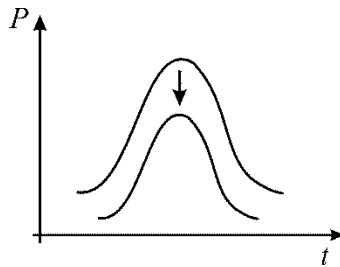
Повећање укупне потрошње енергије (Сл. 5.8) је корисно ако неко комунално предузеће има вишак капацитета или расположиву енергију за продају уз ниже трошкове по kWh. Ова DSM техника **повећања оптерећења** се постиже подстицањем потрошача да троше електричну енергију тамо где је то потребно за рад електроенергетског система. Постоје примери дистрибутивних компанија које су купцима давале термоакумулационе

пећи као велика оптерећења где је то било пожељно, да би се одржали капацитети електроенергетског система у тој области.



Сл. 5.8 DSM техника повећања оптерећења

Уштеда енергије (Сл. 5.9) је такође веома важна у електроенергетским системима и има све више савремених штедљивих уређаја. Смањење укупне потрошње енергије је веома важно на глобалном нивоу, нарочито због заштите животне средине.



Сл. 5.9 DSM техника очувања енергије

5.3 Дефинисање циљних функција за проблем оптимизације потрошње

Циљна функција за проблем оптимизације може се дефинисати на више начина. При оптимизацији се може:

- максимизирати фактор оптерећења, дефинисан једначином (5.1);
- максимизирати фактор оптерећења, дефинисан једначином (5.2);
- минимизирати укупни трошак за потрошача, дефинисан једначином (5.3):

$$LF_{\max} = \left[\left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{(i,j)} t_{(j)} \right] / \sum_{j=1}^J t_{(j)} \right] / \sum_{i=1}^N P_{(i,k)} \quad (5.1)$$

$$LF_{\max} = \left[\left[\sum_{j=1}^J P_{tot(j)} t_{(j)} \right] / \sum_{j=1}^J t_{(j)} \right] / P_{tot(k)} \quad (5.2)$$

$$C_{\min} = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{(i,j)} t_{(j)} C_{e(i,j)} \right] + \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{(i,j)} C_{d(i,j)} \right] \quad (5.3)$$

за следеће ознаке:

LF – фактор оптерећења,

$P_{(i,j)}$ – потражња за снагом типа оптерећења i у временском интервалу j , за $i = 1, \dots, N$

и $j = 1, \dots, J$,

N – укупан број типова оптерећења,

J – укупан број временских интервала,

$P_{tot(j)}$ – укупна снага потражње за све врсте оптерећења, где j означава број временског интервала,

k – временски интервал максималне потражње свих типова оптерећења $i = 1, \dots, N$, у свим интервалима $j = 1, \dots, J$,

C – укупни трошак електричне потражње, односно потрошње енергије,

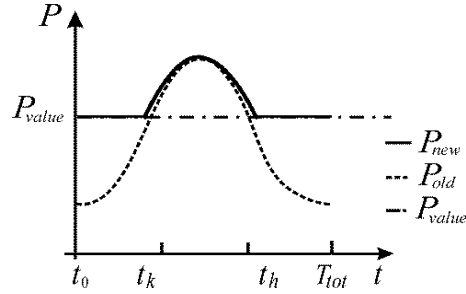
$c_{e(i,j)}$ – цена енергије (по јединици енергије) за тип оптерећења i у временском интервалу j ,

$c_{d(i,j)}$ – трошак потражње (по јединици снаге) за тип оптерећења i у временском интервалу j .

5.4 Ограничења типа једнакости и типа неједнакости за проблем оптимизације

Ограничења за проблем оптимизације зависе од изабране DSM технике, од карактеристика оптерећења и карактеристика електроенергетског система [9].

За DSM технику попуњавања долина (Сл. 5.10) позитиван ефекат се добија повећавањем оптерећења у периодима ван вршног оптерећења. На Сл. 5.10 је приказана идеално поправљена крива оптерећења.



Сл. 5.10 Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике попуњавања долина

У случају примене DSM технике попуњавања долина ограничење типа једнакости је:

$$P_{new(i,j)} = P_{old(i,j)}, \quad \forall t \in \{t_k, t_h\}, \quad (5.4)$$

а ограничења типа неједнакости су:

$$P_{new(i,j)} \geq P_{old(i,j)}, \quad \forall t \in \{t_0, t_k\} \cup \{t_h, T_{tot}\}, \quad (5.5)$$

$$P_{new(i,j)} \leq P_{value}, \quad \forall t \in \{t_0, t_k\} \cup \{t_h, T_{tot}\}, \quad (5.6)$$

где су:

$P_{new(i,j)}$ – потражња типа оптерећења i у временском интервалу j након примене DSM технике,

$P_{old(i,j)}$ – потражња типа оптерећења i у временском интервалу j пре примене DSM технике,

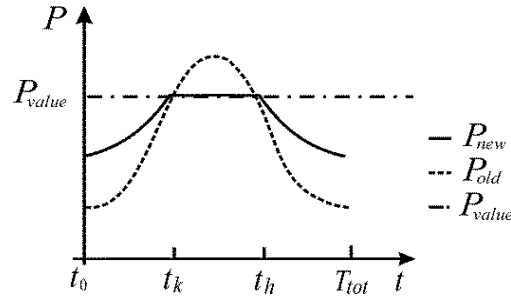
P_{value} – гранична вредност коју задаје планер система,

k – временски интервал у коме је укупна потражња свих врста оптерећења $P_{tot(k)}$ максималне вредности, тако да је:

$$P_{tot(k)} > P_{tot(j)}, \quad \forall j = 1, \dots, J; j \neq k, \quad (5.7)$$

а збир свих временских интервала је $T_{tot} = \sum_{j=1}^J t_{(j)}$.

При примени DSM технике пребацивања оптерећења (Сл. 5.11) нема промене укупне потрошње енергије, али долази до смањења вршне потражње.



Сл. 5.11 Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике пребацивања оптерећења

У случају примене DSM технике пребацивања оптерећења ограничења типа једнакости су:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{new(i,j)} t_{(j)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J P_{old(i,j)} t_{(j)}, \quad (5.8)$$

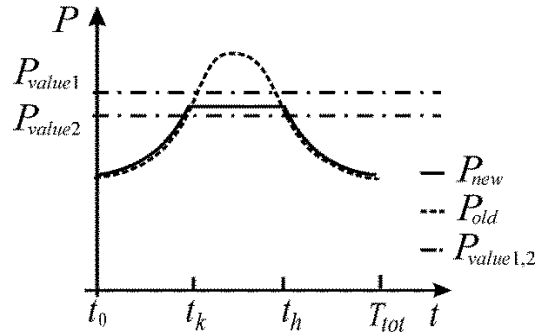
$$P_{new(i,j)} = P_{value}, \quad \forall t \in \{t_k, t_h\}, \quad (5.9)$$

а ограничења типа неједнакости су:

$$P_{new(i,j)} \geq P_{old(i,j)}, \quad \forall t \in \{t_0, t_k\} \cup \{t_h, T_{tot}\}, \quad (5.10)$$

$$P_{new(i,j)} \leq P_{value}, \quad \forall t \in \{t_0, t_k\} \cup \{t_h, T_{tot}\}. \quad (5.11)$$

При примени DSM технике одсецања врхова позитиван ефекат се добија смањењем потражње оптерећења током вршног периода од t_k до t_h и смањењем укупне потрошње енергије од t_0 до T_{tot} (Сл. 5.12).



Сл. 5.12 Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике одсецања врхова

У случају примене DSM технике одсецања врхова ограничење типа једнакости је:

$$P_{new(i,j)} = P_{old(i,j)}, \quad \forall t \in \{t_0, t_k\} \cup \{t_h, T_{tot}\}, \quad (5.12)$$

а ограничења типа неједнакости су:

$$P_{new(i,j)} \leq P_{value1}, \quad \forall t \in \{t_k, t_h\}, \quad (5.13)$$

$$P_{new(i,j)} \geq P_{value2}, \quad \forall t \in \{t_k, t_h\}, \quad (5.14)$$

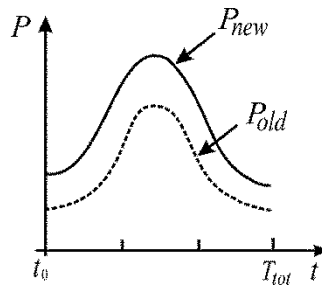
$$P_{value2} \leq P_{value1}, \quad (5.15)$$

где су P_{value1} и P_{value2} граничне вредности задате од стране планера електроенергетског система.

При примени DSM технике повећања оптерећења (Сл. 5.13) вршна потражња и укупна потрошња енергије се повећавају током читавог периода од t_0 до T_{tot} .

У случају примене DSM технике повећања оптерећења ограничење типа неједнакости је:

$$P_{new(i,j)} \geq P_{old(i,j)}, \quad \forall t \in \{t_0, T_{tot}\}. \quad (5.16)$$

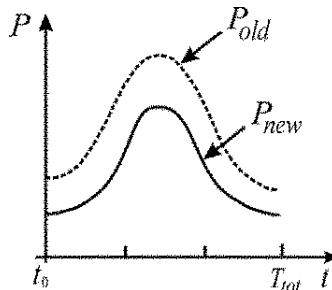


Сл. 5.13 Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике повећања оптерећења

При примени DSM технике уштеде енергије (Сл. 5.14) вршна потражња и укупна потрошња енергије се смањују током читавог периода од t_0 до T_{tot} .

У случају примене DSM технике уштеде енергије ограничење типа неједнакости је:

$$P_{new(i,j)} \leq P_{old(i,j)}, \quad \forall t \in \{t_0, T_{tot}\}. \quad (5.17)$$



Сл. 5.14 Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике уштеде енергије

5.5 Примери оптимизације дневне криве потрошње

У овом поглављу анализирана је оптимизација трошкова и примена DSM техника на примеру дневне криве укупне потрошње потрошача међу којима су три електрична котла снаге $P_{load\ i} = 20\text{ kW}$ ($i = 1, 2, 3$) који морају да раде четири сата непрекидно да би постигли жељену температуру. Пошто се могу укључити у било ком тренутку и искључити четири сата касније, треба искористити могућност промене времена захтева за потрошњом [10].

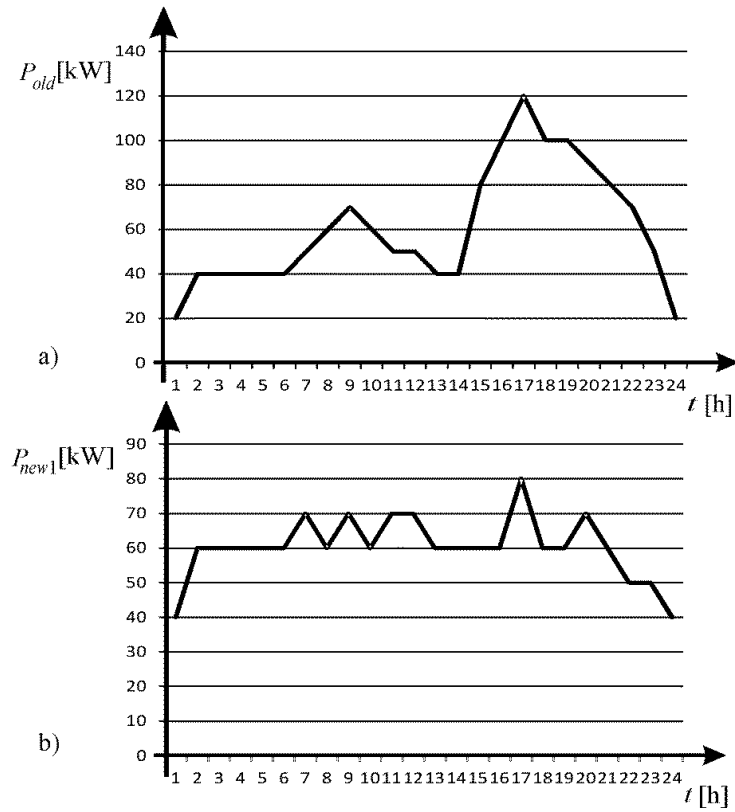
Крива потрошње P_{old} у зависности од интервала времена у току дана $t_j \in [1, \dots, 24]$ дата је на Сл. 5.15 а). Временски распоред за контролабилна оптерећења дат је у Таблици 5.1, као и укупна потрошња P_{old} по сатима. У Таблици 5.1 је обележено са 0 ако потрошач није укључен, а са 1 ако јесте. Сивом бојом су обележени сатни интервали у којима важи нижа тарифа (од 22h увече до 6h ујутру). Овај временски распоред треба променити када постоје оптерећења која се могу контролисати, како би се добила оптимална дневна крива потрошње P_{new} и одредио нови временски распоред.

Након примене DSM технике пребацивања оптерећења и коришћењем програма MS Excel Solver добија се нова крива потрошње P_{new} која је дата на Сл. 5.15 б). Solver је алатка MS Excel-а чији је прозор дат на Сл. 5.16 и користи се за решавање проблема оптимизације. Циљна функција је записана у циљној ћелији, а ограничења и променљиве у ћелијама које се мењају. Нови временски распоред оптерећења дат је у Таблици 5.1, као и укупна потрошња P_{new} по сатима. На Сл. 5.17 дат је нови временски распоред за три контролисана оптерећења и дневне криве потрошње пре и после оптимизације.

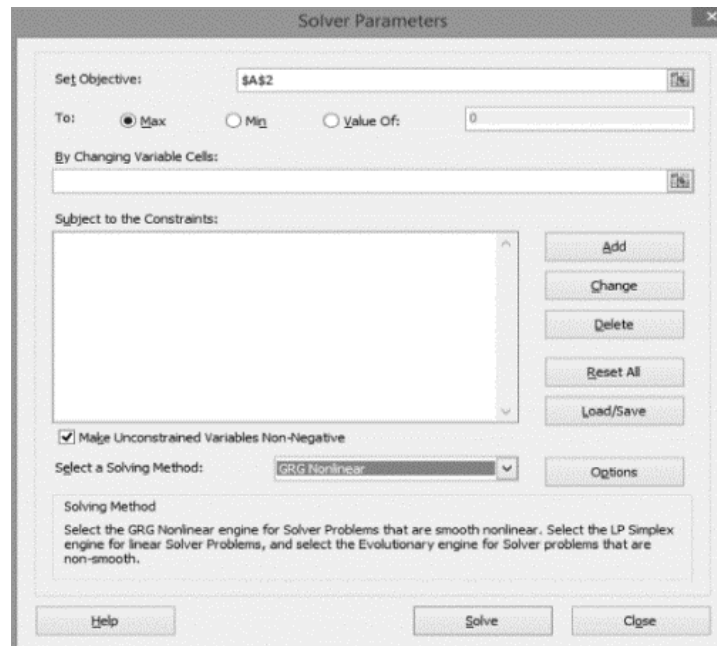
Максимална вредност потрошње пре прве процедуре оптимизације је $P_{max\ old} = 120\text{ kW}$, а минимална $P_{min\ old} = 20\text{ kW}$. Однос тих вредности је $P_{max\ old} / P_{min\ old} = 6$. После прве процедуре оптимизације добијена вредност за максимум је $P_{max\ new} = 80\text{ kW}$, а за минимум $P_{min\ new} = 40\text{ kW}$, тако да је $P_{max\ new} / P_{min\ new} = 2$, као на Сл. 5.18.

Средња вредност снаге пре и после прве процедуре оптимизације је иста:

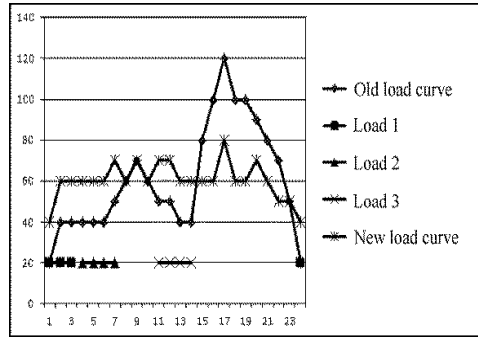
$$P_{av} = \left(\sum_{j=1}^{24} P_{old\ j} t_j \right) / \sum_{j=1}^{24} t_j = \left(\sum_{j=1}^{24} P_{new\ j} t_j \right) / \sum_{j=1}^{24} t_j. \quad (5.18)$$



Сл. 5.15 а) Дневна крива потрошње пре прве процедуре оптимизације P_{old} ,
 б) дневна крива потрошње после прве процедуре оптимизације P_{new}



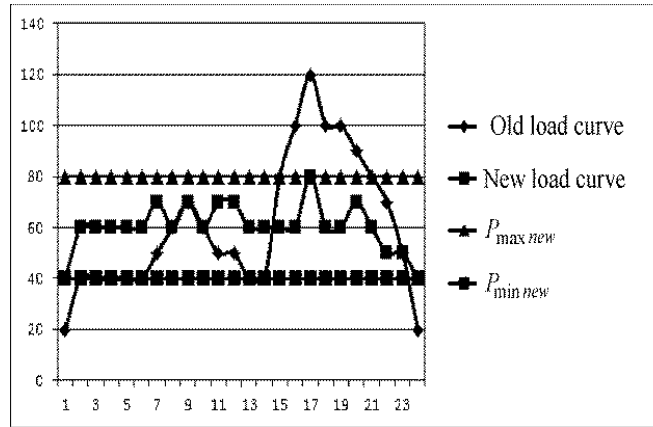
Сл. 5.16 MS Excel Solver алатка



Сл. 5.17 Временски распоред за три контролисана оптерећења и дневне криве потрошње пре и после прве процедуре оптимизације

Таблица 5.1 Временски распоред оптерећења и укупне снаге, пре и после прве процедуре

Временски интервал	P_{old} [kW]	Load 1 пре I процедуре	Load 2 пре I процедуре	Load 3 пре I процедуре	Load 1 после I процедуре	Load 2 после I процедуре	Load 3 после I процедуре	P_{new} [kW]
1	20	0	0	0	1	0	0	40
2	40	0	0	0	1	0	0	60
3	40	0	0	0	1	0	0	60
4	40	0	0	0	0	1	0	60
5	40	0	0	0	0	1	0	60
6	40	0	0	0	0	1	0	60
7	50	0	0	0	0	1	0	70
8	60	0	0	0	0	0	0	60
9	70	0	0	0	0	0	0	70
10	60	0	0	0	0	0	0	60
11	50	0	0	0	0	0	1	70
12	50	0	0	0	0	0	1	70
13	40	0	0	0	0	0	1	60
14	40	0	0	0	0	0	1	60
15	80	1	0	0	0	0	0	60
16	100	1	1	0	0	0	0	60
17	120	1	1	0	0	0	0	80
18	100	1	1	0	0	0	0	60
19	100	0	1	1	0	0	0	60
20	90	0	0	1	0	0	0	70
21	80	0	0	1	0	0	0	60
22	70	0	0	1	0	0	0	50
23	50	0	0	0	0	0	0	50
24	20	0	0	0	1	0	0	40



Сл. 5.18. Дневне криве потрошње, максимална и минимална снага за временски распоред оптерећења после прве процедуре оптимизације

Таблица 5.2 Параметри потрошње пре и после прве процедуре оптимизације

Параметар	Вредност пре прве процедуре оптимизације	Вредност после прве процедуре оптимизације
P_{\max} [kW]	120	80
P_{\min} [kW]	20	40
P_{avg} [kW]	60.4167	60.4167
$LF = P_{\text{avg}} / P_{\max}$	0.5035	0.7552
Утрошак енергије [kWh/дан]	1450	1450
Утрошак енергије по вишој тарифи [kWh/дан]	1160	1020
Утрошак енергије по нижој тарифи [kWh/дан]	290	430
Уштеда трошкова за електричну енергију [%]	–	8.52

Ако је цена више тарифе четири пута већа од цене ниже тарифе, може се одредити уштеда у трошковима за електричну енергију у процентима, што је приказано у Табlici 5.2. Уштеда је приближно 8.52%. Фактор оптерећења LF се повећао од 0.5035 на 0.7552, што је повећање од око 50% после примене DSM технике.

Могу се користити и други алати за оптимизацију, као што је Lingo [11] рачунарски програм за линеарно, нелинеарно и целобројно програмирање, погодан за ову врсту оптимизационих проблема.

Ако су се међу осталим оптерећењима појавила нова управљива оптерећења, нпр. четири акумулационе грејалице $P_{load\ i} = 5\text{ kW}$ ($i = 4, 5, 6, 7$) које морају да раде четири сата непрекидно да би ускладиштиле жељену топлотну енергију, могло би се наћи побољшано решење за временски распоред потражње. Ако се грејачи могу укључити у било ком тренутку и искључити четири сата касније, по могућности у ноћним сатима са нижом тарифом, треба искористити могућност промене њиховог захтеваног времена. Оптимални временски распоред за тај случај и укупна потрошња по сату су приказани у Таблици 5.3.

Таблица 5.3 Временски распоред оптерећења и укупне снаге, пре и после друге процедуре

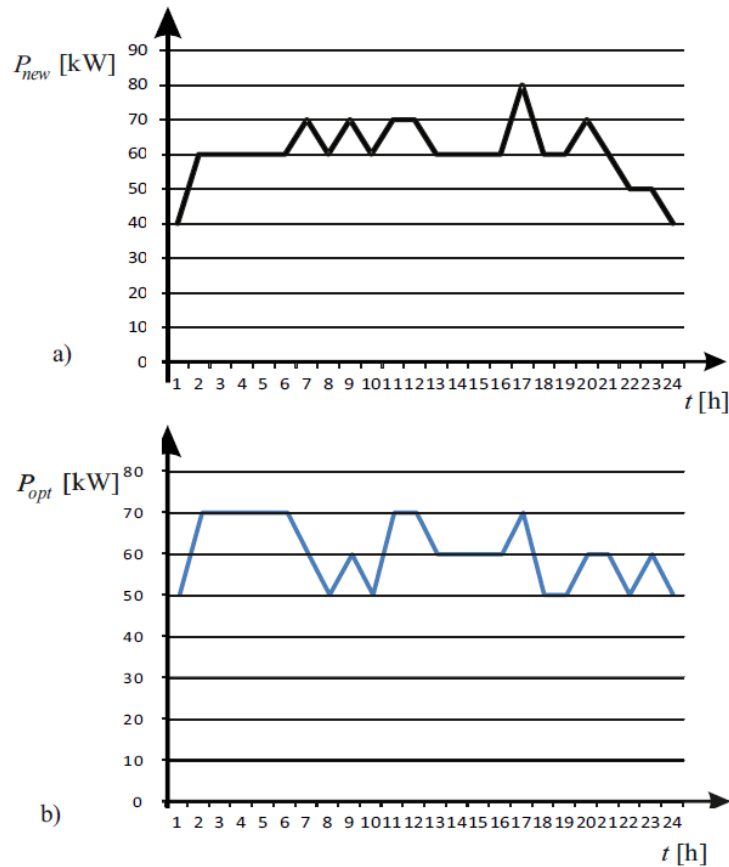
Временски интервал	P_{new} [kW]	Load 4 после I процедуре	Load 5 после I процедуре	Load 6 после I процедуре	Load 7 после I процедуре	Load 4 после II процедуре	Load 5 после II процедуре	Load 6 после II процедуре	Load 7 после II процедуре	P_{opt} [kW]
1	40	0	0	0	0	0	1	0	1	50
2	60	0	0	0	0	0	1	0	1	70
3	60	0	0	0	0	1	0	1	0	70
4	60	0	0	0	0	1	0	1	0	70
5	60	0	0	0	0	1	0	1	0	70
6	60	0	0	0	0	1	0	1	0	70
7	70	0	0	1	1	0	0	0	0	60
8	60	0	0	1	1	0	0	0	0	50
9	70	0	0	1	1	0	0	0	0	60
10	60	0	0	1	1	0	0	0	0	50
11	70	0	0	0	0	0	0	0	0	70
12	70	0	0	0	0	0	0	0	0	70
13	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60
14	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60
15	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60
16	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60
17	80	1	1	0	0	0	0	0	0	70
18	60	1	1	0	0	0	0	0	0	50
19	60	1	1	0	0	0	0	0	0	50
20	70	1	1	0	0	0	0	0	0	60
21	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60
22	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50
23	50	0	0	0	0	0	1	0	1	60
24	40	0	0	0	0	0	1	0	1	50

У Таблици 5.4 су дати резултати пре и после друге процедуре оптимизације за P_{\max} , P_{\min} , P_{avg} , $LF = P_{\text{avg}} / P_{\max}$ и уштеда трошкова за електричну енергију.

Таблица 5.4 Параметри потрошње пре и после друге процедуре оптимизације

Параметар	Вредност пре друге процедуре оптимизације	Вредност после друге процедуре оптимизације
P_{\max} [kW]	80	70
P_{\min} [kW]	40	50
P_{avg} [kW]	60.4167	60.4167
$LF = P_{\text{avg}} / P_{\max}$	0.7552	0.8631
Утрошак енергије [kWh/дан]	1450	1450
Утрошак енергије по вишој тарифи [kWh/дан]	1020	940
Утрошак енергије по нижој тарифи [kWh/дан]	430	510
Уштеда трошкова за електричну енергију [%]	8.52	13.39

После примене DSM технике пребацивања оптерећења и друге процедуре оптимизације, добијају се побољшана крива оптерећења и оптимални временски распоред оптерећења као што је дато у Таблици 5.4. Максимална вредност снаге на дневној криви потрошње после прве процедуре је $P_{\max_{\text{new}}} = 80\text{kW}$, а минимална $P_{\min_{\text{new}}} = 40\text{kW}$. Однос ових вредности је $P_{\max_{\text{new}}} / P_{\min_{\text{new}}} = 2$. Након примене друге процедуре оптимизације, максимална снага је $P_{\max_{\text{opt}}} = 70\text{kW}$, а минимална снага $P_{\min_{\text{opt}}} = 50\text{kW}$, тако да је $P_{\max_{\text{opt}}} / P_{\min_{\text{opt}}} = 1.4$. Побољшана је крива оптерећења, као и фактор оптерећења, тако да је $LF = P_{\text{av}} / P_{\max_{\text{opt}}} = 0.8631$. На Сл. 5.19 а) дата је дневна крива потрошње P_{new} пре друге процедуре оптимизације, а на Сл. 5.19 б) дневна крива потрошње P_{opt} после друге процедуре оптимизације.



Сл. 5.19 а) Дневна крива потрошње пре друге процедуре P_{new} ,
 б) дневна крива потрошње после друге процедуре P_{opt}

Исти поступак се може применити и у случају пуњења електричних возила у трајању од четири сата узастопно, уколико није унапред задат временски интервал када возила због коришћења нису на располагању за пуњење утрошене електричне енергије. Може се увести и додатни захтев за што “равнију” криву потражње, односно за што мања одступања од средње вредности.

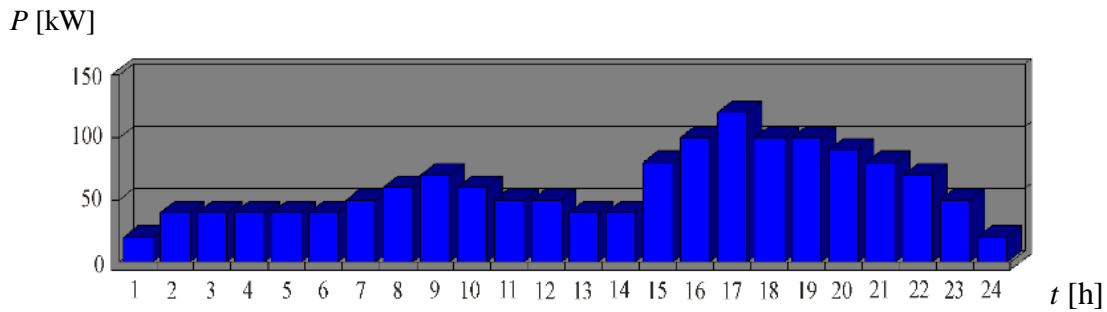
У случају електричних возила може се поставити много већи број захтева да би се добио оптималан временски распоред пуњења и пражњења возила, али се овакви компликованији проблеми морају решавати специјално реализованим рачунарским програмима као што је приказано у наредним поглављима ове дисертације.

5.6 Нова процедура двостепене оптимизације уз примену техника управљања потрошњом

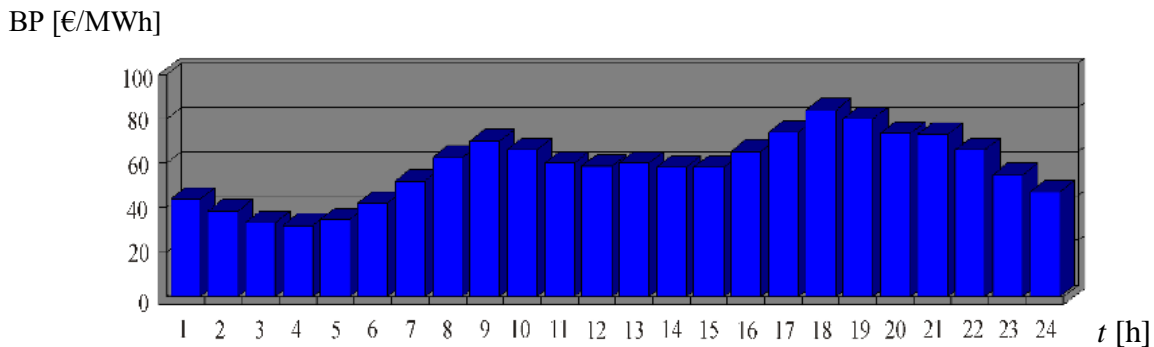
У овом поглављу приказана је нова процедура двостепене оптимизације која се може користити при управљању потрошњом у циљу смањења трошкова енергије и оптималног рада електроенергетског система. Ова процедура има два корака [13]. У првом кораку процедуре утврђују се вредности максималне и минималне захтеване снаге потражње у току дана које се добијају минимизирањем апсолутних вредности разлика између захтеваних снага по сату у дневном распореду. У другом кораку, претходно израчунате вредности се узимају као ограничења, а функција трошкова енергије се минимизира на основу варијабилних цена електричне енергије по сату. Тако се добија оптимизована дневна крива оптерећења, временски распоред укључења/искључења одложивих потрошача и максималне уштеде уз највећи могући фактор оптерећења. Оптимизација је реализована у рачунарском програму Lingo.

Управљање на страни потрошње (DSM) има много предности и за купце и за дистрибутивне компаније [7], [8]. Може се применити на различитим нивоима: на националном нивоу, нивоу потрошача које снабдева дистрибутивна компанија, нивоу локалне заједнице или индивидуалног домаћинства. Са становишта потрошача, циљ DSM техника је да се смање трошкови смањењем потражње енергије у време вршне потрошње, а повећањем у време ван вршне потрошње. Захтеви потрошача могу се модификовати финансијским подстицајима и променом њиховог понашања кроз континуирану едукацију о штетности превелике потрошње фосилних горива и загађења човекове околине. Са становишта дистрибутивне компаније, циљ DSM техника је да се побољша квалитет електричне енергије, одржи сигурност електроенергетског система и одложи или смањи улагање у повећање капацитета мреже, додатне капацитете генератора и јединице за складиштење енергије како би се задовољиле вршне потребе. Примена DSM техника резултира нижим трошковима по kWh. Корист за све је повећана енергетска ефикасност, као и мања емисија гасова стаклене баште, што је веома важно за заштиту животне средине. За постизање краткорочних или дугорочних циљева могу се применити различите DSM технике (попуњавање долина, пребацивање оптерећења, одсецање врхова, повећање оптерећења и уштеда енергије).

Постоје различита оптерећења која могу променити време захтева за потрошњом. За одређена оптерећења могуће је користити сатни распоред у циљу уштеде трошкова и побољшања дневне криве потрошње. Дневна крива потрошње [10] дата је на Сл. 5.20 за неодложна и одложива оптерећења, па се применом технике пребацивања оптерећења могу постићи значајне уштеде трошкова за варијабилне цене електричне енергије. Цене на тржишту електричне енергије [12] за 08.01.2020. год. дате су на Сл. 5.21.

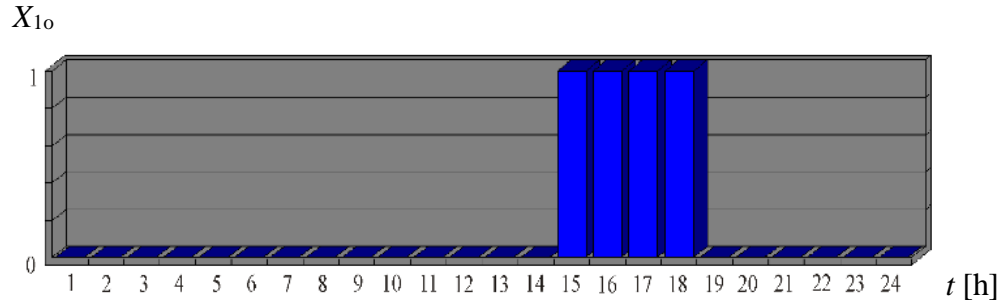


Сл. 5.20 Дневна крива потрошње пре оптимизације

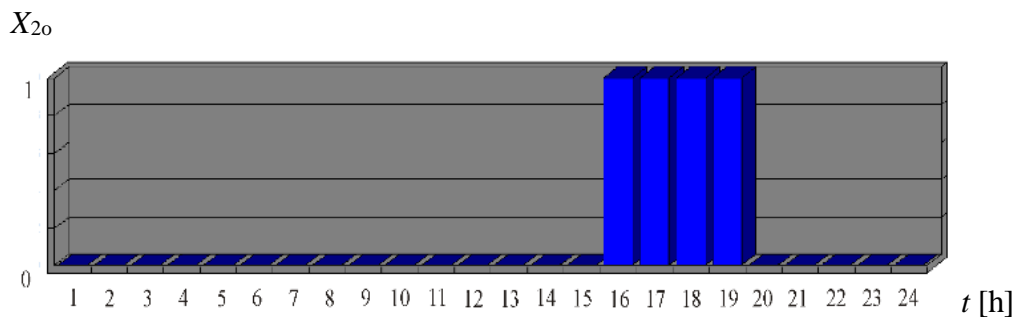


Сл. 5.21 Дијаграм варијабилних цена на тржишту електричне енергије за 08.01.2020. године

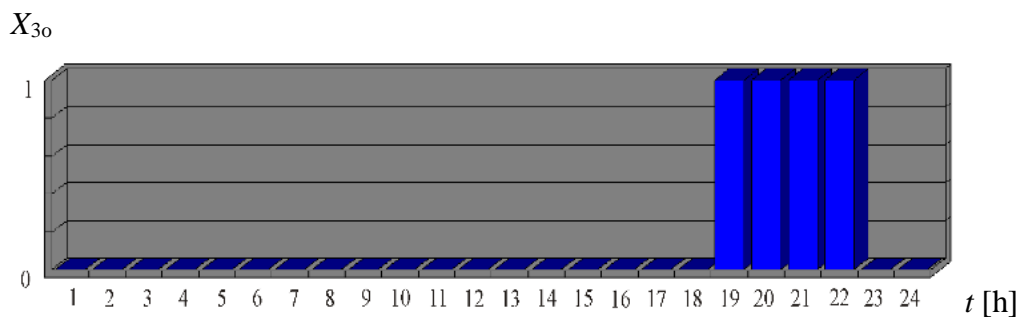
У дневну криву потрошње укључена су три одложива оптерећења (енг. Deferrable Loads – DL) снаге $P_{DL} = 20 \text{ kW}$, чији је временски распоред укључивања [14] пре првог корака оптимизације дат на Сл. 5.22 – 5.24. Фактор оптерећења је $LF = P_{avg}/P_{max} = 0.5035$ за просечну потражњу $P_{avg} = 60.4167 \text{ kW}$ и максималну потражњу $P_{max} = 120 \text{ kW}$.



Сл. 5.22 Временски распоред укључивања првог одложивог оптерећења $X_{10}(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, пре првог корака оптимизације



Сл. 5.23 Временски распоред укључивања другог одложивог оптерећења $X_{20}(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, пре првог корака оптимизације



Сл. 5.24 Временски распоред укључивања трећег одложивог оптерећења $X_{30}(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, пре првог корака оптимизације

$X_{10}(i)$, $X_{20}(i)$ и $X_{30}(i)$ су променљиве које могу имати следеће вредности: 1 ако је потрошач укључен или 0 ако је потрошач искључен у i -том интервалу, као што је дато на Сл. 5.22 – 5.24.

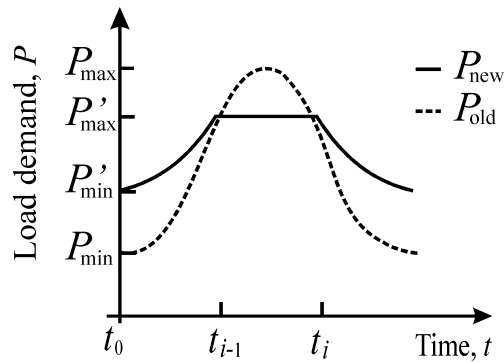
Функција коју треба минимизирати у првом кораку је:

$$D = \min \left\{ \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^{24} |P'(i) - P'(j)| \right\} \quad (5.19)$$

Пошто је примењена DSM техника пребацивања оптерећења (Сл. 5.25) укупна потрошња по дану је иста, тако да важи:

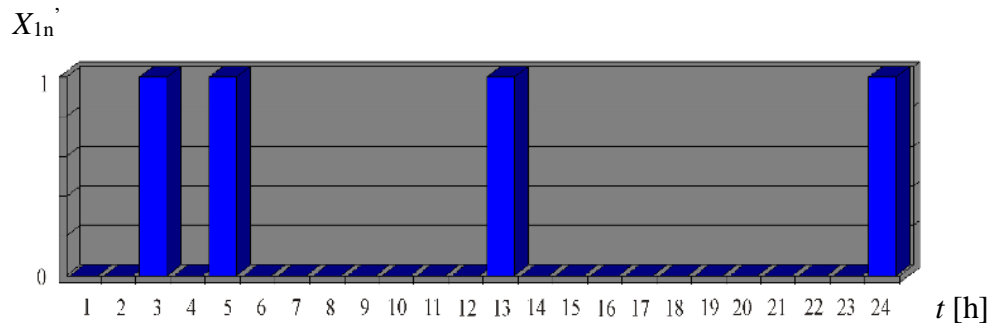
$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{24} P_{ND}(i) + P_{DL} [X_{1n}'(i) + X_{2n}'(i) + X_{3n}'(i)] = \\ \sum_{i=1}^{24} P_{ND}(i) + P_{DL} [X_{1o}(i) + X_{2o}(i) + X_{3o}(i)], \end{aligned} \quad (5.20)$$

где је $P_{ND}(i)$ оптерећење које се не може одложити у i -том интервалу.

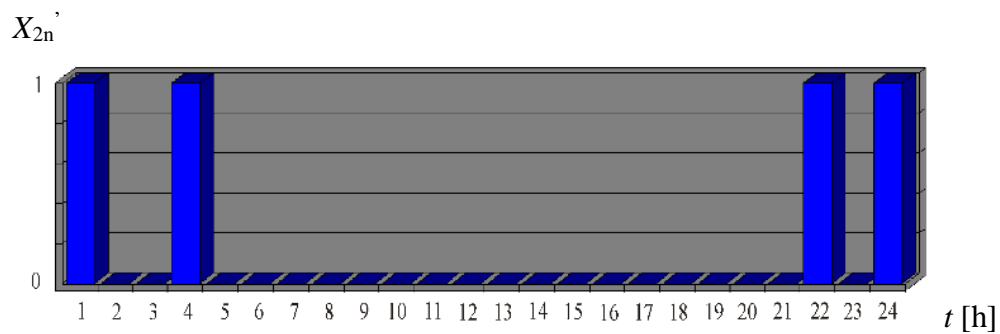


Сл. 5.25 Максимална снага P_{\max}' и минимална снага P_{\min}' после првог корака оптимизације уз примену технике пребацивања оптерећења

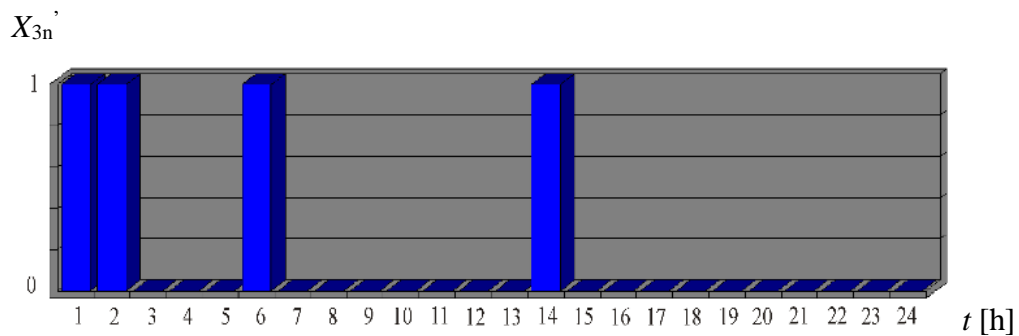
После првог корака процедуре оптимизације могуће је применити временске распореде одложивих оптерећења као на Сл. 5.26 – 5.28, при чему променљиве $X_{1n}'(i)$, $X_{2n}'(i)$ и $X_{3n}'(i)$ имају вредности 0 или 1, за $i = 1, \dots, 24$.



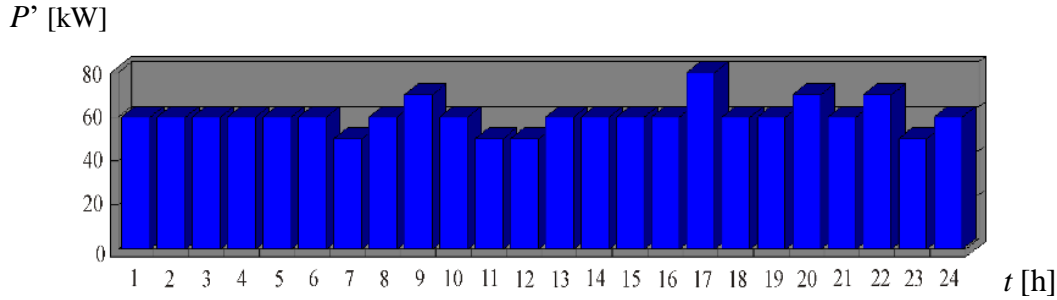
Сл. 5.26 Временски распоред укључивања првог одложивог оптерећења $X_{1n}'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације



Сл. 5.27 Временски распоред укључивања другог одложивог оптерећења $X_{2n}'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације



Сл. 5.28 Временски распоред укључивања трећег одложивог оптерећења $X_{3n}'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације

Сл. 5.29 Дневна крива потрошње $P'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације

Пре првог корака оптимизације постојала је разлика од 100 kW између максималне и минималне потрошње по сату, $P_{\max} = P(17) = 120$ kW и $P_{\min} = P(1) = P(24) = 20$ kW (Сл. 5.20). Након првог корака оптимизације ова разлика је 30 kW између $P'_{\max} = P'(17) = 80$ kW и $P'_{\min} = P'(7) = P'(11) = P'(12) = P'(23) = 50$ kW (Сл. 5.29). Фактор оптерећења је $LF' = 0.7552$, као што је дато у Таблици 5.4. Уштеде су 7.27% у поређењу са трошковима енергије пре примене оптимизације.

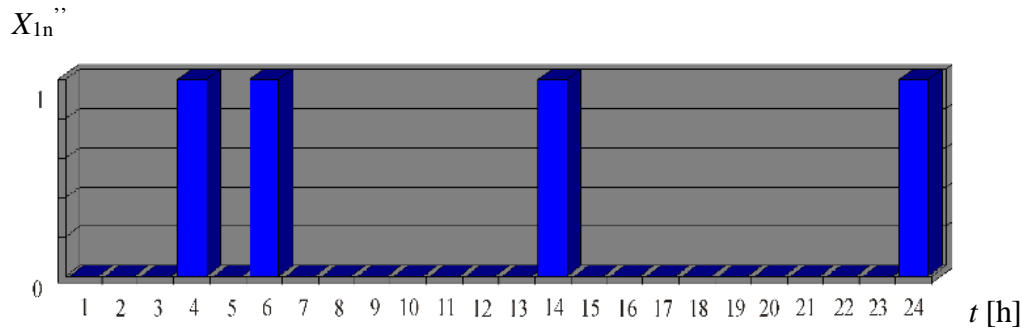
За дневну криву куповних цена [12], дату на Сл. 5.21, функција трошкова (5.21) је оптимизована у другом кораку, уз ограничење да је разлика максималне и минималне снаге остала иста. Фактор оптерећења је исти као у првом кораку и укупна потрошња по дану је такође иста.

Функција трошкова је дата следећим изразом:

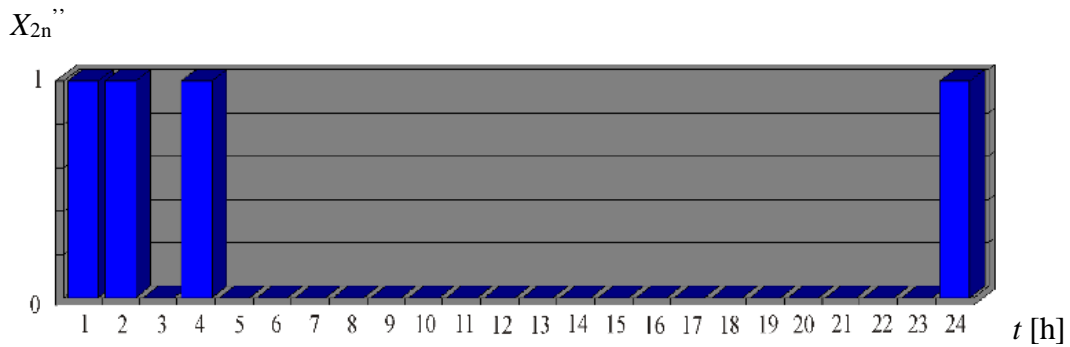
$$C = \min \sum_{i=1}^{24} \{P_{ND}(i) + P_{DL} \cdot [X_{1n}''(i) + X_{2n}''(i) + X_{3n}''(i)]\} \text{BP}(i), \quad (5.21)$$

за куповну цену $\text{BP}(i)$ у i -том интервалу.

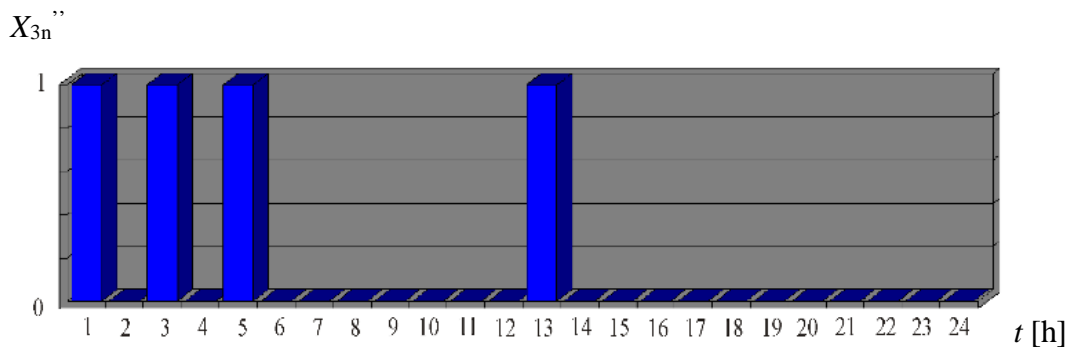
Временски распореди $X_{1n}''(i)$, $X_{2n}''(i)$ и $X_{3n}''(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације дати су на Сл. 5.30 – 5.32, а добијена дневна крива укупне потрошње је дата на Сл. 5.33. На овај начин уштеде су повећане са 7.27% на 8.02%. Параметри потрошње пре првог, пре другог и после другог корака оптимизације приказани су у Таблици 5.5.



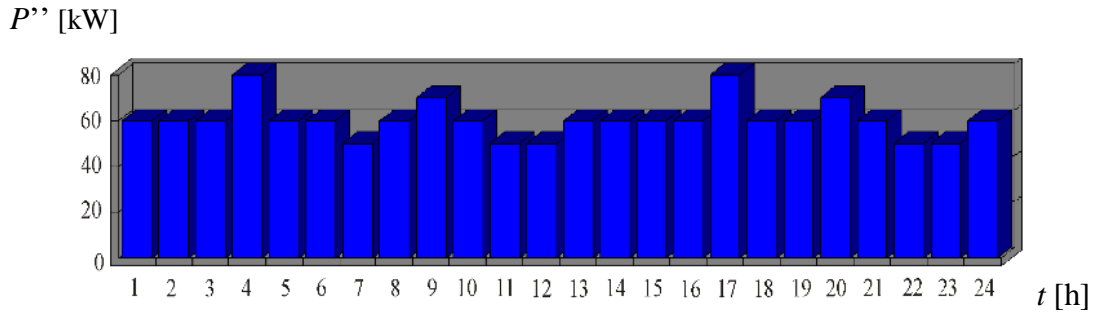
Сл. 5.30 Временски распоред укључивања првог одложивог оптерећења $X_{1n}''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације



Сл. 5.31 Временски распоред укључивања другог одложивог оптерећења $X_{2n}''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације



Сл. 5.32 Временски распоред укључивања трећег одложивог оптерећења $X_{3n}''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације

Сл. 5.33 Дневна крива потрошње $P''(i)$

за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 20$ kW

Таблица 5.5 Параметри потрошње пре првог корака, пре другог корака и после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 20$ kW

Параметар	Вредност пре првог корака оптимизације	Вредност пре другог корака оптимизације	Вредност после другог корака оптимизације
P_{\max} [kW]	120	80	80
P_{\min} [kW]	20	50	50
P_{avg} [kW]	60.4167	60.4167	60.4167
$LF = P_{\text{avg}} / P_{\max}$	0.5035	0.7552	0.7552
Утрошак енергије [kWh/дан]	1450	1450	1450
Трошкови за електричну енергију у току дана [€]	91.1576	84.5314	83.8502
Уштеда трошкова за електричну енергију [%]	-	7.27	8.02

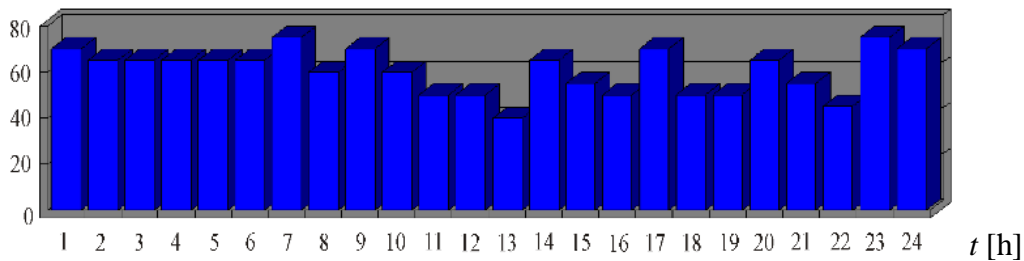
Поступак оптимизације у претходном примеру је урађен за три одложива оптерећења $P_{DL} = 20$ kW. Међутим, веће уштеде се могу постићи ако су одложива оптерећења већих снага, нпр. за оптерећења од 25 kW. У том случају $P_{\max} = 75$ kW и $P_{\min} = 40$ kW су ограничења добијена после првог корака оптимизације, док се фактор оптерећења повећао на $LF = 0.8056$, као што је приказано у Таблици 5.6.

После другог корака оптимизације за одложива оптерећења од 25 kW уштеда трошкова је 9.62%, као што је дато у Таблици 5.6, за куповне цене дате на Сл. 5.21. Резултујућа дневна крива потрошње дата је на Сл. 5.34.

Таблица 5.6 Параметри потрошње пре првог корака, пре другог корака и после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 25 \text{ kW}$

Параметар	Вредност пре првог корака оптимизације	Вредност пре другог корака оптимизације	Вредност после другог корака оптимизације
P_{\max} [kW]	120	75	75
P_{\min} [kW]	20	40	40
P_{avg} [kW]	60.4167	60.4167	60.4167
$LF = P_{\text{avg}} / P_{\max}$	0.5035	0.8056	0.8056
Утрошак енергије [kWh/дан]	1450	1450	1450
Трошкови за електричну енергију у току дана [€]	91.1576	84.38685	82.38785
Уштеда трошкова за електричну енергију [%]	-	7.43	9.62

P''' [kW]



Сл. 5.34 Дневна крива потрошње $P'''(i)$

за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 25 \text{ kW}$

Предложеном процедуром оптимизације у два корака добија се оптимизирана дневна крива потрошње, као и максималне уштеде уз највећи фактор оптерећења. У случају да је на располагању већи број одложивих оптерећења и веће укупне снаге, овај поступак обезбеђује већи фактор оптерећења и веће уштеде.

Литература за Главу 5

- [1] “Цене и тарифе”, Агенција за енергетику Републике Србије. [Online]. Доступно на: <https://www.aers.rs/FILES/Prezentacije/2012-12-28%20Prezentacija%20za%20EPS%20-%20Cene%20i%20tarife%20Tanic.pdf> [Приступљено 04.12.2022.]
- [2] “Tarifni sistem za obračun električne energije za tarifne kupce”, Elektrodistribucija. [Online]. Доступно на: https://elektrodistribucija.rs/propisi/tarifni_sistem.pdf [Приступљено 05.12.2022.]
- [3] Д. Котур, “Оптимално просторно и временско управљање потрошњом у електроенергетском систему са високим степеном пенетрације обновљивих извора енергије”, докторска дисертација, Електротехнички факултет у Београду, јули 2020.
- [4] “Recovery Act: Time Based Rate Programs,” SmartGrid.gov. [Online]. Доступно на: https://www.smartgrid.gov/recovery_act/time_based_rate_programs.html [Приступљено 04.12.2022.]
- [5] J. H. Broehl, W. R. Huss, J. C. Skelton, R. W. Sullivan, D. R. Limaye, B. D. Sloane, T. D. Davis, R. P. Blevins, “Demand-Side Management, Volume 3: Technology Alternatives and Market Implementation Methods,” Electric Power Research Institute, EPRI-EA/EM-3597-Vol.3, Research project 2381-4, 1984.
- [6] “SEE Power EXchange,” Adex. [Online]. Доступно на: <https://seepex-spot.rs/day-ahead-auction> [Приступљено 16.02.2023.]
- [7] L. Y. Seng, P. Taylor, “Innovative Application of Demand Side Management to Power Systems,” *Proceedings of the First International Conference on Industrial and Information Systems*, Sri Lanka, pp. 185-189, 2006.
- [8] M. M. Salama, E. M. Saied, H. M. Mahmoud, H. A. Abdelhadi, “Residential loads and Application of Demand Side Management (DSM) Techniques,” *Conference of Saudi Arabia Grid 2013 (SASG)*, Geddah, Saudi Arabia, pp. 1-7, 2013.
- [9] H. A. Attia, “Mathematical formulation of the Demand Side Management (DSM) problem and its optimal solution,” *Proceedings of 14th International Middle East Power Systems Conference MEPCON'10*, Paper ID 314, Cairo, Egypt, pp. 953-959, 2010.
- [10] D. Javor, A. Janjić, "Using Optimization Tools for Solving Demand Side Management Problems," *2nd Virtual International Conference on Science, Technology and Management in*

Energy eNergetics 2016, Research and Development Center “Alfatec” Niš, ISBN: 978-86-80616-01-8, pp. 83-88, Niš, Serbia, September 2016.

<https://energetics.cosrec.org/wp-content/uploads/2019/03/eNergetics-2016.pdf>

[11] “Lingo,” Lindo Systems Inc. [Online]. Доступно на: <https://www.lindo.com> [Приступљено 03.05.2016.]

[12] “HUPX ID market data,” Hungarian Power Exchange. [Online]. Доступно на: <https://hupx.hu/en> [Приступљено 08.01.2020.]

[13] D. Javor, A. Janjić: "Application of Demand Side Management Techniques in Successive Optimization Procedures," *Communications in Dependability and Quality Management*, DQM Research Center, Čačak, Serbia, ISSN: 1450-7196, vol. 19, no. 4, pp. 40-51, Čačak, Serbia, December 2016.

<http://www.dqmcenter.com/uploads/images/dokumenta/19%204/07%20Javor,%20Janjic.pdf>

[14] D. Javor, N. Raičević, "Two-Steps Procedure in Demand Side Management for Reducing Energy Costs," *19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA 2020*, CD Proc. of papers, East Sarajevo, Bosnia & Herzegovina, March 18-20, 2020, ISBN 978-1-7281-4774-1, INSPEC Accession No: 19534156, pp. 1-4, doi: [10.1109/INFOTEH48170.2020.9066311](https://doi.org/10.1109/INFOTEH48170.2020.9066311)

6

Вишекритеријумска оптимизација примене V2G технологије у микромрежи

- 6.1 Оптимизација трошкова микромреже за фиксне и варијабилне цене електричне енергије
- 6.2 Величина флоте електричних возила и снага фотонапонских панела у микромрежи као критеријуми оптимизације
- 6.3 Капацитет батерија електричних возила и снага пуњача као критеријуми оптимизације
- 6.4 Утицај амбијенталне температуре на трошкове пуњења батерија електричних возила
- 6.5 Вишекритеријумска оптимизација коришћења V2G технологије са становишта власника микромреже, агрегатора и главне мреже

6.1 Оптимизација трошкова микромреже за фиксне и варијабилне цене електричне енергије

У овом поглављу разматра се проблем минимизације трошкова енергије у микромрежи која садржи ветрогенераторе, соларне панеле и флоту електричних возила која се могу пунити или празнити, осим у временском интервалу када се возила користе за превоз [1]. Математички модели таквих проблема могу бити представљени циљном функцијом која се минимизира, подвргава ограничењима, а затим решава нумерички. За решавање проблема оптимизације могуће је користити рачунарске програме као што су: MATLAB, Yalmip, Excel Solver, Lingo [2] и други, у којима се могу изабрати различите оптимизационе методе и параметри.

Ако су доступни дневни дијаграми очекиване производње електричне енергије фотонапонским панелима и ветрогенераторима, као и расположивост и капацитет батерија за складиштење енергије у микромрежи, трошкови се могу минимизирати и израчунати оптимални капацитети ових ресурса и њихова исплативост. Могу се одредити и оптимални временски распореди укључивања/искључивања батерија и пуњења/пражњења електричних возила, ако су познате варијабилне цене електричне енергије у току дана. Употреба батерија електричних возила за складиштење електричне енергије, посебно у случају великог броја возила и дугих временских интервала расположивости за пуњење или пражњење док су возила прикључена на пуњаче на паркингу или у гаражама, пружа могућности за оптимизацију трошкова електричне енергије у микромрежи. Могуће је задовољити и друге циљеве, као што су смањење трошкова улагања у електроенергетски систем, повећање ефикасности коришћења енергије, смањење емисија штетних гасова, итд.

У изабраном примеру микромреже (Сл. 6.1) разматрани су следећи ресурси:

- ветрогенератори вршне снаге 33 kW чији је дневни дијаграм очекиване производње енергије процењен на основу брзине ветра мерене 2011. године у Банату, срачунат WASP софтвером (енг. Wind Atlas Analysis and Application Program) [3], за сатне вредности и одређену висину турбине [4];
- фотонапонски панели вршне снаге 33 kW чији је дневни дијаграм очекиване производње енергије процењен на основу сунчевог зрачења и температуре

воздуха измерених у Јужном Банату, у општини Ковин, на локацији Баваниште, за просечан дан у 2009. години [5];

- станица за пуњење/пражњење електричних возила која има n_V пуњача снаге $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$;
- флота са n_V возила истог типа чије батерије имају појединачне капацитете $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$.



Сл. 6.1. Шема микромреже

Познати су дневни дијаграми куповних цена електричне енергије $BP(i)$ и продајних цена $SP(i)$ у сатним интервалима $i = 1, \dots, 24$ на тржишту електричне енергије [6].

Циљна функција C_{COST} , коју треба минимизирати, представља збир трошкова за енергију преузету из електричне мреже током једног дана:

$$C_{COST} = \min \left\{ \sum_{i=1}^{24} P_{ch} \cdot n_V \cdot [BP(i) \cdot x_B(i) - SP(i) \cdot x_S(i)] - SP(i) \cdot n_{PV} \cdot P_{PV}(i) - SP(i) \cdot n_W \cdot P_W(i) + BP(i) \cdot P_L(i) \right\}, \quad (6.1)$$

где је n_W број ветрогенератора снаге P_W , а n_{PV} број фотонапонских панела снаге P_{PV} .

Променљива $x_B(i)$ има вредност 1 ако се енергија купује из мреже у i - том сату, вредност 0 ако се не купује, док $x_S(i)$ има вредност 1 ако се енергија продаје главној мрежи за напајање у i - том сату, а 0 ако се не продаје. Уместо ове две променљиве, може се дефинисати једна променљива $x(i)$ која има вредност 1 када $x_B(i)$ има вредност 1, вредност -1 када је $x_S(i)$ једнако 1, а вредност 0 ако било која од ове две променљиве има вредност 0 (када је возило прикључено на пуњач, али се нити пуни нити празни, или се вози тј. није прикључено на пуњач).

Дубина пражњења (енг. Depth of Discharge – DOD) батерије је обично 80% капацитета батерије. Стање напуњености батерије $SOC(i)$ електричног возила мора бити у опсегу од 20% до 100%, па се дефинише следеће ограничење:

$$20 \leq SOC(i) \leq 100, \quad i = 1, \dots, 24. \quad (6.2)$$

Стање напуњености батерије у процентима се одређује дискретно, за сваки временски интервал $i = 1, \dots, 24$, на основу стања $SOC(i-1)$ за претходни интервал, процента пуњења/пражњења батерије по сату $P_{ch} \Delta T / en_{EV}$ и променљиве $x(i-1)$ која означава пуњење или пражњење у претходном интервалу:

$$SOC(i) = SOC(i-1) + x(i-1) P_{ch} \Delta T / en_{EV} \quad (6.3)$$

За изабрани пример, на почетку временског интервала од 6 сати када се возила користе, батерије су напуњене на $SOC_0 = 100\%$, а на крају интервала коришћења возила

стање напуњености батерија износи 67%. Разматрана је флота возила Nissan Leaf (једно од најпродаванијих електричних возила које припада Б-сегменту, односно малим аутомобилима, и редовно се серијски производи), која са напуњеном батеријом могу да пређу од 120 до 250 km са капацитетом батерије од 30 kWh (модел из 2016. године). Ако се претпостави да возило може да пређе 167 km са 100% напуњеном батеријом у нормалном режиму коришћења и да свако возило прелази укупно 55 km за 6 сати вожње у временском интервалу који почиње у 10 часова ујутру и завршава се у 16 часова поподне, SOC просечно опада за 5.5% по сату када се возило користи. У преосталих 18 сати возила су доступна на станици за пуњење/пражњење. Када је возило прикључено на пуњач, стопа пуњења/пражњења је 11% на сат, јер је $P_{ch}/en_{EV} = 0.11$. Усвојен је исти коефицијент ефикасности ($\eta = 1$) и за пуњење и за пражњење батерије.

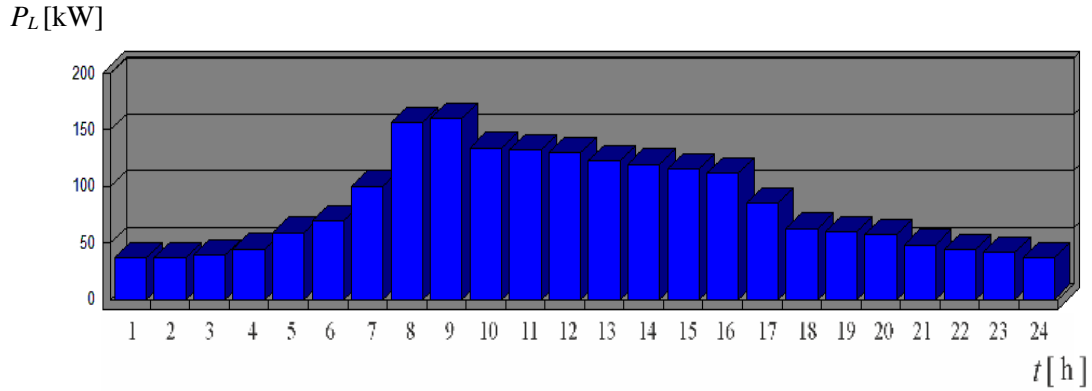
У тачки спајања микромреже са главном мрежом (енг. Point of Common Coupling – PCC) обезбеђен је двосмерни ток снаге према главној мрежи (Сл. 6.1), тако да је снага која се узима из мреже P_G . Може постојати и систем за складиштење енергије снаге P_S , али се овде претпоставља да је $P_S = 0$, односно да су на располагању само батерије електричних возила у време када су она на станици за пуњење.

Биланс снага је дат изразом:

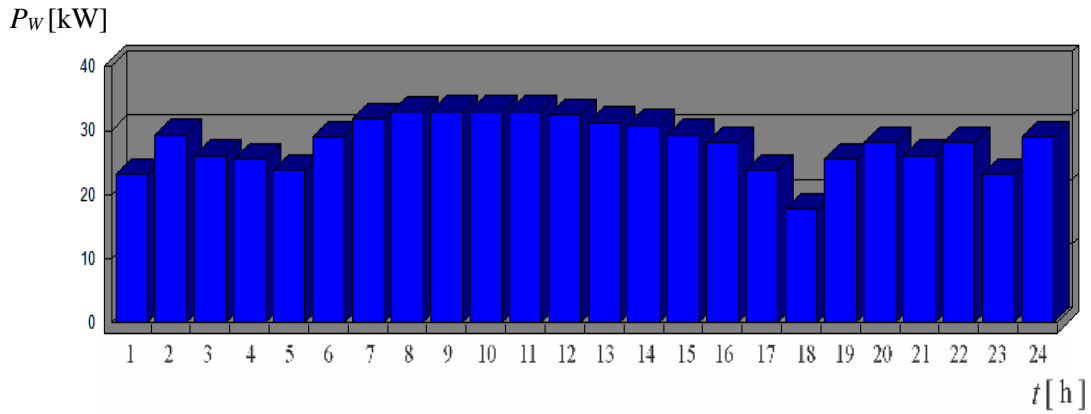
$$P_G(i) = P_L(i) - P_{PV}(i) - P_W(i) + P_{EV}(i), \quad \text{за } i = 1, \dots, 24, \quad (6.4)$$

где је $P_{EV}(i)$ снага коју у i – том интервалу користе пуњачи на станици за пуњење или пражњење батерија електричних возила. Ова снага је негативна кад се енергија продаје мрежи, а позитивна кад се купује од мреже. Додатно ограничење може бити максимална вредност снаге која се може преносити водовима, као и максимална снага P_{Gmax} која се може захтевати од мреже за напајање.

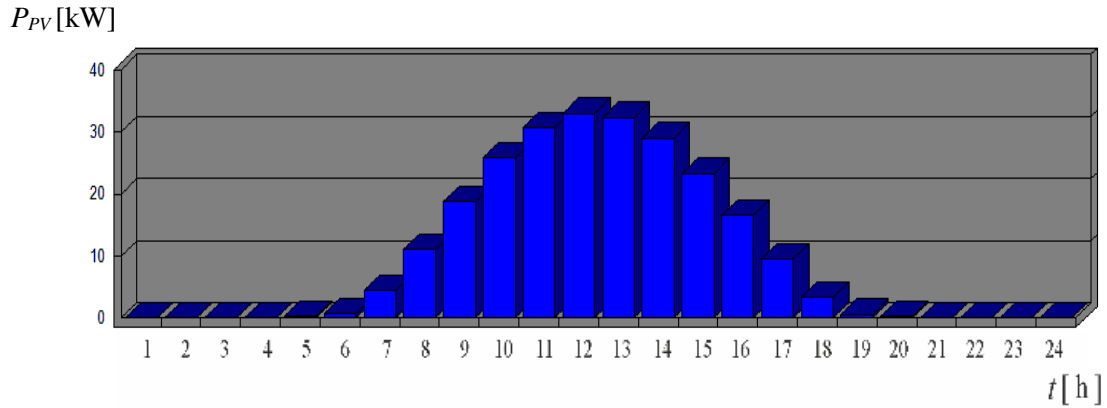
На Сл. 6.2 је приказан пример дневног дијаграма [7], [8] неодложног оптерећења управне зграде дистрибутивног предузећа $P_L(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$. Дневни дијаграм процењене производње електричне енергије у микромрежи овог предузећа помоћу ветрогенератора вршне снаге $P_{Wmax} = 33 \text{ kW}$ дат је на Сл. 6.3, а помоћу фотопанела вршне снаге $P_{PVmax} = 33 \text{ kW}$ на Сл. 6.4.



Сл. 6.2 Дневни дијаграм неодложног оптерећења $P_L(i)$, за $i = 1, \dots, 24$



Сл. 6.3 Дневни дијаграм производње ветрогенератора $P_w(i)$, за $i = 1, \dots, 24$



Сл. 6.4 Дневни дијаграм производње фотонапонских панела $P_{pv}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$

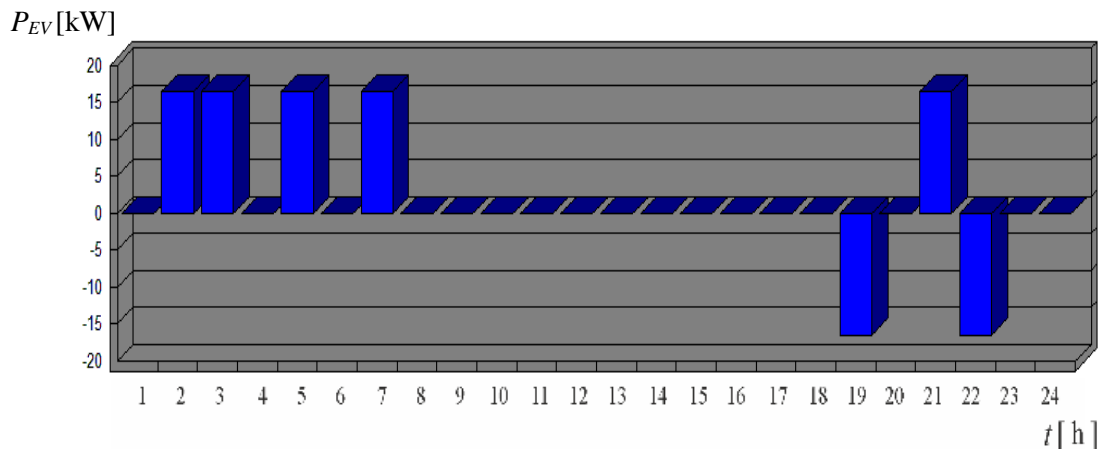
За сваки од наредна 4 изабрана сценарија претпоставља се да власник микромреже (предузеће) има $n_V = 5$ електричних возила у флоти која су доступна за пуњење/пражњење на станици, односно за коришћење њихових батерија, у интервалу од 16 часова поподне до 10 часова следећег дана. Осталих 6 сати возила нису доступна за пуњење/пражњење на станици, а за вожњу троше енергију својих батерија.

Проблем је анализиран: а) за вишу и нижу тарифу куповних цена електричне енергије и фиксну продајну цену, за Сценарио 1 и 2; б) за варијабилне куповне цене електричне енергије и варијабилне продајне цене које су 75% од куповних цена, за Сценарио 3 и 4.

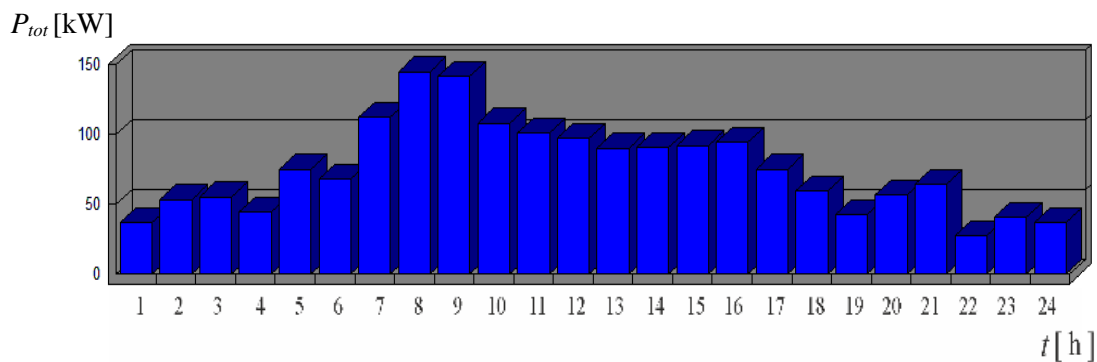
а) За микромрежу у Савони, Италија [9], куповна цена електричне енергије по нижој тарифи је 0.2 €/kWh од 19 часова увече до 9 часова ујутру, а по вишој тарифи 0.26 €/kWh од 9 часова ујутру до 19 часова увече, док је продајна цена електричне енергије према главној мрежи 0.15 €/kWh.

Сценарио 1: Фотопанели у микромрежи раде, а ветрогенератори не раде. Минимизацијом функције трошкова (6.1) у програму Lingo, уз испуњене захтеве (6.2) и (6.3), добија се дневни распоред пуњења/пражњења флоте електричних возила као на Сл. 6.5. Дијаграм укупне потрошње микромреже приказан је на Сл. 6.6.

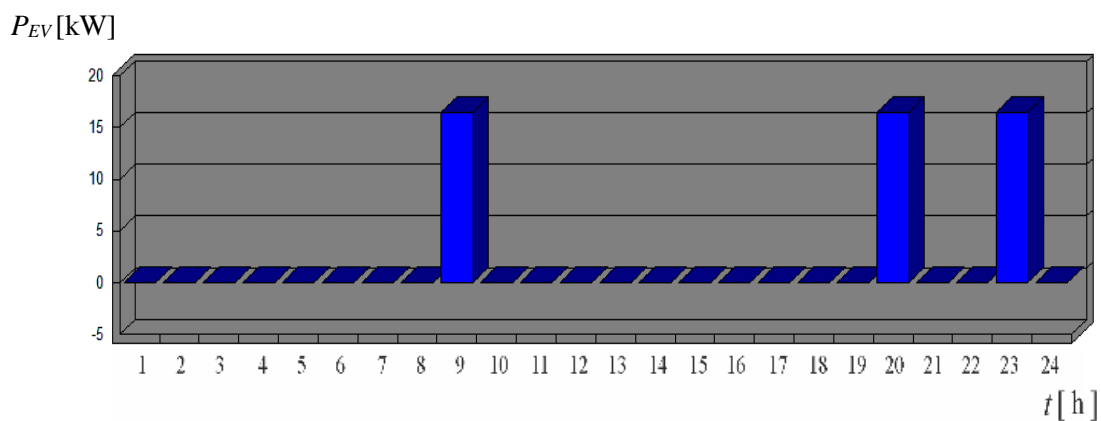
Сценарио 2: Ветрогенератори раде, а фотопанели не раде. Минимизацијом функције трошкова (6.1) у програму Lingo, уз испуњене захтеве (6.2) и (6.3), добија се дневни распоред пуњења/пражњења флоте електричних возила као на Сл. 6.7. Дијаграм укупне потрошње приказан је на Сл. 6.8. Трошкови су за 14.3% нижи него за Сценарио 1.



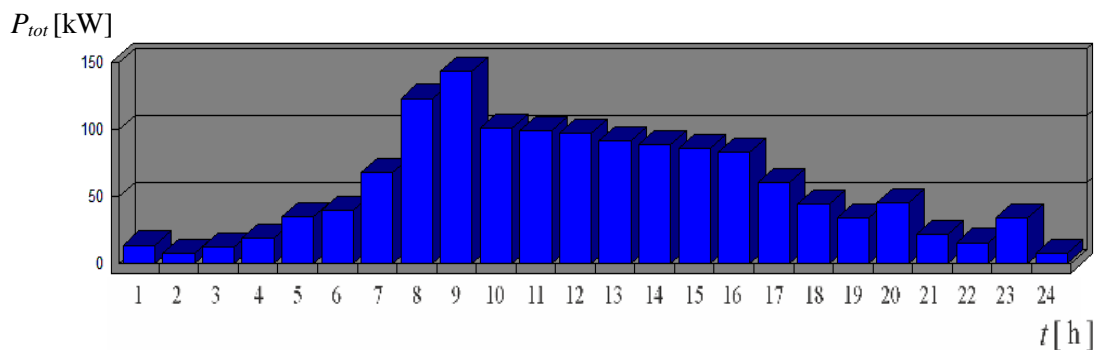
Сл. 6.5 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33$ kW, $P_W = 0$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене



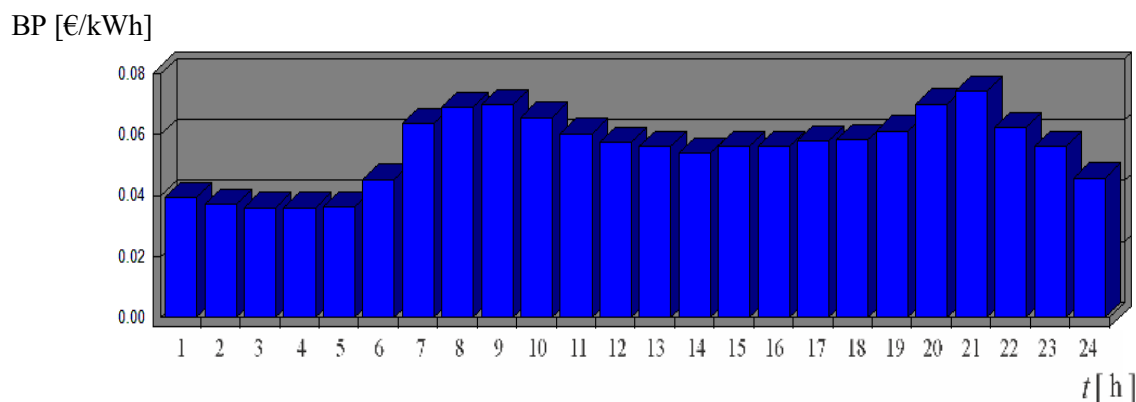
Сл. 6.6 Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33$ kW, $P_W = 0$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене



Сл. 6.7 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33$ kW, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене



Сл. 6.8 Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33$ kW, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене

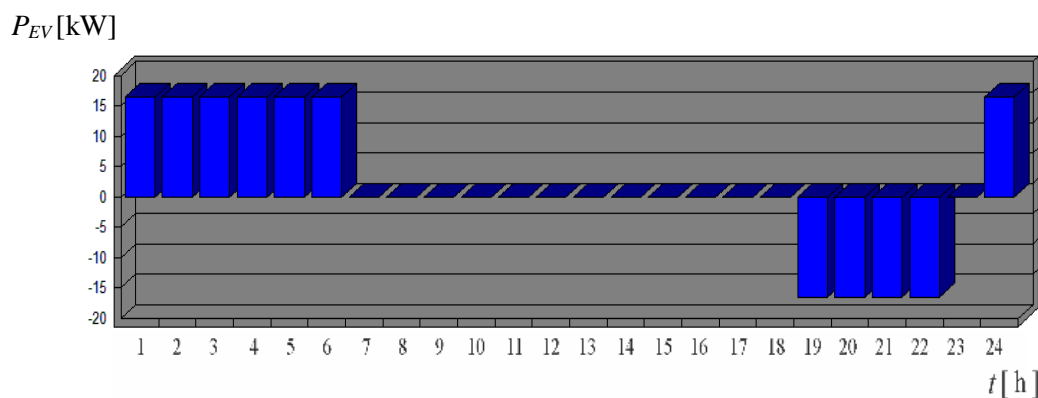


Сл. 6.9 Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за дан 17.04.2019. године

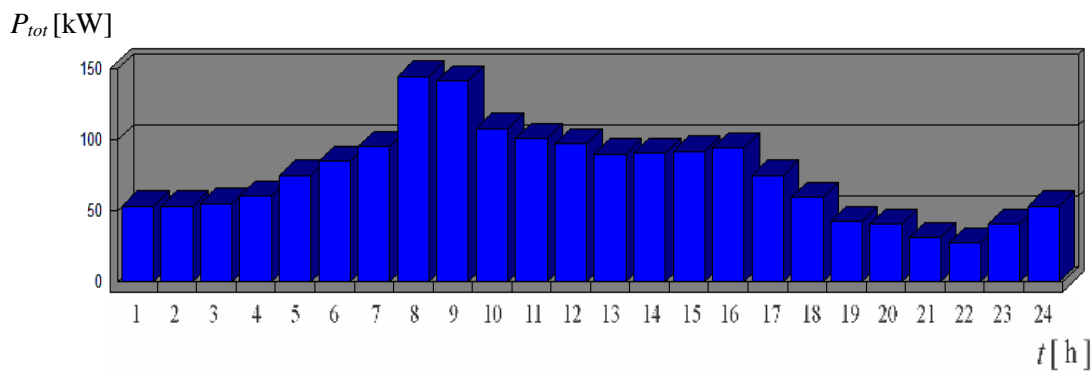
б) Дијаграм варијабилних куповних цена $BP(i)$ дат је за 17.04.2019. године [6] на Сл. 6.9, а варијабилне продајне цене су $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$.

Сценарио 3: Фотопанели у микромрежи раде, а ветрогенератори не раде. Минимизацијом функције трошкова (6.1) у програму Lingo, уз испуњене захтеве (6.2) и (6.3), добија се дневни распоред пуњења/пражњења флоте електричних возила као на Сл. 6.10. Дијаграм укупне потрошње микромреже приказан је на Сл. 6.11.

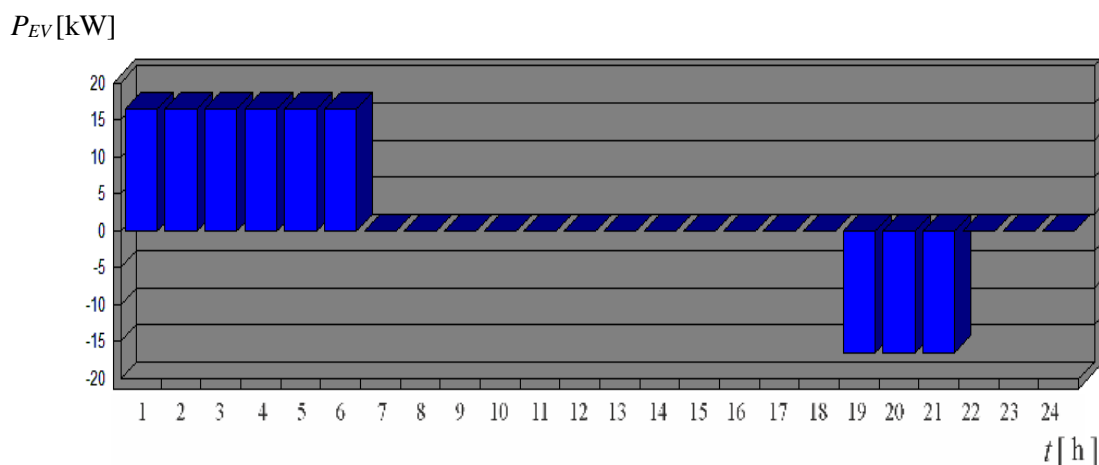
Сценарио 4: Ветрогенератори раде, а фотопанели не раде. Минимизацијом функције трошкова (6.1) у програму Lingo, уз испуњене захтеве (6.2) и (6.3), добија се дневни распоред пуњења/пражњења флоте електричних возила као на Сл. 6.12. Дијаграм укупне потрошње микромреже приказан је на Сл. 6.13. Трошкови су за 16.36% мањи него за Сценарио 3.



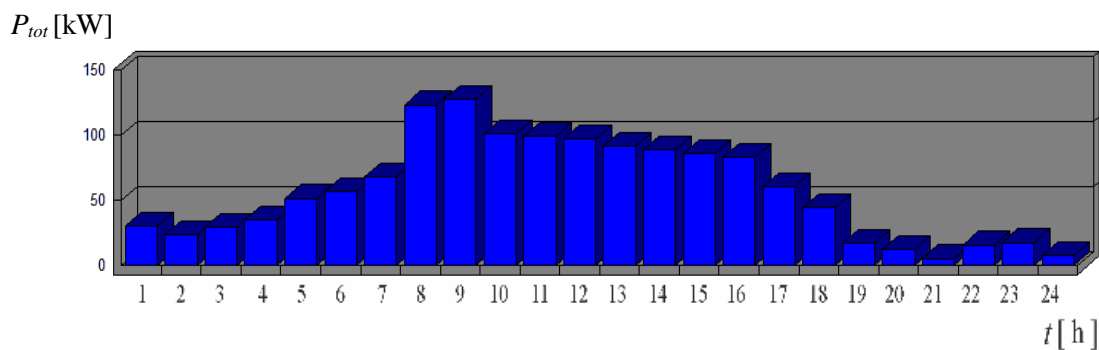
Сл. 6.10 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33$ kW, $P_W = 0$, BP са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$



Сл. 6.11 Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33$ kW, $P_W = 0$, ВР са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$



Сл. 6.12 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33$ kW, ВР са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$

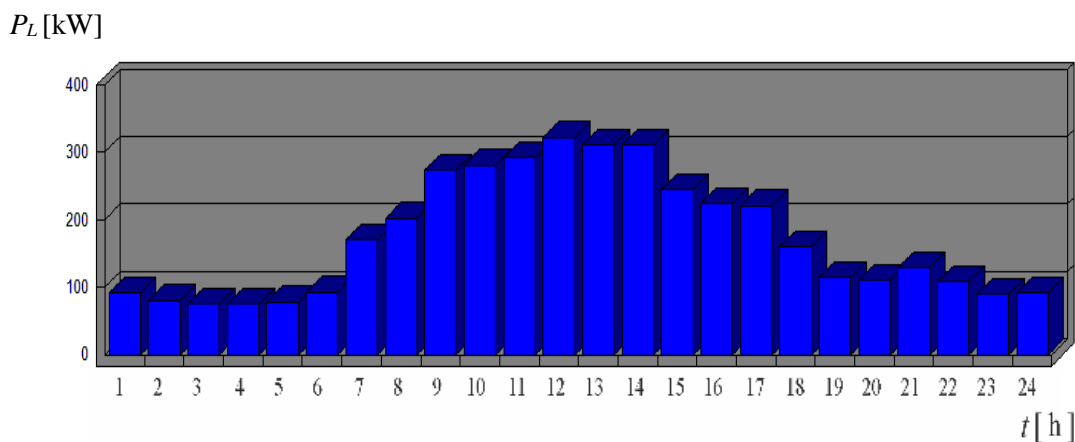


Сл. 6.13 Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33$ kW, ВР са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$

На основу резултата, може се закључити да варијабилне сатне цене електричне енергије омогућавају већи проценат уштеде. Треба приметити да је дијаграм снаге ветрогенератора погоднији и због повољнијег временског распореда и због равномерније криве производње него за фотонапонске панеле, али су трошкови улагања у том случају знатно већи. Са становишта микромрежа на територији Србије је повољније улагати у фотонапонске панеле него у ветрогенераторе, како због мањих инвестиционих трошкова, тако и због слабије расположивости енергије ветра која није довољно исплатљива на већини локација.

6.2 Величина флоте електричних возила и снага фотонапонских панела у микромрежи као критеријуми оптимизације

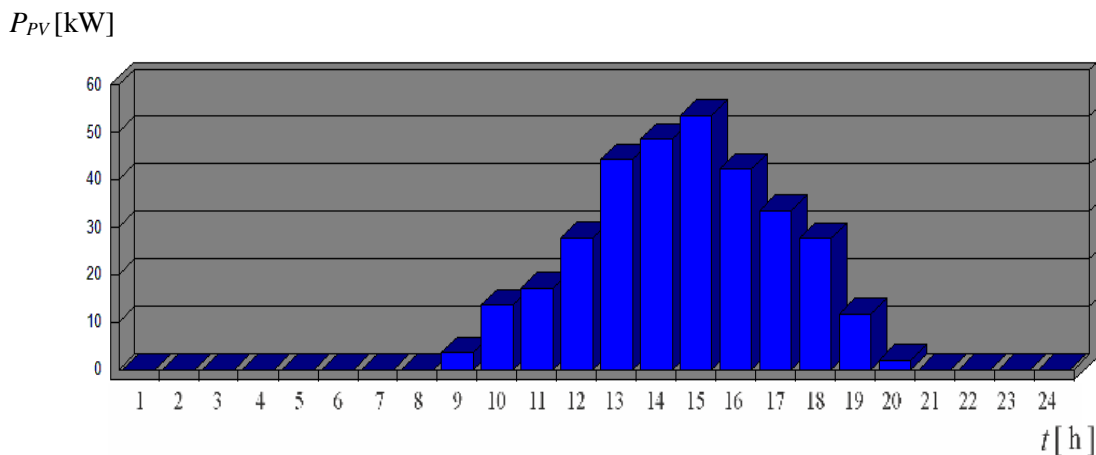
У овом поглављу анализирана је искључиво производња електричне енергије у микромрежи фотонапонским панелима за различите величине флоте електричних возила [10]. У разматраним сценаријима је коришћена експериментално измерена дневна крива неодложног оптерећења за Savona Campus Smart Polygeneration Microgrid [9], као на Сл. 6.14.



Сл. 6.14 Дневни дијаграм неодложног оптерећења $P_L(i)$, за $i = 1, \dots, 24$

За фотонапонске панеле ($n_{PV} = 1$) у микромрежи у Савони, Италија, измерена је дневна крива производње електричне енергије и усредњена на једносатне интервале [9]. У разматраним сценаријима анализирани су случајеви када нема производње фотонапонским

панелима ($n_{PV} = 0$), за два пута већу ($n_{PV} = 2$) и за четири пута већу производњу електричне енергије ($n_{PV} = 4$). На Сл. 6.15 је дата дневна крива за $n_{PV} = 1$.



Сл. 6.15 Дневни дијаграм производње фотонапонских панела $P_{PV}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_{PV} = 1$

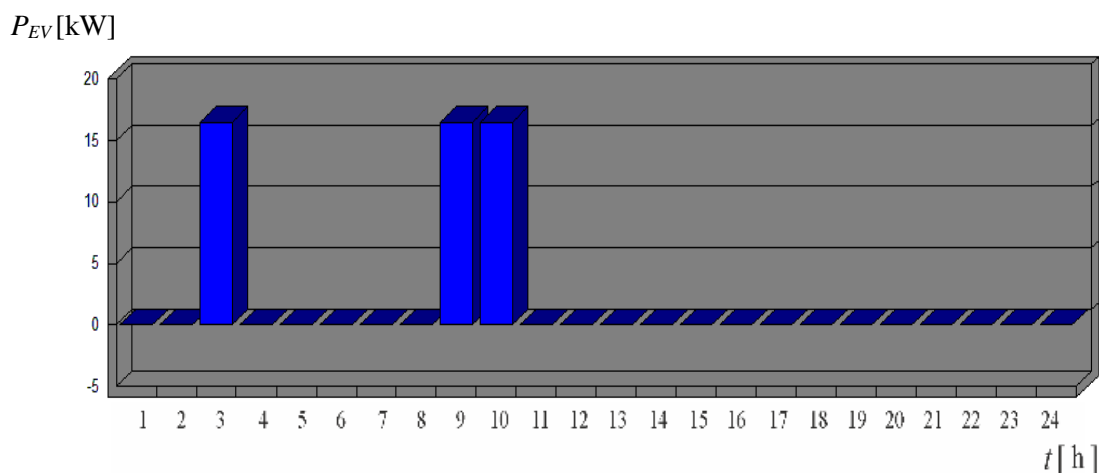
Куповна цена електричне енергије у Савони, Италија, по нижој тарифи је 0.2 €/kWh од 19 часова увече до 9 часова ујутру, а по вишој тарифи 0.26 €/kWh од 9 часова ујутру до 19 часова увече, док је продајна цена електричне енергије према главној мрежи 0.15 €/kWh, као што је дато у [9].

Број електричних возила у флоти је означен са n_V и у разматраним сценаријима је изабрано $n_V = 5$ или $n_V = 10$. Потребно је да се возила користе од 10 часова ујутру до 16 часова поподне (укупно 6 часова), а преостали део дана су возила на располагању за пуњење или пражњење батерија на станици (укупно 18 часова). Изабрана вредност за капацитет батерије електричних возила је $en_{EV} = 30$ kWh, а снага пуњача при пуњењу и пражњењу је $P_{ch} = 3.3$ kW. Претпоставка је да се SOC смањило са почетних 100% на 67% након 6 часова вожње и да је возило прешло око 55 km, ако је укупан домет возила око 167 km. Захтев је да се возило остави 100% напуњено пре следећег периода вожње.

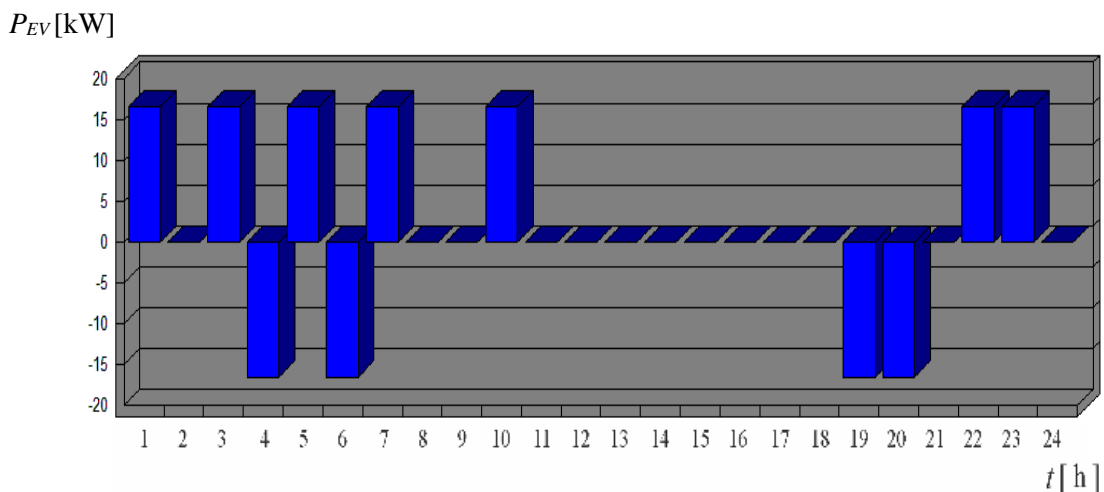
Како је $P_{ch}/en_{EV} = 3.3 \text{ kW}/30 \text{ kWh} = 0.11$ односно 11% по сату, то значи да се SOC повећава/смањује при пуњењу/пражњењу за 11% у временском интервалу од једног сата, а ово важи и за целу флоту електричних возила. Према томе, у току 24-часовног периода

неопходно је три сата више за пуњење на станици у односу на број сати у којима се батерија користи за пражњење на станици.

У првој групи сценарија, за две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене, у микромрежи са флотом од $n_V = 5$ возила раде фотопанели: $n_{PV} = 2$ (**Сценарио 5**) и $n_{PV} = 4$ (**Сценарио 6**). Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 5 дат је на Сл. 6.16, а за Сценарио 6 на Сл. 6.17.



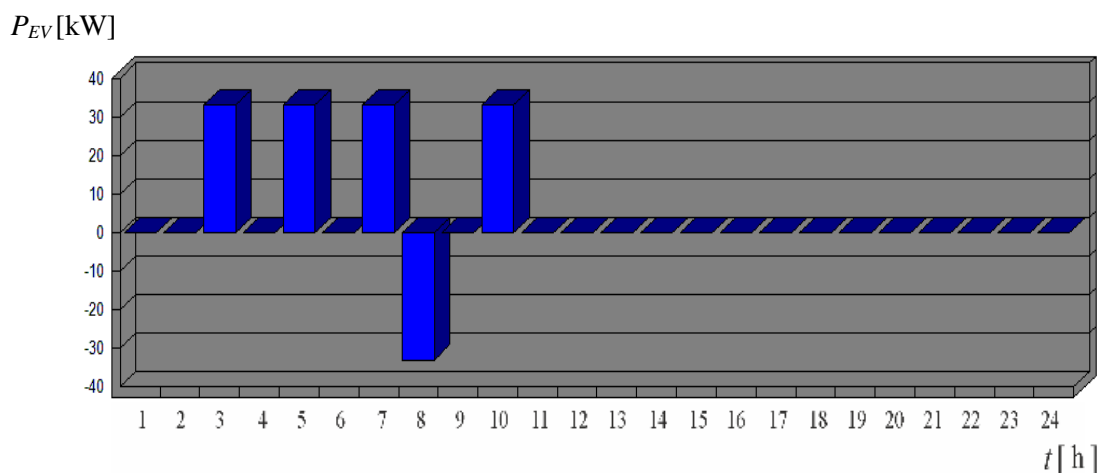
Сл. 6.16 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 2$, $n_V = 5$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене



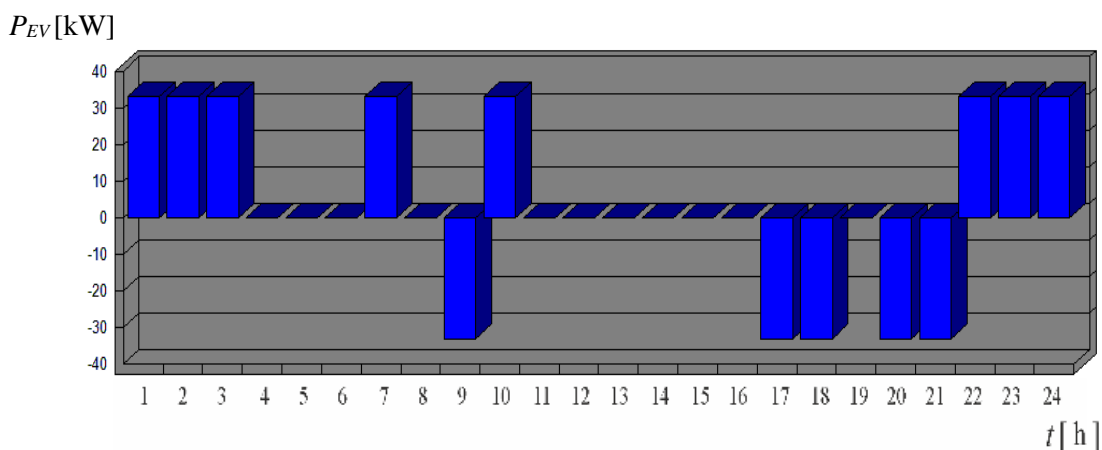
Сл. 6.17 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 4$, $n_V = 5$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене

У поређењу са сценаријем без фотонапонске производње ($n_{PV} = 0$), за $n_V = 5$, укупни трошкови за Сценарио 5 ($n_{PV} = 2$) су нижи за 9.86%, а за Сценарио 6 ($n_{PV} = 4$) су нижи за 19.72%.

У истој микромрежи, али са флотом од $n_V = 10$ возила раде фотопанели: $n_{PV} = 2$ (**Сценарио 7**) и $n_{PV} = 4$ (**Сценарио 8**). Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 7 дат је на Сл. 6.18, а за Сценарио 8 на Сл. 6.19.



Сл. 6.18 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 2$, $n_V = 10$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене

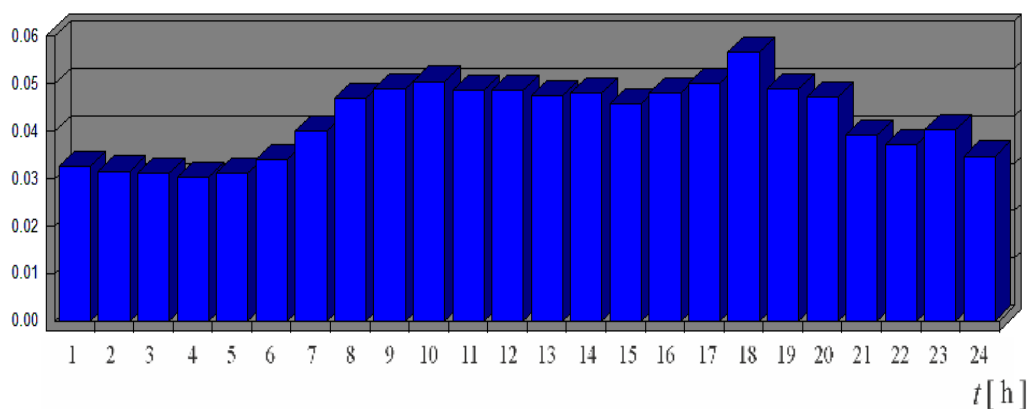


Сл. 6.19 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 4$, $n_V = 10$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене

У поређењу са сценаријем за $n_V = 10$, а без фотонапонске производње ($n_{PV} = 0$), укупни трошкови за Сценарио 7 ($n_{PV} = 2$) су нижи за 9.76%, а за Сценарио 8 ($n_{PV} = 4$) су нижи за 19.53%.

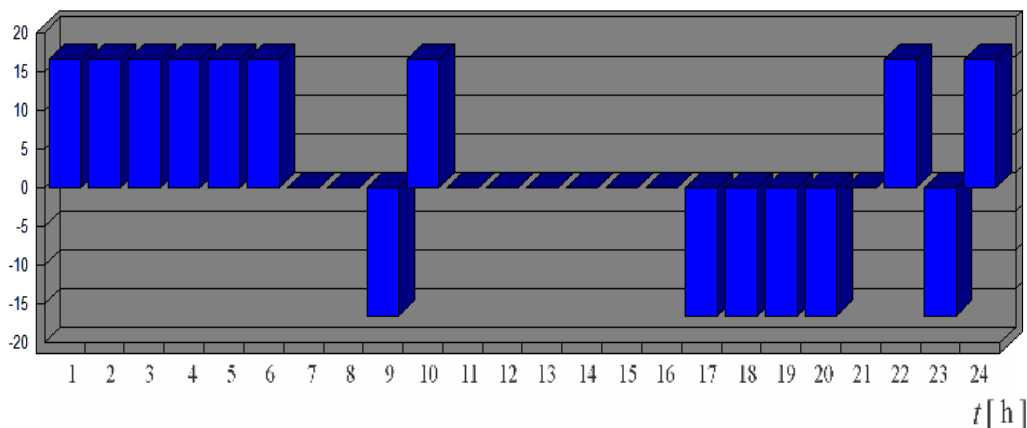
У другој групи сценарија, за варијабилне тржишне куповне цене $BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, [8] дате на Сл. 6.20 и продајне цене које су 75% куповних у истим временским интервалима, тако да је $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, у микромрежи са флотом од $n_V = 5$ возила раде фотопанели, $n_{PV} = 2$ (**Сценарио 9**), а са флотом од $n_V = 10$ возила, $n_{PV} = 4$ (**Сценарио 10**). Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 9 дат је на Сл. 6.21, а за Сценарио 10 на Сл. 6.22.

BP [€/kWh]

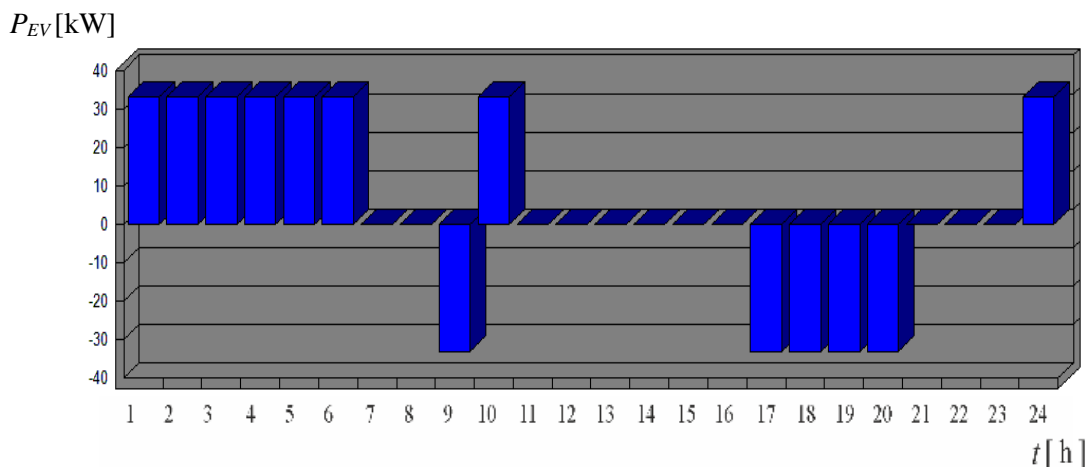


Сл. 6.20 Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$

P_{EV} [kW]



Сл. 6.21 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 2$, $n_V = 5$, за варијабилне цене $BP(i)$ и $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$



Сл. 6.22 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 4$, $n_V = 10$, за варијабилне цене $BP(i)$ и $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$

За $n_{PV} = 2$ и $n_V = 5$, у поређењу са сценаријем без фотонапонске производње, укупни трошкови енергије су нижи за 14.4%, док су за $n_{PV} = 4$ и $n_V = 10$ нижи за 28.8%.

6.3 Капацитет батерија електричних возила и снага пуњача као критеријуми оптимизације

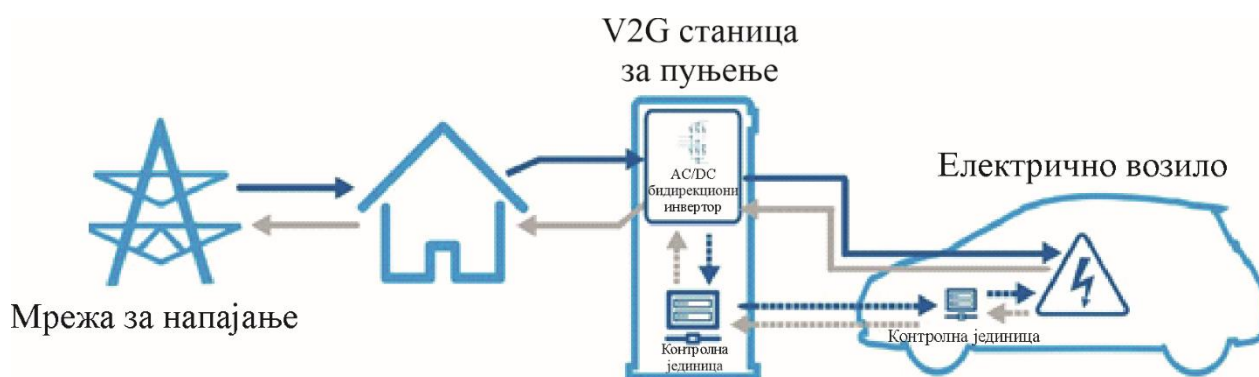
У овом поглављу разматрани су различити капацитети батерија електричних возила компаније и снаге пуњача на станици за пуњење [11]. Да би се батерија електричног возила напунила од минималног до максималног капацитета, време пуњења може бити од петнаестак минута до чак двадесет сати. Време пуњења зависи од капацитета батерије, снаге пуњача у возилу, типа пуњача на станици за пуњење, амбијенталне температуре и других фактора. Батерије електричних возила имају различите капацитете, као и различите захтеве за пуњењем зависно од карактеристика батерије, услова коришћења и експлоатације.

Постоји и захтев да се електрична возила пуне у најкраћем могућем року на најпогоднијим локацијама, па би паметне мреже требало да обезбеде такво пуњење без нарушавања своје функционалности и без проблема са квалитетом електричне енергије. Ово уводи проблем тражења оптималног решења за рутирање и заказивање пуњења електричних возила [9], [12-16].

Многа електрична возила имају V2L (енг. vehicle-to-load) технологију, нпр. Hyundai Ioniq 5, KIA EV6, KIA Niro EV, BYD Atto 3, MG ZS EV, Genesis GV60, GV70, G80, и друга.

Електрична возила која имају V2G (енг. vehicle-to-grid) технологију су: Nissan e-NV200, Nissan LEAF, Mitsubishi Outlander PHEV, Mitsubishi Eclipse Cross PHEV, Nissan Leaf ZE1, Hyundai Ioniq 5, KIA EV6, BYD Atto 3, BYD Han EV, Ford F-150 Lightning, MG ZS EV (2022), VW ID модели.

Шема употребе V2G технологије дата је на Сл. 6.23, а на Сл. 6.24 приказан је брзи пуњач са V2G технологијом.



Сл. 6.23 Шема употребе V2G технологије



Сл. 6.24 Брзи пуњач са V2G технологијом

Што је већи капацитет батерије, потребно је више времена за пуњење. Када је *SOC* између 20 и 80% батерије се много брже пуне него када је *SOC* изван овог опсега. На нижим температурама пуњење електричних возила траје дуже.

Постоје два типа пуњења: нормално пуњење наизменичном струјом и брзо пуњење једносмерном струјом [17].

Нормално пуњење наизменичном струјом траје од неколико сати до чак двадесет сати, а може се обављати снагом до 22 kW, код куће или на јавним станицама. Пуњач у возилу претвара наизменичну струју из станице за пуњење у једносмерну струју за пуњење високонапонске батерије електричног возила. Приказ утичника и одговарајући типови утикача каблова дати су на Сл. 6.25.

Брзо пуњење једносмерном струјом траје мање од сат времена, а може се обављати само на јавним станицама. У случају пуњења једносмерном струјом заобилази се пуњач у возилу, а пуњење се обавља снагом од 22 kW до 350 kW. Приказ утичника и одговарајући типови утикача каблова за брзо пуњење дати су на Сл. 6.26.



Сл. 6.25 Тип утикача кабла и утичника

а) Тип 1 Yazaki – SAE J1772; б) Тип 2 Mennekes – IEC 62196



а)



б)

Сл. 6.26 Тип утикача кабла и утичница

а) CHAdeMO; б) Combined Charging System (CCS Combo 2)

У Таблици 6.1 дати су модели најпродаванијих електричних возила чији је капацитет батерија око 30 kWh. Параметри за нормално пуњење различитим типовима пуњача приказани су за Тип 1 Yazaki – SAE J1772 за стандардни пуњач снаге 3.3 kW и опциони пуњач снаге 6.6 kW за Nissan Leaf са батеријом 30 kWh (за пуњење од 0 до 100%) у Таблици 6.2, а за брзо пуњење за CHAdeMO (од 10 до 80%) у Таблици 6.3 [18].

Постоје две опције за пуњење електричних возила у домаћинствима: обична кућна утичница или зидна кутија. Снага зидних кутија инсталираних у приватним домаћинствима је од 2.3 до 22 kW.

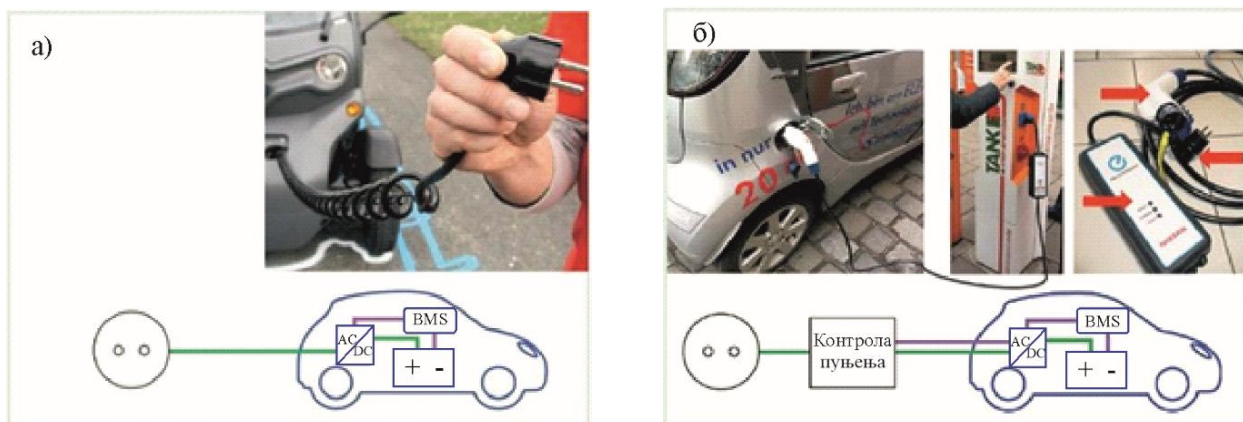
Зидне кутије су тачке пуњења електричних возила и монтирају се на зидовима кућних гаража, на паркиралиштима компанија и у јавним гаражама. Могу бити и самостојеће тамо где монтирање на зиду није погодно и где се пуни већи број аутомобила. Електрична возила се пуне знатно брже на зидним кутијама него на обичној утичници на зиду, али су потребни различити каблови за прикључивање.

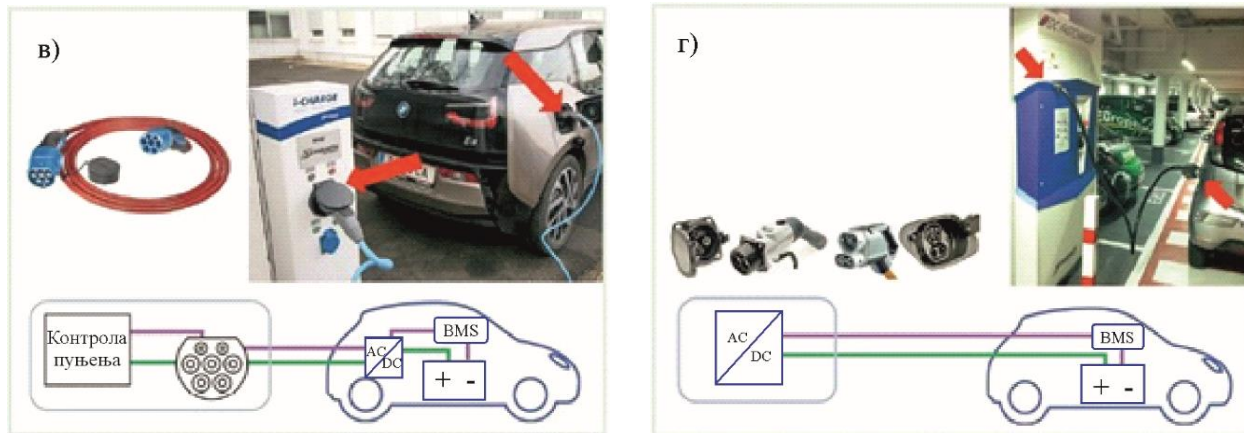
Први начин пуњења батерије електричног возила је прикључивање пуњача у возилу на утичницу у домаћинству (230 V AC), као на Сл. 6.27 а). Типична снага пуњења је 2.7 kW.

Други начин пуњења је сличан првом, осим што додатно користи управљачки уређај у напојном каблу (енг. In Cable Control Box – ICCB). ICCB кабл је део опреме возила, а пуњач је у возилу и нема комуникације са утичницом станице за пуњење. Систем за управљање батеријом електричног возила BMS (Battery Management System) контролише и врши мониторинг процеса пуњења батерије у зависности од напона батерије, стања батерије и температуре. Овај начин пуњења приказан је на Сл. 6.27 б).

Трећи начин пуњења батерије електричног возила наизменичном струјом је преко утичнице Типа 2 на зидној кутији на станици за пуњење уз специјални кабл до возила, Сл. 6.27 в). Зависно од зидне кутије, каблови могу бити трајно повезани на кутију или имати утикаче на оба краја. При пуњењу постоји комуникација између станице за пуњење и возила. Претварач у електричном возилу претвара наизменичну струју у једносмерну. Снага пуњења одређена је снагом станице (обично до 22 kW) и снагом пуњача електричног возила, односно мањом од те две снаге.

Четврти начин је брзо пуњење једносмерном струјом (енг. fast charging) и обавља се само на јавним станицама које имају стално повезане каблове типа CHAdeMO или CCS Combo 2 (енг. Combined Charging System), као што је приказано на Сл. 6.27 г). Постоји комуникација између електричног возила и станице за пуњење у којој се налази пуњач. Брзина пуњења није ограничена снагом пуњача у ауту, јер се он заобилази и користи се једносмерна струја за пуњење батерија.





Сл. 6.27 Начини пуњења батерије електричног возила [19]:

- а) пуњење на стандардној АС утичници;
- б) пуњење преко ICCB кабла без комуникације са станицом за пуњење;
- в) пуњење преко кабла Типа 2 уз комуникацију са станицом за пуњење;
- г) брзо пуњење

Таблица 6.1 Капацитети батерија неких модела електричних возила

Електрично возило	Година	Капацитет батерије [kWh]
Nissan Leaf	2016	30
BMWi3	2017	33
Ford Focus Electric	2017	33.5
Volkswagen e-Golf	2017	35.8
Renault Kangoo Maxi ZE 33	2017	32.6
Kia Soul EV	2018	30
Mazda MX-30	2019	30
Volkswagen e-Up!	2019	32.3
Mini Cooper SE	2020	32.6
Honda e	2020	28.5
Seat Mii Electric	2020	32.3

Таблица 6.2 Параметри за нормално пуњење различитим типовима пуњача за Nissan Leaf са батеријом 30 kWh

Тип пуњача (номинална снага)	Максимална снага	Снага пуњења [kW]	Време пуњења [h]	Брзина пуњења [km/h]
Тип 1 Yazaki – SAE J1772				
Стандардни 3.3 kW on-board пуњач				
Зидна кутија (2.3 kW)	230 V / 1 × 10 A	2.3	14.5	12
1- фазни 16 A (3.7 kW)	230 V / 1 × 14 A	3.3	10	17
1- фазни 32 A (7.4 kW)	230 V / 1 × 14 A	3.3	10	17
3- фазни 16 A (11 kW)	230 V / 1 × 14 A	3.3	10	17
3- фазни 32 A (22 kW)	230 V / 1 × 14 A	3.3	10	17
Опциони 6.6 kW on-board пуњач				
Зидна кутија (2.3 kW)	230 V / 1 × 10 A	2.3	14.5	12
1- фазни 16 A (3.7 kW)	230 V / 1 × 16 A	3.7	9	19
1- фазни 32 A (7.4 kW)	230 V / 1 × 29 A	6.6	5	34
3- фазни 16 A (11 kW)	230 V / 1 × 16 A	3.7	9	19
3- фазни 32 A (22 kW)	230 V / 1 × 29 A	6.6	5	34

Таблица 6.3 Параметри за брзо пуњење за Nissan Leaf са батеријом 30 kWh

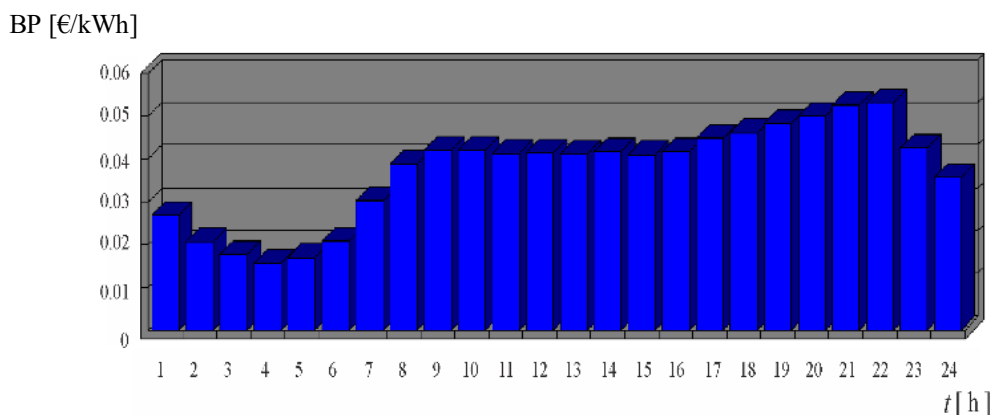
Тип пуњача (номинална снага)	Максимална снага [kW]	Снага пуњења [kW]	Време пуњења [h]	Брзина пуњења [km/h]
CHAdeMO				
CHAdeMO (50 kW DC)	47	45	0.5	250

У разматраним случајевима двосмерни ток снага унутар микромреже је доступан за уређаје за складиштење и батерије електричних возила, а од микромреже према главној мрежи у тачки повезивања микромреже и главне мреже. Параметри при коришћењу V2G технологије које треба узети у обзир су унапред дефинисани временски интервали за вожњу возила, број пуњача на станици за пуњење, снага пуњача, максимални домети вожње

возила, капацитети батерија, стање напуњености (SOC), животни век батерије и деградација батерија заснована на максималној дубини пражњења (DOD), броју циклуса пуњења, радној температури, укупно преузетој енергији итд.

У овом поглављу разматрана је производња електричне енергије у микромрежи ветрогенераторима и фотопанелима чије су дневне криве производње дате на Сл. 6.3 и Сл. 6.4. Вршна снага ветрогенератора изабрана је иста као и за фотонапонске панеле како би се проценило који тип обновљивог извора енергије је погоднији за минимизирање трошкова енергије у овој микромрежи.

Дневна крива неодложне потрошње у микромрежи дата је на Сл. 6.2. Дијаграм варијабилних куповних цена $BP(i)$ дат је за 06.07.2020. године са SEEPEX тржишта електричне енергије [20] на Сл. 6.28, а варијабилне продајне цене су $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$.



Сл. 6.28 Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за дан 06.07.2020. године

У претходним поглављима електрична возила су разматрана као флота, док су у овом поглављу за нека возила изабрани различити капацитети батерија како би се размотрило шта је повољније са становишта уштеде електричне енергије. Осим тога, трошкови су оптимизовани за различите снаге пуњача. У разматраној микромрежи постоји станица за пуњење са $n = 5$ пуњача снаге $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$ или $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$, доступна за V2G услугу.

Циљна функција C_{cost} , коју треба минимизирати, дата је изразом (6.1). Постоји и ограничење $P_G(i) \leq P_{Gmax}(i)$. Биланс снага је дат изразом (6.4) у коме снага $P_{EV}(i)$ у

временским интервалима $i = 1, \dots, 24$, мора бити оптимизована да би се минимизирали трошкови. Електрична возила се користе за вожњу у одређеним временским интервалима током дана и тада нису доступна на станици за пуњење. Возила се користе за вожњу од 10 часова ујутру до 16 часова поподне.

Сценарио 11: На располагању микромреже је 5 возила која се користе за вожњу и пуњење/пражњење. Мала електрична возила као што је Nissan Leaf са капацитетом батерије од $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ имају домете од 100 km до 200 km са својим потпуно напуњеним батеријама. Ако једно возило пређе 166.7 km са пуним капацитетом батерије, онда је за пређени пут од 55 km потребно 33% капацитета. Ако се за 6 сати вожње пређе 55 km, то значи да се *SOC* смањује у просеку 5.5% по сату. Ако су електрична возила била потпуно напуњена, *SOC* се смањио на 67% након периода вожње. Наредних 18 сати (од 16h поподне до 10h ујутру) сва електрична возила су доступна за пуњење/пражњење на станици. Ако је снага пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, а $P_{ch}/en_{EV} = 3.3\text{kW}/30\text{kWh} = 0.11$, то значи да се *SOC* повећава или смањује за 11% по сату приликом пуњења/пражњења. Претпоставља се да је иста ефикасност и приликом пуњења и приликом пражњења. Свако електрично возило мора да се пуни најмање 3 сата да би добило енергију од 9.9 kWh (што је укупно 49.5 kWh за свих 5 возила, односно, 33% од 150 kWh).

Сценарио 12: Доступна су 3 возила са капацитетом батерија $en_{EV} = 50 \text{ kWh}$, што је укупно 150 kWh, као у Сценарију 11. Потрошња енергије за исто пређено растојање разликује се за мање од 10% за оваква и за мала електрична возила. На пример, потрошња енергије за електрично возило Tesla S са капацитетом батерије 85 kWh износи 0.233 kWh/km, а за Nissan Leaf капацитета батерије 24 kWh износи 0.211 kWh/km, што се разликује за 9.44%. Ако возило пређе 277.8 km са пуним капацитетом батерије, онда му је за 91.67 km потребно 33% њеног капацитета. Претпоставка је да ова 3 возила прелазе исто растојање као 5 возила са мањим капацитетом у Сценарију 11, односно 275 km. За 6 сати вожње и 91.67 km пређеног пута по возилу, то значи да се *SOC* смањује у просеку 5.5% по сату. Ако је батерија била потпуно напуњена, *SOC* се смањио на 67% након периода вожње. У том случају, електрична возила морају да се пуне најмање 5 сати током наредних 18 сати

на станици са пуњачима снаге $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$ да би добили енергију од 16.5 kWh (што је укупно 49.5 kWh за 3 возила), што значи да се *SOC* повећава/смањује око 6.6% по сату пуњења/пражњења.

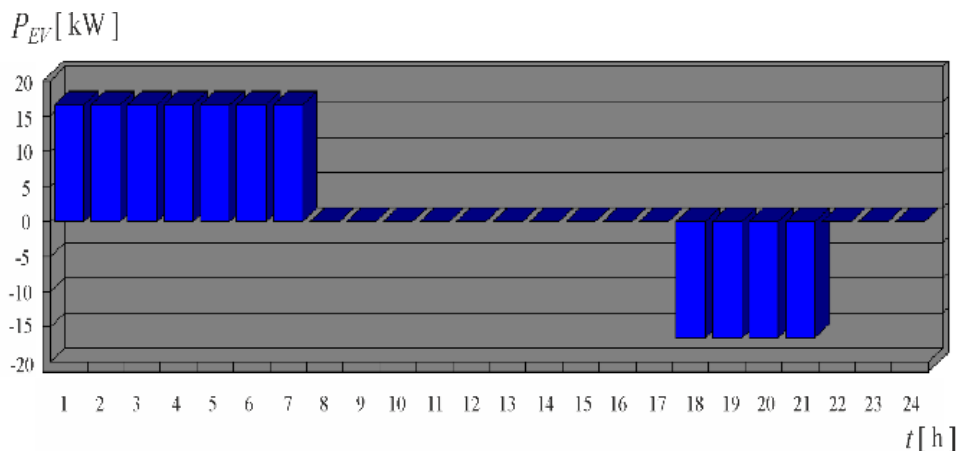
Сценарио 13: Доступна су 3 електрична возила од којих једно са капацитетом батерије $en_{EV1} = 30 \text{ kWh}$ и два са $en_{EV2} = 60 \text{ kWh}$, па је укупна снага такође 150 kWh као у претходно разматраним сценаријима. За возила мањег капацитета потребно је најмање 3 сата за пуњење, а за електрична возила већег капацитета минимално 6 сати са пуњачима снаге $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$. Претпоставка је да ова 3 возила у току периода вожње прелазе 275 km и то возило мањег капацитета 55 km, а два возила већег капацитета по 110 km. Ако возило већег капацитета пређе 333.3 km са пуним капацитетом батерије, онда му је за 110 km потребно 33% њеног капацитета. За 6 сати вожње и 110 km пређеног пута за возило већег капацитета, то значи да се *SOC* смањује у просеку 5.5% по сату. Ако је батерија била потпуно напуњена, *SOC* се смањио на 67% након периода вожње. У том случају, оба електрична возила већег капацитета морају да се пуне најмање 6 сати током наредних 18 сати на станици са пуњачима снаге $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$ да би добили енергију од 19.8 kWh што значи да се *SOC* повећава у просеку 5.5% по сату. Возило мањег капацитета се пуни 3 сата да би добило енергију од 9.9 kWh, што значи да се *SOC* повећава у просеку 11% по сату. То значи да су сва 3 возила добила укупно 49.5 kWh у току пуњења на станици.

Сценарио 14: Овај сценарио је исти као Сценарио 11, али за пуњаче на станици који су снаге $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW} = 3P_{ch}$, тако да се свако електрично возило пуни најмање 1 сат. За то време се *SOC* повећа за 33%.

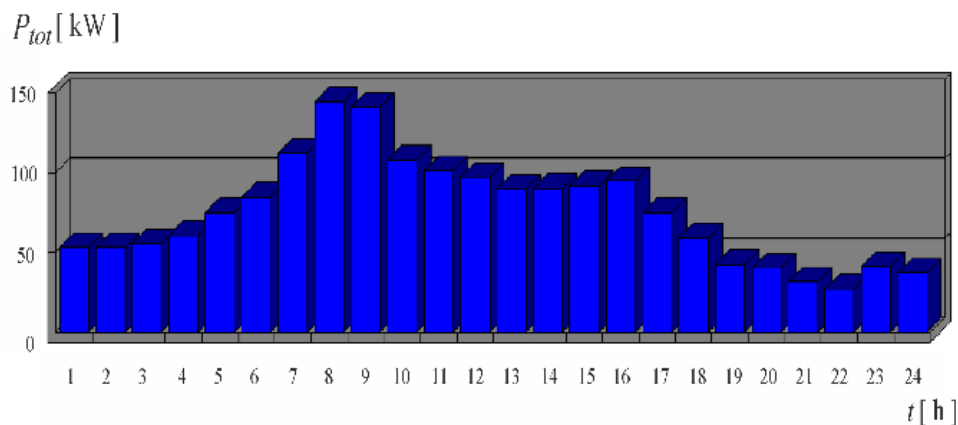
Сценарио 15: Овај сценарио је исти као Сценарио 13, али за пуњаче на станици који су снаге $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$, тако да је за електрично возило мањег капацитета потребно најмање 1 сат за пуњење, а за електрична возила већег капацитета најмање 2 сата.

За сваки од ових сценарија оптимизација је урађена за два случаја: а) PV панели раде, ветрогенератори не раде, б) ветрогенератори раде, PV панели не раде.

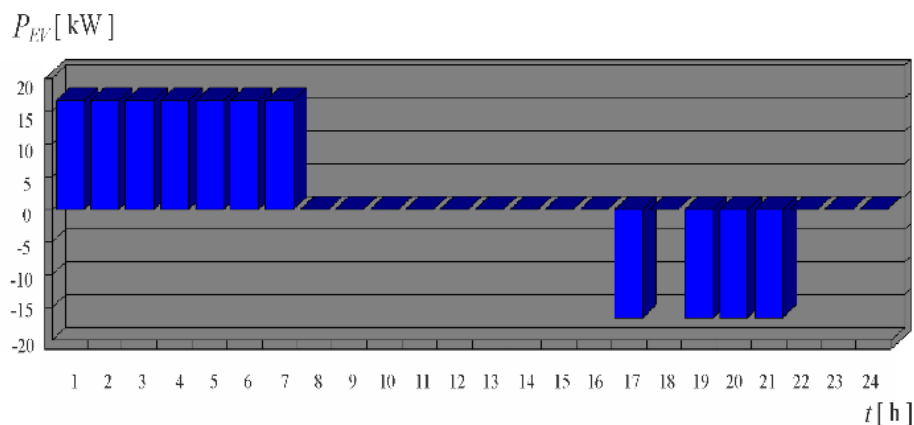
За случај а), Сценарио 11, за $n_V = 5$ електричних возила, капацитета батерија $en_{EV} = 30$ kWh и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења електричних возила је добијен као што је приказано на Сл. 6.29. Дневни распоред укупне потрошње енергије у микромрежи $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, дат је на Сл. 6.30.



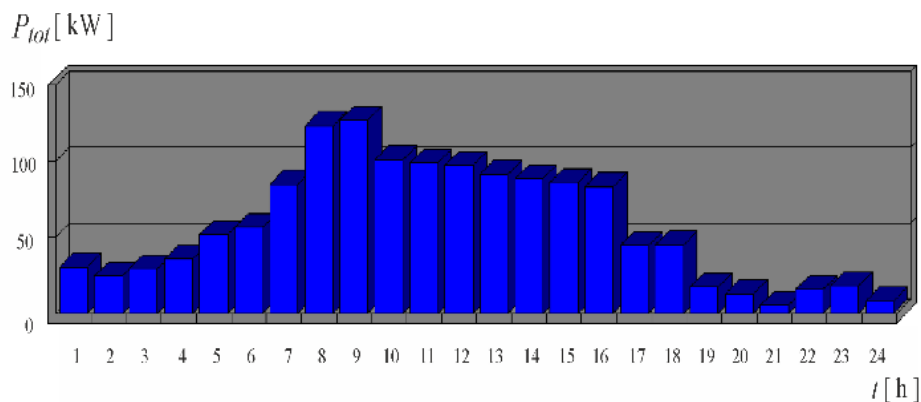
Сл. 6.29 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 11, за $n_V = 5$, капацитета батерија $en_{EV} = 30$ kWh и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW



Сл. 6.30 Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже за случај а), Сценарио 11, после оптимизације пуњења/пражњења електричних возила



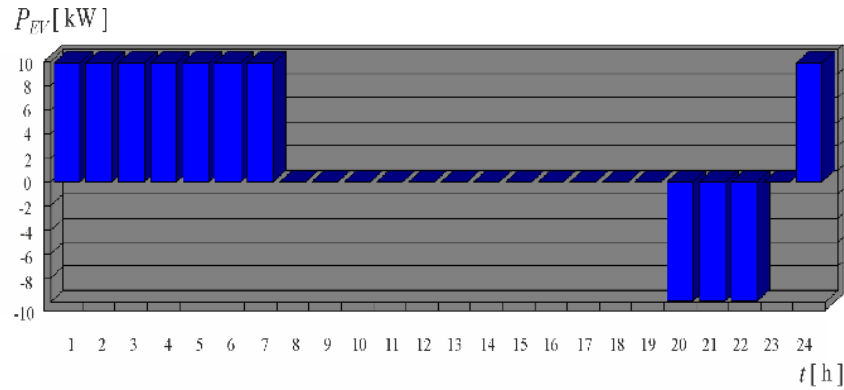
Сл. 6.31 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 11, за $n_V=5$, капацитете батерија $en_{EV}=30$ kWh и снаге пуњача $P_{ch}=3.3$ kW



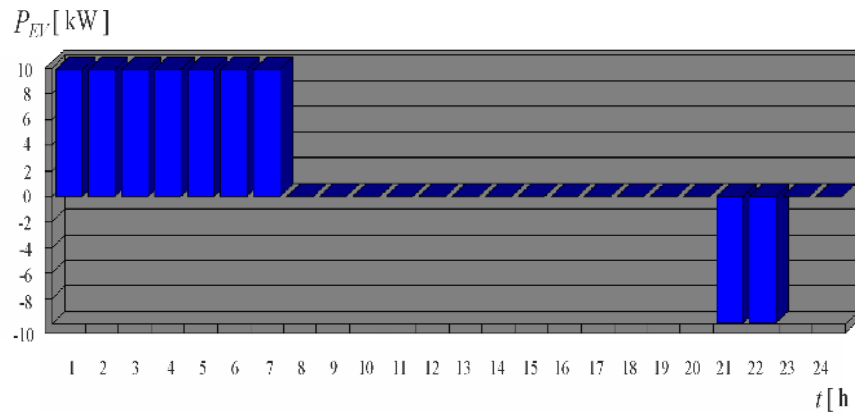
Сл. 6.32 Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже за случај б), Сценарио 11, после оптимизације пуњења/пражњења електричних возила

За случај б), Сценарио 11, добијен је оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења електричних возила као што је дато на Сл. 6.31, а дневни распоред укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, дат је на Сл. 6.32. У сваком сату, збир снаге неодложних оптерећења $P_L(i)$ и снаге пуњења електричних возила $P_{EV}(i)$ је већи од снаге производње обновљивих извора енергије, као што се може приметити на Сл. 6.30 и Сл. 6.32.

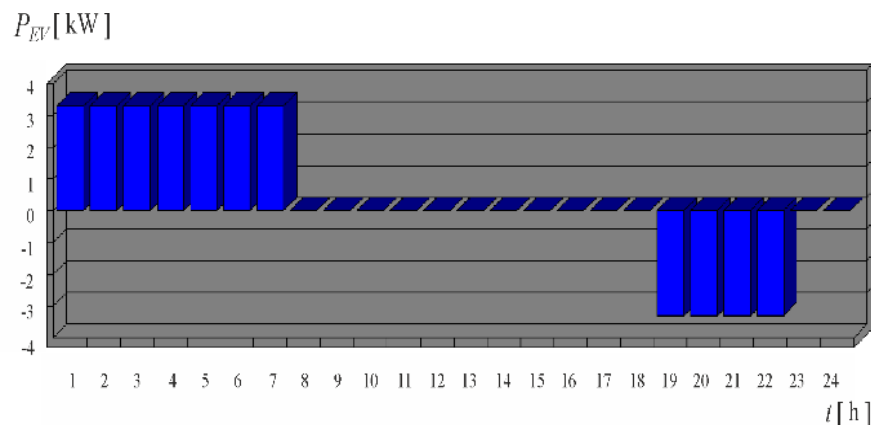
Резултати оптимизације за случајеве а) и б), Сценарио 12, дати су на Сл. 6.33 и Сл. 6.34. Резултати оптимизације за случај а), Сценарио 13, за возила већег капацитета дати су на Сл. 6.35, за возила мањег капацитета на Сл. 6.36, а за случај б), Сценарио 13, на Сл. 6.37 и Сл. 6.38. Може се закључити да ветрогенератори обезбеђују веће уштеде електричне енергије од PV панела у случају исте инсталисане вршне снаге.



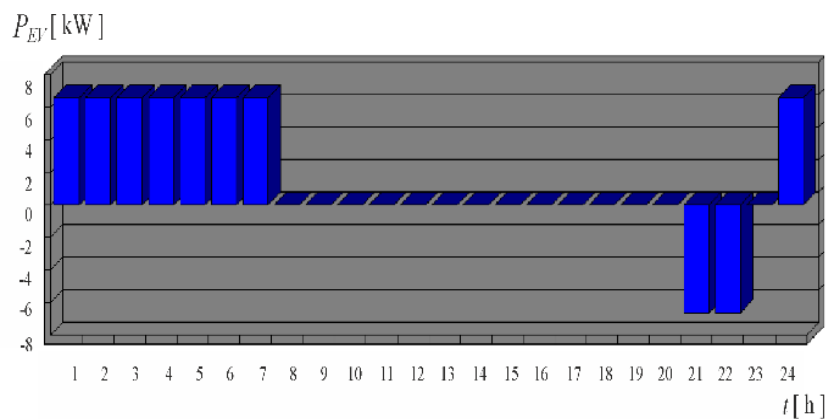
Сл. 6.33 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а),
Сценарио 12, за $n_V = 3$, капацитете батерија $en_{EV} = 50$ kWh и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW



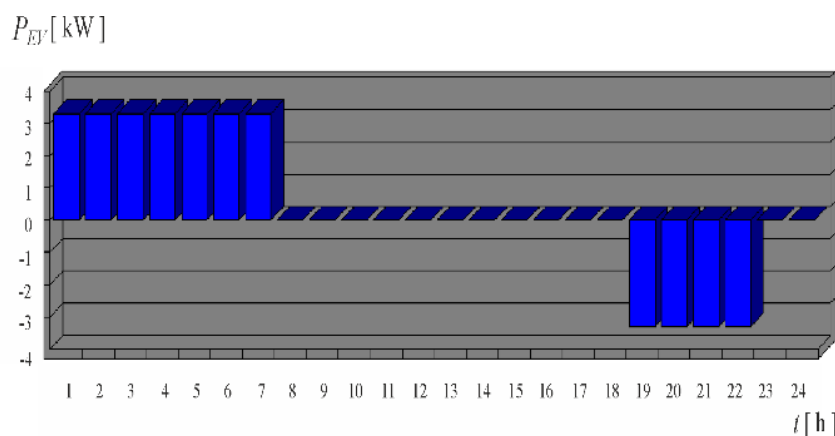
Сл. 6.34 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б),
Сценарио 12, за $n_V = 3$, капацитете батерија $en_{EV} = 50$ kWh и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW



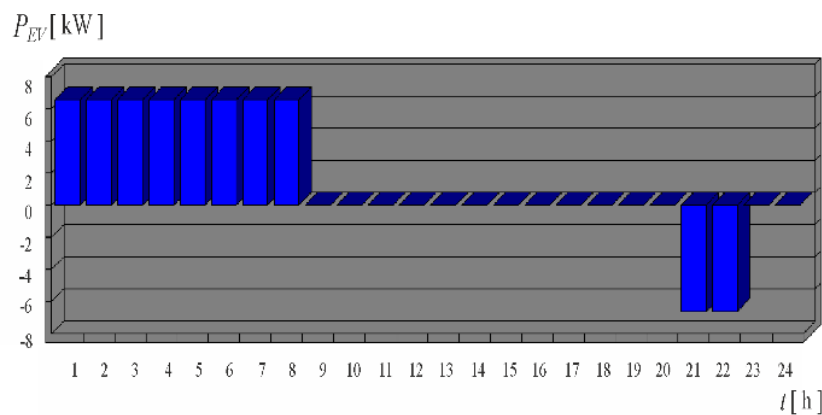
Сл. 6.35 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а),
Сценарио 13, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30$ kWh и снагу пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW



Сл. 6.36 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а),
Сценарио 13, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60$ kWh и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW



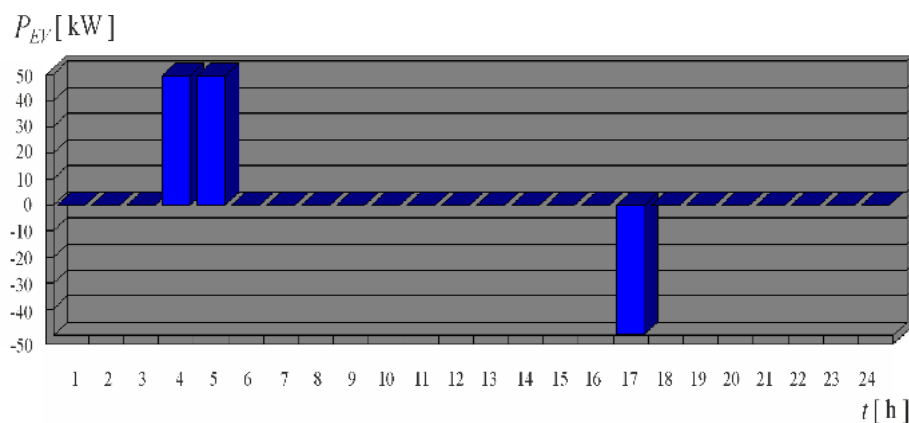
Сл. 6.37 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б),
Сценарио 13, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30$ kWh и снагу пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW



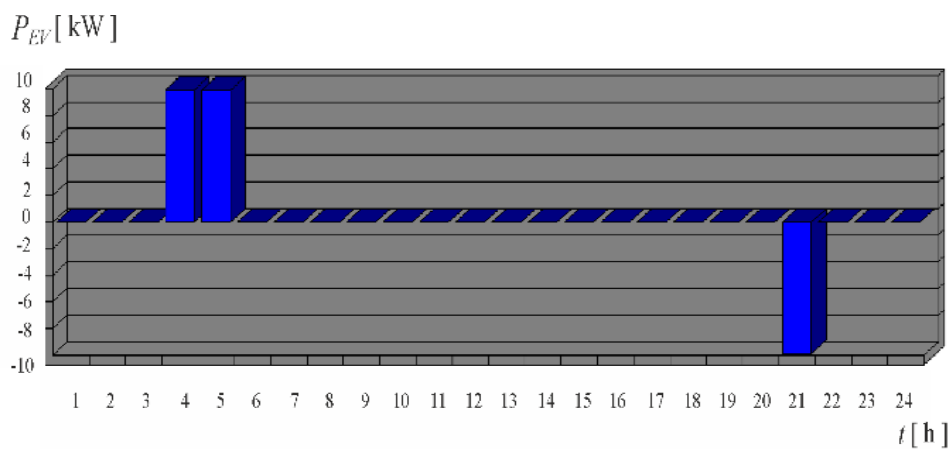
Сл. 6.38 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б),
Сценарио 13, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60$ kWh и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3$ kW

Сценарији 14 и 15 су исти као и Сценарији 11 и 13, само што су пуњачи три пута веће снаге тако да је пуњење/пражњење три пута брже. Исти резултати за дневне дијаграме су добијени за Сценарио 14 а) и Сценарио 14 б), као што је приказано на Сл. 6.39. Резултати за Сценарије 15 а) и б) дати су на Сл. 6.40 – 6.43.

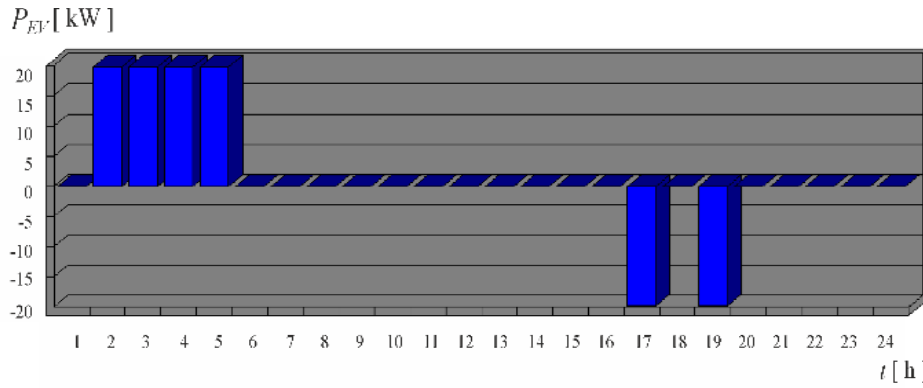
Трошкови за електричну енергију су мањи у случају б) у поређењу са случајем а) за 16.21% у Сценарију 11, за 16.16% у Сценарију 12, за 16.15% у Сценарију 13, за 16.35% у Сценарију 14 и за 16.33% у Сценарију 15.



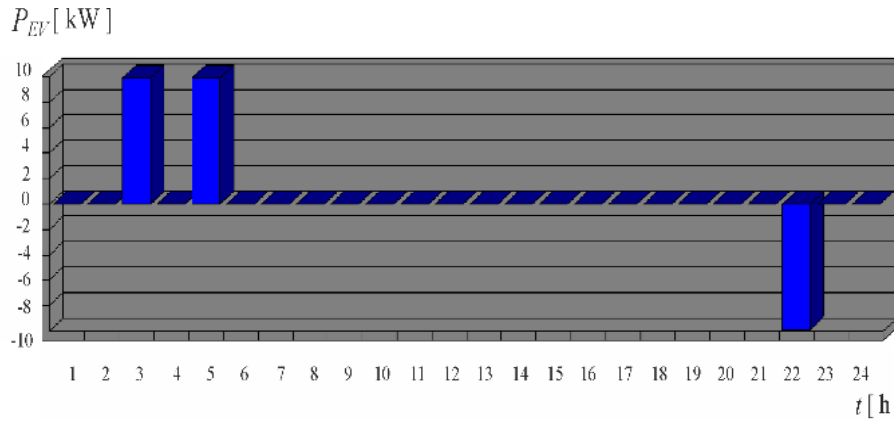
Сл. 6.39 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случајеве а) и б), Сценарио 14, за $n_V=5$, капацитете батерија $en_{EV}=30$ kWh и снаге пуњача $P_{ch}'=9.9$ kW



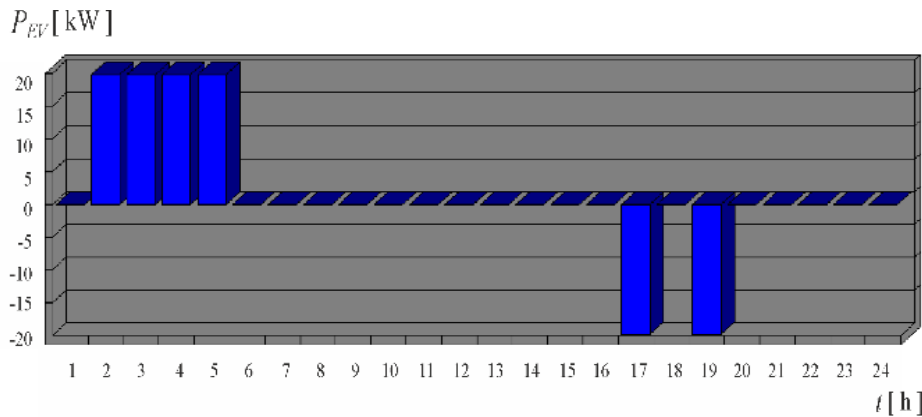
Сл. 6.40 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 15, за возило капацитета батерије $en_{EV1}=30$ kWh и снагу пуњача $P_{ch}'=9.9$ kW



Сл. 6.41 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а),
Сценарио 15, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60$ kWh и снаге пуњача $P_{ch}' = 9.9$ kW



Сл. 6.42 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б),
Сценарио 15, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30$ kWh и снагу пуњача $P_{ch}' = 9.9$ kW



Сл. 6.43 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б),
Сценарио 15, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60$ kWh и снаге пуњача $P_{ch}' = 9.9$ kW

Закључује се да флота са већим бројем електричних возила мањег капацитета батерија даје већу уштеду од флоте са мањим бројем возила већег капацитета батерија, за исту потрошњу енергије и исто укупно пређено растојање, али ова уштеда није значајна. Највеће уштеде се постижу за Сценарије 14 и 15 због пуњења/пражњења помоћу пуњача веће снаге. Снажнији пуњачи резултирају не само задовољством потрошача због краћег времена пуњења, већ и смањењем трошкова микромреже за електричну енергију.

Различите уштеде електричне енергије се добијају и за различите дане у недељи за које се међусобно разликују куповне цене на тржишту електричне енергије. У поређењу са средом или четвртком, куповне цене могу бити и двоструко ниже суботом и недељом. Ово се закључује на основу куповних цена са тржишта електричне енергије SEEPEX [20]. Због тога су дани викенда (посебно недеља) погоднији за пуњење, ако возило није неопходно за вожњу у међувремену и ако *SOC* није опао испод 20% капацитета батерије.

Дан-унапред познате варијабилне цене електричне енергије на тржишту енергије омогућавају смањење трошкова енергије у случају коришћења V2G технологије електричних возила. Ветрогенератори обезбеђују већу уштеду од PV панела исте инсталисане вршне снаге, али захтевају већа улагања.

6.4 Утицај амбијенталне температуре на трошкове пуњења батерија електричних возила

Утицај различитих фактора на максимално растојање које електрично возило може да пређе са напуњеном батеријом је анализиран у [21]. Моделовање перформанси возила је коришћено за процену промене ефикасности возила и унутрашњег отпора батерије са температуром околине за различите типове климе: топлу, благу и хладну климу [22]. Закључак је да су ефекти промене унутрашњег отпора батерије занемарљиви, али системи за грејање, вентилацију и климатизацију кабине (енг. Heating Ventilation and Air Conditioning – HVAC) могу смањити дomet вожње електричних возила [23] и значајно повећати потрошњу енергије [24-26].

Што се тиче потрошње енергије по пређеном километру пута електричног возила, оптимални распон температуре околине је од 14 °C до 24 °C.

На температурама нижим од оптималних, ефикасност батерије и способност пражњења се смањују, док се унутрашњи отпор батерије повећава, као и потрошња енергије по километру. По хладном времену, клима-уређај је потребан за загревање кабине и троши више енергије из батерије електричног возила. Возило са мотором са унутрашњим сагоревањем користи вишак топлоте мотора да загреје кабину, док електрично возило користи своју ограничену унутрашњу енергију акумулирану у батерији.

На температурама вишим од оптималних, перформансе батерије електричног возила се брже погоршавају, а захтеви за управљање топлотом се повећавају, као и потрошња енергије по километру. По топлом времену потребна је додатна енергија за хлађење кабине. Може се закључити да се домет вожње смањује и током хладних и током топлих дана. Већа потрошња енергије по километру доводи до деградације батерије због циклуса старења, а самим тим и до већих трошкова.

У овом поглављу је анализиран утицај температуре околине на трошкове пуњења електричних возила са V2G технологијом. Разматрана микромрежа састоји се од неодложних оптерећења једне компаније, фотонапонских (PV) панела и станице за пуњење електричних возила компаније (Сл. 6.44). Ова микромрежа је повезана са главном мрежом у тачки заједничког спајања и омогућен је бидирекциони ток енергије.

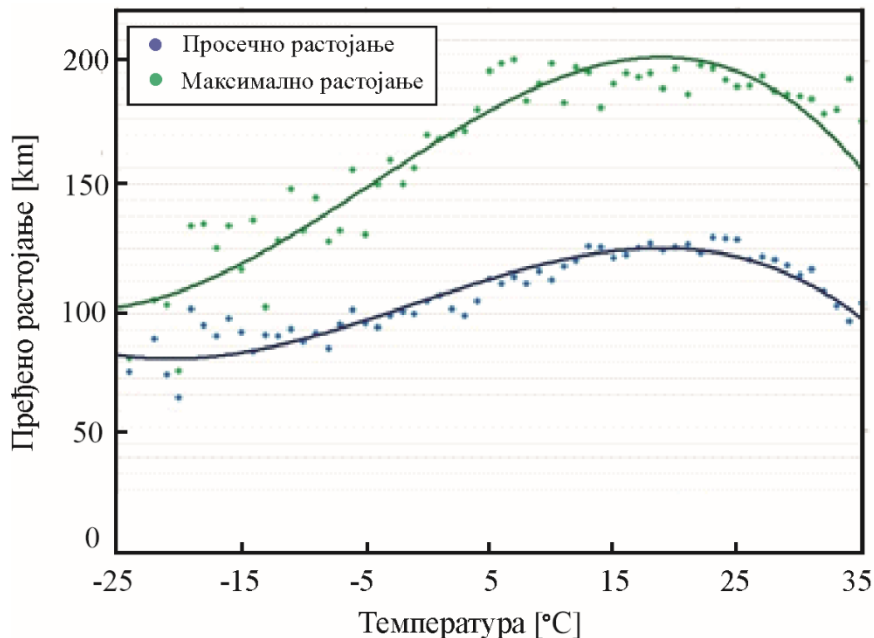


Сл. 6.44 Nissan Leaf на станици за пуњење у микромрежи

Дневни дијаграм потрошње неодложног оптерећења компаније означен са $P_L(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, дат је на Сл. 6.2. Фотонапонски панели су вршне снаге $P_{PV\max} = 33 \text{ kW}$ и имају дневну криву производње електричне енергије као на Сл. 6.4. Производња енергије је процењена на основу сунчевог зрачења у северном региону Србије [5]. Компанија поседује $n_V = 5$ возила типа Nissan Leaf са капацитетом батерије $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$. Положај батерије унутар електричног возила приказан је на Сл. 6.45.



Сл. 6.45 Позиција батерије у возилу Nissan Leaf [27]

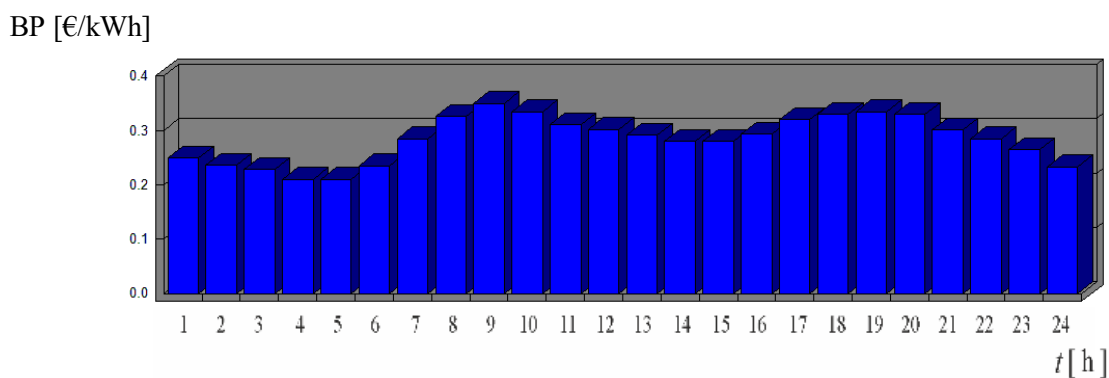


Сл. 6.46 Дијаграми просечног пређеног растојања и максималног пређеног растојања у зависности од амбијенталне температуре за возило Nissan Leaf [28]

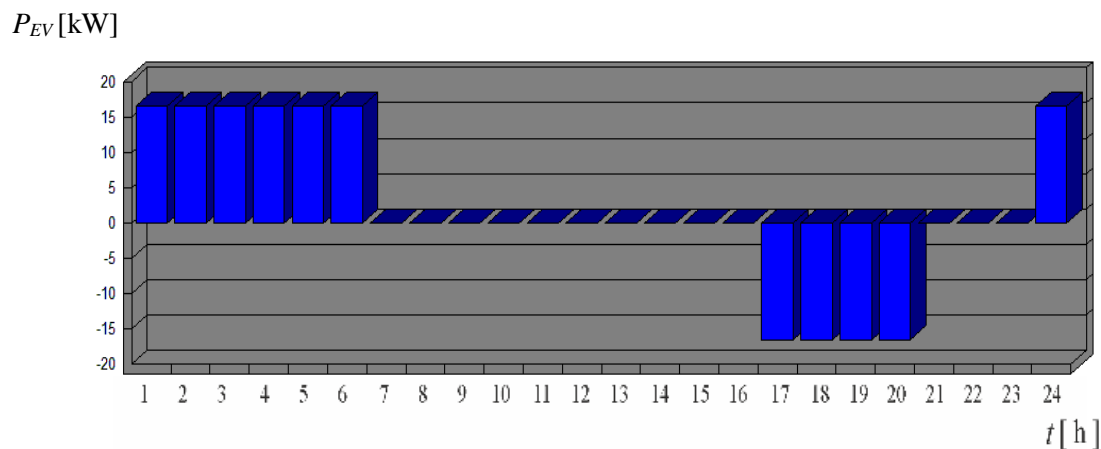
Према реалним подацима које је прикупила канадска компанија Fleetcarma [28] за 7375 путовања широм Северне Америке за возила Nissan Leaf, дијаграми просечног пређеног растојања и максималног пређеног растојања у зависности од амбијенталне температуре дати су на Сл. 6.46. На оба дијаграма може се уочити значајна зависност од температуре, посебно на веома ниским температурама када пређено растојање може бити и двоструко мање него при оптималној температури.

У претходно разматраним сценаријима претпостављен је домет електричног возила Nissan Leaf од 166.67 km. Ово растојање има вредност између максималне и просечне вредности за оптималну температуру околине од 19 °C.

Сценарио 16: Ако возило може да пређе 166.67 km са 100% напуњеном батеријом, а у току периода возње од 6 сати возило пређе 55 km на температури околине $t_{opt} = 19$ °C, то значи да ће стање напуњености батерије бити 67% на почетку периода од 18 сати у коме су возила на располагању за пуњење/пражњење на станици. За функцију трошкова, када не раде ветрогенератори ($P_W = 0$), а раде фотопанели ($P_{PV} \neq 0$), важи једначина (6.1), уз ограничење за стање напуњености батерија (6.2) и за промену стања батерија према (6.3), а за биланс снага важи једначина (6.4). За дневни дијаграм куповних цена на тржишту електричне енергије SEEPEx [29] за дан 27.01.2022. (Сл. 6.47), а за продајне цене микромреже према главној мрежи које износе 75% од куповних цена, минимизирана је функција трошкова за електричну енергију у рачунарском програму Lingo и добијен је оптимални дневни распоред пуњења/пражњења електричних возила возног парка компаније као на Сл. 6.48.



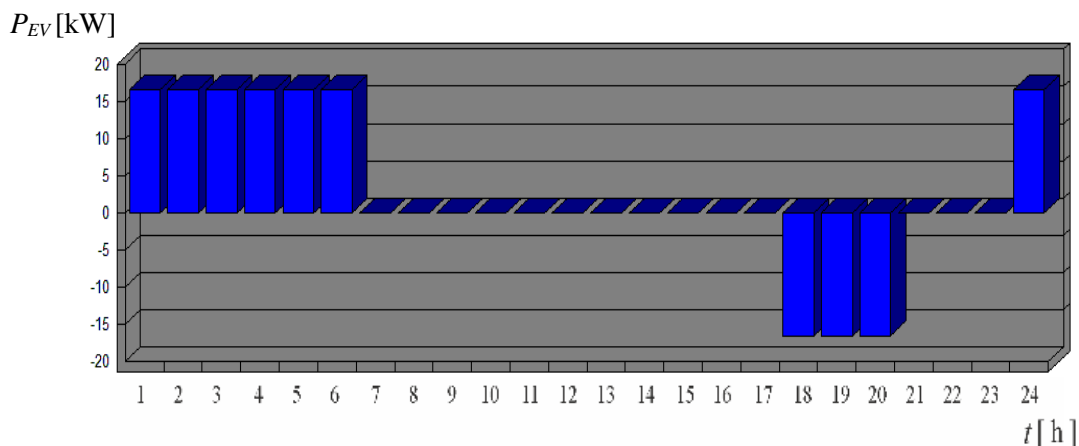
Сл. 6.47 Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за дан 27.01.2022. године



Сл. 6.48 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 16, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_{opt} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$

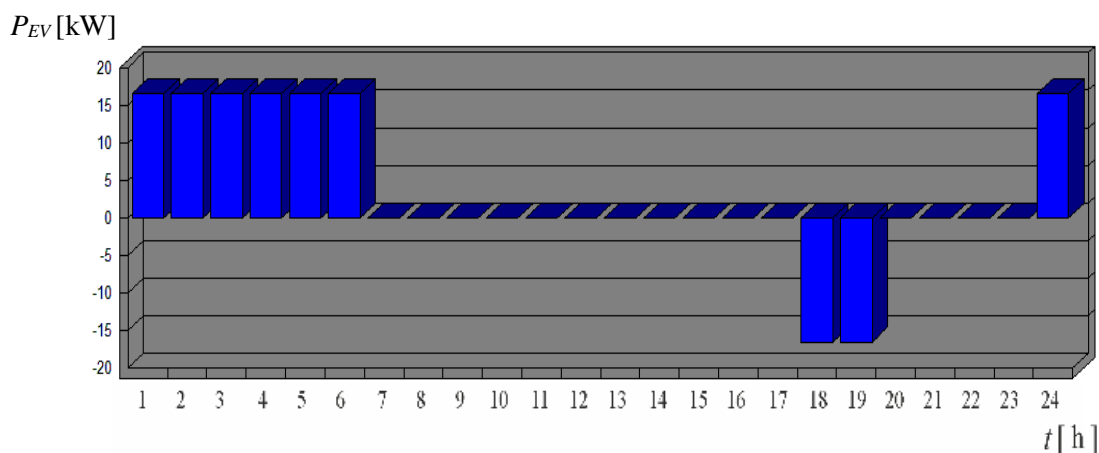
Потребно је укупно три сата за пуњење возила са 67% на пуни капацитет батерије, тј. на 100% за наредни период вожње, а у оптималном дневном распореду има 7 сати пуњења и 4 сата пражњења.

Сценарио 17: Возило у току периода вожње од 6 сати (од 10h ујутру до 16h поподне) пређе 55 km на температури околине $t_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Потрошња батерије електричног возила је већа за око 25% него на оптималној температури $t_{opt} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, што резултује смањењем почетног стања батерије на $SOC_0 = 56\%$ у 16h поподне. Укупно четири сата потребно је да се возила са 56% поново напуне на 100% капацитета батерије за наредни период вожње. Возила су 18 сати на располагању за пуњење/пражњење на станици. Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења електричног возила возног парка компаније дат је на Сл. 6.49. На температури $t_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$, која је нижа од оптималне, батерије електричних возила у току 6 часова вожње имају потрошњу која такође резултује смањењем почетног стања батерије од 100% на 56%. Хладно време и веома ниске температуре (Сл. 6.46) неповољни су за потрошњу енергије електричних возила.



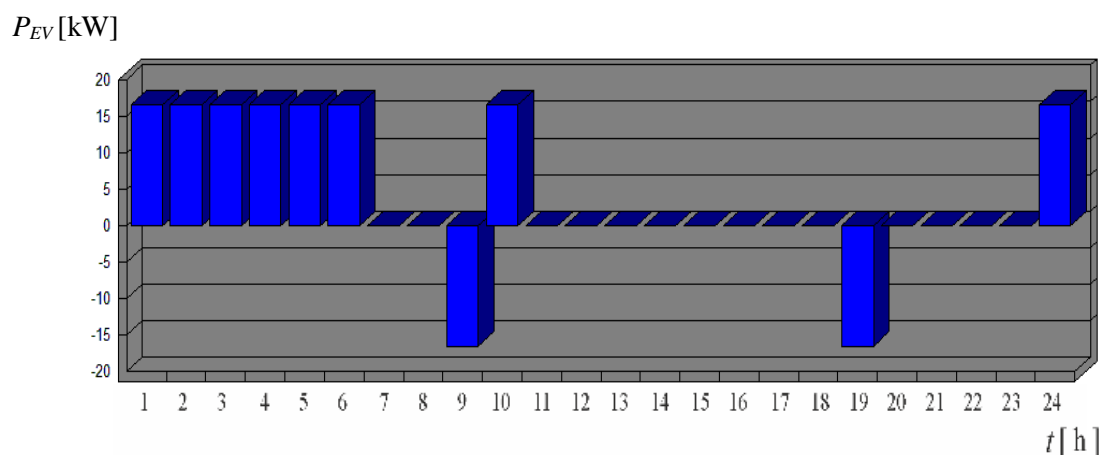
Сл. 6.49 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 17, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ или $t_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$

Сценарио 18: Ако возило у току периода вожње од 6 сати пређе укупно 55 km на температури околине $t_3 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$, потрошња енергије батерије електричног возила је већа за око 40% него на оптималној температури $t_{opt} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$. Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења електричних возила возног парка дат је на Сл. 6.50. Укупно пет сати је потребно да се батерије возила напуне од 45% на 100% капацитета батерије за наредни период вожње. Очигледно је да микромрежа има на располагању два сата мање за продају електричне енергије главној мрежи.



Сл. 6.50 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 18, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_3 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$

Сценарио 19: Ако возило на веома ниској температури околине $t_4 = -25\text{ }^\circ\text{C}$ у току периода вожње од 6 сати пређе укупно 55 km, потрошња енергије батерије електричног возила је већа за око 50% него на оптималној температури $t_{\text{opt}} = 19\text{ }^\circ\text{C}$. Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења електричних возила возног парка дат је на Сл. 6.51. У том случају потребно је укупно шест сати да се батерије возила напуне од 34% на 100% капацитета батерије за наредни период вожње, што је двоструко више него на $t_{\text{opt}} = 19\text{ }^\circ\text{C}$. Микромрежа има на располагању три сата мање за продају електричне енергије главној мрежи.



Сл. 6.51 Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 19, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3\text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30\text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_4 = -25\text{ }^\circ\text{C}$

6.5 Вишекритеријумска оптимизација коришћења V2G технологије са становишта власника микромреже, агрегатора и главне мреже

У овом поглављу оптимизован је распоред пуњења и пражњења електричних возила применом вишекритеријумске оптимизације у циљу смањења трошкова за електричну енергију за власника електричних возила, за власника микромреже или агрегатора, као и за главну мрежу [30]. Критеријуми укључују: минимизирање деградације батерије због великог броја циклуса пуњења/пражњења (као корист за власника електричних возила), минимизирање трошкова електричне енергије у микромрежи (као корист за власника

микромреже или локалног агрегатора) и максимизирање изравнавања дневне криве укупне потражње микромреже (као корист за главног оператера мреже).

Пуњење и пражњење електричних возила са циљем смањења трошкова електричне енергије мора узети у обзир и трошкове деградације батерије који су веома битни за власника електричних возила. Проблем деградације батерије електричног возила је веома актуелан и разматран је у радовима [31-35]. Ово је важно за смањење трошкова компанија које поседују микромреже и флоте електричних возила, као и за контролу њихових микромрежа.

Са становишта главне мреже веома је важно применити технике управљања потрошњом и добити што равнију дневну криву потражње за електричном енергијом. Могу се поставити и други циљеви који се могу остварити применом V2G технологије. За електроенергетске системе, такви циљеви укључују: регулацију фреквенције, побољшање квалитета напона, смањење вршног оптерећења, избегавање неочекиваних прекида у напајању електричном енергијом и побољшање интеграције обновљивих извора енергије.

У неким концептима паметних мрежа, локални агрегатори управљају децентрализованом производњом и потрошњом и контролишу рад више микромрежа. Они координирају рад микромрежа и доприносе оптималном раду читавог електроенергетског система. Главне предности коришћења V2G технологије за власнике микромрежа и агрегаторе су: повећање поузданости електроенергетског система ублажавањем интермитентности ветрогенератора и соларних генератора, смањење трошкова електричне енергије и трошкова за уређаје за складиштење енергије. Смањење трошкова за електричну енергију применом V2G технологије је нарочито оправдано у случају варијабилних цена електричне енергије.

У овој дисертацији експериментална анализа је извршена на неколико сценарија и програм Lingo [2] је искоришћен за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације.

Проблем оптимизације у случају два циља може се превести у проблем оптимизације са једним циљем, ако се искористи пондерисана линеарна комбинација две функције као у [36]. У случају три циља може се такође применити линеарна комбинација три функције са одговарајућим тежинским коефицијентима, како би се добила једна циљна функција, што је и урађено у овој дисертацији. Генетски алгоритам примењен је за вишекритеријумску

оптимизацију у MATLAB-у у [37] за оптимизацију енергетске ефикасности и управљање енергијом зграда. Оптимизација учешћа различитих извора енергије са циљем повећања удела обновљивих извора енергије у производњи енергије је предложена у [38] и анализирана у [39].

Главна предност V2G технологије за власника електричних возила је коришћење подстицаја и снижавање трошкова за електричну енергију, али не по цену прекорачења трошкова деградације батерија услед пуњења или пражњења. Мора се узети у обзир да су трошкови батерије значајан део укупних трошкова електричног возила, иако су се они смањили неколико пута у последњој деценији. Батерије неповратно губе свој капацитет због старења и све већег броја циклуса пуњења и пражњења у току коришћења. Батерија се мора заменити када достигне крај свог животног века (енг. End of Life – EoL), што се дешава у случају да је батерија трајно изгубила око 20% – 30% свог капацитета. Ово је важно за разматрање броја циклуса пуњења/пражњења за оптимално коришћење V2G технологије.

Типови батерија који се најчешће користе у електричним возилима су: литијум-јонска (Li-ion), оловна (Pb), никл-кадмијумска (NiCd) и никл-металхидридна (NiMH). Ове батерије имају различите карактеристике у зависности од технологије, као што су: радна температура, проценат самопражњења, специфична енергија, цена, безбедност и животног век. Литијум-јонске батерије имају велику специфичну енергију и немају меморијски ефекат, што их чини најперспективнијим. Брзина пуњења и пражњења (енг. charge/discharge rate – C-rate), дубина пражњења батерије (DoD), стање напуњености (SOC), амбијентална и радна температура, укупна прерађена енергија и број циклуса пуњења и пражњења одређују степен старења батерије. Два главна критеријума за процену EoL батерије су старење и број циклуса пуњења/пражњења. Број циклуса пуњења и пражњења и укупна прерађена енергија захтевају адекватно моделирање [40]. Брже пуњење резултира бржом деградацијом батерија. Међутим, ултра-брзи пуњачи се често користе за возила великог капацитета батерија. Бежично пуњење је такође перспективна технологија. Електрична возила могу користити и замену празних батерија у станицама за замену батерија, а на станици се оне касније пуне у оптималним временским периодима [41].

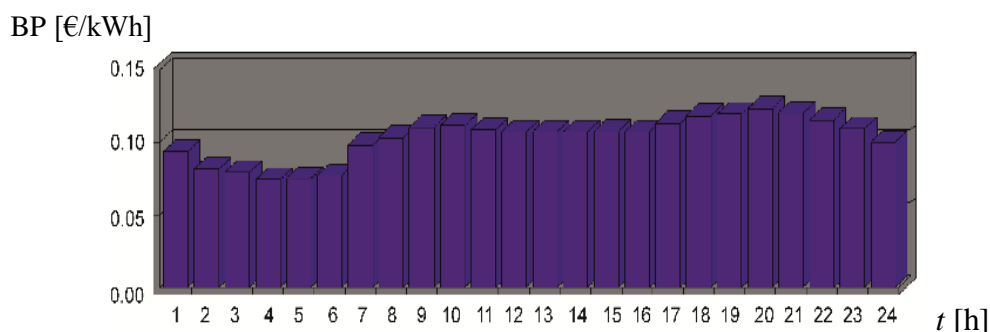
У овом поглављу, као и у претходним сценаријима, анализирана је микромрежа која има неодложна оптерећења, фотонапонске генераторе, ветрогенераторе, уређаје за

складиштење електричне енергије, флоту електричних возила са доступном V2G технологијом и станицу за пуњење са довољним бројем пуњача. Ове компоненте контролише систем управљања микромрежом која је повезана са главном мрежом у тачки заједничког спајања. За уређаје за складиштење и станицу за пуњење електричних возила обезбеђен је двосмерни ток електричне енергије, као и према главној мрежи. Други уређаји за складиштење осим батерија електричних возила нису разматрани у овој процедури оптимизације.

Дневна крива неодложних оптерећења микромреже дата је на Сл. 6.2. Максимална снага је потребна у радно време компаније. Иако су одложива оптерећења пожељна, она се не узимају у обзир у овој процедури оптимизације. Дневни дијаграми предвиђене производње електричне енергије у микромрежи, из ветрогенератора и фотонапонских панела исте вршне снаге 33 kW, дати су на Сл. 6.3 и на Сл. 6.4.

Варијабилне куповне цене електричне енергије $BP(i)$ на SEEPEx тржишту [29] за уторак, 27. јул 2021. године, дате су по сату за $i = 1, 2, \dots, 24$, на Сл. 6.52. Продајне цене $SP(i)$ микромреже према главној мрежи износе 75% од куповних цена, за $i = 1, 2, \dots, 24$.

Важно је напоменути да су цене електричне енергије у октобру 2021. године биле двоструко веће него у јулу 2021. године због повећане потражње за електричном енергијом на глобалном тржишту, као последице опоравка индустрије у многим земљама након кризе са пандемијом COVID-19. Цене електричне енергије су у децембру 2021. године биле више за додатних 20% у односу на октобар 2021. године. Варијабилност тржишних цена чини оптимизацију трошкова за електричну енергију још значајнијом.



Сл. 6.52 Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за уторак, 27.07.2021. године

Осим ограничења за стање напуњености батерија (6.2) и једначине за промену стања батерија према (6.3), као и једначине за биланс снага (6.4), важи и додатно ограничење за снагу $P_G(i)$:

$$P_G(i) \leq P_{G\max}, \quad \text{за } i = 1, \dots, 24, \quad (6.5)$$

где је $P_{G\max}$ максимална снага која се може преносити водом између главне мреже и микромреже.

Постоје три члана у функцији трошкова коју треба минимизирати у поступку оптимизације, а сваки од њих је помножен одговарајућим тежинским коефицијентом.

Циљна функција за вишекритеријумску оптимизацију је:

$$\begin{aligned} F = \min & \left\{ \alpha_1 \sum_{i=1}^{24} [BP(i) P_L(i) - SP(i) P_{PV}(i) - SP(i) P_W(i) + \right. \\ & + n_{EV} P_{CH} (BP(i) x_B(i) - SP(i) x_S(i))] + \\ & + \alpha_2 n_{EV} C_{BD} P_{CH} \sum_{i=1}^{24} \text{Abs}[x_B(i) - x_S(i)] + \\ & + \alpha_3 C_{AV} \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^{24} \text{Abs}[P_L(i) + n_{EV} P_{CH} x(i) - P_{PV}(i) - P_W(i) - \\ & \left. - P_L(j) - n_{EV} P_{CH} x(j) + P_{PV}(j) + P_W(j)] \right\} \quad (6.6) \end{aligned}$$

Трошкови укупне потрошње електричне енергије микромреже се множе тежинским коефицијентом α_1 .

Укупни трошкови деградације батерија електричних возила се множе тежинским коефицијентом α_2 . Ови трошкови зависе од снаге пуњења P_{CH} и цене једног пуњења или пражњења C_{BD} по сваком сату за свако од n_{EV} возила која се пуне или празне. Просечна вредност батерије малог електричног возила је око 5000 € и очекује се да ће она трајати око 10 година пре него што се достигне EoL након око 3000 циклуса пуњења/пражњења. Деградација батерије услед старења представља око 50% трошкова батерије, а преосталих 50% је последица циклуса пуњења. Међутим, у првих пет година коришћења новог

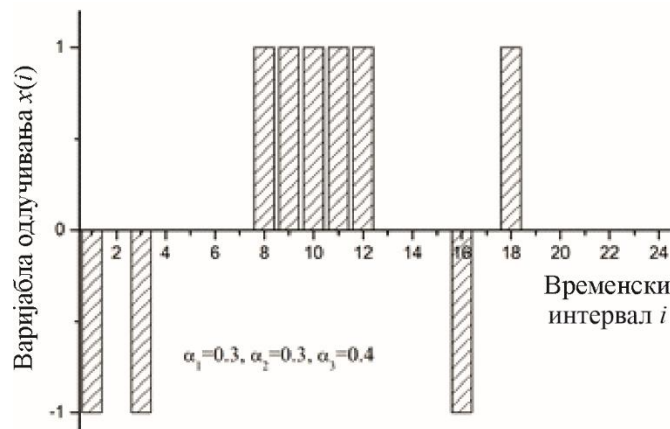
електричног возила, трошкови деградације батерије услед старења су доминантнији од трошкова услед циклуса пуњења. Цена пуњења/пражњења у овде приказаној анализи процењена је на $C_{BD} = 0.1 \text{ €/kWh}$. Ови трошкови се повећавају ако се пуњење/пражњење дешава у наредним сатима за приближно 5% у сваком следећем сату.

Постоје трошкови који се односе на разлике између тражене снаге по сату и просечне снаге P_{AV} тог дана. Ови трошкови се множе са тежинским коефицијентом α_3 . C_{AV} је просечна цена електричне енергије за исти дан и израчунава се као:

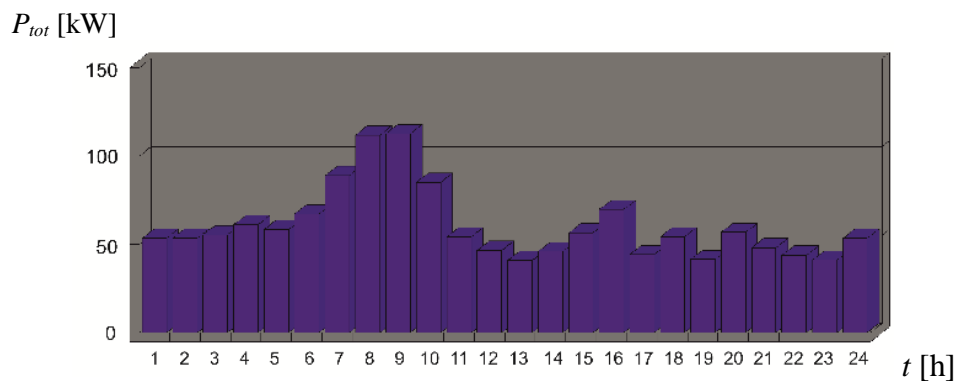
$$C_{AV} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} SP(i). \quad (6.7)$$

Изравнавање дневне криве укупне потражње микромреже врши се применом техника управљања потрошњом тј. попуњавањем долина и смањењем вршног оптерећења, што резултира смањењем ових трошкова.

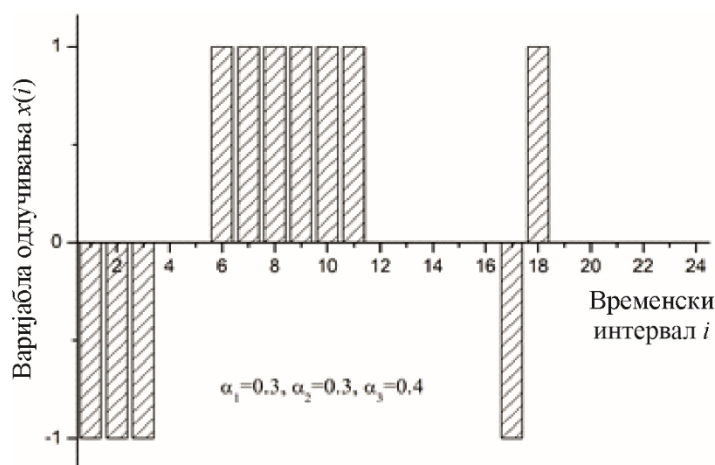
Сценарио 20: У микромрежи ради PV генератор вршне снаге 33 kW са производњом електричне енергије као што је приказано на Сл. 6.4. За минимизацију функције (6.6), њени тежински коефицијенти су изабрани као $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$. Оптимизовани распоред пуњења/пражњења електричних возила се добија као на Сл. 6.53. Укупна дневна потрошња те микромреже након оптимизације је представљена на Сл. 6.54.



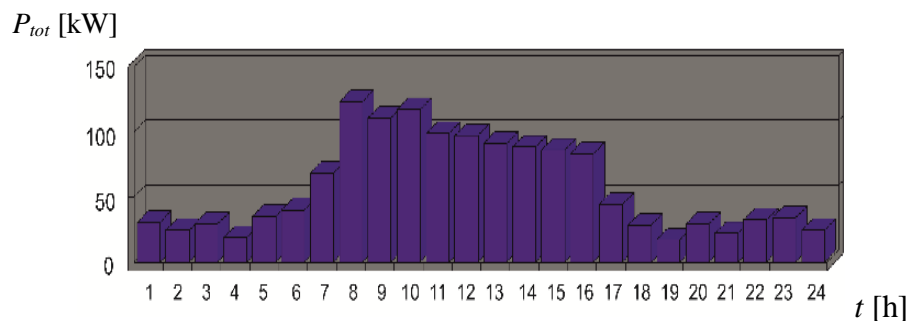
Сл. 6.53 Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са PV генератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$



Сл. 6.54 Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 20 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$



Сл. 6.55 Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са ветрогенератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$

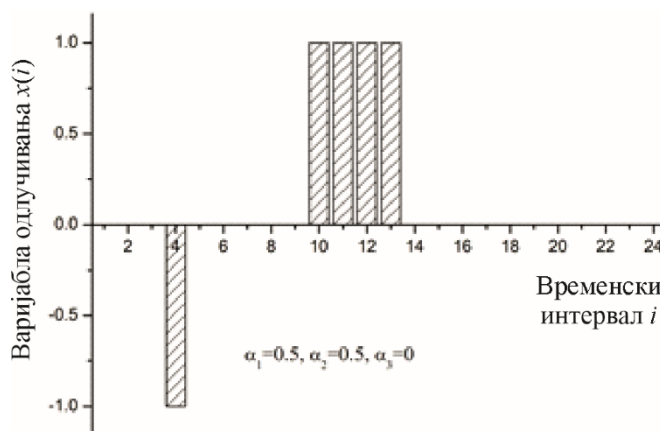


Сл. 6.56 Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 21 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$

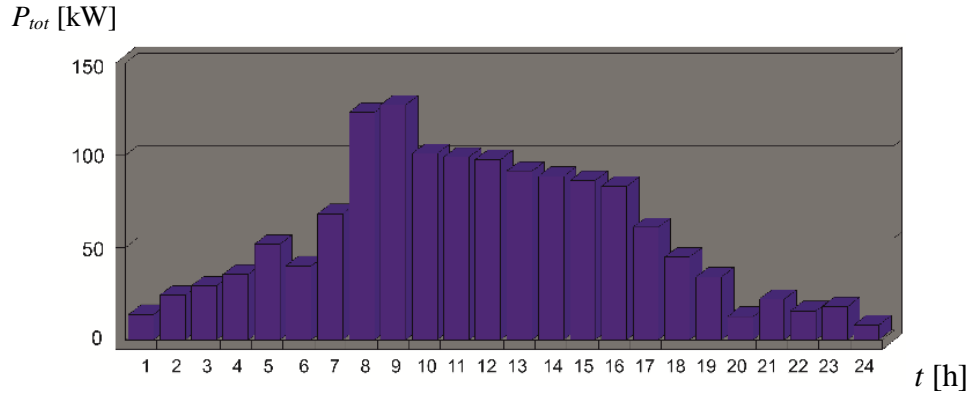
Сценарио 21: У микромрежи ради ветрогенератор вршне снаге 33 kW са производњом електричне енергије као што је дато на Сл. 6.3. За исте тежинске коефицијенте као у Сценарију 20, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$, распоред пуњења/пражњења електричних возила добија се као на Сл. 6.55. Укупна дневна потрошња микромреже након оптимизације приказана је на Сл. 6.56.

Сценарио 22: За микромрежу из Сценарија 21 изабрани су тежински коефицијенти $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$ и $\alpha_3 = 0$. Ови коефицијенти показују да су трошкови минимизирани само са становишта власника електричних возила и власника микромреже или агрегатора. Оптимизовани распоред пуњења/пражњења електричних возила приказан је на Сл. 6.57. Електрична возила се укупно пуне/празне пет сати у току дана. Укупна потрошња микромреже након оптимизације дата је на Сл. 6.58.

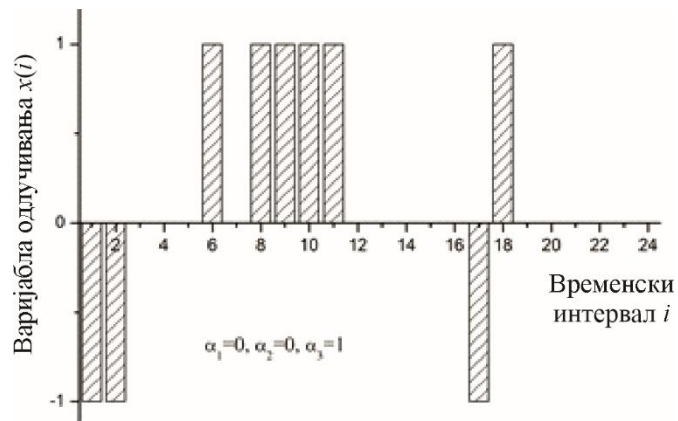
Сценарио 23: За микромрежу из Сценарија 21 изабрани су тежински коефицијенти $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_3 = 1$, тако да се трошкови електричне енергије оптимизују само са становишта главне мреже изравнавањем укупне дневне криве потрошње. Распоред пуњења/пражњења електричних возила је дат на Сл. 6.59. Укупна дневна потрошња након оптимизације је приказана на Сл. 6.60. Боље изравнавање криве потрошње се не може постићи без већег броја електричних возила.



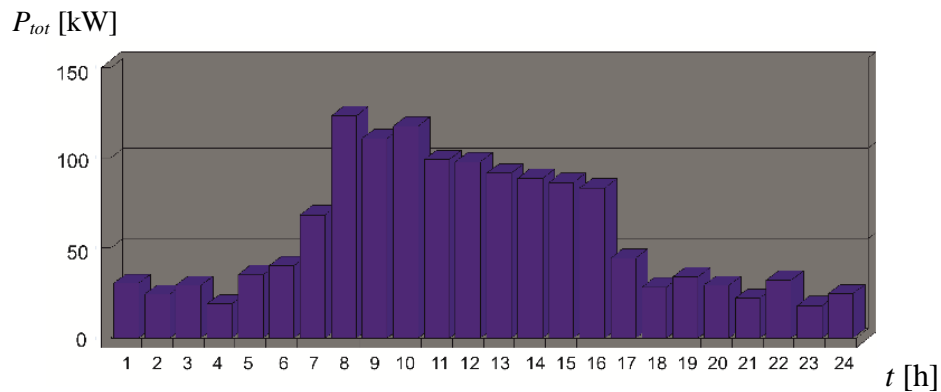
Сл. 6.57 Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са ветрогенератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$ и $\alpha_3 = 0$



Сл. 6.58 Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 21 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$ и $\alpha_3 = 0$



Сл. 6.59 Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са ветрогенератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_3 = 1$



Сл. 6.60 Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 21 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_3 = 1$

Процедура за добијање оптимизованог распореда за пуњење флоте електричних возила у микромрежи једне компаније којом се обезбеђује компромис између захтева заинтересованих субјеката, представља један од доприноса ове дисертације. Резултати показују да оптимални распореди пуњења/пражњења електричних возила у микромрежи могу узети у обзир користи свих учесника на тржишту електричне енергије.

Литература за Главу 6

- [1] D. Javor, N. Raičević, “Optimizacija primene V2G tehnologije u mikromreži sa obnovljivim izvorima energije”, *63. Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2019*, Srebrno jezero, Srbija, Juni 3 – 6, 2019, EE1.2, str. 326-329.
- [2] “Lingo,” Lindo Systems Inc. [Online]. Доступно на: <https://www.lindo.com> [Пристапљено 10.03.2019.]
- [3] “WAsP - the Wind Atlas Analysis and Application Program,” DTU. [Online]. Доступно на: <http://www.wasp.dk> [Пристапљено 17.04.2019.]
- [4] M. Mirković, “Eksploataciona karakteristika obnovljivih izvora energije”, *Diplomski rad*, ETF, Beograd, str. 32, 2011.
- [5] I. Babić, “Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu”, *Doktorska disertacija*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, str. 66, 2016.
https://www.etf.bg.ac.rs/uploads/files/javni_uvid/izvestaji/doktorske/2016/Iva_Babic_doktorska_disertacija.pdf
- [6] “HUPX ID market data,” Hungarian Power Exchange. [Online]. Доступно на: <https://hupx.hu/en> [Пристапљено 17.04.2019.]
- [7] Elektroprivreda Srbije 2015, “Odluka o izmenama pravila o radu distributivnog sistema, 6.16 Profili potrošnje”, str. 11, 2015.
- [8] I. Anastasijević, A. Janjić, “Electric vehicles charging optimization: reducing operational costs of small companies,” *6th International Conference on Transport and Logistics TIL 2017*, pp. 109-113, 2017.
- [9] G. Ferro, F. Laureri, R. Minciardi, M. Robba, “An optimization model for electrical vehicles scheduling in a smart grid,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 14, pp. 62-70, 2018.
- [10] D. Javor, A. Janjić, N. Raičević, “Reducing energy costs by using optimal electric vehicles scheduling and renewable energy sources,” *18th International Symposium INFOTEH – JAHORINA 2019*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/INFOTEH.2019.8717760.
- [11] D. Javor, D. Krstić, N. Raičević, “Optimization of daily schedule for electric vehicles charging to minimize the energy costs,” *Safety Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 69–74, Jan. 2020. DOI:

10.5937/SE2002069J. <https://www.znrfak.ni.ac.rs/SE-Journal/Archive/SE-Web%20Journal%20-%20Vol10-2/PDF/SE%20Vol.10,%20No.2%20-%20Journal.pdf>

[12] L. Liu, F. Kong, X. Liu, Y. Peng, Q. Wang, “A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 648-661, 2015.

[13] F. Laureri, L. Puliga, M. Robba, F. Delfino, G. Bulto, “An optimization model for the integration of electric vehicles and smart grids: Problem definition and experimental validation,” *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2016.

[14] Z. Yang, K. Li, A. Foley, “Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems: a review,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 396-416, 2015.

[15] B. Kim, S. Ren, M. van der Schaar, J. Lee, “Bidirectional energy trading and residential load scheduling with electric vehicles in the smart grid,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 7, pp. 1219-1234, 2013.

[16] H. Yang, H. Pan, F. Luo, J. Qiu, Y. Deng, M. Lai, Z. Dong, “Operational planning of electric vehicles for balancing wind power and load fluctuations in a microgrid,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 592-604, 2017.

[17] “Tipovi kablova i utikači za punjenje,” Hyundai. [Online]. Доступно на: <https://www.hyundai.rs/ponuda/emobilnost/cables-plugs> [Приступљено 22.04.2023.]

[18] “Nissan Leaf 30 kWh,” Electric Vehicle Database. [Online]. Доступно на: <https://ev-database.org/car/1020/Nissan-Leaf-30-kWh> [Приступљено 18.04.2019.]

[19] “Elektromobilnost,” Schrack Technik. [Online]. Доступно на: <https://www.schrack.rs/know-how-cip/elektromobilnost> [Приступљено 11.04.2023.]

[20] “Market Data: Day-Ahead Auction,” SEEPEx. [Online]. Доступно на: <http://seepex-spot.rs/en/market-data/day-ahead-auction> [Приступљено 05.07.2020.]

[21] D. Javor, N. Raičević, “The Effect of Ambient Temperature on the Costs of Battery Electric Vehicles Charging in the Microgrid,” *21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA 2022*, East Sarajevo, Bosnia & Herzegovina, March 16-18, 2022, pp. 1-4, doi: [10.1109/INFOTEH53737.2022.9751270](https://doi.org/10.1109/INFOTEH53737.2022.9751270)

- [22] M. van der Kam, W. van Sark, “Smart charging of electric vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid; a case study,” *Applied Energy*, vol. 152, pp. 20-30, 2015.
- [23] J. G. Neubauer, E. Wood, “Thru-life impacts of driver aggression, climate, cabin thermal management, and battery thermal management on battery electric vehicle utility,” *J. Power Sources* 2014, 259, pp. 262–275, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.083.
- [24] K. R. Kambly, T. H. Bradley, “Estimating the HVAC energy consumption of plug-in electric vehicles,” *J. Power Sources* 2014, 259, pp. 117–124, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.033.
- [25] K. R. Kambly, T. H. Bradley, “Geographical and temporal differences in electric vehicle range due to cabin conditioning energy consumption,” *J. Power Sources* 2014, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.10.142.
- [26] T. Yuksel, J. J. Michalek, “Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the United States,” *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49, 3974–3980.
- [27] “Cost of replacing the Nissan LEAF’s Batteries,” Cars UK. [Online]. Доступно на: <https://www.carsuk.net/cost-of-replacing-the-nissan-leafs-batteries-drops-90-in-seven-years> [Приступљено 28.12.2021.]
- [28] “Nissan Leaf, Chevy Volt Range Loss in Winter: New Data from Canada,” Green Car Reports. [Online]. Доступно на: https://www.greencarreports.com/news/1089160_nissan-leaf-chevy-volt-range-loss-in-winter-new-data-from-canada [Приступљено 28.12.2021.]
- [29] “SEE Power EXchange,” Adex. [Online]. Доступно на: <https://seepex-spot.rs/day-ahead-auction> [Приступљено 24.01.2022.]
- [30] D. Javor, N. Raičević, D. Klimenta, A. Janjić: “Multi-Criteria Optimization of Vehicle-to-Grid Service to Minimize Battery Degradation and Electricity Costs,” *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 28 (3), pp. 24-29, June 2022, <https://doi.org/10.5755/j02.eie.31238>
- [31] D. Wang, J. Coignard, T. Zeng, C. Zhang, S. Saxena, “Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services,” *Journal of Power Sources*, vol. 332, pp. 193–203, 2016. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.116.
- [32] A. Dogan, M. Alci, “Heuristic optimization of EV charging schedule considering battery degradation cost,” *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 24, no. 6, pp. 15–20, 2018. DOI: 10.5755/j01.eie.24.6.22283.

- [33] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghaie, “A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1730–1738, Oct. 2016. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2558500.
- [34] M. A. Ortega-Vazquez, “Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty,” *IET Gen. Trans. & Dist.*, vol. 8, no. 6, pp. 1007–1016, Jun. 2014. DOI: 10.1049/iet-gtd.2013.0624.
- [35] H. Fu, Y. Han, J. Wang, Q. Zhao, “A novel optimization of plug-in electric vehicles charging and discharging behaviors in electrical distribution grid,” *Journal of Electrical and Computer Engineering (JECE)*, vol. 2018, art. ID 5091084, 2018. DOI: 10.1155/2018/5091084.
- [36] G. Saldaña, J. I. San Martin, I. Zamora, F. J. Asensio, O. Oñederra, “Electric vehicle into the grid: Charging methodologies aimed at providing ancillary services considering battery degradation,” *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2443, 2019. DOI: 10.3390/en12122443.
- [37] V. G. Guliashki, G. I. Marinova, P. P. Groumpos, “Multi-objective optimization approach for energy efficiency in microgrids,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 25, pp. 477–482, 2019. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.587.
- [38] A. Petrušić, A. Janjić, “Renewable energy tracking and optimization in a hybrid electric vehicle charging station,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, p. 245, 2021. DOI: 10.3390/app11010245.
- [39] S. Nayana, “Electric vehicle charging with battery scheduling and multicriteria optimization using genetic algorithm,” *Journal of Electrical Engineering and Automation (EEA)*, vol. 2, no. 3, pp. 123–128, Jan. 2021. DOI: 10.36548/jeea.2020.3.003.
- [40] M. Jafari, A. Gauchia, S. Zhao, K. Zhang, L. Gauchia, “Electric vehicle battery cycle aging evaluation in real-world daily driving and vehicle-to-grid services,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 122–134, Mar. 2018. DOI: 10.1109/TTE.2017.2764320.
- [41] W.-Q. Sun, Y.-M. Tan, L. Ye, S.-F. Chen, “Optimizing the load curve of electric vehicle battery swapping station,” *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 23, no. 4, pp. 3–8, 2017. DOI: 10.5755/j01.eie.23.4.18715.

7

Вишекритеријумско рангирање опасности од пожара електричних возила

7.1 Батерије електричних возила

7.2 Узроци настанка пожара електричних возила

7.3 Типични пожари електричних возила

7.4 Процена опасности од пожара

7.5 Стратегије гашења пожара електричних возила

7.6 Примена метода вишекритеријумске оптимизације за одређивање најопаснијег пожара електричног возила са еколошког становишта

7.1 Батерије електричних возила

Опасност од пожара је увек присутна код возила због складиштења неопходне енергије. Са порастом броја електричних возила све је већи број различитих забележених случајева пожара који ће омогућити боље проучавање и превазилажење ове опасности код BEV, HEV, PHEV и FCEV. Код возила са мотором са унутрашњим сагоревањем (ICEV) енергија је пропорционална капацитету резервоара, а код електричних возила зависи од величине, типа, броја и капацитета батерија. Поред тога што батерије електричних возила треба да обезбеде велику снагу и капацитет, дуги век трајања и велике брзине пуњења, оне морају да испуне захтеве ограниченог простора за смештај у возилу и за што мању тежину уз одговарајућу цену батерије и што мањи утицај на животну средину при рециклажи. Већини захтева одговарају литијум-јонске (Li-ion) батерије које имају већу специфичну густину енергије у односу на друге типове батерија: оловне (Pb), никл-кадмијумске (Ni-Cd) и никл-металхидридне (Ni-MH).

Први електрични аутомобили који су се појавили почетком двадесетог века користили су оловне батерије (Сл. 7.1), чија је једноставна технологија већ била довољно развијена. Главни недостаци ових батерија су велика тежина (25-50% укупне тежине електричног возила) и ниска специфична енергија батерије од 30 до 50 Wh/kg. Ефикасност оваквих батерија је од 70 до 75%, али се смањује са смањењем спољашње температуре чак до 40%. Спорије се пуне од осталих типова батерија, а век трајања оловних батерија опада ако се у режиму употребе празне великим струјама, као и у случају ниских температура.



Сл. 7.1 Оловна батерија

Никл-кадмијумска батерија (Сл. 7.2) има дужи век трајања од оловне, већу специфичну густину енергије, омогућава високе струје пражњења и отпорна је на екстремне температуре. Њен недостатак је што је кадмијум веома токсичан метал и опасан за животну средину. Из еколошких разлога кадмијум је замењен металхидридима који садрже мање токсичне метале.



Сл. 7.2 Никл-кадмијумска батерија

Никл-металхидридне батерије (Сл. 7.3) имају већу специфичну енергију од никл-кадмијумских и краћи век трајања, али дужи од оловних. Никл-металхидридне батерије се могу рециклирати и нису опасне за животну средину. На високим температурама долази до бржег самопражњења и ослобађања топлоте. Пошто су неки недостаци батерија били израженији и на ниским температурама, појавиле су се батерије под називом Zebra за које је било потребно загрејати електролит на 270 °С на почетку рада. Оне су нетоксичне и имају специфичну енергију до 120 Wh/kg.



Сл. 7.3 Никл-металхидридне батерије

Литијум-јонске батерије појавиле су се 1979. године. Оне имају мању тежину, већу густину енергије, дужи век трајања и већи капацитет од осталих врста батерија, али су доста скупље. Због усавршавања технологије производње цена батерија смањила се од 750 \$/kWh 2010. године на 130 \$/kWh 2021. године, са тенденцијом даљег смањења.

Недостаци литијум-јонских батерија које су се прве појавиле били су: температурна осетљивост, деформације на високој температури, лоше перформансе на ниској температури и рана деградација батерије. Ако се у потпуности испразне, не могу се поново напунити, за разлику од никл-кадмијумских код којих је то могуће. Новије генерације литијум-јонских батерија (Сл. 7.4) имају дужи век трајања, веће брзине пуњења, мањи ризик од пожара и мањи утицај на животну средину.

Осим литијум-јонских батерија, постоје и други типови литијумских батерија: литијум-гвожђе-фосфатне (LFP), литијум-титан-оксидне (LTO), литијум-никл-манган-кобалтне (LNMC), литијум-манган-оксидне (LMO) и литијум-никл-кобалт-алуминијум-оксидне (LNCA).



Сл. 7.4 Литијум-јонске батерије

Нови системи за складиштење енергије у електричним возилима развијају се у циљу повећања специфичне густине енергије и века трајања, као и смањења ризика од пожара. Ризик од пожара постоји због микроскопских промена у структури литијума у току непрекидног протока енергије, као и због прекида напона, а постоји и хемијска реакција која изазива корозију у танком слоју на површини електрода. Произвођачи батерија Toshiba

заменили су анодну легуру литијум-јонске батерије ниобијум-титанском оксидном легуром која има својства суперпроводљивости при врло ниским температурама, што смањује време пуњења. Развијају се и технологије замене графита силицијумом у литијумским батеријама како би се повећала специфична густина енергије.

Перспективан је и развој технологија чврстих батерија које не користе електролит, што омогућава већу стабилност и густину енергије, брже пуњење, већу сигурност и дуже трајање. Још увек се траже погодни материјали да замене електролите, а осим тога поступак производње чврстих батерија је комплекснији.

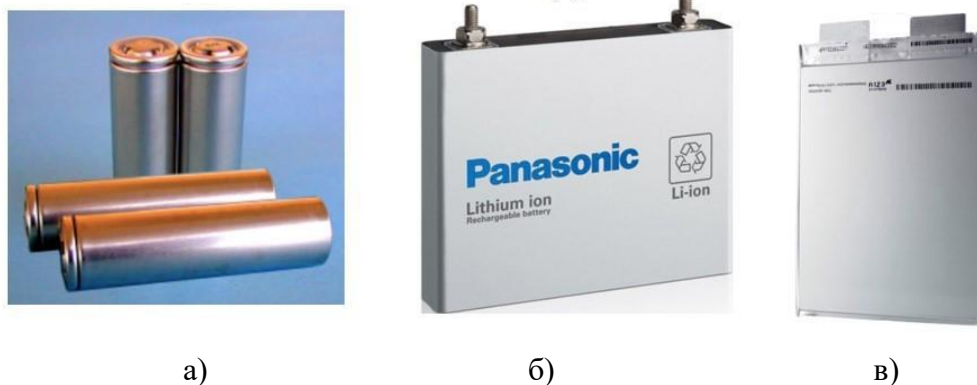
Батерије електричних возила се састоје од ћелија, модула и пакета, као што је приказано на Сл. 7.5 а), б) и в). Батеријске ћелије могу бити повезане серијски, паралелно или у мешовитом споју. Више ћелија формира батеријски модул. Због заштите од спољашњих удара, топлоте и вибрација, неопходно је ћелије поставити у оквир. Пакет батерија укључује више модула, структурне компоненте, ожичење, расхладне петље и енергетску електронику [1-3].



Сл. 7.5 а) Батеријска ћелија, б) батеријски модул и в) батеријски пакет

На основу конфигурације разликују се три облика батеријских ћелија: цилиндричне, призматичне и танке призматичне ћелије, приказане на Сл. 7.6 а), б) и в).

Карактеристике неких типова батеријских ћелија приказане су у Таблици 7.1.



а)

б)

в)

Сл. 7.6 Типови батеријских ћелија

а) цилиндрична, б) призматична и в) танка призматична

Таблица 7.1 Карактеристике неких типова батеријских ћелија

	Pb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion
Напон ћелије [V]	2	1.2	1.2	4
Радна температура [°C]	од -40 до 55	од -40 до 50	од -20 до 50	од -20 до 50
Самопражњење [% месечно]	4-6	10-20	15-25	2
Специфична енергија [Wh/kg]	30-50	45-80	60-120	90-250
Век трајања [год]	6	10	2-5	10
Број циклуса	500-1000	500-2000	300-600	3000-5000

У Таблици 7.2 дати су основни параметри ових облика батеријских ћелија, а у Таблици 7.3 подаци за капацитет и дomet неких најчешће продаваних електричних возила. Дometи електричних возила најчешће се узимају из података три организације: United States Environmental Protection Agency (EPA), Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP) и New European Driving Cycle (NEDC). Њихови подаци се међусобно разликују због тога што свака од њих има своје специфичне процедуре тестирања. Различити су и подаци

произвођача, као и реални домети електричних возила који зависе од много фактора. Максимални домети најновијих модела електричних возила су до 750 km.

Систем за управљање батеријом (енг. Battery Management System – BMS) управља снагом, пуњењем/пражњењем и температуром батерије [4].

Таблица 7.2 Основни параметри различитих облика батеријских ћелија [5], [11]

Произвођач	Облик ћелије	Димензије [mm]	Напон [V]	Капацитет [Ah]	Специфична снага [W/kg]	Тежина [g]
Panasonic	Цилиндрична	Ø 18.5 × 65.3	3.6	3.2	120	48.5
Hitachi	Призматична	148 × 91 × 26.5	3.6	28	2300	720
Kokam	Танка призматична	462 × 327 × 15.8	3.6	240	360	4780

Таблица 7.3 Капацитет батерије, специфична густина енергије, облик ћелије и домет неких модела електричних возила [6], [11]

Модел електричног возила	Капацитет батерије [kWh]	Специфична густина енергије [Wh/kg]	Облик ћелије	Домет [km]
Nissan Leaf S (2017) [7]	40	229	Танка призматична	243 (EPA)
Renault Zoe 40 (2017) [8]	41	228	Танка призматична	400 (NEDC)
BMW i3 (2016) [9]	42.2	230	Призматична	246 (EPA)
Tesla Model S (2017) [10]	90	248	Цилиндрична	509 (NEDC)

На Сл. 7.7 приказан је батеријски модул за Tesla Model S (2012) са цилиндричним ћелијама дужине 65.3 mm и пречника Ø 18.5 mm. Батеријски пакет капацитета 85 kWh садржи 7104 ћелије. Tesla Model S (2017) има домет од око 500 km, а у свом батеријском пакету капацитета 90 kWh садржи 18650 цилиндричних батеријских ћелија. На Сл. 7.8 приказан је батеријски пакет за Nissan LEAF (2011) са призматичним ћелијама димензија

290 mm x 216 mm x 7.1 mm који садржи 192 ћелије у пакету капацитета 24 kWh. На Сл. 7.9 приказан је батеријски пакет за Chevrolet Volt (2011) са танким призматичним ћелијама димензија 177 mm x 127 mm x 6.3 mm који садржи 288 ћелија у пакету капацитета 60 kWh.



Сл. 7.7 Батеријски модул за Tesla Model S (2012) са цилиндричним ћелијама



Сл. 7.8 Батеријски пакет за Nissan LEAF (2011) са призматичним ћелијама



Сл. 7.9 Батеријски пакет за Chevrolet Volt (2011) са танким призматичним ћелијама

Сваки произвођач електричних аутомобила користи одређени тип батеријских ћелија. Tesla користи цилиндричне ћелије, BMW и Volkswagen користе призматичне ћелије, док Nissan, Renault и Chevrolet користе танке призматичне ћелије. Капацитет литијум-јонских батерија [12] у зависности од типа и произвођача варира од 3 до 300 Ah. Нпр. Tesla користи NCAO цилиндричне ћелије са 3.4 Ah по ћелији којих има укупно 18650 у аутомобилу Tesla Model S (2017), што резултује са 248 Wh/kg. Ризик од пожара расте са већим бројем и капацитетом батерија.

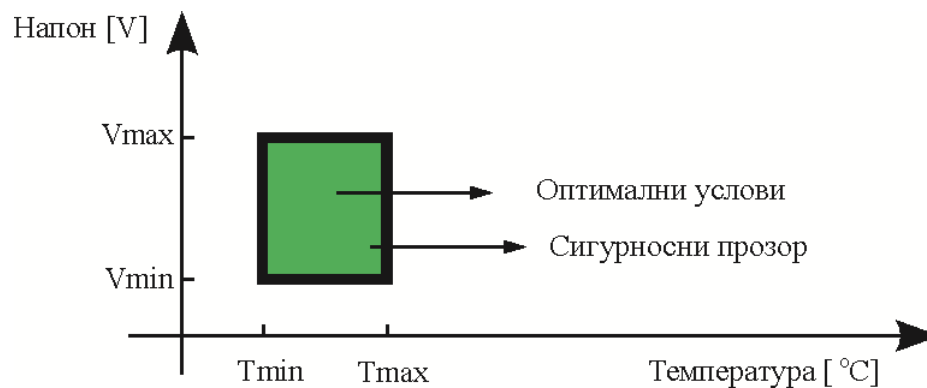
7.2 Узроци настанка пожара електричних возила

Ризик од пожара због самопаљења батерија у електричним возилима постоји [13], [14], а додатно је увећан ако су батерије подвргнуте спољашњим утицајима: термалним, механичким и електричним, који су нарочито присутни у екстремним радним условима и у случају саобраћајних удеса. За разлику од литијум-јонских батерија које се користе у већини преносних електронских уређаја (лаптоп, мобилни телефон, ...), код којих најчешће нема екстремних радних услова при експлоатацији, у случају електричних возила батерије трпе сталне и брзе промене услед убрзавања и успоравања у комплексним условима вожње у градском саобраћају, као и на путу. Капацитети батерија у електричним возилима су хиљадама пута већи него у преносивим уређајима, па је ризик од пожара знатно већи и због тога су сигурносне мере напредније. Систем за праћење стања батерије (BMS) надгледа температуру и напон, како би се одржали оптимални услови. Неопходно је осигурати правилну дистрибуцију електричне енергије и напона и обезбедити хлађење. У случају квара у BMS-у може доћи до прегревања батерија, пуцања, бацања варница, испуштања запаљивих гасова и токсичних димова, што даље може довести до паљења и пожара, бацања пламена и експлозије гаса [15].

7.2.1 Термички утицај на батерије електричних возила

Батерије најбоље раде на температурама од 20 до 30 °C. Опсези температуре и напона потребни за оптимално функционисање батерија, као и критичне температуре и напони за угрожену сигурност рада батерије електричног возила дати су на Сл. 7.10. Екстремно високе и екстремно ниске температуре утичу на перформансе батерија.

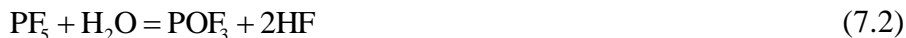
Дуготрајно коришћење електричног возила на екстремним температурама смањује век трајања батерија. У условима високих температура у батеријама се одвијају нежељене хемијске реакције, па ако је смањена способност термалне дисипације, то може резултовати прегревањем, паљењем батерија и пожаром електричног возила. На ниским температурама је повећана унутрашња отпорност батерија што доводи до таложења метала и ефеката грејања унутар батерија. То такође може бити узрок паљења батерија.



Сл. 7.10 Опсеги температуре и напона за оптимално функционисање батерија

Прегревање батерије, односно, повећање температуре за више од 10 °C/min, дешава се услед бурних егзотермних термохемијских и електрохемијских ланчаних реакција које превазилазе могућности хлађења. Ризик од термичког пробоја наступа када температура батерије пређе око 150 °C. Како се процеси одвијају унутар појединачних ћелија, ризик од пожара се повећава ако се прегревање шири кроз батерију. Након прегревања, велика количина дима се ослобађа кроз сигурносни вентил или пукотине у кућишту батерије [16]. Овај дим се састоји од мешавине запаљивих и токсичних гасова, као што су флуороводоник (HF), цијановодоник (HCN), угљен-моноксид (CO), итд. Удисање ових гасова може бити веома опасно и изазвати несвестицу, главобољу, кому, па чак и смрт. Флуориди као састојци литијум-јонских батерија могу стварати фосфороксифлуорид (POF₃), који може бити отровнији од флуороводоника. Хемијске реакције које се одвијају при настанку HF и POF₃ дате су једначинама (7.1-7.3):





Емисије гасова разликују се зависно од произвођача и типа батерије. Испитивањем је утврђено да су концентрације HF биле веће код LFP ћелија него код LNMC/LMO ћелија које су емитовале више гаса за краће време, док је тотална количина ослобођеног HF била приближно иста [17]. Сматра се да је тотална количина ослобођена при пожару електричног возила око 2 пута већа од измерене при тестирању пожара ICEV [18].

Тестирањем пожара три ICEV и два BEV измерене су емисије продуката сагоревања, а установљено је и присуство различитих метала у чађи, као што су: алуминијум (Al), кадмијум (Cd), олово (Pb), кобалт (Co), хром (Cr), бакар (Cu), литијум (Li), манган (Mn), никл (Ni), цинк (Zn), као и органских једињења полицикличних ароматичних угљоводоника (PAHs) и анјона растворљивих у води: флуорида (F^-), хлорида (Cl^-) и бромида (Br^-), присутних у чађи и пепелу. Измерене количине токсичних гасова (CO_2 , CO, THC – укупни угљоводоници, NO, NO_2 , HF, HCl, HCN) дате су у Таблици 7.4.

Таблица 7.4 Емисије токсичних гасова при тестирању пожара возила

Реф.	Тип возила	Маса [kg]	Ускладиштена енергија	Укупна количина продуката сагоревања							
				CO_2 [kg]	CO [kg]	THC [kg]	NO [g]	NO_2 [g]	HF [g]	HCl [g]	HCN [g]
[18, 19]	ICEV1	1128	Пун резервоар дизел горива	508	12.0	2.4	679	307	621	1990	167
	BEV1	1122	16.5 kWh 100% SOC	460	10.4	2.4	500	198	1540	2060	113
	ICEV2	1404	Пун резервоар дизел горива	723	15.7	2.9	740	410	813	2140	178
	BEV2	1501	23.5 kWh 100% SOC	618	11.7	2.7	770	349	1470	1930	148
[20]	ICEV3 (1998)	Модел средње класе	Празан резервоар горива	265	6.9	4.0	-	-	-	1400	170

У тестовима ICEV и BEV произвођача А, и BEV произвођача В (Таблица 7.5) добијени су резултати хемијских анализа чађи, пепела и дима приликом пожара возила [21].

Таблица 7.5 Ослобођена топлота и губитак масе при тестирању пожара возила

Тест	Тип возила	Ускладишена енергија	SOC	Облик и тип ћелије	Модел	Година	Произвођач
1.	ICEV	44 l дизел горива	-	-	Породични ауто	2011	A
2.	BEV	40 kWh	80%	Танка призматична, NMC	Породични ауто	2019	A
3.	BEV	24 kWh	80%	Призматична, NMC	Мали ауто породични	2016	B

Таблица 7.6 Продукти сагоревања при тестирању пожара возила

Продукти сагоревања		Тип возила		
		ICEV A	BEV A	BEV B
Гасовита једињења	CO ₂ [kg]	344	335	438
	CO [g]	6 420	7 790	9 510
	THC [g]	2 370	3 130	2750
	HF [g]	11	573	859
	HCl [g]	1100	1590	1800
	HBr [g]	18	115	88
	HCN [g]	-	-	155
	SO ₂ [g]	479	575	645
	NO [g]	452	371	617
	NO ₂ [g]	44	25	76
	PAH [g]	112	29	334
Честице у чађи	Сува маса [kg]	9.0	10.7	17.0
Метали у чађи	Li [mg/g]	0.03	12	3.2
	Al [mg/g]	0.5	8.5	1.5
	Cd [mg/g]	0.003	0.004	0.002
	Co [mg/g]	0.003	24	12
	Cr [mg/g]	0.03	0.07	0.01
	Cu [mg/g]	0.9	1.4	0.9
	Mn [mg/g]	0.1	26	9.3
	Ni [mg/g]	0.03	45	12
	Pb [mg/g]	2.0	0.4	0.2
	Zn [mg/g]	22	27	20
	Ањони у чађи	F ⁻ [mg/g]	0.2	18
Cl ⁻ [mg/g]		26	17	18
Br ⁻ [mg/g]		2.3	16	8.3
Органска једињења у чађи	PAH [mg/g]	1.0	0.03	0.5
Ањони у пепелу	F ⁻ [mg/g]	0.02	0.2	0.1
	Cl ⁻ [mg/g]	31	62	16
	Br ⁻ [mg/g]	0.4	0.07	0.5

Таблица 7.7 Ослобођена топлота и губитак масе при тестирању пожара возила

Тип возила	ICEV A	BEV A	BEV B
Укупна ослобођена топлота THR [GJ]	5.9	5.2	6.7
Губитак масе [kg]	252	247	400
Процентуални губитак масе [%]	19.0	15.6	25.6
Ефективна топлота сагоревања [MJ/kg]	23	21	17

Продукти сагоревања при тестирању пожара возила дати су у Таблици 7.6 [21]. Укупна ослобођена топлота, ефективна топлота сагоревања и губитак масе при тестирању пожара возила дати су у Таблици 7.7 [21]. Брзина ослобађања топлоте (енг. Heat release rate – HRR) је још важнији параметар пожара од укупне количине ослобођене топлоте. Овај фактор представља снагу пожара односно интензитет и одређује опасност од пожара. Брзина ослобађања топлоте при пожару ICEV и BEV измерена при тестирању је обично у границама од 2 MW до 11 MW.

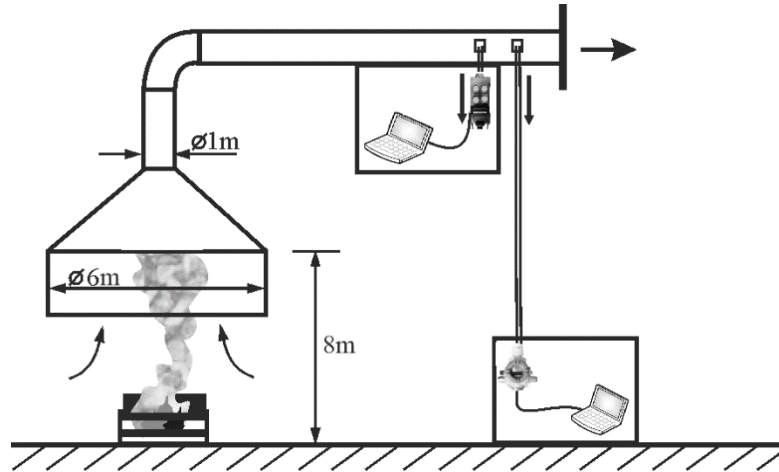
Остали важни параметри су: токсичност гасова и пара, појава густог дима, ризик од експлозије, појава накнадног паљења, итд.

Тестирања се, према регулативи, обављају на четири нивоа: на нивоу ћелије, на нивоу модула, на нивоу батеријског пакета возила и на нивоу целог возила.

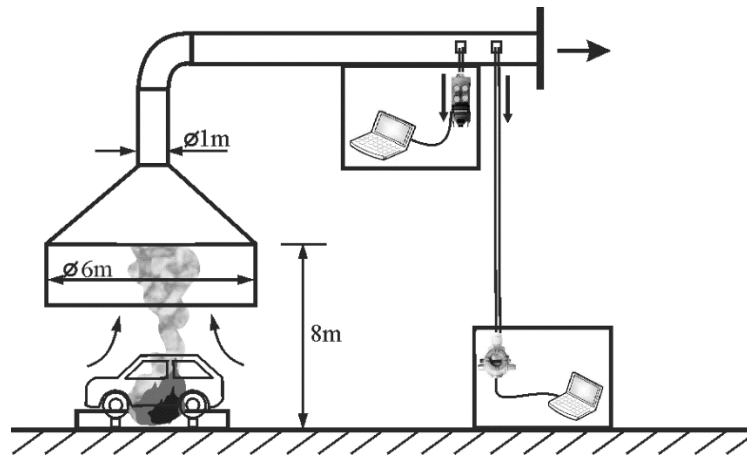
Приликом сагоревања танке призматичне ћелије Li-Ion батерије од 96 g измерене су емисије [22]: CO од 1.77 g, NO од 195 mg, SO₂ од 220 mg, HCl од 25 mg и HF од 757 mg.

За тестове RISE [21] је коришћена батерија возила PHEV SUV из 2014. године. Три од десет батеријских модула је уклоњено из пакета пре великог теста са преосталим батеријским пакетом. Та три модула су искоришћена и за тестове на нивоу ћелије и за тестове на нивоу модула. На овај начин сви тестови су обављени са батеријским ћелијама истог пакета батерија. Разматране призматичне LMO-NMC батеријске ћелије су капацитета 40 Ah, а SOC је око 80% за све тестове. Резултати за измерене гасовите продукте у девет тестова пожара батерија специфицираних у Таблици 7.8, приказани су у Таблици 7.9.

Поставка тестирања за пожар на нивоу пакета батерија приказана је на Сл. 7.11. Иста поставка користи се и за тестирање пожара целокупног возила (Сл. 7.12).



Сл. 7.11 Поставка тестирања за пожар на нивоу пакета батерија



Сл. 7.12 Поставка тестирања за пожар возила

Таблица 7.8 Спецификација тестова пожара батерија PHEV [21]

Тест	Тип	Капацитет енергије	Облик и тип ћелије	Напон	Спољашња снага паљења
1	пакет	8.4 kWh	Призматична, LMO-NMC	31.33-31.57 V (модули)	150 kW
2	модул	1.2 kWh	Призматична, LMO-NMC	31.30 V	30 kW
3	модул	1.2 kWh	Призматична, LMO-NMC	31.31 V	30 kW
4	2 ћелије	300 Wh	Призматична, LMO-NMC	3.913 V, 3.913 V	15 kW
5	2 ћелије	300 Wh	Призматична, LMO-NMC	3.912 V, 3.913 V	15 kW
6	1 ћелија	150 Wh	Призматична, LMO-NMC	3.912 V	15 kW
7	1 ћелија	150 Wh	Призматична, LMO-NMC	3.913 V	15 kW
8	1 ћелија	150 Wh	Призматична, LMO-NMC	3.913 V	15 kW
9	1 ћелија	150 Wh	Призматична, LMO-NMC	3.914 V	15 kW

Таблица 7.9 Гасовити продукти сагоревања при пожару батерија PHEV [21]

гас	пакет	модул	модул	2 ћелије	2 ћелије	1 ћелија	1 ћелија	1 ћелија	1 ћелија
CO ₂ [kg]	34	4.7	3.9	0.93	0.91	0.44	0.41	0.44	0.43
CO [g]	250	14	7.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.2
HF [g]	244	50	42	11	9.1	3.5	4.0	4.8	5.1
HCl [g]	111	1.9	2.0	-	-	-	-	-	-
HBr [g]	4.8	0.07	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂ [g]	-	18	22	-	-	-	-	-	-
NO [g]	-	2.2	1.1	-	-	-	-	-	-
THC [g]	298								
PAH [g]	8.8								

Запаљиви гасови могу да се запале варницама, електричним луком или неким другим извором паљења. Настали пламен може додатно загревати батерију. Ако је брзина ослобађања гаса из кућишта батерије мања од брзине стварања гаса, ћелија батерије може да пукне. Испуштање гасова кроз сигурносни вентил не спречава спољашње загревање ћелије у случају пламена или запаљених батерија у близини ћелије. Ако се ослобођени гасови акумулирају у затвореном простору и помешају са околним кисеоником и ако постоји извор паљења, могућа је и експлозија.

Енергија која се ослобађа при пожару батерије електричног возила (модел произведени 2018. године) чији је домет 200 km, приближно је једнака енергији која се ослобађа при пожару резервоара горива које је довољно за 700 km приликом вожње ICEV, према извештају US Department of Energy [23].

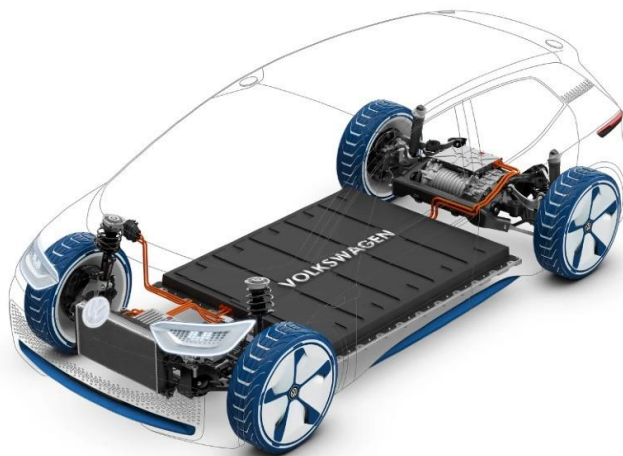
Ако се претпостави да је термохемијска енергија која се ослобађа при пожару батерије електричног возила од 5 до 10 пута већа од електричне енергије батерије, може се одредити да је при пожару електричног возила батерије 90 kWh тотална енергија вредности између 1.64 GJ и 3.28 GJ. Са оваквом батеријом домет је 400 km. Исти домет имало би ICEV које може да пређе 100 km са 7.3 литра горива, ако у резервоару има око 30 литара. У том случају може се одредити да би ослобођена топлота од сагоревања горива из резервоара била приближно 1 GJ уколико гориво ослобађа 47 MJ/kg и ако је однос масе и запремине 0.75 kg по литру. У зависности од количине горива у резервоару биће ослобођена пропорционално мања енергија, али то не важи у случају пожара литијум-јонске батерије, јер ослобађање топлоте не зависи тако значајно од стања напуњености батерије (SOC) које

се креће од 20 до 100%. Из овог разматрања је очигледно да је пожар електричног возила теже угасити него пожар возила на фосилна горива.

У EV, осим батерије која складишти енергију исто као и резервоар горива у ICEV, постоји значајна количина других запаљивих материјала. Маса пластике у EV је између 100 и 200 kg, док је у ICEV маса пластике најчешће мања од 50 kg. Топлота сагоревања уобичајених пластичних материјала без остатка сагоревања је нпр. 38.4 MJ/kg за полиетилен, 27 MJ/kg за полистирен, 17.95 MJ/kg за поливинил-хлорид, и није много мања од топлоте сагоревања бензина која је око 47 MJ/kg. Ово значајно повећава укупну количину ослобођене топлоте пожара EV.

7.2.2 Механички утицај на батерије електричних возила

Као и код свих других возила, код електричних возила се у току коришћења може очекивати могућност саобраћајног удеса и механичких оштећења. Због тога постоји заштита батеријских ћелија у оквирима модула и оклопима батеријских пакета. Нова технологија у развоју је директно постављање батерија у каросерију возила (енг. Cell to Body), ради још боље заштите. У принципу, батерија се налази у најсигурнијем делу што се тиче механичких утицаја тј. у сигурној зони (енг. Safety zone), као на Сл. 7.13.



Сл. 7.13 Положај батерије у поду возила

При великим брзинама које су могуће код електричних возила у тренутку саобраћајног удеса, ни највећи ниво механичке заштите није довољан да спречи оштећење

батерија и евентуални пожар возила. Пожар аутомобила Tesla Model S услед удара великом брзином у бетонски браник на улазу у тунел, у Аустрији, 17.10.2017. године, приказан је на Сл. 7.14. На гашењу пожара било је ангажовано 35 ватрогасаца, 5 ватрогасних возила и амбулантно возило [24]. Након гашења пожара коришћена је велика количина воде за хлађење батерије, а возило је било у карантину 48 сати након удеса како би се надгледало евентуално поновно паљење.



Сл. 7.14 Пожар аутомобила Tesla Model S у Аустрији 17.10.2017. године

7.2.3 Електрични утицај на батерије електричних возила

Батерије имају електричне карактеристике које могу бити угрожене честим и брзим пуњењем и пражњењем батерија, као и негативним ефектима услед екстремно тешких услова. Обично је промена електричних карактеристика праћена Цуловим губицима, загревањем батерије и унутрашњим хемијским реакцијама, што даље може довести до кратког споја у батерији. Могући су и кратки спојеви у високонапонском колу, препуњавање батерије (Сл. 7.10) и прегревање, а нарочито у случају неадекватне контроле преноса електричне енергије или квара у BMS.

7.3 Типични пожари електричних возила

У типичне пожаре електричних возила спадају: пожари спонтаног паљења, пожари приликом пуњења, пожари услед саобраћајних удеса, пожари поновног паљења и пожари

услед спољашњих фактора. Истраживање пожара електричних возила у Кини спроведено је у једном кварталу 2022. године и обухватило је 680 случајева пожара. Забележени случајеви паљења електричних возила показују да се дешава просечно 7 пожара дневно на око 6 милиона возила (BEV и PHEV) у Кини, где има око 36% од укупног броја електричних возила у свету.

7.3.1 Пожари спонтаног паљења

Пожари спонтаног паљења дешавају се наизглед без разлога. Њихов узрок могу бити екстремни временски услови као што су веома високе и веома ниске температуре, висока влажност, а могу бити и унутрашњи процеси деградације батеријских ћелија. Дешавају се због преласка граница подношљивости сигурносног оквира у условима којима је изложена батерија у неком тренутку експлоатације.

Ватрогасци округа Orange County у САД гасили су пожар (Сл. 7.15) који се спонтао запалио у електричном возилу и проширио на кућу у Lake Forest, Калифорнија, 2017. год. Батерија се касније поново запалила на камиону за вучу на плацу где је био остављен.

Случај спонтаног паљења електричног аутобуса у Хонг Конгу (Сл. 7.16) забележен је децембра 2015. године. Аутобус који је дизајниран у Хонг Конгу прошао је сва тестирања и био спреман за употребу у градском превозу. Сматра се да је техничко особље приликом контроле и инспекције нарушило заптивање батеријског пакета.



Сл. 7.15 Пожар аутомобила Tesla Model S у Lake Forest, у Калифорнији, 2017. год.



Сл. 7.16 Аутобус градског превоза у Хонг Конгу и његов пожар 2015. године

7.3.2 Пожари приликом пуњења

Пожари приликом пуњења батерија електричних возила дешавају се услед квара BMS и препуњавања батерија, али још чешће у случајевима кварова пуњача и каблова на несигурним станицама за пуњење.

На Сл. 7.17 је приказан пожар аутомобила Porsche Panamera у Бангкоку, Тајланд, 2018. године, који је избио приликом пуњења батерије овог PHEV у току ноћи и након експлозије проширио се на стамбени објекат. Највероватнији узрок овог пожара је инсталација која није била у складу са сигурносним захтевима за коришћење у Тајланду.



Сл. 7.17 Пожар аутомобила Porsche Panamera у Бангкоку, Тајланд, 2018. године

7.3.3 Пожари услед саобраћајних удеса

Пожари електричног возила су често резултат саобраћајних удеса при којима се јако оштети батеријско паковање и запали у току или после судара. Пример таквог пожара је дат на Сл. 7.14. Вероватноћа оваквих узрока пожара повећава се са повећањем броја електричних возила у саобраћају.

При великој брзини аутомобила Tesla Model S у близини града Seattle, Вашингтон, САД, десио се судар са металним отпадом на путу који је оштетио батерију на дну возила и изазвао пожар [25]. Систем електричног возила је открио проблем и алармирао, тако да је возач имао довољно времена да изађе из возила пре појаве пожара (Сл. 7.18). Након овог догађаја, Tesla је ојачао своја возила балистичким штитовима и дефлекторима како би се спречило да крхотине са пута проузрокују било какву штету на батерији возила.



Сл. 7.18 Пожар аутомобила Tesla Model S у близини града Seattle, Вашингтон, 2013. године

7.3.4 Пожари поновног паљења

Батерија која је већ била термички прегрејана или запаљена, може се поново упалити и након гашења првобитног пожара. Маја 2018. године возило Tesla Model S ударило је у зид брзином од 140 km/h и запалило се. Пошто је ватра угашена, батерија се поново запалила у тренутку пребацавања на камион за шлепање. Када је возило поново угашено, још једном се запалило на паркингу где је остављено. Марта 2018. године возило Tesla

Model X у Калифорнији, САД, запалило се 5 дана након удеса (Сл. 7.19). Јуна 2022. године запалило се возило Tesla у складишту ватрогасне службе Сакрамента, САД, након 3 недеље од тренутка судара, иако није ни било пожара приликом почетног инцидента.



Сл. 7.19 Гашење поновног пожара аутомобила, марта 2018. године [26]

7.3.5 Пожари услед спољашњих фактора

Спољашњи фактори због којих може доћи до паљења електричних возила могу бити: злонамерна паљења, шумски пожари, ланчани пожари и пожари других узрока који се дешавају у близини електричног возила.

Ланчани пожар догодио се маја 2017. године на електричним аутобусима на паркингу Crab Island Resort, у Пекингу, Кина (Сл. 7.20) [27], [28]. У овом пожару изгорело је око 80 електричних аутобуса и неколико возила у близини. Истрагом пожара установљено је да је узрок био ватромет са оближње прославе који је запалио гомилице маца (семена) тополе и врбе око аутобуса. Оне садрже много био-уља што их чини лако запаљивим, па су представљале почетни извор пожара. Ови електрични аутобуси имали су LFP батеријске ћелије које имају релативно малу густину енергије у односу на друге батерије и сматрају се сигурнијим, јер су им температуре паљења у опсегу 350 – 500 °С, за разлику од Li-Ion батерија чије су температуре паљења око 200 °С. Због отвореног пламена (чије су температуре више од 1200 °С) и пламених језичака (чије су температуре више од 600 °С), као и дугог трајања ватре у близини возила, батерије су се могле загрејати до критичних температура. Могуће је да је дошло до термичког прегревања и процеса ланчаног паљења, а могуће је и да су се прво запалили запаљиви материјали у аутобусу.



Сл. 7.20 Ланчани пожар електричних аутобуса у Пекингу, Кина, маја 2017. године

7.4 Процена опасности од пожара

Батерије електричних возила морају да задовоље велики број обавезних међународних стандарда да би биле постављене у возилима. Тестови којима се подвргавају су тестови перформанси батерија и тестови сигурности. Приликом тестирања се мере напон, струја и температура батерије. Тестови сигурности дају увид у одговор на кварове услед унутрашњих и спољашњих узрока [11]. Квар батерије може резултовати цурењем, паљењем, па и експлозијом батерије. Стандарди SAE J2464:2009 [29], SAE J2929:2013 [30] и UL 2580:2013 [31] дају информације о емисијама и запаљивости токсичних гасова и дима које батерије испуштају приликом термичког прегревања и пожара, као и о нивоима опасности (Таблица 7.10).

Таблица 7.10 Нивои опасности и критеријуми класификације [29]

Ниво опасности	Опис	Критеријуми класификације и ефекти
0	Нема ефекта	Нема ефекта. Нема губитка функционалности.
1	Пасивна заштита активирана	Нема штете ни опасности; губитак функције није неповратан. Замена или ресетовање заштитног уређаја је довољно да се поново врати нормална функционалност.
2	Дефект/Оштећење	Нема опасности, али систем за пуњење батерије је оштећен; неповратни губитак функције. Замена или поправка.
3	Мало цурење	Доказ цурења ћелије је губитак мањи од 50% тежине електролита.
4	Велико цурење	Доказ цурења ћелије је губитак више од 50% тежине електролита.
5	Руптура	Губитак механичког интегритета оклопа батерија, који резултује ослобађањем садржаја. Кинетичка енергија ослобођеног материјала није довољна да проузрокује физичку штету изван батерија.
6	Пожар или пламен	Паљење и продужено сагоревање запаљивих гасова или течности (дуже од једне секунде), искључујући варнице.
7	Експлозија	Врло брзо ослобађање енергије довољно да проузрокује ударне ваздушне таласе и крхотине које могу изазвати значајно структурно оштећење зависно од величине батерије. Кинетичка енергија избачених делова од батерије може бити довољна да такође направи штету.

Пожар батерије је последица термичког прегревања и електрохемијских реакција унутар батеријских ћелија, разарања активног материјала, реакција између материјала аноде и електролита, уништења сепаратора и разарања катоде. Са порастом броја електричних возила повећаваће се број батерија које треба рециклирати и одложити уз минималне последице за животну средину. У Европи се рециклира само око 5% Li-Ion батерија. Потенцијална опасност од пожара постоји и приликом прикупљања, рециклирања, третмана и одлагања. Овај ризик повезан је са типом и капацитетом батерија, као и начином одлагања. Забринутост за животну средину постоји и због отпадних вода приликом гашења таквих пожара, као и због цурења токсичних материја и испуштања гасова. Постоји и опасност од ширења пожара на околину.

7.5 Стратегије гашења пожара електричних возила

Пожари електричних возила и њихових батерија су тешки за гашење и захтевају велику количину средства за гашење, а посебно су опасни зато што се могу поново појавити изненада и данима након иницијалног пожара. Један од начина да не дође до поновног паљења је да возило или батерија сагоре у потпуности и да се тај начин утרוши сав активни материјал. У пракси ово није случај, јер је најчешће потребно гашење ватре и сузбијање пожара.

Суве прашкасте материје које се иначе користе за гашење пожара могу се користити да контролишу пожар електричних возила, али оне не могу да охладе батеријски пакет и спрече поновно паљење. Ако се користи вода за гашење, она може да сузбије ватру и охлади електрично возило, али може изазвати електричне кварове и реаговати са литијумом из батерија тако да се ослобађају различити токсични гасови и преостаје токсична вода после гашења. Могу се појавити и запаљиви гасови, па поновно паљење може резултовати и експлозијом. С обзиром да би капацитет било каквог уређаја за гашење пожара унутар електричног возила морао бити ограничен, такав уређај не би био довољан да сузбије пожар. Мада је примарни задатак да се смањи температура батерије која је почела да се прегрева, код електричних возила је изражен проблем приступа батеријама, јер су оне херметички затворене како не би продрла влага и прашина, и оклопљене како би се осигурала отпорност на механичке ударе. Због тога вода примењена за гашење има утицаја само на видљиве пламенове и спољашњу површину батеријског пакета, као и материјале који га окружују. Тестови су показали да треба око 10 000 литара воде како би се угасио пожар целокупног возила, што зависи и од величине, типа и локације батерије. За хлађење и гашење пожара потребно је да проток буде велики (200 l/min). Ово може створити велике количине отпадне воде. У тој води биће растворене и велике количине средства за гашење пожара због чега је потребно пронаћи оптимални удео количина средстава која се користе за гашење. Да би било што мање отпадне воде и да она не би неконтролисано загадила околину, користе се монтажни базени [32], као на Сл. 7.21, као и контејнери [33] у које се запаљено возило пребацује (Сл. 7.22) и потапа у довољној количини воде (Сл. 7.23).



Сл. 7.21 Монтажни базен за гашење пожара возила



Сл. 7.22 Пребацивање возила у контејнер за одлагање запаљеног возила



Сл. 7.23 Возило потопљено у контејнеру за одлагање запаљеног возила

Електрична возила на којима је угашен пожар морају бити одложена на безбедном паркингу на отвореном простору и довољно удаљена од других возила и запаљивих објеката. Додатну сигурност пружа прекривање целог електричног возила специјалним прекривачем [34] који онемогућава појаву и ширење пожара (Сл. 7.24 - Сл. 7.28). Неопходно је и упозорење на опасност од поновног пожара, као и упознавање људи у околини депонованог возила са мерама опреза и одговарајућим процедурама у случају потребе.



Сл. 7.24 Термовизијски снимак запаљеног електричног аутомобила Nissan Leaf чија је температура приликом пожара достигла 1080 °C [34]



Сл. 7.25 Сузбијање пожара специјалним прекривачем [34]



Сл. 7.26 Термовизијски снимак запаљеног електричног аутомобила Nissan Leaf испод специјалног покривача чија је температура опала на 107 °C [34]



Сл. 7.27 Поновно избијање пожара електричног возила [34]



Сл. 7.28 Сузбијање поновног пожара електричног возила [34]

На Сл. 7.24 приказан је термовизијски снимак запаљеног електричног аутомобила Nissan Leaf чија је температура након око 10 минута од почетка пожара достигла 1080 °C, након чега је ватрогасна екипа преко аутомобила навукла специјални прекривач (Сл. 7.25). За мање од 20 секунди температура је пала на 350 °C, а за још 10 секунди на 240 °C. Возило је било прекривено специјалним прекривачем око 10 минута, након чега је температура опала на 107 °C (Сл. 7.26). Чим је специјални прекривач уклоњен са возила, ватра је поново букнула (Сл. 7.27). Због тога је ватрогасна екипа поново прекрила аутомобил специјалним прекривачем (Сл. 7.28).

Сваки возач електричног возила треба да буде упознат са мерама предострожности у случајевима алармирања због појаве термичког прегревања батерије. Ако дође до појаве варница, дима или пламена из возила, возач треба да угаси возило, изађе из возила, склони се на сигурну удаљеност, информише ватрогасну службу о месту догађаја и типу возила (BEV, HEV, PHEV). Најсигурније место за путнике возила је изван коловоза и, ако је то могуће, уз ветар, да не би дошло до удисања дима, пара и гасова који могу бити опасни по здравље људи.

Посебну опасност представља ширење пожара електричних аутомобила у затвореним просторима [35] као што су тунели и гараже за паркирање више возила. За пожаре у делимично затвореним надземним и подземним гаражама неопходне мере заштите од пожара су: инсталирани системи за детекцију пожара, фиксни системи за сузбијање пожара (енг. Fixed fire fighting systems - FFFS), шира паркинг места, смањење величина пожарних хелија, млазнице за воду и вентилатори за одувавање густог дима. У случају пожара услед судара у тунелима веома је важно заустављање саобраћаја, као и инсталација система за детекцију пожара, FFFS, обележене пожарне руте, доступни преносиви апарати за гашење, системи за хитне позиве и вентилатори за одувавање густог дима. За пожаре у затвореним гаражама неопходне мере заштите од пожара су: инсталирани системи за детекцију пожара, FFFS, шира паркинг места, ручни апарати за гашење, одржавање и инспекција електричних инсталација, безбедне руте, безбедни дизајн пуњача који спречава употребу неисправне опреме за пуњење, противпожарне завесе, као и паметни систем за управљање паркирањем у гаражи (енг. Artificial intelligence / machine learning based system -

AI/ML систем) који користи сензоре, камере и вештачку интелигенцију како би се обезбедила безбедна растојања између возила.

Због повећаног броја електричних возила и компликованије процедуре гашења пожара неопходно је обучити ватрогасце за ове интервенције. Прва неопходна информација је да ли се ради о електричном аутомобилу, који је тип и капацитет батерије тог возила. Затим треба одредити стратегију гашења пожара на основу ситуације. Прво треба заштити људе и евентуално имобилисати возило. У случају да је возило на пуњачу треба искључити довод електричне енергије, ако је то могуће. Не треба померати возило док се пожар не угаси. Електрични аутомобил који је укључен (спреман за погон) не производи типичан звук као ICEV, тако да ватрогасац није сигуран да ли је возило укључено или искључено. Већина електричних возила има могућност за прекид напајања електричном енергијом. Приликом тешких хаварија могуће је да различити делови возила буду под напоном који је опасан за људе без заштитне опреме. Није дозвољено додиривати или пресецати кабл високог напона (наранцасте боје), јер он може бити на 650 V DC, при чему је напон који је смртоносан за већину људи 120 V DC. За сузбијање пожара електричне батерије не користи се вода, јер би литијум из батерије у хемијским реакцијама са водом појачавао ватру. Пожар се гаси у складу са стандардним радним процедурама за сузбијање пожара. Вода се користи за расхлађивање материјала око батерије, али тек пошто се пожар угаси другим средствима. Поклопац кућишта батерије не сме се отворати или уклањати у току гашења пожара, јер постоји велики ризик од озбиљних повреда ватрогасаца. Сви који су на растојању до 15 m од електричног аутомобила захваћеног пожаром морају имати комплетну личну заштитну опрему (одело и маска), а посебно зато што се при пожару ослобађају различити токсични гасови. Потребно је осигурати довољан број заменских боца са ваздухом, јер гашење пожара може трајати и више сати. Возило са оштећеним или делимично изгорелим Li-Ion батеријама треба удаљити од осталих возила или било каквог запаљивог материјала на удаљеност већу од 15 m, док не прође довољно времена да се батерија може извадити из аутомобила према правилима произвођача и квалификованим особљем, а затим одложити или рециклирати. Уколико је возило потапано у контејнер, употребљену воду треба третирати као отровни отпад и неопходно је пречишћавање пре испуштања у околину.

7.6 Примена метода вишекритеријумске оптимизације за одређивање најопаснијег пожара електричног возила са биоколошког становишта

Методe вишекритеријумске оптимизације могу се применити на одређивање опасности од пожара возила са становишта заштите људи и околине, уколико су познати експериментални подаци за различите типове и моделе возила о мерењима штетних гасова, токсичних метала и једињења, и опасних материја у диму, чађи и пепелу од пожара. У овој дисертацији приказани су резултати примене тежинске методе BWM и методе вишекритеријумске оптимизације PROMETHEE у случају пожара ICEV и BEV. Одређени су тежински коефицијенти за 30 критеријума применом BWM.

7.6.1 Одређивање тежинских коефицијената критеријума применом BWM

Приликом примене BWM као најбољи критеријум узима се онај који је најважнији са становишта заштите људи и околине од пожара возила, а као најгори онај који је најмање важан. Критеријуми опасности од пожара су подељени у 4 групе:

1. Штетни гасови;
2. Параметри сагоревања и ослобађања топлоте;
3. Токсични метали;
4. Анјони халогених елемената у чађи и пепелу.

У првој групи је 9 критеријума: CO₂, CO, THC, HF, HCl, HBr, SO₂, NO и NO₂.

У другој групи је 6 критеријума: PAHG (полициклични ароматични угљоводоници у гасу), DMS (сува маса у чађи), Li (литијум као лаки алкални метал који утиче на експлозивност пожара), PAHS (полициклични ароматични угљоводоници у чађи), THR (укупна ослобођена топлота) и EHC (ефективна топлота сагоревања).

У трећој групи је 9 критеријума: Al, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn.

У четвртој групи је 6 критеријума: FS (анјон F⁻ у чађи), ClS (анјон Cl⁻ у чађи), BrS (анјон Br⁻ у чађи), FA (анјон F⁻ у пепелу), ClA (анјон Cl⁻ у пепелу) и BrA (анјон Br⁻ у пепелу).

За појединачне критеријуме група добијени су тежински коефицијенти применом BWM, а затим су, такође применом BWM, добијени тежински коефицијенти за сваку од 4

групе. Резултујући тежински коефицијенти критеријума добијени су множењем групног тежинског коефицијента са појединачним тежинским коефицијентима критеријума.

Као најважнији критеријум у групи штетних гасова изабран је CO, а као најмање важан CO₂. Одређене су преференције за све остале критеријуме у односу на најважнији критеријум, коришћењем оцена од 1 до 9. Затим су одређене преференције осталих критеријума у односу на најмање важан критеријум, коришћењем оцена од 1 до 9. Добијени резултати за тежине критеријума приказани су на Сл. 7.29, при чему је конзистентност решења остварена, јер је индекс конзистентности (енг. Consistency Ratio – CR) мањи од одговарајућег прага.

Број критеријума = 9	Критеријум 1	Критеријум 2	Критеријум 3	Критеријум 4	Критеријум 5	Критеријум 6	Критеријум 7	Критеријум 8	Критеријум 9	
Назив критеријума	CO ₂	CO	THC	HF	HCl	HBr	SO ₂	NO	NO ₂	
Избор најбољег	CO									
Избор најгорег	CO ₂									
Најбољи према осталима	CO ₂	CO	THC	HF	HCl	HBr	SO ₂	NO	NO ₂	
CO	9	1	8	7	2	4	3	5	6	
Остали према најгорем	CO ₂									
CO ₂	1									
CO	9									
THC	2									
HF	3									
HCl	8									
HBr	6									
SO ₂	7									
NO	5									
NO ₂	4									
Тежински коефицијенти	CO ₂	CO	THC	HF	HCl	HBr	SO ₂	NO	NO ₂	
	0,0273598	0,3146375	0,0478796	0,0547196	0,1915185	0,0957592	0,127679	0,0766074	0,0638395	
CR	0,2083333									
Праг конзистентности	0,3662									



Сл. 7.29 Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за прву групу критеријума (штетни гасови)

У другој групи критеријума (параметри сагоревања и ослобађања топлоте) као најважнији критеријум изабран је THR, а као најмање важан PAHS. Одређене су преференције за све остале критеријуме у односу на најважнији критеријум, а затим у односу на најмање важан критеријум, коришћењем оцена од 1 до 9. Добијени резултати за тежине критеријума приказани су на Сл. 7.30, при чему је конзистентност решења остварена.

Број критеријума = 6	Критеријум 1	Критеријум 2	Критеријум 3	Критеријум 4	Критеријум 5	Критеријум 6
Назив критеријума	PAHG	PM	Li	PAHS	THR	EHC

Избор најбољег	THR
----------------	-----

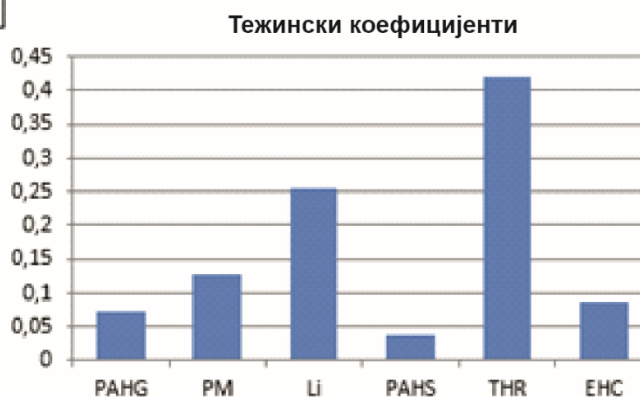
Избор најгорег	PAHS
----------------	------

Најбољи према осталима	PAHG	PM	Li	PAHS	THR	EHC
THR	7	4	2	9	1	6

Остали према најгорем	PAHS
PAHG	3
PM	6
Li	8
PAHS	1
THR	9
EHC	4

Тежински коефицијенти	PAHG	PM	Li	PAHS	THR	EHC
	0,0731707	0,1280488	0,2560976	0,0365854	0,4207317	0,0853659

CR	0,2083333
Праг конзистентности	0,3337



Сл. 7.30 Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за другу групу критеријума (параметри сагоревања и ослобађања топлоте)

У трећој групи критеријума (токсични метали) као најважнији критеријум изабран је Cd, а као најмање важан Al. Редослед токсичности метала узет је на основу биолошких и хемијских спецификација [36]. Одређене су преференције за све остале критеријуме у односу на Cd, а затим у односу на Al, коришћењем оцена од 1 до 9. Добијени резултати за тежине критеријума приказани су на Сл. 7.31, при чему је конзистентност решења остварена.

Број критеријума = 9	Критеријум 1	Критеријум 2	Критеријум 3	Критеријум 4	Критеријум 5	Критеријум 6	Критеријум 7	Критеријум 8	Критеријум 9	
Назив критеријума	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
Избор најбољег	Cd									
Избор најгорег	Al									
Најбољи према осталима	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
Cd	9	1	4	8	2	5	7	3	6	
Остали према најгорем	Al									
Al	1									
Cd	9									
Co	6									
Cr	2									
Cu	8									
Mn	5									
Ni	3									
Pb	7									
Zn	4									
Тежински коефицијенти	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
	0,0273598	0,3146375	0,0957592	0,0478796	0,1915185	0,0766074	0,0547196	0,127679	0,0638395	
CR	0,2083333									
Праг конзистентности	0,3662									



Сл. 7.31 Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за трећу групу критеријума (токсични метали)

У четвртој групи критеријума (анјони халогених метала у чађи и пепелу) као најважнији критеријум изабран је FA (анјон F⁻ у пепелу), а као најмање важан BrS (анјон Br⁻ у чађи). Одређене су преференције за све остале критеријуме у односу на њих, коришћењем оцена од 1 до 9. Добијени резултати за тежине критеријума приказани су на Сл. 7.32, при чему је конзистентност решења остварена.

Број критеријума = 6	Критеријум 1	Критеријум 2	Критеријум 3	Критеријум 4	Критеријум 5	Критеријум 6
Назив критеријума	FS	CIS	BrS	FA	CIA	BrA

Избор најбољег	FA
----------------	----

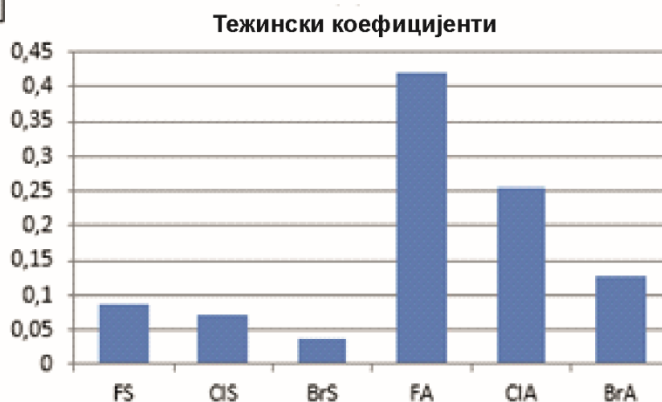
Избор најгорег	BrS
----------------	-----

Најбољи према осталима	FS	CIS	BrS	FA	CIA	BrA
FA	6	7	9	1	2	4

Остали према најгорем	BrS
FS	4
CIS	3
BrS	1
FA	9
CIA	8
BrA	6

Тежински коефицијенти	FS	CIS	BrS	FA	CIA	BrA
	0,0853659	0,0731707	0,0365854	0,4207317	0,2560976	0,1280488

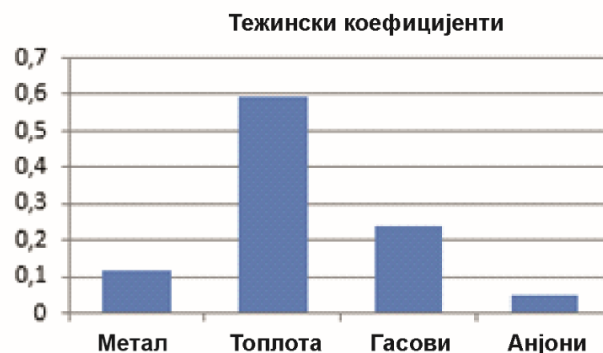
CR	0,2083333
Праг конзистентности	0,3337



Сл. 7.32 Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за четврту групу критеријума (анјони халогених метала у чађи и пепелу)

За групе критеријума примењен је BWM и као најважнија изабрана је друга група, а као најмање важна четврта група. Одређене су преференције за остале групе у односу на њих, коришћењем оцена од 1 до 9. Добијени резултати за тежине група приказани су на Сл. 7.33, при чему је конзистентност решења остварена. Резултујући тежински коефицијенти за свих 30 критеријума дати су у Таблици 7.11, а добијени су множењем групног тежинског коефицијента појединачним тежинским коефицијентом критеријума у тој групи.

Број критеријума = 4	Критеријум 1	Критеријум 2	Критеријум 3	Критеријум 4
Назив критеријума	Метал	Топлота	Гасови	Анјони
Избор најбољег	Топлота			
Избор најгорег	Анјони			
Најбољи према осталима	Метал	Топлота	Гасови	Анјони
Топлота	6	1	3	9
Остали према најгорем	Анјони			
Метал	4			
Топлота	9			
Гасови	7			
Анјони	1			
Тежински коефицијенти	0,119171	0,5906736	0,238342	0,0518135
CR	0,2083333			
Праг конзистентности	0,2681			



Сл. 7.33 Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте група критеријума (оцене група, тежински коефицијенти, коефицијент конзистентности решења и дијаграм тежина)

Таблица 7.11 Тежински коефицијенти критеријума

Критеријум	Тежина критеријума у групи	Тежина групе	Резултујућа тежина
CO ₂	0.02735978	0.23834197	0.006521
CO	0.31463748		0.074991
THC	0.04787962		0.011412
HF	0.05471956		0.013042
HCl	0.19151847		0.045647
HBr	0.09575923		0.022823
SO ₂	0.12767898		0.030431
NO	0.07660739		0.018259
NO ₂	0.06383949		0.015216
PAHG	0.07317073		0.59067358
DMS	0.12804878	0.075635	
Li	0.25609756	0.151270	
PAHS	0.03658537	0.021610	
THR	0.42073171	0.248515	
EHC	0.08536585	0.050423	
Al	0.02735978	0.11917098	0.003261
Cd	0.31463748		0.037496
Co	0.09575923		0.011412
Cr	0.04787962		0.005706
Cu	0.19151847		0.022823
Mn	0.07660739		0.009129
Ni	0.05471956		0.006521
Pb	0.12767898		0.015216
Zn	0.06383949		0.007608
FS	0.08536585		0.05181347
CIS	0.07317073	0.003791	
BrS	0.03658537	0.001896	
FA	0.42073171	0.021800	
CIA	0.25609756	0.013269	
BrA	0.12804878	0.006635	

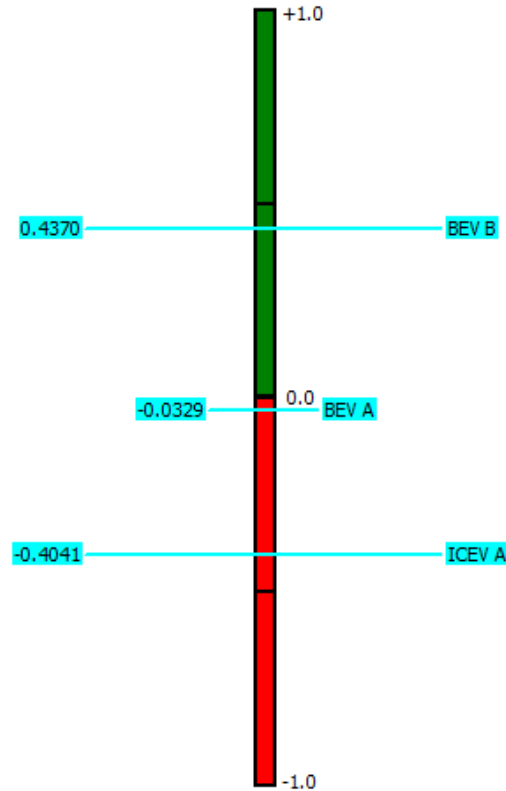
7.6.2 Рангирање опасности од пожара возила применом метода BWM и PROMETHEE

Улазни подаци за програм PROMETHEE II за пожаре возила дати су у Таблици 7.12.

Таблица 7.12 Критеријуми и њихови коефицијенти за пожаре ICEV A, BEV A, BEV B [21]

Критеријум [јединица мере]	Тежински коефицијент	ICEV A	BEV A	BEV B
CO ₂ [kg]	0.006521	344	335	438
CO [g]	0.074991	6 420	7 790	9 510
THC [g]	0.011412	2 370	3 130	2750
HF [g]	0.013042	11	573	859
HCl [g]	0.045647	1100	1590	1800
HBr [g]	0.022823	18	115	88
SO ₂ [g]	0.030431	479	575	645
NO [g]	0.018259	452	371	617
NO ₂ [g]	0.015216	44	25	76
PAHG [kg]	0.043220	112	29	334
DMS [kg]	0.075635	9.0	10.7	17.0
Li [mg/g]	0.151270	0.03	12	3.2
PAHS [mg/g]	0.021610	1.0	0.03	0.5
THR [GJ]	0.248515	5.9	5.2	6.7
EHC [MJ/kg]	0.050423	23	21	17
Al [mg/g]	0.003261	0.5	8.5	1.5
Cd [mg/g]	0.037496	0.003	0.004	0.002
Co [mg/g]	0.011412	0.003	24	12
Cr [mg/g]	0.005706	0.03	0.07	0.01
Cu [mg/g]	0.022823	0.9	1.4	0.9
Mn [mg/g]	0.009129	0.1	26	9.3
Ni [mg/g]	0.006521	0.03	45	12
Pb [mg/g]	0.015216	2.0	0.4	0.2
Zn [mg/g]	0.007608	22	27	20
FS [mg/g]	0.004423	0.2	18	4.3
ClS [mg/g]	0.003791	26	17	18
BrS [mg/g]	0.001896	2.3	16	8.3
FA [mg/g]	0.021800	0.02	0.2	0.1
ClA [mg/g]	0.013269	31	62	16
BrA [mg/g]	0.006635	0.4	0.07	0.5

Применом методе PROMETHEE II добија се као резултат рангирања пожара возила да је најопаснији пожар са биоколошког становишта пожар возила BEV B, а затим следи пожар возила BEV A, док је пожар возила ICEV A најмање опасан за људе и околину. Комплетно рангирање ових пожара дато је на Сл. 7.34 и у Таблици 7.13.



Сл. 7.34 Комплетно рангирање опасности од пожара возила ICEV A, BEV A и BEV B применом метода PROMETHEE II

Таблица 7.13 Рангирање опасности од пожара возила ICEV A, BEV A и BEV B

Ранг	Алтернатива	Phi	Phi ⁺	Phi ⁻
1	BEV B	0.4370	0.7128	0.2758
2	BEV A	-0.0329	0.4835	0.5165
3	ICEV A	-0.4041	0.2923	0.6963

Треба напоменути да приликом извођења експеримената пожари различитих возила могу имати и различите дужине трајања, као и различите губитке масе [21], што може значајно утицати на резултате рангирања. Ова разлика је била изражена код пожара возила BEV B и BEV A, али не и између ICEV A и BEV A. Резултат рангирања примењеним методама потврђује да су, са биоеколошког становишта, опаснији пожари електричних возила од пожара конвенционалних возила.

Литература за Главу 7

- [1] R. Garcia-Valle, J. A. P. Lopes, *Electric vehicle integration into modern power networks*, Springer-Verlag New York, 2013, doi:10.1007/978-1-4614-0134-6.
- [2] “The Composition of EV Batteries: Cells? Modules? Packs?” Samsung. [Online]. Доступно на: <https://www.samsungdi.com/column/all/detail/54344.html> [Приступљено 10.03.2019.]
- [3] “Comparing Electric Cars and Their Batteries,” Influid Energy. [Online]. Доступно на: <https://www.influidenergy.com> [Приступљено 12.03.2019.]
- [4] “Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020,” BCG. [Online]. Доступно на: <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/enright1/docs/file36615.pdf> [Приступљено 12.03.2019.]
- [5] “A list of Li-Ion cells available today,” Li-Ion BMS 2018. [Online]. Доступно на: <http://liionbms.com/php/cells.php> [Приступљено 12.03.2019.]
- [6] G. J. Offer, “Automated vehicles and electrification of transport,” *Energy & Environmental Science*, vol. 8, pp. 26–30, 2015, doi:10.1039/C4EE02229G.
- [7] J. Le Houx, “Developments in Composite Energy Storage,” *Energy Technology, Environment and Sustainability Reviews*, 24832413, 2017.
- [8] D. Berjoza, I. Jurgena, “Effects of change in the weight of electric vehicles on their performance characteristics,” *Agronomy Research*, vol. 15, pp. 952–963, 2017.
- [9] “2014 BMW i3 review – Advanced Vehicle Testing – Baseline Vehicle Testing Result,” Idaho National Laboratory INL/MIS-15-34211 2016. [Online]. Доступно на: <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/phev/fact2014bmwi3rex.pdf> [Приступљено 15.03.2021.]
- [10] “Compare Side-by-Side,” EPA, US Department of Energy. [Online]. Доступно на: <https://www.fueleconomy.gov> [Приступљено 15.03.2021.]
- [11] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, “A Review of Battery Fires in Electric Vehicles,” *Fire Technology*, vol. 56, pp. 1361–1410, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- [12] J. M. Kolly, J. Panagiotou, B. A. Czech, “Failure Analysis Techniques for a Lithium-Ion Battery Fire Investigation,” *Fire in Vehicles*, 2014.
- [13] Y. Liu, P. Sun, H. Niu, X. Huang, “Propensity to self-heating ignition of open-circuit pouch Lithium-ion battery pile on a hot boundary,” *Fire Safety Journal*, 2020, doi:10.1016/j.firesaf.2020.103081.

- [14] X. He, F. Restuccia, Y. Zhang, Z. Hu, X. Huang, J. Fang, “Experimental study of self-heating ignition of lithium-ion batteries during storage and transport: effect of the number of cells,” *Fire Technology*, 2019.
- [15] A. Lecocq, G. G. Eshetu, S. Grugeon, N. Martin, S. Laruelle, G. Marlair, “Scenario-based prediction of Li-ion batteries fire-induced toxicity,” *Journal of Power Sources*, vol. 316, pp. 197-206, 2016, doi:10.1016/j.jpowsour.2016.02.090.
- [16] F. Larsson, *Lithium-ion Battery Safety-Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation*, Chalmers University of Technology, 2017.
- [17] D. Stephens, P. Stout, G. Sullivan, E. Saunders, J. Risser, J. Sayre, “Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles,” *National Highway Traffic Safety Administration*, Report No DOT HS 812 418, Washington DC, 2019.
- [18] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot, G. Marlair, “Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle,” *International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2012*, Chicago, United States, vol. 2, pp. 183–194, 2012.
- [19] B. Truchot, F. Fouillen, S. Collet, “An experimental evaluation of the toxic gas emission in case of vehicle fires,” *Proceedings of 7th ISTSS*, Montreal, Canada, pp. 419-429, 2016.
- [20] A. Lönnemark, P. Blomqvist, “Emissions from an automobile fire,” *Chemosphere*, no. 62, pp. 1043-1056, 2006.
- [21] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple, J. Anderson, “Toxic gases from fire in electric vehicles,” *RISE*, Report 2020:90, ISBN: 978-91-89167-75-9, p. 240, Borås, 2020.
- [22] P. Ribière, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. S. Laruelle, G. Marlair, “Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry,” *Energy & Environmental Science*, vol. 5, pp. 5271–5280, 2012, doi:10.1039/C1EE02218K.
- [23] “All-Electric Light Vehicle Ranges Can Exceed Those of Some Gasoline Light Vehicles,” Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, US Dept. of Energy. [Online]. Доступно на: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office> [Приступљено 13.05.2023.]
- [24] “Tesla Model S fire vs 35 firefighters – watch impressive operation after a high-speed crash,” Electrek. [Online]. Доступно на: <https://electrek.co> [Приступљено 17.05.2023.]
- [25] “Tesla Model S catches fire near Seattle, no injuries reported,” Autoblog. [Online]. Доступно на: <https://www.autoblog.com/2013/10/02/tesla-model-s-fire> [Приступљено 17.05.2023.]
-

- [26] “What is EV fire reignition?” EV FireSafe. [Online]. Доступно на: <https://www.evfiresafe.com/ev-fire-reignition> [Приступљено 24.09.2023.]
- [27] “Nearly 100 electric buses caught fire in Beijing,” TMC. [Online]. Доступно на: http://www.21cnev.com/html/201705/775455_1.html [Приступљено 24.09.2023.]
- [28] “Tourist buses catch fire in Beijing, no casualties,” XINHUANET. [Online]. Доступно на: http://www.xinhuanet.com/english/2017-05/01/c_136248785.htm [Приступљено 24.09.2023.]
- [29] “Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing J2464_202108,” SAE. [Online]. Доступно на: https://www.sae.org/standards/content/j2464_202108 [Приступљено 24.09.2023.]
- [30] “Safety Standard for Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery Systems Utilizing Lithium-based Rechargeable Cells J2929_201302,” SAE. [Online]. Доступно на: https://www.sae.org/standards/content/j2929_201302/ [Приступљено 24.09.2023.]
- [31] “Batteries for Use in Electric Vehicles,” UL. [Online]. Доступно на: <https://explorestandards.ul.org/batteries-in-ev.html> [Приступљено 24.09.2023.]
- [32] “Battery Water Submersion Pool for Electric Vehicle Fires,” Garrison Flood Control. [Online]. Доступно на: <https://www.garrisonflood.com/ev-fire-fighting-water-submersion-pool> [Приступљено 25.09.2023.]
- [33] “Belgium FFs Submerge Burning Hybrid Car in Container,” Firehouse. [Online]. Доступно на: <https://www.firehouse.com/operations-training/news/21236083/belgium-firefighters-submerge-burning-hybrid-car-in-container> [Приступљено 25.09.2023.]
- [34] “Giant Fire Blanket Helps Cut Battery Reignition in Electric Car Blazes,” InsideEVs. [Online]. Доступно на: <https://insideevs.com/news/429647/giant-fire-blanket-cuts-reignition-ev-blazes> [Приступљено 26.09.2023.]
- [35] “Electric Vehicle Fire Safety in Enclosed Spaces,” RISE Report 2023:42. [Online]. Доступно на: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1744882/FULLTEXT01.pdf> [Приступљено 26.09.2023.]
- [36] E. Nieboer, D. H. S. Richardson, “The replacement of the nondescript term 'heavy metals' by a biologically and chemically significant classification of metal ions,” *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, vol. 1, no. 1, pp. 3–26, 1980, [https://doi.org/10.1016/0143-148X\(80\)90017-8](https://doi.org/10.1016/0143-148X(80)90017-8)
-

8

Закључак

Примена обновљивих извора енергије у енергетском сектору, њихов континуирани развој, као и инсталација нових капацитета, уз електрификацију у сектору саобраћаја и усавршавање нових технологија, значајно доприносе заштити животне средине, смањењу емисија гасова стаклене баште и ублажавању проблема са зависношћу од фосилних горива. Интеграција електричних возила у електроенергетске мреже, као и оптималан временски и просторни распоред за пуњење/пражњење њихових батерија, морају бити реализовани у складу са економским и еколошким захтевима корисника и власника возила, произвођача електричне енергије и дистрибутивних компанија, као и друштвене заједнице, уз уважавање потражње потрошача енергије и превазилажење проблема интермитентне производње електричне енергије изворима који користе енергију сунца, ветра и воде, дајући допринос одрживом развоју.

У овој докторској дисертацији представљени су резултати истраживања у области паметног управљања микромрежама уз постизање компромиса између циљева заштите људи и животне средине, и смањења економских трошкова. Анализиране су технологије за производњу електричне енергије у микромрежама (генератори са моторима са унутрашњим сагоревањем, индустријске и микротурбине, соларни генератори са концентраторима, фотонапонски панели, мали ветрогенератори, горивне ћелије, мале хидроелектране) и системи за складиштење енергије (механички, електрохемијски, хемијски, електрични и термички) који доприносе техничкој еволуцији електроенергетских система.

У Другој глави дисертације су анализиране типичне конфигурације микромрежа, њихове предности и недостаци, као и пример микромреже кампуса у Савони, Универзитета у Ђенови, Италија, са примењеним технологијама за производњу и складиштење енергије, станицама за пуњење електричних возила, паметном зградом, електроенергетском и информационо-комуникационом инфраструктуром, контролним и управљачким системом.

У Трећој глави дисертације анализирани су и могућности примене оптимизације у планирању, контроли и управљању микромрежама. Приказане су циљне функције које су коришћене при решавању оптимизационих проблема у микромрежама, а дат је и преглед метода које омогућавају решавање оваквих проблема. У току истраживања аутора у овој области, на примерима појединих микромрежа примењени су поступци оптимизације са циљем испуњења економских и еколошких захтева, као и смањења емисија штетних гасова ради очувања животне средине. У циљу постизања оптималног управљања микромрежом са применом нових технологија реализовани су одговарајући рачунарски програми.

У Четвртој глави дисертације предложено је коришћење субјективних метода за одређивање тежинских коефицијената тако да се добију оптимална решења са економског и еколошког становишта. Ово је нарочито важно у случају да доносилац одлука одређује приоритете циљева према условима који се могу мењати и бити другачији у различитим тренуцима доношења одлуке. Анализиран је проблем рангирања извора енергије у микромрежи у циљу оптималног избора извора као што су: дизел генератор, микротурбина, горивна ћелија и главна мрежа за напајање. Разматрани су еколошки аспекти проблема (емисије штетних гасова и ситних честица) и економски аспекти проблема (инвестициони, операциони, трошкови одржавања и горива).

Оригинални допринос ове дисертације представља рангирање управљивих дистрибуираних генератора у микромрежи и главне електроенергетске мреже за напајање применом субјективних тежинских метода BWM и АНР за одређивање тежинских коефицијената. Након одређивања тежинских коефицијената применом ових метода, добијени резултати коришћени су у програмима који су реализовани у складу са методама вишекритеријумске оптимизације: PROMETHEE, ELECTRE, ВИКОР и TOPSIS. Реализација одговарајућих рачунарских програма омогућава избор оптималног извора енергије за измењене преференције доносиоца одлука. За добијање резултата у овој дисертацији коришћени су програми Excel, PROMETHEE-GAIA и Lingo. У дисертацији су приказани резултати рангирања генератора добијени овим методама, као и предности и недостаци појединих метода.

У Петој глави анализирани су директне и индиректне методе управљања потрошњом у микромрежи. У циљу минимизације трошкова микромреже могуће је применити

преуређење временског распореда оптерећења, складиштење топлотне енергије, ефикасне технологије крајње употребе, тарифне системе и друге напредне технологије. Након дефинисања циљних функција за решавање проблема, уз разматрања ограничења типа једнакости и типа неједнакости, анализирани су примери оптимизације коришћењем DSM (енг. Demand Side Management). У овој глави приказана је нова процедура двостепене оптимизације уз примену DSM техника попуњавања долина и пребацивања оптерећења у циљу управљања потрошњом, при чему је постигнута корист за потрошаче (због смањења трошкова за електричну енергију) и за дистрибутивну компанију (због “равнања” дневне криве оптерећења и смањења инвестиционих трошкова).

У првом кораку предложене процедуре утврђују се вредности максималне и минималне снаге потрошње у току дана које се добијају након премештања одложивих оптерећења и минимизирањем апсолутних вредности разлика између захтеваних снага по сату у дневном распореду. Пошто је примењена DSM техника пребацивања оптерећења, укупна потрошња по дану је иста, али увек постоје и неодложива оптерећења која се појављују у одређеним временским интервалима, па дневна крива потрошње не може бити идеално равна. Фактор оптерећења срачунат као однос средње снаге и максималне снаге после првог корака оптимизације, може се додатно поправити у другом кораку оптимизације. У другом кораку ове вредности снаге се узимају као ограничења, а функција трошкова енергије се минимизира на основу варијабилних цена електричне енергије на тржишту за дан унапред. Тако се добија оптимизована дневна крива оптерећења и временски распоред укључења/искључења одложивих потрошача, као и максималне уштеде уз највећи могући фактор оптерећења. Оптимизација је реализована у рачунарском програму Lingo. Ова процедура може се прилагодити за варијабилне цене електричне енергије, за петнаестоминутне интервале, а може се остварити и динамичка процедура. Уз уштеде трошкова за електричну енергију (што је добробит за потрошаче), постигнута је и оптимизована дневна крива потрошње (што је добробит за дистрибутивну компанију и стабилност електроенергетског система).

У Шестој глави приказана је оптимизација трошкова микромреже за фиксне и варијабилне цене електричне енергије уз примену V2G технологије за пуњење/пражњење флоте електричних возила, као и различитих извора енергије у микромрежи као што су

ветрогенератори и фотонапонски панели. Може се закључити да варијабилне сатне цене омогућавају веће уштеде него фиксне цене, као и да је дијаграм производње енергије ветрогенератором погоднији због повољнијег сатног распореда у току дана и равномерније криве производње него у случају фотонапонских панела (за исту инсталирану максималну снагу и за експериментално измерене дневне криве производње енергије из ових извора на датој локацији). На територији Србије је повољније улагати у фотонапонске панеле него у ветрогенераторе, не само због мањих инвестиционих трошкова, него и због слабије расположивости енергије ветра која на већини локација где постоје захтеви за инсталацију микромрежа није довољно исплатива. Разматране су величина флоте електричних возила и снага ветрогенератора и фотонапонских панела у микромрежи као критеријуми оптимизације. Анализиране су уштеде трошкова за електричну енергију за велики број различитих сценарија микромреже у зависности од броја возила на располагању, као и капацитета батерија електричних возила и снага пуњача као критеријума оптимизације. Посебно је разматран и утицај амбијенталне температуре на трошкове пуњења батерија електричних возила.

У овој глави дат је значајан допринос ове дисертације применом вишекритеријумске оптимизације трошкова микромреже са становишта власника електричних возила, власника микромреже, агрегатора и главне мреже, уз коришћење V2G технологије. Да би се добило оптимално решење у случају међусобно супротстављених захтева за заштиту животне средине, неопходна је примена поступака вишекритеријумске оптимизације. Више циљева оптимизације остварено је свођењем на једну резултантну функцију циља према MAUT и коришћењем изабраних тежинских коефицијената. Ови критеријуми укључују минимизирање трошкова електричне енергије у микромрежи као корист за локалног агрегатора, максимизирање изравнавања криве укупне потражње микромреже као корист за главног оператера мреже и минимизирање деградације батерије (због бројних циклуса пуњења/пражњења) као корист за власника електричних возила. Експериментална анализа је извршена за неколико сценарија микромрежа. У програму Lingo реализовани су програми аутора који обезбеђују оптимални временски распоред пуњења и пражњења електричних возила са коришћењем V2G технологије за разматране сценарије.

У Седмој глави анализиране су батерије електричних возила и њихови параметри који су важни за одређивање опасности од пожара. Анализирани су термички, механички и електрични утицаји на батерије електричних возила, као и типични пожари електричних возила: пожари спонтаног паљења, пожари приликом пуњења, пожари услед саобраћајних удеса, пожари поновног паљења, као и пожари услед спољашњих фактора. Приказани су нивои опасности и ефекти пожара батерија електричних возила, као и стратегије гашења пожара електричних возила.

Субјективне методе одређивања тежинских коефицијената критеријума и методе вишекритеријумске оптимизације примењене су у овој дисертацији за рангирање еколошке опасности од пожара различитих типова возила, што је оригинални допринос ове дисертације, а може се применити у сличним сценаријима пожара и других катастрофалних догађаја. Тежински коефицијенти критеријума опасности од пожара одређени су применом субјективне методе BWM при чему је разматрано 30 критеријума подељених у 4 групе (штетни гасови, параметри сагоревања и ослобађања топлоте, токсични метали и анјони халогених елемената у чађи и пепелу). Затим је примењена метода PROMETHEE за рангирање опасности од пожара возила и утврђено је да су опаснији пожари електричних од пожара конвенционалних возила посматрано са биолошког и еколошког становишта.

Допринеси ове дисертације постигнути су: развојем и реализацијом рачунарских програма за управљање ресурсима микромрежа; развојем и применом одговарајућег вишекритеријумског метода оптимизације за постизање компромиса између минимизације трошкова (са становишта корисника микромреже, власника електричних возила, као и дистрибутивне компаније) и минимизације емисија штетних гасова у циљу очувања животне средине, уз разматрање различитих сценарија микромрежа, захтева и ограничења; анализом оптималног коришћења V2G технологије са економског и еколошког становишта уз уважавање променљивих цена на тржишту електричне енергије и интермитентне производње обновљивим изворима енергије; рационалним коришћењем енергије у микромрежи уз смањење емисија штетних гасова, као и рангирањем опасности од пожара возила применом предложеног метода вишекритеријумске оптимизације.

Списак слика

Бр. слике	Назив слике	Страна
Сл. 2.1	Структура производње енергије различитим врстама извора у продатој електричној енергији у Србији у 2022. години	13
Сл. 2.2	Структура произведене електричне енергије у Србији у 2022. години [2]	14
Сл. 2.3	Структура произведене електричне енергије у Србији у 2017. години [2]	14
Сл. 2.4	Структура производње енергије различитим врстама извора у продатој електричној енергији у Србији у 2017. години	15
Сл. 2.5	Структура производње енергије у Србији на дан 06.08.2023. год. у 17h [1]	16
Сл. 2.6	Шема микромреже	18
Сл. 2.7	Дизел генератор [11]	26
Сл. 2.8	Генератор са ICE	26
Сл. 2.9	Гасна турбина [12]	27
Сл. 2.10	Пресек микротурбине [14]	28
Сл. 2.11	Микротурбине а) снаге 65 kW и б) снаге 1000 kW [15]	29
Сл. 2.12	Тањирасти соларни концентратор са Стирлинговом машином [16]	30
Сл. 2.13	Фотонапонски панели на крову стамбеног објекта [19]	31
Сл. 2.14	Трошкови различитих технологија за производњу електричне енергије у периоду од 2010. до 2020. године	31
Сл. 2.15	Деривациона хидроелектрана [23]	33
Сл. 2.16	Инсталирани капацитети електроенергетских извора у ЕУ у 2021. години	34
Сл. 2.17	Светски трговински центар у Манами, Бахреин [27]	34
Сл. 2.18	Горивна ћелија типа PEMFC	36
Сл. 2.19	Генератор са горивним ћелијама [29]	37
Сл. 2.20	Гравитациони систем за складиштење енергије у Рудонгу, у близини Шангаја, Кина [33]	41
Сл. 2.21	Акумулаторски систем за складиштење енергије у Пилсвуду, Енглеска [34]	43
Сл. 2.22	Паметна полигенерациона микромрежа у Савони, Италија [41]	47
Сл. 2.23	Фотонапонски панели у SPM у Савони, Италија [42]	49
Сл. 2.24	Електроенергетска и комуникациона инфраструктура у SPM	50
Сл. 2.25	SEB у Савони, Италија [45]	51
Сл. 3.1	Режими рада микромреже	58
Сл. 3.2	Хијерархијска шема контроле микромреже	59

Сл. 4.1	Дијаграм промене цена електричне енергије на тржишту SEEPEX [9] за период 12/09/2021 – 12/09/2022	71
Сл. 4.2	Парцијално рангирање генератора применом методе PROMETHEE I за Сценарио 1	72
Сл. 4.3	Комплетно рангирање генератора применом методе PROMETHEE II за Сценарио 1	73
Сл. 4.4	PROMETHEE-Rainbow за Сценарио 1	74
Сл. 4.5	Парцијално рангирање генератора применом методе PROMETHEE I за Сценарио 2	75
Сл. 4.6	Комплетно рангирање генератора применом методе PROMETHEE II за Сценарио 2	75
Сл. 4.7	PROMETHEE-Rainbow за Сценарио 2	76
Сл. 4.8	Поређење резултата рангирања генератора за Сценарио 1 и Сценарио 2	77
Сл. 4.9	Поређење резултата рангирања генератора за три сценарија	78
Сл. 4.10	Матрица одлучивања у програму PROMETHEE-GAIA	80
Сл. 4.11	Парцијално рангирање генератора према еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE I	81
Сл. 4.12	Комплетно рангирање генератора према еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE II	81
Сл. 4.13	Оцене емисионих параметара горивне ћелије	82
Сл. 4.14	Оцене емисионих параметара гасне турбине	83
Сл. 4.15	Оцене емисионих параметара генератора на природни гас	83
Сл. 4.16	Оцене емисионих параметара микротурбине	83
Сл. 4.17	Оцене емисионих параметара дизел генератора	84
Сл. 4.18	Матрица одлучивања у програму PROMETHEE-GAIA	86
Сл. 4.19	Парцијално рангирање генератора према економским и еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE I	87
Сл. 4.20	Комплетно рангирање генератора према економским и еколошким критеријумима применом методе PROMETHEE II	87
Сл. 4.21	Оцене трошковних и емисионих параметара гасне турбине	88
Сл. 4.22	Оцене трошковних и емисионих параметара горивне ћелије	89
Сл. 4.23	Оцене трошковних и емисионих параметара генератора на природни гас	89
Сл. 4.24	Оцене трошковних и емисионих параметара микротурбине	89
Сл. 4.25	Оцене трошковних и емисионих параметара дизел генератора	90
Сл. 4.26	Оцене критеријума и тежине критеријума	110
Сл. 4.27	Дијаграм тежина критеријума	110
Сл. 4.28	Комплетно рангирање генератора применом метода ANP и PROMETHEE II	116
Сл. 4.29	Комплетно рангирање генератора применом метода BWM и PROMETHEE II	120
Сл. 5.1	TOU тарифирање у току 24-часовног периода	131
Сл. 5.2	CPP тарифирање у току 24-часовног периода	132
Сл. 5.3	RTP у току 24-часовног периода на тржишту SEEPEX 17.02.2023. [6]	133

Сл. 5.4	DSM методе и одговарајуће DSM технике	137
Сл. 5.5	DSM техника попуњавања долина	137
Сл. 5.6	DSM техника пребацивања оптерећења	138
Сл. 5.7	DSM техника одсецања врхова	138
Сл. 5.8	DSM техника повећања оптерећења	139
Сл. 5.9	DSM техника очувања енергије	139
Сл. 5.10	Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике попуњавања долина	141
Сл. 5.11	Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике пребацивања оптерећења	142
Сл. 5.12	Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике одсецања врхова	143
Сл. 5.13	Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике повећања оптерећења	144
Сл. 5.14	Крива оптерећења пре (испрекидана линија) и после (пуна линија) примењене DSM технике уштеде енергије	144
Сл. 5.15	а) Дневна крива потрошње пре прве процедуре оптимизације P_{old} , б) дневна крива потрошње после прве процедуре оптимизације P_{new}	146
Сл. 5.16	MS Excel Solver алатка	146
Сл. 5.17	Временски распоред за три контролисана оптерећења и дневне криве потрошње пре и после прве процедуре оптимизације	147
Сл. 5.18	Дневне криве потрошње, максимална и минимална снага за временски распоред оптерећења после прве процедуре оптимизације	148
Сл. 5.19	а) Дневна крива потрошње пре друге процедуре P_{new} , б) дневна крива потрошње после друге процедуре P_{opt}	151
Сл. 5.20	Дневна крива потрошње пре оптимизације	153
Сл. 5.21	Дијаграм варијабилних цена на тржишту електричне енергије за 08.01.2020. године	153
Сл. 5.22	Временски распоред укључивања првог одложивог оптерећења $X_{10}(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, пре првог корака оптимизације	154
Сл. 5.23	Временски распоред укључивања другог одложивог оптерећења $X_{20}(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, пре првог корака оптимизације	154
Сл. 5.24	Временски распоред укључивања трећег одложивог оптерећења $X_{30}(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, пре првог корака оптимизације	154
Сл. 5.25	Максимална снага P_{max} и минимална снага P_{min} после првог корака оптимизације уз примену технике пребацивања оптерећења	155
Сл. 5.26	Временски распоред укључивања првог одложивог оптерећења $X_{1n}'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације	156
Сл. 5.27	Временски распоред укључивања другог одложивог оптерећења $X_{2n}'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације	156
Сл. 5.28	Временски распоред укључивања трећег одложивог оптерећења $X_{3n}'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације	156
Сл. 5.29	Дневна крива потрошње $P'(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после првог корака оптимизације	157

Сл. 5.30	Временски распоред укључивања првог одложивог оптерећења $X_{1n}''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације	158
Сл. 5.31	Временски распоред укључивања другог одложивог оптерећења $X_{2n}''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације	158
Сл. 5.32	Временски распоред укључивања трећег одложивог оптерећења $X_{3n}''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације	158
Сл. 5.33	Дневна крива потрошње $P''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 20 \text{ kW}$	159
Сл. 5.34	Дневна крива потрошње $P'''(i)$ за $i = 1, \dots, 24$, после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 25 \text{ kW}$	160
Сл. 6.1	Шема микромреже	165
Сл. 6.2	Дневни дијаграм неодложног оптерећења $P_L(i)$, за $i = 1, \dots, 24$	168
Сл. 6.3	Дневни дијаграм производње ветрогенератора $P_W(i)$, за $i = 1, \dots, 24$	168
Сл. 6.4	Дневни дијаграм производње фотонапонских панела $P_{PV}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$	168
Сл. 6.5	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33 \text{ kW}$, $P_W = 0$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	169
Сл. 6.6	Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33 \text{ kW}$, $P_W = 0$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	170
Сл. 6.7	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33 \text{ kW}$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	170
Сл. 6.8	Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33 \text{ kW}$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	170
Сл. 6.9	Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за дан 17.04.2019. године	171
Сл. 6.10	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33 \text{ kW}$, $P_W = 0$, BP са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$	171
Сл. 6.11	Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 33 \text{ kW}$, $P_W = 0$, BP са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$	172
Сл. 6.12	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33 \text{ kW}$, BP са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$	172
Сл. 6.13	Дневни дијаграм укупне потрошње $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_V = 5$, $P_{PV} = 0$, $P_W = 33 \text{ kW}$, BP са Сл. 6.9 и $SP = 0.75BP$	172
Сл. 6.14	Дневни дијаграм неодложног оптерећења $P_L(i)$, за $i = 1, \dots, 24$	173
Сл. 6.15	Дневни дијаграм производње фотонапонских панела $P_{PV}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за $n_{PV} = 1$	174
Сл. 6.16	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 2$, $n_V = 5$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	175
Сл. 6.17	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 4$, $n_V = 5$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	175
Сл. 6.18	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 2$, $n_V = 10$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	176
Сл. 6.19	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 4$, $n_V = 10$, две тарифе куповних цена и фиксне продајне цене	176

Сл. 6.20	Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$	177
Сл. 6.21	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 2$, $n_V = 5$, за варијабилне цене $BP(i)$ и $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$	177
Сл. 6.22	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за $n_{PV} = 4$, $n_V = 10$, за варијабилне цене $BP(i)$ и $SP(i) = 0.75 BP(i)$, за $i = 1, \dots, 24$	178
Сл. 6.23	Шема употребе V2G технологије	179
Сл. 6.24	Брзи пуњач са V2G технологијом	179
Сл. 6.25	Тип утикача кабла и утичница а) Тип 1 Yazaki – SAE J1772; б) Тип 2 Mennekes – IEC 62196	180
Сл. 6.26	Тип утикача кабла и утичница а) CHAdeMO; б) Combined Charging System (CCS Combo 2)	181
Сл. 6.27	Начини пуњења батерије електричног возила [19]: а) пуњење на стандардној АС утичници; б) пуњење преко ICCB кабла без комуникације са станицом за пуњење; в) пуњење преко кабла Типа 2 уз комуникацију са станицом за пуњење; г) брзо пуњење	183
Сл. 6.28	Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за дан 06.07.2020. године	185
Сл. 6.29	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 11, за $n_V = 5$, капацитете батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	188
Сл. 6.30	Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже за случај а), Сценарио 11, после оптимизације пуњења/пражњења електричних возила	188
Сл. 6.31	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 11, за $n_V = 5$, капацитете батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	189
Сл. 6.32	Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже за случај б), Сценарио 11, после оптимизације пуњења/пражњења електричних возила	189
Сл. 6.33	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 12, за $n_V = 3$, капацитете батерија $en_{EV} = 50 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	190
Сл. 6.34	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 12, за $n_V = 3$, капацитете батерија $en_{EV} = 50 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	190
Сл. 6.35	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 13, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30 \text{ kWh}$ и снагу пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	190
Сл. 6.36	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 13, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	191
Сл. 6.37	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 13, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30 \text{ kWh}$ и снагу пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	191

Сл. 6.38	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 13, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$	191
Сл. 6.39	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случајеве а) и б), Сценарио 14, за $n_V = 5$, капацитете батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$	192
Сл. 6.40	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 15, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30 \text{ kWh}$ и снагу пуњача $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$	192
Сл. 6.41	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај а), Сценарио 15, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$	193
Сл. 6.42	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 15, за возило капацитета батерије $en_{EV1} = 30 \text{ kWh}$ и снагу пуњача $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$	193
Сл. 6.43	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за случај б), Сценарио 15, за возила капацитета батерија $en_{EV2} = 60 \text{ kWh}$ и снаге пуњача $P_{ch}' = 9.9 \text{ kW}$	193
Сл. 6.44	Nissan Leaf на станици за пуњење у микромрежи	195
Сл. 6.45	Позиција батерије у возилу Nissan Leaf [27]	196
Сл. 6.46	Дијаграми просечног пређеног растојања и максималног пређеног растојања у зависности од амбијенталне температуре за возило Nissan Leaf [28]	196
Сл. 6.47	Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за дан 27.01.2022. године	197
Сл. 6.48	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 16, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_{opt} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$	198
Сл. 6.49	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 17, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ или $t_2 = -3 \text{ }^\circ\text{C}$	199
Сл. 6.50	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 18, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_3 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$	199
Сл. 6.51	Оптимизовани дневни распоред пуњења/пражњења возила за Сценарио 19, снаге пуњача $P_{ch} = 3.3 \text{ kW}$, за возила капацитета батерија $en_{EV} = 30 \text{ kWh}$ која се користе за вожњу на температури околине $t_4 = -25 \text{ }^\circ\text{C}$	200
Сл. 6.52	Дневни дијаграм тржишних куповних цена енергије $BP(i)$, за сатне интервале $i = 1, \dots, 24$, за уторак, 27.07.2021. године	203

Сл. 6.53	Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са PV генератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$	205
Сл. 6.54	Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 20 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$	206
Сл. 6.55	Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са ветрогенератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$	206
Сл. 6.56	Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 21 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.3$ и $\alpha_3 = 0.4$	206
Сл. 6.57	Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са ветрогенератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$ и $\alpha_3 = 0$	207
Сл. 6.58	Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 21 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.5$ и $\alpha_3 = 0$	208
Сл. 6.59	Варијабла одлучивања $x(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за пуњење/пражњење возила за микромрежу са ветрогенератором, за тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_3 = 1$	208
Сл. 6.60	Дневни дијаграм укупне потрошње микромреже $P_{tot}(i)$, за $i = 1, \dots, 24$, за Сценарио 21 и тежинске коефицијенте $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_3 = 1$	208
Сл. 7.1	Оловна батерија	215
Сл. 7.2	Никл-кадмијумска батерија	216
Сл. 7.3	Никл-металхидридне батерије	216
Сл. 7.4	Литијум-јонске батерије	217
Сл. 7.5	а) Батеријска ћелија, б) батеријски модул и в) батеријски пакет	218
Сл. 7.6	Типови батеријских ћелија а) цилиндрична, б) призматична и в) танка призматична	219
Сл. 7.7	Батеријски модул за Tesla Model S (2012) са цилиндричним ћелијама	221
Сл. 7.8	Батеријски пакет за Nissan LEAF (2011) са призматичним ћелијама	221
Сл. 7.9	Батеријски пакет за Chevrolet Volt (2011) са танким призматичним ћелијама	221
Сл. 7.10	Опсежи температуре и напона за оптимално функционисање батерија	223
Сл. 7.11	Поставка тестирања за пожар на нивоу пакета батерија	227
Сл. 7.12	Поставка тестирања за пожар возила	227
Сл. 7.13	Положај батерије у поду возила	229
Сл. 7.14	Пожар аутомобила Tesla Model S у Аустрији 17.10.2017. године	230
Сл. 7.15	Пожар аутомобила Tesla Model S у Lake Forest, у Калифорнији, 2017. год.	231
Сл. 7.16	Аутобус градског превоза у Хонг Конгу и његов пожар 2015. године	232
Сл. 7.17	Пожар аутомобила Porsche Panamera у Бангкоку, Тајланд, 2018. године	232
Сл. 7.18	Пожар аутомобила Tesla Model S у близини града Seattle, Вашингтон, 2013. године	233
Сл. 7.19	Гашење поновног пожара аутомобила, марта 2018. године [26]	234

Сл. 7.20	Ланчани пожар електричних аутобуса у Пекингу, Кина, маја 2017. године	235
Сл. 7.21	Монтажни базен за гашење пожара возила	238
Сл. 7.22	Пребацивање возила у контејнер за одлагање запаљеног возила	238
Сл. 7.23	Возило потопљено у контејнеру за одлагање запаљеног возила	238
Сл. 7.24	Термовизијски снимак запаљеног електричног аутомобила Nissan Leaf чија је температура приликом пожара достигла 1080 °C [34]	239
Сл. 7.25	Сузбијање пожара специјалним прекривачем [34]	239
Сл. 7.26	Термовизијски снимак запаљеног електричног аутомобила Nissan Leaf испод специјалног покривача чија је температура опала на 107 °C [34]	240
Сл. 7.27	Поновно избијање пожара електричног возила [34]	240
Сл. 7.28	Сузбијање поновног пожара електричног возила [34]	240
Сл. 7.29	Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за прву групу критеријума (штетни гасови)	244
Сл. 7.30	Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за другу групу критеријума (параметри сагоревања и ослобађања топлоте)	245
Сл. 7.31	Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за трећу групу критеријума (токсични метали)	246
Сл. 7.32	Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте за четврту групу критеријума (анјони халогених метала у чађи и пепелу)	247
Сл. 7.33	Улазни параметри и резултати BWM за тежинске коефицијенте група критеријума (оцене група, тежински коефицијенти, коефицијент конзистентности решења и дијаграм тежина)	248
Сл. 7.34	Комплетно рангирање опасности од пожара возила ICEV A, BEV A и BEV B применом метода PROMETHEE II	251

Списак таблица

Бр. таблице	Назив таблице	Страна
Таб. 2.1	Ефикасност и емисије штетних гасова различитих типова горивних ћелија [9]	37
Таб. 4.1	Емисије штетних гасова и честица за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи [5-8]	70
Таб. 4.2	Операциони трошкови са трошковима одржавања и трошкови горива за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи	71
Таб. 4.3	Рангирање генератора на основу Φ_i за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи за Сценарио 1	74
Таб. 4.4	Рангирање генератора на основу Φ_i за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи за Сценарио 2	76
Таб. 4.5	Емисије штетних гасова и честица за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи [10]	79
Таб. 4.6	Рангирање на основу Φ_i за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи	82
Таб. 4.7	Економски критеријуми за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи [10]	85
Таб. 4.8	Рангирање на основу Φ_i за различите алтернативе производње електричне енергије у микромрежи	88
Таб. 4.9	Параметри који дефинишу матрицу одлучивања [5-8]	91
Таб. 4.10	Нето супериорне вредности и ранг алтернатива	96
Таб. 4.11	Нето инфериорне вредности и ранг алтернатива	96
Таб. 4.12	Растојања од идеално најбољег и од идеално најгорег решења	99
Таб. 4.13	Коефицијенти приближности алтернатива CC_i	100
Таб. 4.14	Ранг алтернатива	100
Таб. 4.15	Матрица одлучивања и вредности f_j^+ и f_j^-	101
Таб. 4.16	Вредности S_i , R_i и Q_i за $i=1, 2, 3, 4$, и ранг алтернатива	102
Таб. 4.17	Q – листе за различите вредности коефицијента v	103
Таб. 4.18	Матрица одлучивања	106
Таб. 4.19	Нормализована матрица одлучивања	107
Таб. 4.20	Коефицијенти ентропије e_j и тежине критеријума w_j за $x_{26} = 0.000001$	108
Таб. 4.21	Коефицијенти ентропије e_j и тежине критеријума w_j за $x_{26} = 0.001$	108
Таб. 4.22	Скала преференција, опис и објашњење [46]	112
Таб. 4.23	Матрица поређења критеријума A	112
Таб. 4.24	Нормализована матрица поређења критеријума A^N	113
Таб. 4.25	Матрица конзистентности A^C	113
Таб. 4.26	Пондерисане збирне вредности WSV_i , тежине критеријума CW_i и односи конзистентности критеријума CR_i , за $i = 1, \dots, 6$	114

Таб. 4.27	Број критеријума n и индекс случајности RI	114
Таб. 4.28	Рангирање генератора применом АНР и методе PROMETHEE II	116
Таб. 4.29	Растојања од идеално најбољег и од идеално најгорег решења	117
Таб. 4.30	Коефицијенти приближности алтернатива CC_i	118
Таб. 4.31	Ранг алтернатива	118
Таб. 4.32	Вредности S_i , R_i и Q_i за $i=1, 2, 3, 4$, и ранг алтернатива	119
Таб. 4.33	Q – листе за различите вредности коефицијента v	119
Таб. 4.34	Рангирање генератора применом BWM и методе PROMETHEE II	121
Таб. 4.35	Растојања од идеално најбољег и од идеално најгорег решења	122
Таб. 4.36	Коефицијенти приближности алтернатива CC_i	122
Таб. 4.37	Ранг алтернатива	122
Таб. 4.38	Вредности S_i , R_i и Q_i за $i=1, 2, 3, 4$, и ранг алтернатива	123
Таб. 4.39	Q – листе за различите вредности коефицијента v	123
Таб. 5.1	Временски распоред оптерећења и укупне снаге, пре и после прве процедуре	147
Таб. 5.2	Параметри потрошње пре и после прве процедуре оптимизације	148
Таб. 5.3	Временски распоред оптерећења и укупне снаге, пре и после друге процедуре	149
Таб. 5.4	Параметри потрошње пре и после друге процедуре оптимизације	150
Таб. 5.5	Параметри потрошње пре првог корака, пре другог корака и после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 20 \text{ kW}$	159
Таб. 5.6	Параметри потрошње пре првог корака, пре другог корака и после другог корака оптимизације за $P_{DL} = 25 \text{ kW}$	160
Таб. 6.1	Капацитети батерија неких модела електричних возила	183
Таб. 6.2	Параметри за нормално пуњење различитим типовима пуњача за Nissan Leaf са батеријом 30 kWh	184
Таб. 6.3	Параметри за брзо пуњење за Nissan Leaf са батеријом 30 kWh	184
Таб. 7.1	Карактеристике неких типова батеријских ћелија	219
Таб. 7.2	Основни параметри различитих облика батеријских ћелија [5], [11]	220
Таб. 7.3	Капацитет батерије, специфична густина енергије, облик ћелије и дOMET неких модела електричних возила [6], [11]	220
Таб. 7.4	Емисије токсичних гасова при тестирању пожара возила	224
Таб. 7.5	Ослобођена топлота и губитак масе при тестирању пожара возила	225
Таб. 7.6	Продукти сагоревања при тестирању пожара возила	225
Таб. 7.7	Ослобођена топлота и губитак масе при тестирању пожара возила	226
Таб. 7.8	Спецификација тестова пожара батерија PHEV [21]	227
Таб. 7.9	Гасовити продукти сагоревања при пожару батерија PHEV [21]	228
Таб. 7.10	Нивои опасности и критеријуми класификације [29]	236
Таб. 7.11	Тежински коефицијенти критеријума	249
Таб. 7.12	Критеријуми и њихови коефицијенти за пожаре ICEV A, BEV A, BEV B [21]	250
Таб. 7.13	Рангирање опасности од пожара возила ICEV A, BEV A и BEV B	251

Биографија аутора

Дарио Јавор рођен је у Нишу 13.05.1992. године. Основну школу “Учитељ Таса“ и гимназију “Бора Станковић“ у Нишу завршио је као носилац диплома “Вук Караџић“. Основне академске студије завршио је 2015. године на Електронском факултету у Нишу на студијском програму Електротехника и рачунарство са просечном оценом 10,00 на модулу Електроенергетика и оценом 10 за завршни рад под називом “Примена енергије ветра“. Мастер академске студије завршио је 2017. године на Електронском факултету у Нишу на студијском програму Електроенергетика са просечном оценом 9,89 и оценом 10 за мастер рад под називом “Вишенивовски претварачи у обновљивим изворима енергије“. Школске 2017/18. године уписао се на Докторске академске студије на Електронском факултету у Нишу, студијски програм Теоријска електротехника, и положио све предмете са просечном оценом 10,00. Био је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја у току основних, мастер и докторских академских студија.

Добио је Плакету града Ниша за најбољег дипломираног студента у 2015. години на Електронском факултету у Нишу, Повељу Електронског факултета у Нишу за најбољег студента I године студија, Похвалницу за изузетне резултате на II години студија, Похвалницу за изузетне резултате на III години студија и Повељу за најбољег студента IV године студија на модулу Електроенергетика. Као члан студентског тима освојио је Другу награду на међународном такмичењу “2018 Best Student EMC Hardware Design Competition“ у организацији IEEE EMC Society.

Од марта 2020. године запослен је на Факултету заштите на раду у Нишу у звању асистента. Ангажован је у настави на више предмета на основним и мастер академским студијама и бави се научноистраживачким радом у оквиру пројекта Министарства науке, технолошког развоја и иновација. Члан је IEEE Power&Energy Society и IEEE EMC Society.

Области његовог научноистраживачког рада су обновљиви извори енергије, заштита животне средине, електрична возила, паметне мреже, оптимизација у области управљања микромрежама, електростатички филтри и електромагнетна компатибилност. Објавио је 21 рад, од тога 4 у часописима, 13 на међународним и 4 на домаћим конференцијама.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖЕ КОРИШЋЕЊЕМ V2G ТЕХНОЛОГИЈЕ

која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

Потпис аутора дисертације:



Дарио Д. Јавор

У Нишу, 26.02.2024. године

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖЕ
КОРИШЋЕЊЕМ V2G ТЕХНОЛОГИЈЕ**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

Потпис аутора дисертације:



Дарио Д. Јавор

У Нишу, 26.02.2024. године

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖЕ КОРИШЋЕЊЕМ V2G ТЕХНОЛОГИЈЕ

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Потпис аутора дисертације:



Дарио Д. Јавор

У Нишу, 26.02.2024. године