



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

NEMANJA KOSTIĆ

**ANALIZA OPTIMALNOG ENERGETSKOG MENADŽMENTA
MREŽNO POVEZANE MIKROMREŽE SA STANOVIŠTA
MINIMIZACIJE GUBITAKA I DEVIJACIJE NAPONA**

-MASTER RAD-

Pogorica, 2024. godine

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: Nemanja Kostić

Datum i mjesto rođenja: 27.08.1995. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija: Energetika i automatika, 2018. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Studijski program Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada: Analiza optimalnog energetskeg menadžmenta mrežno povezane mikromreže sa stanovišta minimizacije gubitaka i devijacije napona

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 17.10.2023.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 16.11.2023.

Mentor: Prof. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu/ odbranu teme rada:

Prof. dr Vladan Vujičić

Prof. dr Martin Čalasan

Prof. dr Vladan Radulović

Lektor: Dajana Kostić

Datum odbrane: _____

Datum promocije: _____

Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat Nemanja Kostić

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja, dolje potpisani

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom
**„Analiza optimalnog energetskeg menadžmenta mrežno povezane mikromreže sa stanovišta
minimizacije gubitaka i devijacije napona“**
rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršio autorska prava i koristio intelektualnu
svojinu drugih lica i da je navedeni rad, uz pomoć mentora, moje originalno djelo.

Podgorica, 2024. godine

Potpis studenta

PREDGOVOR

Tradicionalni elektroenergetski sistemi suočavaju se sa rastućim zahtjevima za održivošću, efikasnošću i autonomijom u proizvodnji, distribuciji i potrošnji električne energije. Uzimajući u obzir stalni tehnološki napredak i promjene u energetsom okruženju, mikromreže se ističu kao ključna inovacija u suočavanju sa ovim izazovima. Definirane kao decentralizovani sistemi, mikromreže omogućavaju lokalnu proizvodnju, skladištenje i distribuciju energije, pridonoseći istovremeno većoj autonomiji i otpornosti elektroenergetskog sistema na dinamične promjene i izazove.

Integracija mikromreže unutar elektroenergetskog sistema zahtijeva pažljivu analizu, kako bi se sagledale mogućnosti smanjenja gubitaka u aktivnoj i reaktivnoj snazi, optimizacije devijacije napona i postizanja optimalne proizvodnje električne energije. Minimizovani aktivni i reaktivni gubici, uporedo sa održavanjem devijacije napona unutar zadovoljavajućih granica, direktno utiču na ukupnu energetska efikasnost sistema. Ovi parametri ne samo da smanjuju operativne troškove, već i povećavaju pouzdanost i održivost elektroenergetskih sistema. Prema tome, značaj integracije mikromreža, više je nego jasan i ima veliki praktični značaj.

U cilju postizanja smanjenja gubitaka i očuvanja naponskih uslova u sistemu, koriste se različite strategije upravljanja mikromrežama. U ovom kontekstu, istraživanje se fokusira na primjenu genetičkog algoritma kao inovativnog pristupa za smanjenje troškova korišćenja resursa unutar mrežno povezane mikromreže, uz istovremenu optimizaciju devijacije napona i minimizaciju gubitaka u sistemu. Genetički algoritam, kao sofisticirana optimizaciona tehnika, omogućava precizno prilagođavanje parametara mikromreže u različitim scenarijima i dinamičkim vremenskim uslovima. Rezultati istraživanja pokazuju da se primjenom genetičkog algoritma može postići optimalna konfiguracija mikromreže. Ova konfiguracija pruža maksimalnu energetska efikasnost, održava stabilnost napona u sistemu i osigurava ekonomsku isplativost u različitim operativnim scenarijima. Analize rezultata dodatno potvrđuju inovativnost ove metode, ističući njen doprinos u smanjenju gubitaka, održavanju naponskih prilika unutar zadovoljavajućih granica i povećanju ekonomske isplativosti integracije mikromreže.

Dakle, predložena metoda omogućava postizanje efikasnog rada mikromreže, pri različitim radnim uslovima. Uz to, ona predstavlja značajnu polaznu tačku za buduća istraživanja u ovoj oblasti.

Zahvaljujem se profesorima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore na podijeljenom znanju i vještinama. Posebnu zahvalnost dugujem mentoru Doc.dr Martinu Čalasanu za nesebičnu pomoć i vrijeme koje je izdvojio tokom izrade mog master rada.

Nemanja Kostić

IZVOD RADA

U savremenom društvu, efikasno upravljanje električnom energijom postaje ključno za postizanje energetske održivosti i pouzdanosti elektoenergetskih sistema. U tom kontekstu, mikromreže se ističu kao esencijalno rješenje za ostvarivanje tih ciljeva, integrišući različite izvore energije i optimizujući troškove prenosa. Detaljna analiza proučavanja različitih konfiguracija mikromreže pri različitim vremenskim uslovima, kao i načina njene optimizacije su ključni za postizanje maksimalne energetske efikasnosti i ekonomske isplativosti integracije mikromreže.

Ovaj master rad, pod nazivom "*Analiza optimalnog energetskeg menadžmenta mrežno povezane mikromreže sa stanovišta minimizacije gubitaka i devijacije napona*", temelji se na sveobuhvatnom istraživanju koncepta optimalnog upravljanja energijom u mrežno povezanoj mikromreži. Cilj optimalnog upravljanja jeste smanjenje gubitaka aktivne i reaktivne snage, kao i devijacije napona, kroz preciznu optimizaciju proizvodnje električne energije.

Kroz implementaciju genetičkog algoritma, kao široko prihvaćene optimizacione tehnike, istraživanjem se identifikuju optimalne strategije upravljanja mikromrežom. Genetički algoritam koristi se za precizno podešavanje proizvodnje aktivne snage svakog elementa tokom jednog dana, u cilju minimizacije devijacije napona i smanjenja gubitaka u elektroenergetskom sistemu, uz optimizacije troškova rada mikromreže. Nakon proračuna optimalnih parametara za svaki od resursa mikromreže, izvršena je analiza različitih situacija, uključujući promjene u prisustvu ili odsustvu obnovljivih i tradicionalnih izvora energije. Uporedo sa tim, analizirana je i simulacija promjenljivih vremenskih uslova, uključujući varijacije u temperaturi, radijaciji zračenja i brzini vjetra, kako bi se utvrdilo kako različiti faktori utiču na efikasnost i ekonomsku isplativost mikromreže u različitim situacijama.

Ovaj strateški pristup omogućava temeljan uvid u ponašanje mikromreže u promjenljivim okolnostima, što predstavlja ključni aspekt za optimizaciju njenih performansi.

Ključne riječi: elektorenergetski sistem, mikromreža, optimizacija, genetički algoritam

ABSTRACT

In contemporary society, efficient management of electrical energy is becoming crucial for achieving energy sustainability and reliability of power systems. In this context, microgrids stand out as an essential solution to realize these goals by integrating various energy sources and optimizing transmission costs. A detailed analysis, examining different configurations of the microgrid under varying weather conditions, along with methods of its optimization, is crucial for achieving maximum energy efficiency and economic feasibility of microgrid integration.

This master's thesis, titled "*Analysis of Optimal Energy Management in Networked Microgrid from the Perspective of Loss Minimization and Voltage Deviation*" is based on a comprehensive investigation into the concept of optimal energy management in a networked microgrid. The objective of optimal management is to reduce losses in active and reactive power, as well as voltage deviation, through precise optimization of electrical energy production.

Through the implementation of a genetic algorithm, a widely accepted optimization technique, the research identifies optimal management strategies for the microgrid. The genetic algorithm is employed to finely adjust the production of active power for each element throughout a day, aiming to minimize voltage deviation and reduce losses in the power system, all while optimizing the operational costs of the microgrid. After calculating optimal parameters for each resource within the microgrid, an analysis is conducted for various scenarios, including changes in the presence or absence of renewable and traditional energy sources. Additionally, a simulation of variable weather conditions is analyzed, encompassing variations in temperature, radiation, and wind speed, to determine how different factors impact the efficiency and economic feasibility of the microgrid in diverse situations.

This strategic approach provides a thorough insight into the behavior of the microgrid under changing circumstances, representing a crucial aspect for optimizing its performance.

Keywords: power system, microgrid, optimization, genetic algorithm

LISTA SKAĆENICA

DER	distributivni izvor električne energije (eng. <i>Distributed Energy Resources</i>)
EES	elektroenergetski sistem
PV	fotonaponski sistemi (eng. <i>Photovoltaic Generation Units</i>)
WT	vjetrogeneratori (eng. <i>Wind Generation Systems</i>)
MT	mirkoturbine (eng. <i>Microturbines</i>)
DG	dizel generatori (eng. <i>Diesel Generators</i>)
FC	gorivne ćelije (eng. <i>Fuel Cells</i>)
V2G	vozilo ka mreži (eng. <i>Vehicle to Grid</i>)
SSE	sistemi za skladištenje energije (eng. <i>Energy Sorage System</i>)
PDF	logaritamska funkcija gustine vjerovatnoće (eng. <i>Probality Density Function</i>)
CHP	sistemi za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije (engl. <i>Combined Heat and Power</i>)
PEMFC	Gorivne ćelije sa protonskom promjenom (eng. <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cells</i>)
MCFC	gorivne ćelije sa rastopljenim karbonatom (eng. <i>Molten Carbonate Fuel Cells</i>)
AAFC	gorivne ćelije sa alkalnim elektrolitom (eng. <i>Aqueous Alkaline Fuel Cells</i>)
SOFC	gorivne ćelije sa čvrstim oksidom (eng. <i>Solid oxide Fuel Cells</i>)
PAFC	Gorivne ćelije sa fosfornom kiselinom kao elektrolitom (eng. <i>Phosphoric Acid Fuel Cells</i>)
DSM	upravljanje potražnjom(eng. <i>Demand Side Management</i>)
EA	evolucijski algoritam (eng. <i>Evolutionary Algorithm</i>)
GA	genetički algoritam (eng. <i>Genetic Algorithm</i>)
COP	diskretni ili kombinovani problemi optimizacije (eng. <i>Discrete or Combinatorial Optimization Problems</i>)
UX	uniformno ukrštanje (eng. <i>Uniform Crossover</i>)
TSP	problem trgovačkog putnika (eng. <i>Traveling Salesman Problem</i>)

PMX djelimično mapirano ukrštanje (eng. *Parially Mapped Crossover*)
XOR ekskluzivna OR operacija (eng. *Exclusive OR*)

SADRŽAJ

UVOD	1
GLAVA 1	3
ANALIZA DISTRIBUTIVNIH ENERGETSKIH RESURSA I ARHITEKTURA MIRKOMREŽE	3
1.1. Uvod	3
1.2. Distribuirani izvori električne energije.....	6
1.2.1. Solarni sistemi	6
1.2.2. Vjetroturbine.....	8
1.2.3. Mikroturbine.....	11
1.2.4. Gorivne ćelije	12
1.2.5. Dizel generatori	14
1.2.6. Baterije	15
1.2.7. Koncept mikromreže	16
GLAVA 2	18
ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE	18
2.1. Opšti pregled distributivnih sistema	18
2.2. Analiza tokova snaga kod distributivne mreže.....	20
2.3. Planiranje radijalnih distributivnih sistema	21
2.4. Rekonfiguracija sistema	21
2.5. IEEE 33-čvorna testna distributivna mreža	21
GLAVA 3	24
GENETIČKI ALGORITAM	24
3.1. Osnovni koncept genetičkog algoritma	24
3.2. Inicijalizacija populacije.....	27
3.3. Kriterijum završetka rada genetičkog algoritma	28
3.4. Uslovi ukrštanja.....	28
3.5. Selekcija	29
3.6. Ukrštanje	30
3.6.1. Nelinearno ukrštanje.....	32
3.7. Mutacija.....	33
3.8. Nova populacija.....	34
3.9. Održavanje raznovrsnosti	35

3.10. Reprezentacija	35
3.10.1. Binarni Problemi	36
3.10.2. Diskretni (ne binarni) problemi	36
3.10.3. Problemi permutacije.....	37
3.11. Generisanje slučajnih brojeva.....	38
GLAVA 4	39
PRIMJENA GENETIČKOG ALGORITMA ZA OPTIMIZACIJU ENERGETSKOG MENADŽMENTA MIKROMREŽE	39
4.1. Struktura korišćene mikromreže.....	39
4.2. Analiza opterećenja 33-čvornog sistema.....	40
4.3. Optimizacioni model	42
4.4. Funkcija cilja u optimizacionom modelu	43
4.4.1. Cijena angažmana vjetrogeneratora.....	43
4.4.2. Cijena angažmana solarnog panela.....	44
4.4.3. Cijena angažmana dizel generatora	44
4.4.4. Cijena angažmana mikroturbine.....	45
4.4.5. Cijena angažmana sistema za skladištenje energije.....	46
4.4.6. Cijena prilagođavanja potrošnje električne energije u skladu sa proizvodnjom.....	46
4.4.7. Cijena angažmana javnog distributera električne energije	47
4.4.8. Analiza devijacije napona.....	47
4.4.9. Aktivni i reaktivni gubici.....	48
4.4.10 Predložena kriterijumska funkcija za angažman mikromreže	48
4.5. OSNOVNE KARAKTERISTIKE GENETIČKOG ALGORITMA U CILJU OPTIMIZACIJE MIKROMREŽE	49
4.6. REZULTATI SIMULACIJA	50
4.6.1. Analiza rada mikromreže u situaciji angažmana svih njenih resursa	50
4.6.2. Analiza rada mikromreže bez vjetrogeneratora.....	55
4.6.3. Analiza rada mikromreže bez solarnog panela.....	60
4.6.4. Analiza rada mikromreže bez obnovljivih izvora energije.....	64
4.6.5. Analiza rada mikromreže bez baterije	66
4.6.6. Analiza rada mikromreže koji isključuje angažman dizelgeneratora	69
ZAKLJUČAK	72
BIBLIOGRAFIJA	74

LISTA SLIKA

Slika 1.1. Prikaz tipične mikromreže uključujući različite tipove DER-a i potrošača	4
Slika 1.2. Serijska i paralelna veza PV ćelija, modula i kreiranje solarnog niza.....	6
Slika 1.3.a. PV model sa jednom diodom.....	7
Slika 1.3.b. PV model sa dvije diode.....	7
Slika 1.4. Funkcija izlazne snage vjetroturbine	10
Slika 1.5. Prikaz sistema rada mikroturbine	11
Slika 1.6. Princip rada PEMFC	13
Slika 1.7. Sistem upravljanja mikromrežom	17
Slika 2.1. Opšti pregled naponskih nivoa elektroenergetske mreže	19
Slika 2.2. Šematski prikaz 33-čvornog sistema	22
Slika 3.1. Prikaz operacije selekcije primjenom RWS metode	29
Slika 3.2. Prikaz problema sklapanja rotora	37
Slika 4.1. Arhitektura mikromreže implementirane u 33-čvorni testni sistem.....	40
Slika 4.2. Dinamika promjena zahtjeva potrošača za grijanje/hlađenje	41
Slika 4.3. Dinamika promjena zahtjeva osvetljenja i V2G sistema.....	41
Slika 4.4. Prikaz ukupnog opterećenja i procentualni prikaz udjela pojedinačnog na ukupno opterećenje	42
Slika 4.5. Optimizacioni model mikromreže	42
Slika 4.6 Promjena radijacija u toku dana	50
Slika 4.7. Promjena temeprature u toku dana.....	50
Slika 4.8. Promjena brzine vjetra u toku dana.....	50
Slika 4.9. Proizvedena snaga PV sistema	50
Slika 4.10. Proizvedena snaga vjetrogeneratora.....	51

Slika 4.11. Proizvedena snaga dizel generatora	51
Slika 4.12. Proizvedena snaga mikroturbina	51
Slika 4.13. Korišćenje usluga javnog distributera	51
Slika 4.14. Zahtjevi za redukcijom opterećenja	52
Slika 4.15. Grafik opterećenja prije i nakon primjene DR	52
Slika 4.16. Uvid u proizvodnji aktivne snage angažmanom svih resursa mikromreže	52
Slika 4.17. Snaga baterije	53
Slika 4.18. Generisana snaga PV	53
Slika 4.19. Generisana snaga WT	53
Slika 4.20. Grafik analize devijacije napona	54
Slika 4.21. Grafik analize aktivnih gubitaka	54
Slika 4.22. Grafik analize reaktivnih gubitaka	54
Slika 4.23. Generisana snaga PV sistema	55
Slika 4.24. Generisana snaga PV sistema u poređenju sa njegovom nominalnom proizvodnjom	56
Slika 4.25. Slika 4.25. Proizvedena snaga mikroturbine	56
Slika 4.26. Proizvedena snaga dizelgeneratora	57
Slika 4.27. Slika 4.27. Zahtjevi potrošačima za smanjenom potrošnjom	57
Slika 4.28. Zahtjevi potrošača za redukcijom opterećenja	57
Slika 4.29. Zahtjevi za korišćenje usluga javnog distributera	58
Slika 4.30. Uvid u proizvodnji aktivne snage angažmanom od strane dostupnih resursa mikromreže	58
Slika 4.31. Grafik analize aktivnih gubitaka	59
Slika 4.32. Grafik analize reaktivnih gubitaka	59
Slika 4.33. Grafik analize devijacije napona	59
Slika 4.34. Proizvedena snaga vjetrogeneratora	60
Slika 4.35. Proizvedena snaga dizelgeneratora	60
Slika 4.36. Proizvedena snaga mikroturbine	61

Slika 4.37. Generisana snaga WT u poređenju sa njegovom nominalnom proizvodnjom	61
Slika 4.38. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom	62
Slika 4.39. Korišćenje usluga javnog distributera	62
Slika 4.40. Uvid u proizvodnju aktivne snage angažmanom dostupnih resursa mikromreže	63
Slika 4.41. Grafik analize aktivnih gubitaka	63
Slika 4.42. Grafik analize reaktivnih gubitaka	63
Slika 4.43. Grafik analize devijacije napona	63
Slika 4.44. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom	64
Slika 4.45. Zahtjevi potrošača prije i nakon DR.....	64
Slika 4.46. Grafik analize aktivnih gubitaka	65
Slika 4.47. Grafik analize reaktivnih gubitaka	65
Slika 4.48. Grafik analize devijacije napona	65
Slika 4.49. Grafik analize aktivnih gubitaka	66
Slika 4.50. Grafik analize reaktivnih gubitaka	66
Slika 4.51. Grafik analize devijacije napona	66
Slika 4.52. Uvid u proizvodnji aktivne snage angažmanom svih resursa mikromreže	67
Slika 4.53. Generisana snaga dizelgeneratora	67
Slika 4.54. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom	68
Slika 4.55. Korišćenje usluga javnog distributera	68
Slika 4.56. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom	69
Slika 4.57. Zahtjevi potrošača prije i nakon DR.....	69
Slika 4.58. Korišćenje usluga javnog distributera	70
Slika 4.59. Proizvedena snaga mirkoturbine	70
Slika 4.60. Grafik analize aktivnih gubitaka	71
Slika 4.61. Grafik analize reaktivnih gubitaka	71

LISTA TABELA

Tabela 1.1. Pregled prednosti i mana upotrebe mikroturbine.....	12
Tabela 1.2. Karakteristike različitih tipova gorivnih ćelija	13
Tabela 1.3 Pregled korišćenih baterija	15
Tabela 2.1. Pregled različitih konfiguracija distributivnih mreža.....	20
Tabela 2.2. Karakteristike 33-čvorne distributivne mreže.....	23
Tabela 3.1. Primjena “Latin hypercube” metode na populaciju koja sadrži 10 jedinki	27

UVOD

Sve veći izazovi u oblasti elektroenergetskih sistema, kao što su potreba za unaprjeđenjem energetske efikasnosti, smanjenjem gubitaka i obezbjeđivanjem pouzdanog snabdijevanja električnom energijom, naročito u ruralnim područjima, postaju sve izraženiji. Uporedo sa tim, mikromreže su postale ključno rješenje za prevazilaženje navedenih izazova.

Mikromreže predstavljaju inovativan pristup u snabdijevanju potrošača električnom energijom, a karakterišu ih različiti izvori energije, uključujući obnovljive izvore energije, poput solarnih panela i vjetrogeneratora, kao i tradicionalni izvori energije poput dizel generatora, mikroturbina i sličnih. Ovi decentralizovani energetske sistemi posebno su značajni u ruralnim sredinama, gdje igraju ključnu ulogu u unaprjeđenju kvaliteta života i zadovoljavanju energetske potreba zajednica [1, 2]. Jedna od glavnih pozitivnih aspekata primjene mikromreža, naročito u ruralnim sredinama, ogleda se u njihovoj ekonomskoj isplativosti. Nasuprot skupim proširenjima centralizovane elektro-distributivne mreže na velikim udaljenostima, mikromreže pružaju ekonomičniju opciju. Fleksibilnost i prilagodljivost ovih sistema omogućavaju njihovu efikasnu implementaciju i obezbjeđuju pouzdan izvor električne energije [3]. Korišćenjem obnovljivih izvora energije, poput solarnih panela i vjetrogeneratora, mikromreže doprinose i ekološkoj održivosti, smanjujući emisiju štetnih gasova. Osim što zadovoljavaju osnovne energetske potrebe zajednice, mikromreže stvaraju i šire mogućnosti za napredak, poboljšavajući na taj način kvalitet života i doprinoseći održivom razvoju ruralnih područja [4]. U cilju donošenja odluka o mjestu priključenja mikromreže, neophodno je sprovesti analizu tokova snaga, kako bi se osigurala stabilnost naponskih uslova i procijenilo opterećenja sistema, čime se obezbjeđuje efikasna integracija mikromreže u postojeću distributivnu mrežu [5, 6].

Da bi se zadovoljili energetske zahtjevi kritičnih opterećenja i osigurala ekonomska isplativost mikromreža, neophodno je pažljivo planirati i optimizovati ove sisteme [7]. Optimizacija mikromreža obuhvata jednostruke i višestruke ciljeve, promjenljive odluke i brojna ograničenja. Jednostruki ciljevi uključuju energetske efikasnost, ekonomsku efikasnost i zaštitu okoline. Energetska efikasnost se odnosi na proizvodnju i upotrebu električne energije. Ekonomski ciljevi teže smanjenju operativnih troškova mikromreže. Cilj zaštite okoline usredsređuje se na smanjenje emisije štetnih gasova i doprinosi održivom razvoju mikromreže. Sa druge strane, višestruki ciljevi traže ravnotežu između ekonomske isplativosti, energetske efikasnosti i očuvanja okoline [8]. U praksi su korišćene različite optimizacione metode, u cilju odabira optimalne konfiguracije mikromreže i postizanja višestrukih ciljeva, koji uključuju minimizaciju troškova proizvodnje električne energije i emisije CO₂. Optimizaciona tehnika, koja se ističe za rješavanje problema vezanih za planiranje mikromreža, sa posebnim fokusom na ekonomske aspekte raspodjele opterećenja energije, u cilju minimizacije njihovog korišćenja jeste genetički algoritam (GA) [9, 10]. Genetički algoritam, u kontekstu mikromreža, predstavlja optimizacionu tehniku koja se koristi za identifikaciju optimalnih strategija upravljanja, prilagođavanje proizvodnje električne energije i minimizaciju gubitaka, doprinoseći

efikasnosti i ekonomičnosti mikromreža. Upotrebom ovog algoritma može se postići optimizacija mikromreže, uključujući minimizaciju ekonomskih troškova i ekoloških uticaja [11, 12].

Međutim, da bi se mikromreže optimalno iskoristile, potrebno je detaljnije razumijevanje njihovog funkcionisanja u različitim uslovima. Ovo uključuje analizu kako se različite konfiguracije mikromreža ponašaju u promjenljivim vremenskim uslovima i način na koji se mogu optimizovati, kako bi se postigla maksimalna energetska efikasnost i ekonomska isplativost.

U ovom radu izvršena je optimizacija mikromreže u cilju smanjenja gubitaka u aktivnoj i reaktivnoj snazi, optimizacije devijacije napona, i postizanja optimalne proizvodnje električne energije, uz minimizaciju cijene troškova korišćenja dostupnih resursa u međusobno povezanim mikromrežama. Za postizanje ovog cilja, korišćen je genetički algoritam kao izuzetno efikasna optimizaciona tehnika, kojim se mogu pronaći najbolje strategije upravljanja mikromrežama.

U master radu analizirane su različite konfiguracije mikromreže, uključujući prisustvo ili odsustvo solarnog panela, vjetrogeneratora, baterije i dizel generatora. Osim toga, izvršena je simulacija promjenljivih vremenskih uslova, uključujući varijacije u temperaturi, brzini vjetra i sunčevoj radijaciji, kako bi se utvrdila aktivna snaga koju treba da proizvodi svaki od proizvodnih elemenata mikromreže u cilju postizanja pouzdanog snabdijavanja električnom energijom u toku jednog dana, uz optimizaciju cijene troškova angažmana istih. Tokom procesa optimizacije troškova angažmana elemenata mikromreže, uključena je i cijena troškova prilagođavanja trenutne potrošnje električne energije od strane potrošača, kao i cijena korišćenja električne energije od strane javnog distributera u slučaju dodatnih zahtjeva. Ovo istraživanje doprinosi razvoju naprednih pristupa upravljanja električnom energijom u mikromreži, čime se postiže optimizacija energetske održivosti i pouzdanosti u savremenim elektroenergetskim sistemima.

Magistarski rad sastoji se od uvoda, četiri poglavlja, zaključka, liste reference i priloga.

U **prvom poglavlju** analiziran je koncept mikromreže korišćene u ovom radu, uključujući detaljan opis njenih elemenata. Uporedo sa tim, dat je uvid u način na koji svaki od resursa doprinosi snabdijevanju električnom energijom.

U **drugom poglavlju** opisan je testni elektroenergetski sistem sa 33 čvora. Sprovedena je i analiza tokova snaga unutar sistema kako bi se bolje razumjela integracija mikromreže u postojeći elektroenergetski sistem.

U **trećem poglavlju** dat je detaljan opis genetičkog algoritma, kao i način njegove primjene u rješavanju optimizacionih problema.

U **četvrtom poglavlju**, objašnjava se praktična primjena genetičkog algoritma za optimizaciju mikromreže. Korišćenjem simulacija, istražuju se različiti scenariji rada mikromreže, uključujući varijacije u vremenskim uslovima kao što su temperatura, brzina vjetra i sunčeva radijacija, koje značajno utiču na performanse obnovljivih izvora energije. Takođe, proučava se uticaj nedostatka tradicionalnih izvora energije na operativnost mikromreže. Rezultati su prikazani grafički, gdje se jasno uočava kako različiti vremenski uslovi i različiti tipovi konfiguracije mikromreže utiču na aktivne, reaktivne gubitke i devijaciju napona.

U **zaključku** rada, diskutovani su rezultati magistarske teze, odnosno doprinosi u odnosu na dosadašnja istraživanja.

GLAVA 1

ANALIZA DISTRIBUTIVNIH ENERGETSKIH RESURSA I ARHITEKTURA MIRKOMREŽE

1.1. Uvod

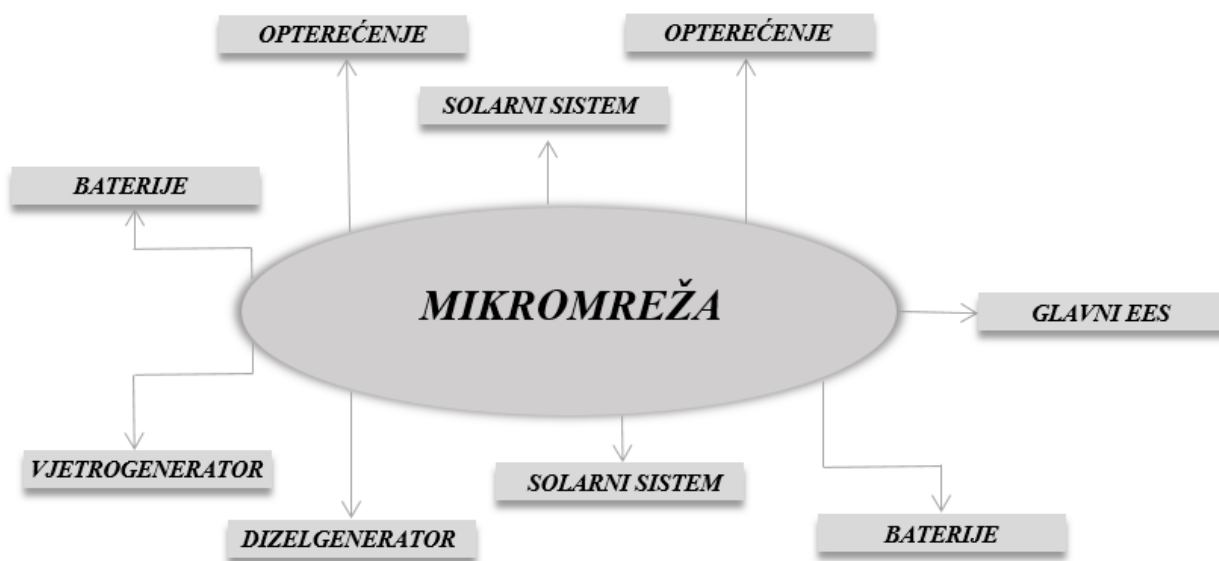
Pouzdana i kvalitetno snabdijevanje električnom energijom postalo je ključna potreba savremenog društva. Međutim, amortizovana oprema u postojećim elektroenergetskim sistemima, uporedo sa rastućim potrebama za električnom energijom, izaziva poteškoće u održavanju stabilnosti, efikasnosti i sigurnosti elektroenergetske mreže. Kao rezultat, nameće se potreba za značajnim investicijama u elektroenergetski sektor, kako bi se dotrajala oprema zamijenila modernijim i naprednijim rješenjima. Ekološki izazovi, tehnološki napredak, eksponencijalni rast potrošnje električne energije, deregulacija elektroenergetskog sektora, ekonomski i drugi faktori motivišu elektroenergetske sisteme da se prilagode promjenama u okruženju. Kao rezultat toga, javljaju se brojni izazovi u domenu upravljanja i planiranja elektroenergetskih sistema, uključujući proširenje energetske kapaciteta i prenosnih mreža, uz očuvanje stabilnosti sistema, optimizaciju efikasnosti i smanjenje emisija štetnih gasova. Uporedo sa tim, zbog rizika povezanih sa radom nuklearnih elektrana, planira se i njihovo postepeno gašenje [13].

Rastući uticaj privatnog sektora u proizvodnji električne energije, uz prethodno istaknute probleme, navodi javne distributere električne energije da istraže alternativne načine proizvodnje električne energije. Jedno od popularnih rješenja za proizvodnju električne energije jeste primjena distribuiranih izvora električne energije (DER), posebno onih koji se oslanjaju na obnovljive izvore energije. Ovi uređaji se integrišu u elektroenergetsku mrežu, obavljaju proizvodnju električne energije i koriste se u kombinaciji sa sistemima za skladištenje električne energije [14]. Različiti standardi definišu uslove i karakteristike koje uređaji moraju zadovoljiti kako bi se smatrali distribuiranim izvorima električne energije (DER). Na primjer, prema definiciji *Instituta* za istraživanje električne energije (eng. *Electric Power Research Institute*), DER-ovi su poznati kao jedinice sa izlaznom snagom od nekoliko kW do 50MW [15]. Iz samog naziva, može se zaključiti da su DER-ovi raspoređeni u distributivnoj mreži. Međutim, potpuna definicija, kako je navedeno u [16], kaže: “*Distribuirana proizvodnja električne energije odnosi se na sisteme za proizvodnju električne energije, koji se nalaze u distributivnoj mreži i direktno su povezani s njom*”. Distribuirani izvori električne energije (DER), uključuju vjetrogeneratore, fotonaponske (PV) sisteme, gorivne ćelije, dizel generatore, mikroturbine itd. i igraju ključnu ulogu u savremenim elektroenergetskim sistemima. Među navedenim resursima, DER-ovi poput PV sistema i vetrogeneratora, zbog svoje prirode često su raspoređeni u skladu sa geografskim uslovima. S’druge strane, lokaciju ostalih DER-ova određuju

dizajneri sistema, prema potrebama. Prisustvo DER-ova često zahtijeva korišćenje uređaja za skladištenje energije, kako bi se prevazišli izazovi povezani sa neslaganjem u trenutnom odnosu proizvodnje i potrošnje električne energije. Ovaj disbalans proizilazi iz stohastičnih promjena u proizvodnji električne energije od strane obnovljivih izvora, koje zavise od promjenjivih vremenskih uslova [17, 18].

Iako distribuirani izvori energije (DER) donose mnoge prednosti sa aspekta potrošača i proizvođača električne enegije, integracija ovih izvora energije zahtijeva detaljnu analizu njihovog uticaja na postojeći elektroenergetski sistem. Ovaj uticaj obuhvata niz pitanja, uključujući aspekte zaštite, kvalitet električne energije, pouzdanost sistema, upravljanje troškovima i druge relevantne faktore. Pametne mreže (eng. *smart grids*), predstavljaju savremeni elektroenergetski sistem prilagođen visokoj integraciji distribuiranih izvora energije (DER) i izazovima koji proizlaze iz ovog procesa. Prema definiciji datoj u literaturi [19-21], pametne mreže obuhvataju različite DER-ove, uključujući obnovljive i konvencionalne izvore električne energije, pametna brojila, kontrolere itd. Osnovni cilj ovakvih sistema je obezbijediti održivo, ekonomično i efikasno snabdijevanje električnom energijom korisnika. Ovim putem, tradicionalni elektroenergetski sistem koji je funkcionisao unidirekcionalno, preoblikovan je u modernu pametnu mrežu koja sadrži distribuirane izvore energije (DER) i podržava dvosmjerni protok električne energije. Drugim riječima, tradicionalni sistem se transformiše iz pasivne u aktivnu mrežu, postajući aktivni distributivni sistem. U takvom sistemu, krajnji korisnici prelaze iz uloge apsolutnih potrošača u proizvođače i potrošače električne energije, čime se omogućava da odlučuju da li će prodavati ili kupovati električnu energiju. Međutim ovakav sistem zahtijeva uvođenje novih komunikacionih sistema i tehnologija, što dovodi do povećanih tehničkih troškova u procesu implementacije i održavanja pametnih mreža.

Mikromreže (eng. *microgrid*), igraju ključnu ulogu u razvoju pametnih elektroenergetskih sistema. One se definišu kao složeni sistemi koji integrišu različite distribuirane izvore energije (DER), uređaje za skladištenje energije, razne vrste potrošača, kao i druge komponente poput pretvarača u cilju njihove integracije sa glavnom elektroenergetskom mrežom [22]. Na slici 4.1 dat je prikaz tipične mikromreže.



Slika 1.1. Prikaz tipične mikromreže uključujući različite tipove DER-a i potrošača

Ključne komponente mikromreže su distribuirani izvori električne energije (DER). Svaki od ovih izvora radi nezavisno, kako bi se osiguralo stabilno i ekonomično snabdijevanje električnom energijom. Ovaj pristup obezbjeđuje održivost mikromreže, čak i kada pojedini izvori električne energije privremeno nijesu dostupni. Višak proizvedene energije se akumulira putem sistema za skladištenje energije (SSE) i može se injektirati u glavni elektroenergetski sistem kada je to potrebno. Kapacitet mikromreža može varirati u opsegu od nekoliko kilovata (kW), do nekoliko desetina megavata (MW), u zavisnosti od specifičnih zahtjeva.

Osnovni cilj uvođenja mikromreža je obezbijediti stabilno i ekonomično snabdijevanje električnom energijom udaljena, odnosno, ruralna područja. Smanjena upotreba fosilnih goriva, izazovi u očuvanju kvaliteta električne energije i poteškoće u održavanju stabilnosti postojeće elektroenergetske mreže podstakli su istraživanje i razvoj mikromreža. Mikromreže koje su pravilno dizajnirane omogućavaju pouzdano i ekonomično snabdijevanje električnom energijom udaljena područja i istovremeno se mogu koristiti kao rezervni izvor energije u slučaju pojave poremećaja na glavnoj mreži. Glavna karakteristika mikromreža je njihova napredna upravljačka sposobnost. Zahvaljujući ovim sposobnostima, mikromreže mogu funkcionisati u dva osnovna operativna režima:

- izolovanom režimu rada
- režimu povezivanja sa glavnom elektroenergetskom mrežom

Prvi režim se primjenjuje u slučaju prirodnih katastrofa i drugih poremećaja na glavnoj elektroenergetskoj mreži, kako bi se povećala pouzdanost sistema i obezbijedilo neprekidno snabdijevanje električnom energijom potrošača. U drugom režimu, naglasak je na optimizaciji ekonomske isplativosti za vlasnika mikromreže [23]. Ukratko, upravljačke sposobnosti predstavljaju ključnu karakteristiku koja razlikuje mikromreže od tradicionalnih distributivnih mreža, bez obzira na prisustvo ili odsustvo distribuiranih izvora energije.

Mikromreže se klasifikuju u pet kategorija:

- komercijalne mikromreže,
- zajedničke mikromreže,
- kampus mikromreže,
- vojne mikromreže i
- udaljene mikromreže.

Komercijalne ili industrijske mikromreže dizajnirane su da rade paralelno sa glavnom elektroenergetskom mrežom. Ovim režimom postiže se smanjenje zavisnosti od glavne elektroenergetske mreže i optimizacija cijene troškova korišćenja električne energije. Uporedo sa tim, komercijalne mikromreže funkcionišu kao rezervni izvor električne energije, obezbjeđujući neprekidan rad komercijalnih i industrijskih objekata, čak i u slučaju prekida snabdijevanja iz glavne elektroenergetske mreže. Zajedničke mikromreže razvijene su kako bi se unaprijedila stabilnost elektroenergetske mreže. Kampus i vojne mikromreže implementiraju se od strane pojedinih ustanova, poput obrazovnih ustanova, bolnica i vojnih baza, zbog specifičnih tipova opterećenja i zahtjeva za neprekidnim napajanjem. Udaljene mikromreže zastupljene su u ruralnim područjima, često tamo gdje nije tehnički ili ekonomski isplativo uspostaviti napajanje iz glavne elektroenergetske mreže. Ove mikromreže doprinose u prevazilaženju izazova u obezbjeđivanju pouzdanog snabdijevanja električnom energijom na udaljenim mjestima, često doprinoseći ekonomskim rješenjima za

energetsku nezavisnost i održivost tih područja. Većina udaljenih mikromreža funkcioniše u izolovanom režimu rada, snabdijeva se dizel generatorima i parnim turbinama, uz obnovljive izvore energije [24, 25, 26, 27].

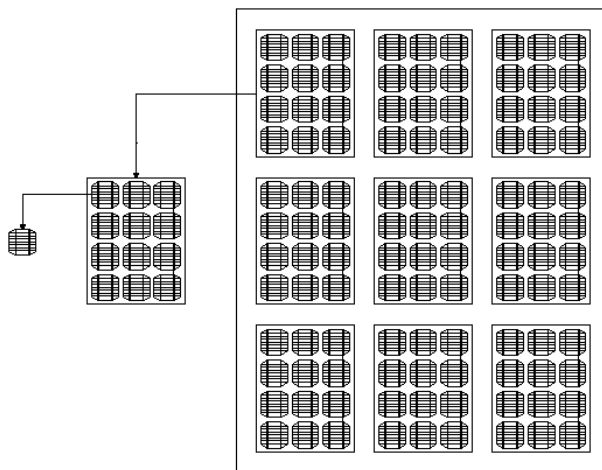
U daljem dijelu detaljno su razmatrane različite vrste distribuiranih izvora energije, uključujući solarne (PV) sisteme, vjetrogeneratore, mikroturbine, gorivne ćelije i dizel generatore, sa fokusom na njihove tehničke karakteristike. Takođe, analizirana je upotreba baterija kao uređaja za skladištenje energije. Na kraju poglavlja, pružena je potpuna definicija i struktura mikromreža.

1.2. Distribuirani izvori električne energije

Intezivna integracija distribuiranih izvora energije (DER) ima značajan uticaj na elektroenergetske sisteme. Ovi DER-ovi obuhvataju solarne (PV) sisteme, vjetrogeneratore, gorivne ćelije, mikroturbine i dizel generatore. Takođe, baterije i ostali sistemi za skladištenje energije se mogu smatrati DER-ovima. Energija skladištena u baterijama može se injektirati u elektroenergetsku mrežu, kako bi se smanjili troškovi proizvodnje električne energije. Međutim, integracija DER-ova zahtijeva specifična razmatranja i dodatnu opremu za povezivanje sa mrežom. Osim toga, njihov rad stvara dodatne troškove za operatera sistema. S'toga je neophodno pažljivo razmotriti mnoge tehničke i funkcionalne aspekte, kako bi se zadovoljili zahtjevi sistema. U ovom dijelu obrađeni su različiti tipovi DER-ova, njihove tehničke karakteristike i specifična oprema koja je potrebna za njihovu integraciju.

1.2.1. Solarni sistemi

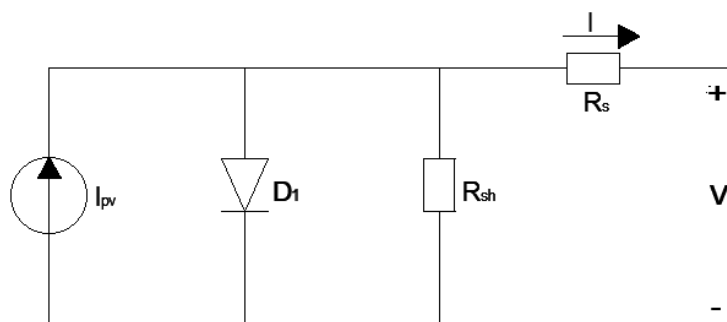
Fotonaponske (*eng. photovoltaic - PV*) jedinice predstavljaju uređaje za proizvodnju električne energije koji efikasno pretvaraju sunčevu svjetlosnu energiju u električnu energiju. Ovi PV uređaji sastoje se od tankih slojeva poluprovodničkog materijala, često izrađenih od kristalnog silicijuma (c-Si). Silicijumske ćelije se koriste kao osnovne komponente za izradu PV modula i vežu se u serijske i paralelne konfiguracije, kako bi formirale panele (module) sa površinom od nekoliko kvadratnih centimetara. Prikaz vezivanja modula u serijske i paralelne konfiguracije dat je na slici 1.2.



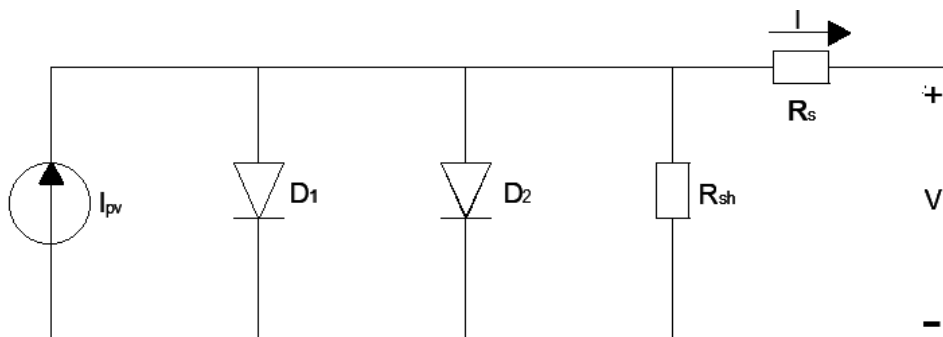
Slika 1.2. Serijska i paralelna veza PV ćelija, modula i kreiranje solarnog niza

Ovi paneli se dalje povezuju serijski ili paralelno, kako bi se postigle zahtijevane vrijednosti struje i napona. PV jedinice su ključni elementi u domenu obnovljivih izvora energije i igraju važnu ulogu u proizvodnji električne energije u održivim elektroenergetskim sistemima. Tehnologije zasnovane na fotonaponskom efektu, koji omogućava konverziju sunčeve energije u električnu, doprinose smanjenju emisija štetnih gasova i očuvanju prirodnih resursa, što je od suštinskog značaja za budućnost energetske održivosti.

Često se kombinacija fotonaponskih ćelija predstavlja putem pojednostavljenog ekvivalentnog modela, koji obuhvata strujni izvor, diode, serijski i paralelni otpornik, kako je prikazano na slici 1.3. Na slici 1.3.a prikazan je PV model sa jednom diodom, što predstavlja manje složen i manje precizniji opis u odnosu na PV model sa dvije diode (Slika 1.3.b). Serijski otpor PV ćelije označava pad napona unutar same ćelije (interne gubitke), dok paralelni otpor predstavlja gubitke uslijed curenja električne struje.



Slika 1.3.a. PV model sa jednom diodom



Slika 1.3.b. PV model sa dvije diode

Izrazi za generisanu struju i napon ovim PV modelom mogu se prikazati sljedećim matematičkim relacijama:

$$I_{\text{ćelije}} = I_r + \left[\alpha * \left(\frac{G}{G_r} \right) * (T_C - T_{cr}) + \left(\frac{G}{G_r} - 1 \right) * I_{sc} \right] \quad (1.1)$$

$$V_{\text{ćelije}} = -\beta * (T_C - T_{cr}) - R_s * \Delta I + V_r \quad (1.2)$$

$$\Delta I = \alpha * \left(\frac{G}{G_r} \right) (T_C - T_{cr}) + \left(\frac{G}{G_r} - 1 \right) * I_{sc} \quad (1.3)$$

U jednačini (1.1), G i G_r predstavljaju stvarne i referentne vrijednosti za radijaciju, dok su T_c i T_{cr} odgovarajuće vrijednosti za temperaturu modula i referentnu temperaturu ćelije. Često se koriste vrijednosti od $1000 \frac{W}{m^2}$, za G_r i $25^\circ C$, za T_{cr} i navedene su od strane proizvođača kao standardne tehničke karakteristike panela. Parametri α i β predstavljaju temperaturne koeficijente struje kratkog spoja i napona praznog hoda, respektivno. Struja kratkog spoja označena je kao I_{sc} , dok su I_r i V_r referentne vrijednosti koje se proračunavaju iz naponsko-strujne (V-I) karakteristike panela [28, 29].

U zavisnosti od broja paralelnih i serijskih vezanih modula, izlazna struja i napon PV sistema mogu se izračunati koristeći jednačine [29]:

$$V_{panel} = N_{redno} * V_{modula} \quad (1.4)$$

$$I_{panel} = N_{paralelno} * I_{modula} \quad (1.5)$$

U prethodnim jednačinama, N_{redno} i $N_{paralelno}$ označavaju odgovarajuće vrijednosti za broj redno i paralelno vezanih modula PV panela [29]. Spoljašnji faktori poput solarne insolacije i temperature imaju uticaj na proizvodnju PV sistema. Solarna insolacija varira tokom dana i razlikuje se iz dana u dan, uslijed promjenljivih vremenskih uslova. U naučnim radovima, solarne radijacije (I_r) se obično modeluje kao slučajna varijabla i prilagođava logaritamskoj gustini vjerovatnoće (PDF), statističkoj funkciji koja je prikazana relacijom (1.6):

$$f_{ir}(I_r) = \frac{1}{I_r * \sigma_{I_r} * \sqrt{2}} e^{-\frac{(\ln I_r - \mu_{I_r})^2}{\sigma_{I_r}^2}}, I_r \geq 0 \quad (1.6)$$

gdje σ_{I_r} i μ_{I_r} predstavljaju vrijednosti standardne devijacije i srednju vrijednost logaritamske gustine vjerovatnoće (PDF), respektivno [29].

Aktivna snaga proizvedena od strane solarnog panela predstavlja funkciju solarne insolacije i data je relacijom (1.7).

$$P_{PV,gen} = \begin{cases} P_{nom} \left(\frac{I_r^2}{I_{rstd} I_{rc}} \right), & I_r \leq I_{rc} \\ P_{nom} \left(\frac{I_r^2}{I_{rstd}} \right), & I_{rc} \leq I_r \end{cases} \quad (1.7)$$

U relaciji (1.7), I_{rstd} i I_{rc} su respektivne vrijednosti solarne insolacije u standardnim uslovima i solarne insolacije u određenom trenutku, dok je nominalna generisana snaga solarnog panela označena sa P_{nom} [29].

1.2.2. Vjetroturbine

Vjetroturbine (eng. *wind turbine* - WT) predstavljaju obnovljive izvore električne energije koji koriste energiju vjetera kako bi generisale električnu energiju. Njihova ekološka prihvatljivost ogleda se u odsustvu emisije štetnih gasova, za razliku od konvencionalnih izvora električne energije koji se oslanjaju na fosilna goriva i nuklearnu energiju [30]. Kinetička energija vjetera transformiše se u električnu energiju rotacijom lopatica vjetroturbine, čime se postiže efikasna i ekološki prihvatljiva

proizvodnja električne energije. Pored ekoloških prednosti, vjetroturbine ostvaruju i značajne ekonomske benefite, kroz minimizaciju troškova proizvodnje električne energije. Za izradu lopatica vjetroturbina koriste se napredni materijali visoke čvrstoće, čime se postiže pouzdan rad vjetroturbina, čak i u izazovnim vremenskim uslovima. Kako je prethodno rečeno, vjetroturbine pretvaraju kinetičku energiju vazduha u električnu energiju. Energija vazduha brzine v i mase m data je relacijom:

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (1.8)$$

Snaga vazduha, koja se pretvara u električnu energiju upotrebom vjetroturbina, može se izračunati dijeljenjem kinetičke energije vazduha sa protokom mase koji se mijenja u vremenu. Protok mase dat je relacijom (1.9).

$$\text{protok mase} = \frac{m}{t} = \frac{\rho * v}{t} \quad (1.9)$$

gdje ρ i v predstavljaju gustinu i zapreminu vazduha, respektivno. Razmatrajući zapreminu kao proizvod površine i dužine, jednačina (1.9) se može zapisati kao:

$$\text{protok mase} = \frac{\rho * v}{t} = \rho * A \frac{l}{t} \quad (1.10)$$

Iz relacija (1.9) i (1.10) proizilazi da se snaga koju prenosi vazduh na određenom mjestu može računati kao:

$$P_k = \frac{1}{2} * \rho * v^3 \quad (1.11)$$

Međutim, ukupna snaga vazduha nije u potpunosti iskorišćena od strane lopatica vjetroturbina, već se samo određeni dio te energije prenosi na rotor generatora. S'toga, snaga vazduha koju koristi vjetroturbina za proizvodnju električne energije data je kao:

$$P_k = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * K_p \quad (1.12)$$

gdje je K_p koeficijent snage rotora, predstavlja dio snage koju koristi vjetroturbina i proporcionalan je odnosu brzine vjetra prije i nakon udara u vjetroturbinu. Teorijski, najviša vrijednost za K_p iznosi 0.59. Iz relacije (4.12) zaključuje se da brzina vjetra ima najveći uticaj na proizvedenu snagu vjetrogeneratora. Na određenoj lokaciji brzina vjetra nije konstantna, već se neprestano mijenja tokom vremena. Osim toga, brzina vjetra značajno varira zbog različitih geografskih karakteristika, uključujući oblik terena, vremenske uslove i nadmorsku visinu na datoj lokaciji. S'toga se u analizama vjetra za određeno područje često koriste dugoročni meteorološki podaci, uključujući prosječne brzine vjetra tokom perioda dužeg i od deset godina. Korišćenjem ovakvih dugoročnih podataka osigurava se maksimalna efikasnost prilikom planiranja i postavljanja vjetrogeneratora, uzimajući u obzir sve varijacije brzine vjetra koje se javljaju na toj lokaciji. Iako su dugoročna mjerenja veoma korisna, često su ekonomski neisplativa. Zbog toga se često koriste kratkoročni podaci, kao što su godišnji podaci o brzini vjetra. Ovi podaci se zatim analiziraju i prilagođavaju funkciji gustine verovatnoće (*eng. probability density function - PDF*). Uobičajeni pristup za modelovanje raspodjele brzine vjetra koristi *Weibull PDF*, matematički izražen kao:

$$f_v(v) = \frac{k}{\vartheta} * \frac{v^{(k-1)}}{\vartheta} e^{-\left(\frac{v}{\vartheta}\right)^k}, \quad \vartheta \geq 0 \quad (1.13)$$

U relaciji (1.13) κ i ϑ predstavljaju faktor oblika i faktor skale, respektivno, dok v označava brzinu vjetra. Očekivana vrijednost *Weibull PDF-a* data je relacijom:

$$E_x(f_v(v)) = \vartheta * \Gamma * \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (1.14)$$

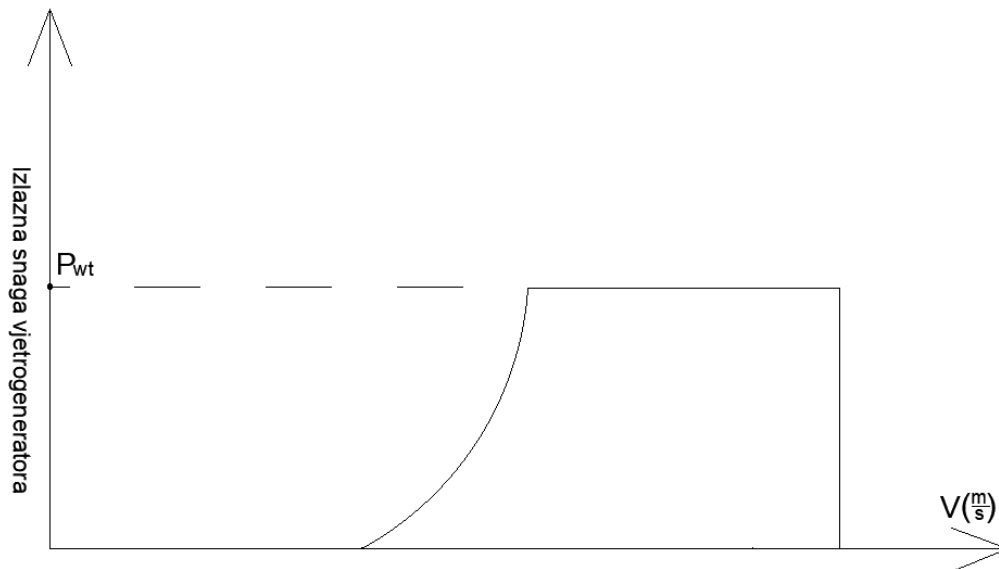
gdje je $\Gamma(\lambda)$ gama funkcija data kao:

$$\Gamma(\lambda) = \int_0^{\infty} e^{-t} * t^{\lambda-1} dt \quad (1.15)$$

Primjenom datih relacija mogu se dobiti očekivane vrijednosti brzine vjetra, kao i izlazna snaga vjetroturbine.

$$P = \begin{cases} 0 & v \leq v_i, v \geq v_0 \\ \frac{v - v_i}{v_r - v_i} P_{wr} & v \leq v_i \leq v_r \\ P_{wr} & v_r \leq v \leq v_0 \end{cases} \quad (1.16)$$

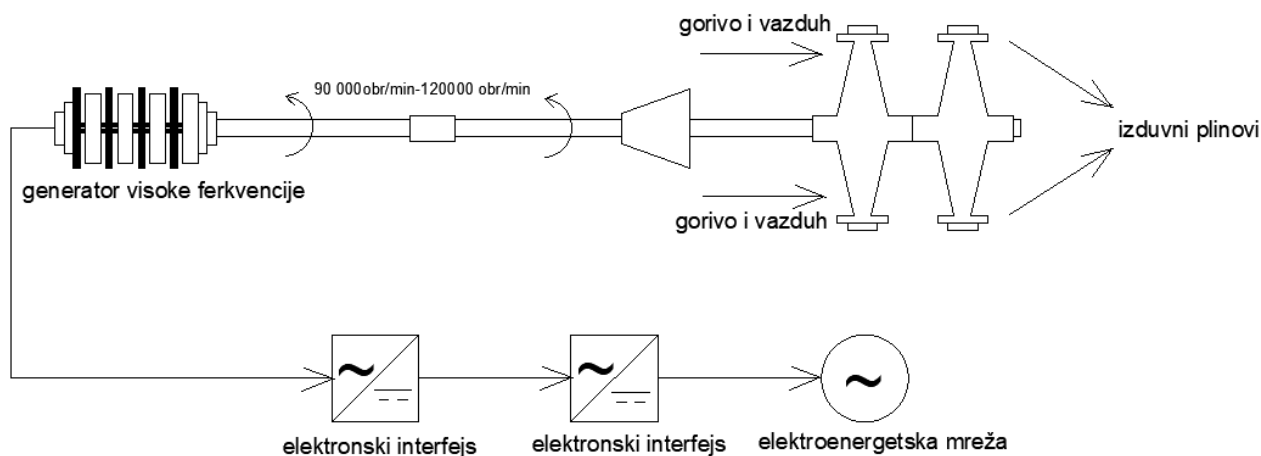
U datoj relaciji v_i , v_0 i v_r predstavljaju brzinu vjetra pri kojima vjetroturbina počinje raditi, prestaje raditi i brzinu koja odgovara nominalnoj snazi vjetroturbine. Na slici 4.6 prikazana je ova karakteristika vjetroturbine.



Slika 1.4. Funkcija izlazne snage vjetroturbine

1.2.3. Mikroturbine

Mikroturbine predstavljaju relativno novu tehnologiju za distribuiranu proizvodnju električne energije. Ove turbine su gasne turbine kompaktnog dizajna, čija snaga varira u opsegu od 25kW do 500kW. Mogu se koristiti kao nezavisni izvori električne energije ili kao dio sistema za proizvodnju električne i toplotne energije, poznatih kao CHP (eng. *combined heat and power*) sistemi. U sistemima za proizvodnju toplote i električne energije, iskorišćeni gas se koristi za rekuperaciju toplote, čime se postiže visoka energetska efikasnost, obično preko 80%. Mikroturbine nude niz prednosti, uključujući nisku težinu, kompaktnu veličinu, nisku emisiju štetnih materija, redukovan broj pokretnih djelova, visoku energetska efikasnost i relativno niske troškove proizvodnje električne energije. Takođe, imaju mogućnost korišćenja različitih vrsta goriva, uključujući prirodni gas, propan, metan, alkohol, benzin, naftu itd, pri čemu je prirodni gas najčešće korišćeno gorivo u mikroturbinama. U mikroturbinama, uređaj za usmjeravanje pare, poznat kao mlaznica, povezan je sa osovinom turbine koja rotira brzinom do $120.000 \frac{obr}{min}$, čime se pokreće visokofrekventni generator. Da bi se mikroturbina integrisala u elektroenergetsku mrežu, izlazna snaga visokofrekventnog generatora prvo se konvertuje u jednosmjernu struju (DC). Nakon toga, koristi se inverter u cilju konvertovanja jednosmjerne u naizmjeničnu (AC) struju, čija frekvencija odgovara frekvenciji elektroenergetskog sistema. Ovaj proces omogućava efikasno i pouzdano povezivanje mikroturbine sa elektroenergetskom mrežom [31].



Slika 1.5. Prikaz sistema rada mikroturbine

Početni sistemi mikroturbina imali su efikasnost od oko 30%. Međutim, upotrebom CHP sistema, iskorišćeni gasovi iz mikroturbine se koriste za zagrijavanje, čime se povećava ukupna energetska efikasnost sistema.

Ovaj pristup omogućava optimalno korišćenje proizvedene toplote i električne energije, čime se postiže optimizacija energetske efikasnosti. Detaljan prikaz rada mikroturbine dat je na slici 1.5. Kako je prethodno navedeno, mikroturbine se ističu po mnogim prednostima kao sistemi za distribuiranu proizvodnju energije. Tabela 1.1, pruža detaljan pregled prednosti i nedostataka upotrebe mikroturbina u okviru sistema za distribuiranu proizvodnju električne energije.

Tabela 1.1. Pregled prednosti i mana upotrebe mikroturbine

N.0.	Prednosti pri radu mikroturbine	Nedostaci pri radu mikroturbine
1.	Kompaktna izrada	Smanjena energetska efikasnost pri proizvodnji samo električne energije
2.	Niska težina konstrukcije	Povećanje temperature u okolini
3.	Redukovan broj pokretnih djelova	Niža efikasnost pretvaranja goriva u električnu energiju, pri proizvodnji samo električne energije
4.	Nizak stepen emisije štetnih gasova	
5.	Mogućnost upotrebe neiskorišćenog goriva za proizvodnju toplote	
6.	Visoka efikasnost proizvodnje u CHP sistemima	
7.	Minimizovani zahtjevi održavanja	
8.	Nizak stepen buke i vibracija pri radu	
9.	Visoka efikasnost proizvodnje u CHP sistemima	
10.	Povećana sigurnost i pouzdanost snabdijevanja energijom	

1.2.4. Gorivne ćelije

Gorivne ćelije (eng. *fuel cells* - FC) su vrsta distribuiranih energetske jedinice koje direktno pretvaraju hemijsku energiju u električnu energiju uz istovremenu proizvodnju toplotne energije. Ove ćelije imaju rasprostranjenu upotrebu, uključujući i postrojenja za proizvodnju električne energije. Uporedo sa tim, često se koriste i kao zamjena za motore sa unutrašnjim sagorijevanjem u električnim vozilima.

Prednosti upotrebe gorivnih ćelija obuhvataju visok odnos proizvedene električne energije u odnosu na njihovu masu i veličinu, visoku energetska efikasnost i nisku emisiju štetnih gasova. Kada se koriste za generisanje električne energije, gorivne ćelije efikasno iskorišćavaju gotovo 60% hemijske energije iz goriva i pretvaraju je u električnu energiju. U slučaju rada kao dijela sistema kombinovane proizvodnje toplote i električne energije (CHP), njihova efikasnost može dostići i više 80% [32]. Osim proizvodnje električne energije, gorivne ćelije takođe koriste višak toplote, čime se postiže visoka energetska efikasnost.

U zavisnosti od njihove hemijske strukture, gorivne ćelije klasifikovane su u pet kategorija:

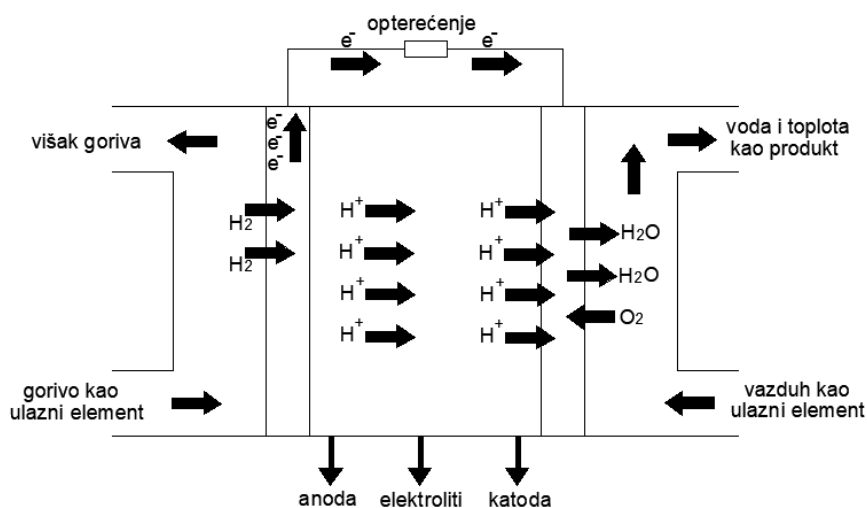
- Gorivne ćelije sa protonskom promjenom (PEMFC)
- Gorivne ćelije sa rastopljenim karbonatom (MCFC)
- Gorivne ćelije sa alkalnim elektrolitom (AAFC)
- Gorivne ćelije sa čvrstim oksidom (SOFC)
- Gorivne ćelije sa fosfornom kiselinom kao elektrolitom (PAFC)

Tabela 1.2 prikazuje karakteristike i osobine svakog tipa gorivnih ćelija [33].

Tabela 1.2. Karakteristike različitih tipova gorivnih ćelija

N.0.	Materijal elektrolita	Očekivana primjena	Radna temperatura	Karakteristike
1.	PEMFC	Električna vozila i stacionarni distributivni generatori	85 °C	Izazovi sa upotrebom materijala pri visokim temperaturama, potreba za kontaminiranim okruženjem
2.	MCFC	Stacionarni distributivni generatori	600 °C	Izazovi sa upotrebom materijala pri visokim temperaturama, generisanje pare pri radu kao CHP sistemi, visoka efikasnost
3.	AAFC	Projekti i inicijative usmjerene ka istraživanju svemira	100 °C	Visoki troškovi korišćenja i održavanja, potreba za kontaminiranim okruženjem
4.	SOFC	Stacionarni distributivni generatori	1000 °C	Poput MCFC
5.	PAFC	Stacionarni distributivni generatori	100 °C	Nijesu u upotrebi kod električnih vozila zbog visoke radne temperature i dužeg vremena zagrijavanja

Među navedenim, PEMFC ćelije su najčešće u upotrebi, zbog svojih osobina kao što su sposobnost rada u vozilima i stacionarnim distributivnim generatorima, niska radna temperatura, visok stepen proizvodnje energije i jednostavna struktura. Kod PEMFC gorivnih ćelija (eng. *proton exchange Membrane Fuel Cells*), vodonik i kiseonik se koriste kao gorivo. Vodonik se pod visokim pritiskom dovodi na anodu, gde se ravnomjerno raspoređuje po površini elektrolita. Na anodi se dešava proces “razbijanja” molekula vodonika na pojedinačne atome vodonika (H_2). Tokom ovog procesa, atomi vodonika gube elektrone, postajući tako pozitivno naelektrisani joni vodonika (H^+). Ovi joni se kreću kroz elektrolit do katode, dok se elektroni (koje su atomi vodonika izgubili) kreću spoljašnjim električnim kolom od anode do katode. Na katodi, joni vodonika i kiseonik se kombinuju, stvarajući vodu (H_2O) kao nusproizvod. Slika 1.6, prikazuje princip rada PEMFC.



Slika 1.6. Princip rada PEMFC

Sve ove hemijske reakcije se odvijaju unutar jedne ćelije i generišu napon od približno 0.7 V. Povezivanjem više ovakvih ćelija paralelno i serijski, povećava se izlazna jednosmerna struja i napon. Ovaj postupak omogućava konverziju hemijske energije vodonika u električnu energiju, uz minimalnu emisiju štetnih gasova, što je jedna od ključnih prednosti gorivnih ćelija.

1.2.5. Dizel generatori

Dizel generatori predstavljaju kombinaciju motora sa unutrašnjim sagorijevanjem i generatora, koji se koriste za proizvodnju električne energije. Motori u dizel generatorima obično koriste dizel gorivo, iako postoje i verzije prilagođene za upotrebu drugih tečnih goriva ili prirodnog gasa. Za razliku od mikroturbina, dizel generatori mogu biti direktno povezani sa elektroenergetskom mrežom, bez potrebe za dodatnim interfejsima. Tokom rada, brzina motora ostaje niska, što omogućava održavanje konstantne frekvencije proizvedene električne energije na 50/60 Hz.

Pravilnim dimenzionisanjem, dizel generator ima ključnu ulogu u osiguranju efikasne proizvodnje električne energije. U slučajevima kada je potrebno generisati više od 50 MW snage, gasne turbine obično pružaju bolju energetska efikasnost u poređenju sa dizel generatorima. Dizel generatori se često smatraju rasporedivim, jer njihova izlazna snaga može biti kontrolisana, što znači da se mogu uključivati ili isključivati iz elektroenergetskog sistema prema potrebi i na taj način proizvoditi električnu energiju u skladu sa unaprijed definisanim referentnim vrijednostima. Ova prilagodljivost čini dizel generatore korisnima za fleksibilno upravljanje elektroenergetskim sistemima. Jednačine (4.17) - (4.19) predstavljaju ograničenja proizvodnje snage za ove distribuirane energetske jedinice [34]:

$$0 \leq P_{dizel} \leq P_{max}^{dizel} \quad (1.17)$$

$$|P_{dizel}(t) - P_{dizel}(t - 1)| \leq ramprate * P_{max}^{dizel} \quad (1.18)$$

$$P_{dizel}^2 + Q_{dizel}^2 \leq S_{dizel}^2 \quad (1.19)$$

Jednačine (4.17) i (4.18) postavljaju ograničenja u kontekstu proizvodnje aktivne snage i brzine promjene snage, dok jednačina (4.19) definiše ograničenja kompleksne snage i faznog pomaka u elektroenergetskom sistemu, kako bi se očuvala njegova stabilnost i sigurnost.

Cijena troškova proizvodnje električne energije kod dizel generatora, obično je razmatrana kao kvadratna funkcija izlazne aktivne snage, što je dato kao:

$$Cijena\ troškova\ (P_{dizel}) = \alpha P_{dizel}^2 + \beta P_{dizel} + \gamma \quad (1.20)$$

U relaciji 1.20, α , β i γ predstavljaju koeficijente troškova dizel generatora i zavise od njegove strukture i vrste korišćenog goriva. Iako je glavna prednost dizel generatora njihova sposobnost prilagođavanja i lakoća upravljanja, važno je napomenuti da ovi generatori pri radu emituju gasove koji izazivaju efekat staklene bašte [34]. Ovaj aspekt ima ključan značaj prilikom razmatranja primjene dizel generatora u elektroenergetskoj industriji.

1.2.6. Baterije

Sistemi za skladištenje energije igraju ključnu ulogu u savremenim elektroenergetskim sistemima, zbog nesigurnosti i fluktuacija u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora energije, poput vjetroturbina i fotonaponskih sistema. Osim toga, dinamika potrošnje električne energije korisnika varira tokom dana. Uporedo sa tim, u periodima najveće potrošnje električne energije, posmatrajući relaciju (1.20), troškovi rada dizel generatora se kvadratno povećavaju u funkciji snage, što dovodi do ukupnog povećanja troškova rada elektroenergetskog sistema. S'tim u vezi, sistemi za skladištenje energije igraju ključnu ulogu u elektroenergetskim sistemima, jer skladište višak energije tokom perioda niske potrošnje iz najefikasnijih jedinica za proizvodnju električne energije. Ovako uskladištena energija unutar sistema za skladištenje energije, može se injektirati u elektroenergetsku mrežu tokom perioda visoke potrošnje i optimizovati smanjenje operativnih troškova sistema. Baterije predstavljaju najčešće korišćene uređaje za skladištenje energije u elektroenergetskim sistemima. Najčešće korišćene baterije u elektroenergetskim sistemima su olovo-kiselinske i protočne baterije. Ovi tipovi baterija imaju široku primjenu, zahvaljujući svojoj visokoj dostupnosti i niskim troškovima. Međutim, uprkos svojim prednostima, imaju određene nedostatke, uključujući nizak odnos između kapaciteta za skladištenje energije i njihove težine i dimenzija, potreba za čestim održavanjem, ograničeni životni vijek trajanja i ekološke probleme zbog upotrebe materijala poput olova [35].

U Tabeli 1.3, dat je pregled različitih tipova baterija i njihovih karakteristika [35]:

Tabela 1.3 Pregled korišćenih baterija

N.0.	Tip	Tehnologija	Gustina energije ($\frac{W}{kg}$)	Specifična snaga ($\frac{W}{kg}$)	Ciljna tržišta
1.	Olovo-kiselna	Koriste sumpornu kiselinu kao elektrolit i zatvorene ćelije sa mogućnošću kontrole ventilacije unutar ćelija, izrađene sa olovo-oksidiom i olovnim elektrodama	30-40	180	Mikromreže, telekomunikacije, UPS, elektroenergetski sistemi, električna vozila
2.	Ni-Cd	Koriste elektrolite visoke PH vrijednosti (obično kalijev hidroksid) i zatvorene ćelije sa mogućnošću kontrole ventilacije unutar ćelija, izrađene sa elektrodama od kadmija i nikl oksid-hidroksida	30	140-200	Avio-industrija, elektroenergetski sistemi
3.	Na-S	Koriste elektrolit od beta aluminijum - oksida i ćelije koje sadrže tečni natrijum i sumporne elektrode.	150	200	Energetski sistemi visokih kapaciteta proizvodnje električne energije (100MW), obnovljivi izvori energije
4.	Zn-Br	Koriste H_2 elektrolit (cink bromid) i zatvorene ćelije izrađene od cinka i broma	35-54	100	Prenos i distribucija električne energije, integracija obnovljivih izvora energije
5.	V-redukovane	Koriste dva elektrolita - elektrolit od vanadijeve soli razrijeđene vodom i razblažene sumporne kiseline	10-20	50	Prenos i distribucija električne energije, integracija obnovljivih izvora energije

1.2.7. Koncept mikromreže

Mikromreže se smatraju niskonaponskim distributivnim mrežama, koje integrišu distribuirane energetske izvore (DER), uređaje za skladištenje energije i različite tipove opterećenja, unutar ograničenog područja [36]. Ukupni kapacitet proizvodnje snage u mikromreži obično se kreće u rasponu od nekoliko desetina megavata (MW), dok je napon mreže obično oko nekoliko kilovolti (kV).

Mikromreže mogu biti projektovane za dva režima rada. Prvi režim rada mikromreže, koji podrazumijeva povezivanje mikromreže sa glavnim elektroenergetskim sistemom, ima za cilj optimizaciju energetske efikasnosti, smanjenje troškova i ostvarivanje drugih benefita. U ovom režimu, mikromreže se primjenjuju u cilju optimizacije korišćenja resursa i efikasnijeg upravljanja električnom energijom. Drugi režim rada, odnosno izolovani režim, fokusiran je na unaprjeđenje pouzdanosti elektroenergetskog sistema. U ovom režimu, mikromreža funkcioniše kao rezervni izvor energije kako bi osiguralo neprekidno snabdijevanje električnom energijom u slučaju poremećaja na glavnoj elektroenergetskoj mreži.

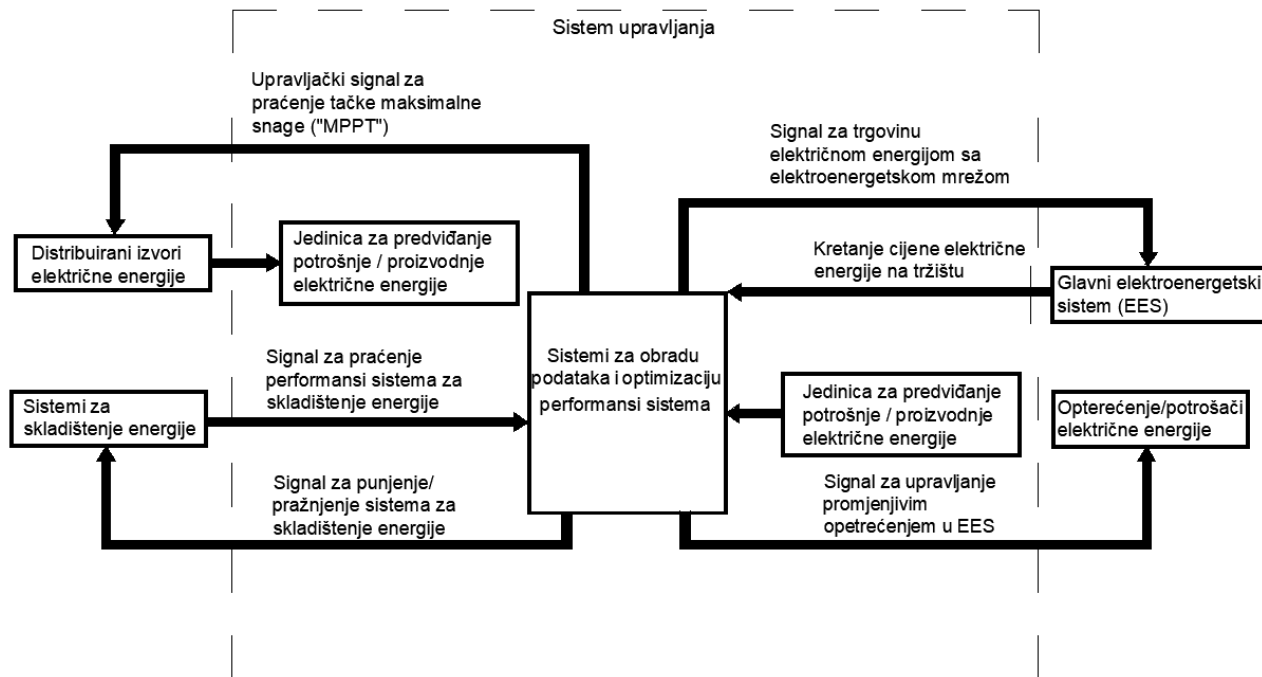
Oba režima rada imaju specifične svrhe i primjene, koje se biraju u zavisnosti od potreba i ciljeva mikromreže. Za dugotrajni izolovani režim rada, neophodna je pažljiva analiza kapaciteta sistema za skladištenje energije, kapaciteta korišćenih distribuiranih izvora električne energije, kao i fleksibilnost u raspodjeli električne energije prema potrebama potrošača. Nedostatak u ovim aspektima može prouzrokovati prekid snabdijevanja električnom energijom ili smanjenje kontinuiranog snabdijevanja električnom energijom.

Osnovna karakteristika koja može razlikovati mikromrežu od distributivne mreže sa lokalnim distribuiranim izvorima energije je visok stepen kontrole. U tom kontekstu, za pravilno funkcionisanje mikromreže, neophodni su odgovarajući kontroleri i sistemi za prikupljanje podataka.

Drugi element kojim se postiže efikasno funkcionisanje mikromreže je pouzdan komunikacioni sistem. U cilju postizanja optimalnog rada mikromreže, neophodno je postojanje integrisanog sistema za upravljanje energijom. Sistem za upravljanje energijom igra ključnu ulogu u održavanju funkcionalnosti mikromreže. Ovaj sistem odgovoran je za prikupljanje podataka, kontrolu različitih komponenti poput distribuiranih izvora energije (DER), sistema za skladištenje energije i potrošača, različite režime rada i sigurnost sistema. Takođe, predviđanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, praćenje potrošnje električne energije i planiranje elektroenergetske mreže, smatraju se sekundarnim zadacima sistema za upravljanje energijom. Cilj sistema za upravljanje energijom je stvaranje odgovarajućih referentnih vrijednosti za sve distribuirane izvore energije koji su dio mikromreže, uključujući i sisteme za skladištenje energije, u cilju optimizacije ekonomske efikasnosti mikromreže i obezbjeđivanja snage za potrebe opterećenja u mreži.

Korišćenje sistema za skladištenje energije zahtijeva detaljnu analizu plana optimizacije, kako bi se zahtijevana količina električna energija isporučila korisnicima i tokom perioda kada postoji deficit u proizvodnji električne energije. Uporedo sa tim, sistem za upravljanje planira upotrebu električne energije u toku jednog ili više dana unaprijed. Takođe, analizira i određuje optimalne transakcije u vezi sa električnom energijom sa glavnom elektroenergetskom mrežom za unaprijed definisani vremenski period, uzimajući u obzir cijenu električne energije i druge promjenljive faktore, u cilju postizanja ekonomskih benefita za mikromrežu.

Interesovanje za razvoj mikromreža u savremenom elektroenergetskom sektoru bilježi sve veći rast iz mnogih razloga. Ekonomske koristi preovlađuju među razlozima za razvoj mikromreža, dok se ostali faktori, uključujući ekološke aspekte, često posmatraju kroz prizmu ekonomske efikasnosti, koja se može smatrati primarnim ciljem u razvoju mikromreža. Slika 1.7. prikazuje sistem upravljanja mikromrežom.



Slika 1.7. Sistem upravljanja mikromrežom

GLAVA 2

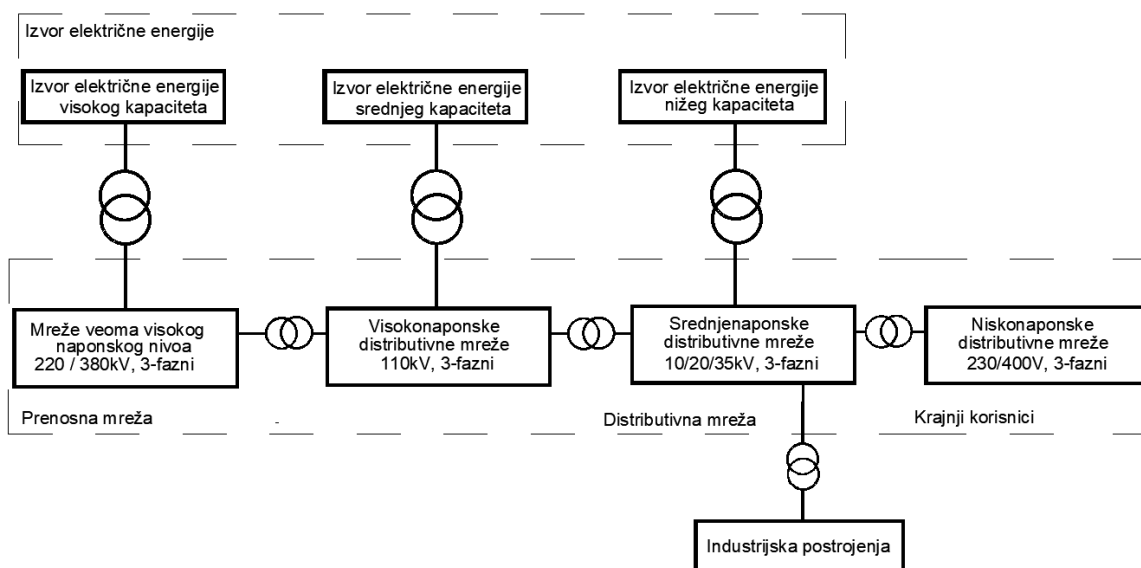
ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE

Elektrodistributivna mreža često je organizovana kao radijalna. Radijalna priroda distributivnog sistema pogodna je zbog svoje jednostavne konfiguracije i ekonomske isplativosti [37]. U distributivnoj mreži važno je implementirati vremenski prilagođene sisteme zaštite kako bi se osiguralo postupno isključivanje dijelova sistema u slučaju pojave poremećaja. S tim u vezi, važno je obezbijediti ažuriranu bazu podataka koja obuhvata različite tipove distributivnih mreža. Time se omogućava analiza i provjera vjerodostojnosti implementiranih algoritama na različite tipove distributivnih mreža koji odgovaraju definisanim ciljevima. Parametri koji igraju ključnu ulogu u konfiguraciji distributivnih mreža su sljedeći:

- Dijagram elektroenergetskog sistema, kojim se omogućava vizuelno predstavljanje topologije distributivnog sistema, pružajući prikaz načina povezivanja različitih komponenti u sistemu i distribucije električne energije kroz sistem. Drugim riječima diagram prikazuje broj čvorova i opterećenja povezanih sa čvorovima sistema.
- Podaci elektroenergetskog sistema, kojima se obuhvataju informacije o karakteristikama prenosnih vodova i čvorova, aktivnom i reaktivnom opterećenju, kao i nominalnoj snazi i naponu sistema.
- Analiza tokova snaga koja obuhvata analizu ukupnih gubitaka aktivne i reaktivne snage kao i identifikaciju čvora sistema u kojem se postiže najmanja vrijednost napona.

2.1. Opšti pregled distributivnih sistema

U elektroenergetskim sistemima u upotrebi su različiti naponski nivoi, a svaki od njih ima svoju specifičnu ulogu u sistemu. Visoki naponski nivoi (naponski nivo veći od 35kV) koristi se za distribuciju električne energije od mjesta proizvodnje, na velike udaljenosti, sa minimalnim gubicima. Srednji naponski nivo (naponski nivo u rasponu od 1kV do 35kV), koristi se za prenos električne energije putem prenosnih vodova prema različitim mjestima, uključujući i veće industrijske komplekse. U zavisnosti od potreba, ovaj naponski nivo može se održavati na definisanoj vrijednosti, ili se transformisati na niže naponske nivoe kroz distributivne transformatore. Niski naponski nivo (naponski nivo niži od 1kV), koristi se za snabdijevanje električnom energijom krajnjih korisnika, uključujući i manje poslovne objekte. Napon se dodatno smanjuje na 400/230V u cilju pouzdanog i efikasnog snabdijevanja električnom energijom. Razumijevanje različitih naponskih nivoa i načina njihovog povezivanja je ključno za pravilno upravljanje elektroenergetskim sistemima i realizaciju specifičnih zahtjeva korisnika. Slika 2.1 pruža opšti pregled ovih veza i naponskih nivoa [38].

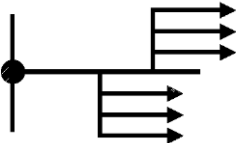
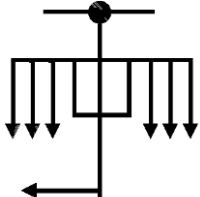
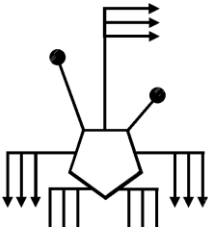


Slika 2.1. Opšti pregled naponskih nivoa elektroenergetske mreže

Distributivni sistem predstavlja dio elektroenergetskog sistema kojim se prenosi električna energija od napojnih tačaka (transformatorskih stanica na granici prenos/distribucija) do krajnjih korisnika [39]. Ključni elementi ovog sistema su prenosni vodovi i transformatorske stanice. Prenosni vodovi predstavljaju dio distributivnog sistema kojim se prenosi električna energija od mjesta proizvodnje do napojnih tačaka, kao i od napojnih tačaka do praga pojedinačnih ili grupnih potrošača. Transformatorske stanice su mjesta gdje se električna energija transformiše u definisani napon za napajanje potrošača. Distributivni sistem, koji može biti povezan ili putem nadzemnih ili podzemnih vodova, ima različite mrežne konfiguracije. Mrežne konfiguracije opisuju način povezivanja opterećenja i izvora energije. Tri opšte konfiguracije koje se koriste u distributivnoj mreži, zajedno sa njihovim prednostima i nedostacima, prikazane su u Tabeli 2.1 [40, 41].

Radialne mreže su poznate po svojoj jednostavnoj konfiguraciji, što olakšava koordinaciju zaštite, upravljanje i praćenje rada mreže. Međutim, ove mreže su podložne fluktuacijama napona na mjestima napojnih tačaka prilikom promjena opterećenja, a prekidi napajanja krajnjih korisnika mogu se javiti u slučaju poremećaja na prenosnomvodu ili transformatorskoj stanici na kojoj su priključeni. Prstenaste mreže imaju izvor napajanja na oba kraja mreže, što obezbjeđuje da se u slučaju poremećaja na jednom kraju, napajanje korisnika obezbijedi sa drugog kraja mreže. Ove mreže mogu priključiti veći broj korisnika u odnosu na radialne mreže, ali dolaze sa većim investicionim troškovima i zahtijevaju složenije metode identifikacije mjesta kvara i koordinacije zaštite. Zvezdaste mreže imaju više izvora napajanja, što doprinosi većoj efikasnosti i pouzdanosti sistema. Tokom perioda visokih opterećenja, snabdijevanje električnom energijom obezbijeđeno je iz više izvora. Međutim, ekonomska isplativost implementacije ovakvih mreža često je izazov, a identifikacija mesta kvara i koordinacija zaštite zahtijevaju kompleksne metode. U praksi, radialne distributivne mreže najčešće se koriste za analizu i implementaciju algoritama. Ova konfiguracija pruža jednostavan i efikasan model za testiranje performansi različitih tehnika i algoritama.

Tabela 2.1. Pregled različitih konfiguracija distributivnih mreža

N.0.	Konfiguracija mreže	Vizuelni prikaz mreže	Specifične karakteristike
1.	Radialne mreže		<p>Prednosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> Jednostavna konfiguracija, koordinacija zaštite, upravljanje i praćenje rada mreže <p>Nedostaci:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fluktuacija napona na mjestima napojnih tačaka pri promjenama opterećenja Prekid napajanja krajnjih korisnika, pri pojavi poremećaja na prenosnomvodu ili transformatorskoj stanici na kojoj su priključeni
2.	Prstenaste mreže		<p>Prednosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> Izvor napajanja se nalazi na oba kraja mreže, čime se postiže da se u slučaju pojave poremećaja na jednom kraju, napajanje korisnika obezbijedi sa drugog kraja mreže Može biti priključen veći broj korisnika u odnosu na radialnu mrežu <p>Nedostaci:</p> <ul style="list-style-type: none"> Veći investicioni troškovi implementacije ovakvih mreža Složeniji metodi za identifikaciju mjesta kvara, složena koordinacija zaštite
3.	Zvezdasta mreža		<p>Prednosti:</p> <ul style="list-style-type: none"> Više izvora napajanja čime se postiže veća efikasnost i pouzdanost Tokom perioda visokih opterećenja, snabdijavanje električnom energijom obezbijeđeno je iz više izvora <p>Nedostaci:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ekonomski isplativost implementacije Složeni metodi za identifikaciju mjesta kvara, složena koordinacija zaštite

2.2. Analiza tokova snaga kod distributivne mreže

Analiza opterećenja i tokova snaga predstavlja osnovnu analizu za prenosne i za distributivne elektroenergetske sisteme. Ovom analizom postiže se određivanje naponskih nivoa i faznog stava u pojedinačnim čvorovima sistema, bez obzira da li je u pitanju distributivna ili prenosna mreža. Na temelju ovih parametara mogu se izračunati ostali parametri sistema, poput gubitaka aktivne i reaktivne snage. Analiza opterećenja i tokova snaga koristi se tokom faza planiranja i projektovanja distributivnih sistema, ali i tokom operativnih faza praćenja i upravljanja mrežom. Često korišćene metode za analizu tokova snaga i opterećenja su “Newton-Raphson”, “Fast-Decoupled” i “Backward-Forward” metoda.

2.3. Planiranje radijalnih distributivnih sistema

U opštem kontekstu planiranje distributivnih sistema uključuje razvoj i optimizaciju postojećih sistema. U fazi razvoja pažnja je usmjerena na minimizaciji troškova dizajna sistema. U ovoj fazi, potrebno je donijeti odluke o cjelokupnom dizajnu sistema, uključujući lokaciju napojnih stanica, tačke opterećenja, kapacitet transformatora i konfiguraciju prenosnih vodova, sa ciljem minimizacije troškova. Uporedo sa tim, važno je uzeti u obzir i tehnička ograničenja poput maksimalnih dopuštenih padova napona u čvorovima, opterećenja u sistemu kao i maksimalnu nosivost prenosnih vodova u periodima najveće potražnje za električnom energijom. Sa druge strane za postojeće sisteme glavna razmatranja usmjerena su na minimizaciji troškova i optimizaciji pouzdanosti sistema.

2.4. Rekonfiguracija sistema

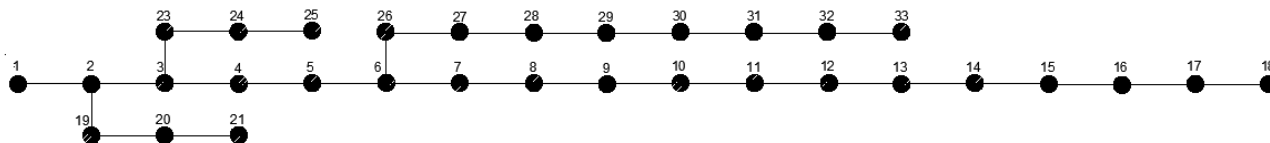
Rekonfiguracija mreže u distributivnom sistemu zahtijeva primjenu optimizacionih tehnika i obično se sprovodi u cilju smanjenja gubitaka u prenosu električne energije. Takođe, doprinosi i poboljšanju kvaliteta električne energije i povećava pouzdanost i sigurnost sistema. Rekonfiguracija mreže uključuje proces odabira prekidača, kojim se pojedini dijelovi sistema stavljaju ili isključuju iz pogona, u cilju optimizacije sistema. Danas, sve većom upotrebom obnovljivih izvora energije rekonfiguracija sistema je postala neizostavni dio prilikom analize upravljanja i planiranja distributivnih sistema. Proces rekonfiguracije u distributivnom sistemu mora zadovoljiti zahtjeve optimizacije i ispunjavati operativna ograničenja. Primjena rekonfiguracije mreže znatno je jednostavnija i efikasnija, posmatrajući ekonomski aspekt, u poređenju sa drugim tehnikama. Uopšteno, rekonfiguracija mreže ima dva glavna cilja, koja obuhvataju obezbjeđivanje maksimalne količine električne energije krajnjim korisnicima i automatsku rekonfiguraciju sistema u slučaju pojave poremećaja na istom [42].

2.5. IEEE 33-čvorna testna distributivna mreža

Različiti testni sistemi široko se primjenjuju u istraživanjima, u području elektroenergetskih sistema. Ovi sistemi često su korišćeni kao referentne tačke za implementaciju različitih algoritama, kako bi se procijenila efikasnost, benefiti, vjerodostojnost i stabilnost njihove upotrebe. Međutim, uprkos sličnoj osnovnoj konfiguraciji, postoji razlika među testnim sistemima. Ove razlike javljaju se kao posljedica prilagođavanja testnih sistema specifičnim primjenama. Promjene u podacima o vodovima ili čvorovima značajno utiču na ponašanje i karakteristike elektroenergetskog sistema. S'obzirom na to, izuzetno je važno imati ažuriranu bazu podataka koja sadrži informacije o raznim distributivnim testnim sistemima, kako bi se postigla tačnost i pouzdanost istraživanja u tom području.

U prethodnom periodu, IEEE je pružao različite testne sisteme, kako bi podržao istraživanje u području elektroenergetskih sistema. U tom kontekstu, jedan od najčešće korišćenih sistema je 33-čvorni testni sistem. Njegov prikaz dat je na slici 2.2 [30]. Ovaj sistem razvijen je 1989. godine od strane Baran-a i Wu-a, kako bi se istražio uticaj rekonfiguracije u distributivnim sistemima, na smanjenje gubitaka snage i ravnotežu opterećenja.

Godinama, 33-čvorna distributivna testna mreža postala je popularna i široko se koristila za proučavanje različitih problema u tradicionalnim distributivnim sistemima.



Slika 2.2. Šematski prikaz 33-čvornog sistema

Nedavni razvoj pametnih elektroenergetskih sistema, povezan sa integracijom novih tehnologija poput distribuiranih i obnovljivih izvora energije (DER), mehanizama upravljanja potražnjom (DSM) i novih operativnih metoda, nameće potrebu za proširenjem testnog sistema, kako bi se analizirali novi izazovi u okviru ovih istraživanja. Originalna verzija 33 čvornog distributivnog testnog sistema, predstavljena od strane Baran-a i Wu-a, sastojala se od 33 čvora, 32 grane, od kojih su tri kontrolisane i nije uključivala jedinice za kompenzaciju reaktivne snage. Kontrolisane linije sadrže prekidače čime se omogućava fleksibilnost u upravljanju mrežom. Drugim riječima, kada je prekidač zatvoren, omogućen je protok električne energije i putem kontrolisanih linija, dok se otvaranjem prekidača protok električne energije putem kontrolisanih linija sprječava. Mreža se napaja putem generatora, povezanog sa prvim čvorom sistema, a u mreži nema drugih izvora električne energije. U predloženom testnom sistemu, naponi na čvorovima ograničeni su od 0.9 do 1.1 (u prirodnim jedinicama - p.u.), što je prihvatljivo za praktične distributivne sisteme [43].

Ukupno opterećenje aktivne snage u 33-čvornom sistemu iznosi 3715kW, dok ukupno opterećenje reaktivne snage iznosi 2300kVAr. Gubici aktivne snage iznose 202.6771kW, a gubici reaktivne snage iznose 135.1410kVAr. Najmanja vrijednost napona u prirodnim jedinicama (p.u.) iznosi 0,913. Ovi podaci, koji uključuju informacije o čvorovima i granama, kao i podatke vezane za gubitke aktivne i reaktivne snage, omogućavaju procjenu ponašanja sistema u različitim uslovima. Osim toga, ovako definisan testni sistem omogućava sprovođenje različitih analiza koje su ključne za planiranje i optimizaciju distributivnih sistema [44]. U Tabeli 2.2, dat je prikaz karakteristika 33-čvorne mreže, koji uključuje aktivne i reaktivne gubitke, kao i parametre svake od grana mreže [44]. Podaci o 33-čvornom sistemu pružaju uvid u ponašanje sistema u različitim naponskim uslovima. Gubici aktivne i reaktivne snage, i naponski profili čvorova, pružaju kompleksne informacije, koje su ključne za razumijevanje performansi distributivnih sistema. Najmanja vrijednost napona i identifikacija čvora sa najnižim naponom dodatno ističe kritična mjesta u mreži, gdje je potrebno obratiti posebnu pažnju na održavanje napona u odgovarajućim granicama. Ovi podaci pružaju osnovu za različite analize, uključujući procjenu stabilnosti sistema, identifikaciju kritičnih tačaka i planiranje optimizacije distributivnih sistema. Detaljan prikaz karakteristika mreže, uključujući aktivne i reaktivne gubitke, kao i parametre svake grane mreže, dodatno omogućava implementaciju algoritama. Ovi podaci pružaju osnovu za testiranje i validaciju algoritama u realnom okruženju. Sve navedene informacije doprinose sprovođenju analiza i razvoju rješenja koja će unaprijediti performanse i pouzdanost distributivnih sistema.

Tabela 2.2. Karakteristike 33-čvorne distributivne mreže

Grana	Od čvora	Do čvora	Otpornost R (p.u.)	Reaktansa X (p.u.)	Gubici P (do sabirnice) (kW)	Gubici Q (do sabirnice) (kW)	Napon V (do čvora) (p.u.) NR	Napon V (do čvora) (p.u.) PQSUM
1	1	2	0.0575	0.0293	100	60	0.997	0.997
2	2	3	0.3076	0.1567	90	40	0.9829	0.9829
3	3	4	0.2284	0.1163	120	80	0.9755	0.9755
4	4	5	0.2378	0.1211	60	30	0.9681	0.9681
5	5	6	0.511	0.4411	60	20	0.9497	0.9497
6	6	7	0.1168	0.3861	200	100	0.9462	0.9462
7	7	8	0.4439	0.1467	200	100	0.9413	0.9413
8	8	9	0.6426	0.4617	60	20	0.9351	0.9351
9	9	10	0.6514	0.4617	60	20	0.9292	0.9292
10	10	11	0.1227	0.0406	45	30	0.9284	0.9284
11	11	12	0.2336	0.0772	60	35	0.9269	0.9269
12	12	13	0.9159	0.7206	60	35	0.9208	0.9208
13	13	14	0.3379	0.4448	120	80	0.9185	0.9185
14	14	15	0.3687	0.3282	60	10	0.9171	0.9171
15	15	16	0.4656	0.34	60	20	0.9157	0.9157
16	16	17	0.8042	1.0738	60	20	0.9137	0.9137
17	17	18	0.4567	0.3581	90	40	0.9131	0.9131
18	18	19	0.1023	0.0976	90	40	0.9965	0.9965
19	19	20	0.9385	0.8457	90	40	0.9929	0.9929
20	20	21	0.2555	0.2985	90	40	0.9922	0.9922
21	21	22	0.4423	0.5848	90	40	0.9916	0.9916
22	22	23	0.2815	0.1924	90	50	0.9794	0.9794
23	23	24	0.5603	0.4424	420	200	0.9727	0.9727
24	24	25	0.559	0.4374	420	200	0.9694	0.9694
25	25	26	0.1267	0.0645	60	25	0.9477	0.9477
26	26	27	0.1773	0.0903	60	25	0.9452	0.9452
27	27	28	0.6607	0.5826	60	20	0.9337	0.9337
28	28	29	0.5018	0.4371	120	70	0.9255	0.9255
29	29	30	0.3166	0.1613	200	600	0.922	0.922
30	30	31	0.608	0.6008	150	70	0.9178	0.9178
31	31	32	0.1937	0.2258	210	100	0.9169	0.9169
32	32	33	0.2128	0.3308	60	40	0.9166	0.9166

GLAVA 3

GENETIČKI ALGORITAM

Izraz genetički algoritam, najčešće označen GA, je optimizacioni metod inspirisan principima evolucije, koji se koristi za pronalaženje najboljih rešenja u skupu mogućih varijanti. Ovaj pojam prvi put uveo je Džon Holand. Njegova knjiga "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*" objavljena 1975. godine, igrala je ključnu ulogu u razvoju istraživanja i primjene u oblasti koja danas prevazilazi prvobitne koncepte genetičkog algoritma [45, 46]. Savremeni termin evolutivni algoritam, označen kao EA, danas se koristi kako bi se obuhvatila dostignuća u posljednjoj deceniji, vezano za ovu oblast. Genetički algoritam (GA), inspirisan Darwinovom teorijom prirodne selekcije, predstavlja optimizacionu tehniku za rješavanje konvencionalnih problema. Kroz biološki inspirisane procese, poput mutacije, ukrštanja i selekcije, GA evoluirala populaciju kandidatskih rešenja. Mutacija doprinosi raznovrsnosti, ukrštanje kombinuje karakteristike, dok selekcija favorizuje preživljavanje najprilagođenijih. Ovaj iterativni proces baziran na principu preživljavanja najprilagođenijih iz Darwinove teorije prirodne selekcije, simulira prirodnu evoluciju i teži postizanju optimalnog rešenja [46, 47, 48].

3.1. Osnovni koncept genetičkog algoritma

Pretpostavimo da je dat prostor pretrage χ gde vrijednosti variraju u određenim, diskretnim koracima, odnosno ograničene su na određeni skup pojedinačnih vrijednosti, umjesto da predstavljaju kontinuirani opseg vrijednosti. Neka je data funkcija:

$$f: \chi \rightarrow R \quad (3.1)$$

Opšti problem je pronaći:

$$\min_{x \in \chi} f \quad (3.2)$$

U ovom kontekstu, x predstavlja vektor odlučujućih varijabli, dok funkcija f predstavlja ciljnu funkciju i mjeri performance, odnosno vrijednost sistema u zavisnosti od vektora x . Pretpostavljamo da je cilj minimizacija, što znači da se teži pronalaženju vektora x koji minimizuje vrijednost ciljne funkcije f . Ovaj tip problema, gdje su varijable diskretne i često kombinovane u različitim skupovima naziva se diskretnim ili kombinatorijalnim problemom optimizacije - COP (eng. *discrete or combinatorial optimization problems*). Jedna od karakterističnih osobina pristupa GA je sposobnost razdvajanja reprezentacije problema od stvarnih varijabli u kojima je problem predhodno formulisan.

U skladu sa biološkom upotrebom termina, postalo je uobičajeno razlikovati izraz "genotip" (enkodiranu reprezentaciju varijabli, odnosno načina na koji su varijable predstavljene unutar

algoritma), od izraza "fenotip" (skupa samih varijabli, odnosno načina na koji te varijable izgledaju u realnom svijetu). Drugim riječima, vektor x je predstavljen stringom s , dužine l , sastavljen od simbola iz abecede A , koristeći mapiranje:

$$c: A^l \rightarrow \chi \quad (3.3)$$

U praksi, često se koristi prostor pretrage

$$S \subseteq A^l \quad (3.4)$$

kako bi se uvažila činjenica da neki stringovi u skupu S mogu predstavljati nevažeca rešenja za originalni problem. Dužina stringa, označena sa l , zavisi od dimenzija A i χ i elementa stringa koji odgovaraju genima, dok se vrijednosti tih gena predstavljaju kao alele. Ova veza između genotipa (stringa simbola) i fenotipa (stvarnih varijabli) često se opisuje kao mapiranje "genotipa na fenotip". Dakle, sam optimizacioni problem svodi se na pronalaženje:

$$\min_{s \in S} g(s) \quad (3.5)$$

gdje je funkcija $g(s)$ data kao:

$$g(s) = f(c(s)) \quad (3.6)$$

Obično je poželjno da c bude bijektivna funkcija (važna osobina bijekcije je da postoji jedinstveni vektor x za svaki string s i jedinstveni string s za svaki vektor x .) U nekim slučajevima, sama priroda mapiranja može stvarati poteškoće za genetički algoritam [49].

Originalna motivacija za razvoj genetičkog algoritma bila je biološka analogija, posebno proces selektivnog uzgoja biljaka ili životinja. U ovom kontekstu, traže se potomci koji imaju određene poželjne karakteristike (karakteristike koje su određene na genetskom nivou, kombinacijama roditeljskih hromozoma). Genetički algoritam primjenjuje sličan princip, koristeći stringove unutar populacije, koji se u okviru genetičkih algoritama nazivaju hromozomima. Proces rekombinacije stringova simulira genetsko ukrštanje i mutaciju. Ove genetske operacije stvaraju nove stringove, koji predstavljaju potomke u narednoj generaciji. Na osnovu ove evaluacije, stringovi koji imaju veću prilagođenost (tj. predstavljaju bolja rešenja za postizanje ciljne funkcije) mogu se identifikovati i imaju veće prilike za reprodukciju. Ovaj evolucijski proces simulira princip "preživljavanja najprilagođenijih", čime se postiže iterativna optimizacija populacije kako bi se pronašla najbolja rješenja problema. Važno je napomenuti da prilagođenost, odnosno "fitness" svake jedinke (stringa) u genetičkom algoritmu nije nužno određivati kompozicijom funkcije $f(c(s))$. Uporedo sa tim, koristi se $h(f(c(s)))$, gdje je h monotono rastuća funkcija [49].

Osnovna karakteristika genetičkih algoritama jeste njihova upotreba populacije sa velikim brojem stringova. U početku, grupa naučnika i istraživača evolutivnih strategija (ES), naročito u Njemačkoj, nije koristila populaciju i fokusirala se isključivo na operaciju mutacije, koja je bila sličnija tradicionalnim operatorima pretrage okoline i metodama istraživanja lokalnog susjedstva. Ove mutacione operacije pravile su male promjene u pojedinačnim jedinkama.

Sa druge strane, John Holland, osnivač genetičkog algoritama, takođe je koristio mutaciju, ali je u njegovoj šemi mutacija uglavnom tretirana kao podređena operacija u odnosu na ukrštanje. Ukrštanje podrazumijeva kombinovanje osobina različitih jedinki, kako bi se generisalo potomstvo sa novim karakteristikama. Ova razlika u pristupu naglašava osnovnu ideju genetičkog algoritama - kroz proces

ukrštanja i mutacije, cjelokupna populacija evoluira tokom generacija, omogućavajući traženje rješenja u prostoru pretrage problema na efikasan način.

U daljem dijelu, dat je osnovan uvid u operator ukrštanja i mutacije. Ovaj operator svodi se na zamjenu pojedinih gena jednog roditelja, odgovarajućim genima drugog roditelja.

Primjer ukrštanja sa jednom tačkom bi bio sljedeći. Ukoliko postoje roditelji $P1$ i $P2$, sa tačkom ukrštanja na mjestu 3 (označeno sa X), potomci će biti par 01 i 02:

$$\begin{array}{rcc}
 P1: 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0 & & 01: 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1 \\
 & X & \\
 P2: 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1 & & 02: 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0
 \end{array}$$

Drugi često korišćeni operator je mutacija, pri čemu se nasumično bira podskup gena, a vrijednost alela odabranih gena se mijenja. U slučaju binarnih stringova, ovo jednostavno znači komplementiranje odabranih bitova. Na primjer, string 01, sa mutiranim genima 3 i 5, postao bi 1 0 0 1 1 0 1 [38].

Niz koraka genetičkog algoritma, koji se koristi u iterativnom procesu optimizacije je sljedeći:

- Izaberite početnu populaciju hromozoma: Početna populacija predstavlja skup mogućih rješenja problema koji se pokušava optimizovati upotrebom GA,
- dok nije zadovoljen uslov zaustavljanja, ponavljajte postupak: GA iterativno evoluira populaciju sve dok nije zadovoljen određeni uslov zaustavljanja, kao što može biti određeni broj generacija, postizanje određenog nivoa prilagođenosti, ili neki drugi kriterijum,
- ako je ispunjen uslov za ukrštanje, odvija se proces ukrštanja koji uključuje odabir roditeljskih hromozoma iz populacije, odabir parametara ukrštanja, izvršavanje operatora ukrštanja, gdje se djelovi roditelja zamjenjuju kako bi se stvorili novi hromozomi (potomci),
- ako je ispunjen uslov za mutaciju, odvija se proces mutacije koji obuhvata: odabir tačke mutacije, odnosno alele odabranih gena koje će biti promijenjene, izvršavanje operatora mutacije, gdje se vrijednosti odabranih gena mijenjaju, procjena prilagođenost potomaka, dok se ne stvori dovoljan broj,
- svaki novostvoreni potomak se ocjenjuje, koristeći funkciju prilagođenosti (“fitness” funkciju) koja mjeri kvalitet rješenja,
- odabir nove populacije,
- proces se ponavlja dok nije ispunjen određeni uslov zaustavljanja, a zatim GA završava izvršavanje.

Ova opšta formulacija genetičkog algoritma omogućava prilagodljivost različitim oblicima selekcije, mutacije i ukrštanja. Pretpostavlja se da korisnik definiše specifične uslove pod kojima će se izvršiti operacije ukrštanja i mutacije. Nakon svake iteracije, nova populacija se generiše, a proces se ponavlja dok se ne zadovolje određeni uslovi zaustavljanja, čime se završava cjelokupan proces optimizacije. Ova struktura omogućava korisnicima prilagodljivost i kontrolu nad evolucijom populacije, čineći genetički algoritam efikasnim i prilagodljivim za različite optimizacione probleme [50].

3.2. Inicijalizacija populacije

Glavna pitanja koja se trebaju uzeti u obzir pri upotrebi genetičkog algoritma su najprije veličina populacije, a zatim i metoda kojom se jedinke biraju. Veličina populacije analizira se sa više teorijskih tačaka gledišta, iako je osnovna ideja uvijek bila o postizanju ravnoteže između efikasnosti i efektivnosti. Intuitivno bi se činilo da bi postojala neka "optimalna" vrijednost za određenu dužinu stringa, s'obzirom na to da bi nedovoljna populacija ograničila efikasno istraživanje prostora pretrage, dok bi prevelika populacija umanjila efikasnost metode do te mjere da se pronalazak rješenja ne bi mogao očekivati u razumnom vremenskom periodu.

Pitanje koje se može postaviti u vezi sa veličinom populacije jeste vezano za minimalnu veličinu populacije koja omogućava smislenu pretragu. Usvojen je princip koji sugerise da svaka tačka u prostoru pretrage treba biti povezana sa početnom populacijom, a ova povezanost se postiže isključivo putem operacije ukrštanja. Ovaj princip može biti zadovoljen samo ako postoji barem jedan primjerak svakog alela na svakom mjestu u svakom stringu cjelokupne populacije.

Pretpostavljajući da je početna populacija generisana nasumičnim uzorkovanjem sa ponavljanjem, vjerovatnoća da je barem jedan alel prisutan na svakom mjestu (lokusu) može se izračunati. Za binarne stringove računanje vjerovatnoće dato je izrazom:

$$P^* = \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^M\right)^l \quad (3.7)$$

gdje M predstavlja veličinu populacije, a l predstavlja dužinu binarnog stringa. Koristeći izraz 3.7, zaključuje se da je, na primjer, populacija veličine 17 dovoljna da obezbijedi da vjerovatnoća dostiže 99,9% za stringove dužine 50 [51].

Iako se često koristi nasumična inicijalizacija populacije, postoji mogućnost primjene naprednijih statističkih metoda, kako bi se postigla ravnomjerna pokrivenost prostora pretrage. Nasumično odabrane tačke ne moraju nužno obezbijediti ravnomjeran raspored u prostoru pretrage, a bolje pokrivanje prostora može se postići primjenom sofisticiranijih pristupa. Jedan od pristupa jeste generalizacija "Latin hypercube", koja se može ilustrovati na sljedeći način. Pretpostavimo da svaki gen ima 5 alela, označenih od 0 do 4. Odaberemo veličinu populacije da bude djeljiva sa brojem 5, recimo m , a aleli u svakoj "koloni" generišemo kao nezavisnu slučajnu kombinaciju ostatka dijeljenja brojeva od 1 do $(m-1)$ sa 5. Tabela 3.1 prikazuje primjer za veličinu populaciju koja sadrži 10 jedinki. Da bismo dobili pokrivenost prostora pretrage na ovom nivou sa nasumičnom inicijalizacijom, bila bi potrebna mnogo veća populacija, u odnosu na upotrebu ovog metoda.

Tabela 3.1. Primjena "Latin hypercube" metode na populaciju koja sadrži 10 jedinki

Jedinka	Geni
1	0 1 3 0 2 4
2	1 4 4 2 3 0
3	0 0 1 2 4 3
4	2 4 0 3 1 4
5	3 3 0 4 4 2
6	4 1 2 4 3 0
7	2 0 1 3 0 1
8	1 3 3 1 2 2
9	4 2 2 1 1 3
10	3 2 4 0 0 1

U situacijama kada se koristi genetički algoritam, inicijalna populacija, tj. skup početnih rješenja, obično se generiše na slučajan način ili prethodno opisanom metodom [52, 53]. Uporedo sa tim, strategija dodavanja poznatih visokokvalitetnih rešenja, u početnu populaciju predstavlja alternativni pristup. Ova strategija podrazumijeva uvođenje rješenja koja su prethodno identifikovana kao visokokvalitetna, bilo putem drugih heurističkih tehnika ili putem drugih izvora. Uključivanje visokokvalitetnih rješenja može imati pozitivan uticaj na performanse genetičkog algoritma. Razlog za to je što algoritam počinje sa rješenjima koja već imaju visok kvalitet, čime se može ubrzati proces pretrage prostora rješenja u odnosu na slučajnu inicijalizaciju. Ipak, važno je napomenuti da postoji i potencijalna negativna strana ove strategije. Dodavanje poznatih rješenja može dovesti do prevremenog konvergiranja genetičkog algoritma. To znači da algoritam može brzo završiti pretragu i konvergirati ka suboptimalnom rješenju, ne istražujući dovoljno cjelokupni prostor pretrage. Dakle, odluka o tome da li se koristiti ova strategija zavisi od specifičnosti problema i ciljeva optimizacije, a balansiranje između prednosti i nedostataka ove prakse ključno je za efikasnost genetičkog algoritma u datom kontekstu [54, 55].

3.3. Kriterijum završetka rada genetičkog algoritma

Za razliku od jednostavnih metoda pretrage okoline, koje se zaustavljaju kada dostignu lokalni optimum, genetički algoritmi su stohastičke metode koje teorijski mogu raditi beskonačno dugo. Međutim, kako bi se postigla praktična primjenljivost, neophodan je kriterijum zaustavljanja. Uobičajni pristupi uključuju postavljanje ograničenja na broj evaluacija prilagođenosti ("fitness" funkcija), vremensko ograničenje na izvršavanje algoritma, ili praćenje raznovrsnosti populacije i zaustavljanje kada opadne ispod predefinisane praga.

Raznovrsnost populacije može se odnositi na raznovrsnost na nivou genotipa, fenotipa ili čak na nivou prilagođenosti jedinki. Najčešći način mjerenja raznovrsnosti je mjerenje kroz statistiku genotipa, gde se analizira distribucija alela na različitim mjestima u genotipu. Na primjer, postavljanje kriterijuma zaustavljanja u kom se algoritam zaustavlja ukoliko procenat zastupljenosti određenog alela pređe 90% na svakoj lokaciji u genotipu, može se koristiti kao mjera održavanja raznovrsnosti. Pravilno postavljen kriterijum zaustavljanja, ključan je dio genetičkog algoritma, jer osigurava da algoritam prekine izvršavanje kada se smatra da je postignuto zadovoljavajuće rješenje ili kada se ostvare druge definisani uslovi. Ovo je važno kako bi se spriječilo nepotrebno produžavanje izvršavanja algoritma i obezbijedilo efikasno traženje optimalnog rješenja [50].

3.4. Uslovi ukrštanja

Sa obzirom na naglasak na rekombinaciji u Hollandovom originalnom radu, zaključak bi bio da je upotreba metode ukrštanja neophodna za efikasno izvršavanje genetičkog algoritma. Međutim, u pojedinim slučajevima nije nužno potrebna. Nadalje, dok bi se mogla pratiti strategija ukrštanja-I-mutacije za generisanje novog potomstva, takođe je moguće koristiti i strategiju ukrštanja-III-mutacije. U literature, postoji mnogo primjera za oba pristupa.

Prva strategija inicijalno pokušava primijeniti ukrštanje, a zatim mutaciju na potomstvu. Moguće je da u nekim slučajevima primjenom ove strategije zapravo ništa ne bude postignuto -

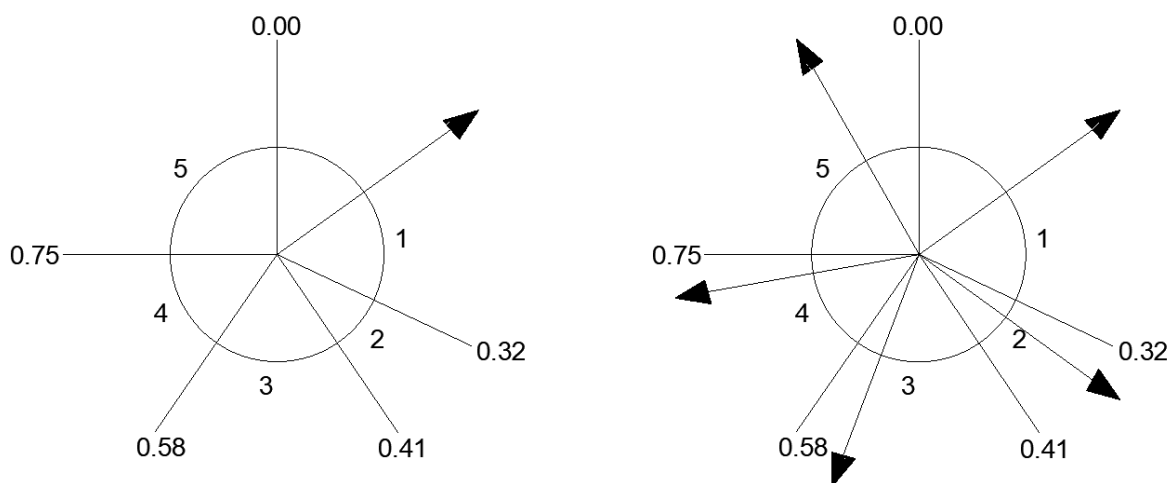
potomstvo je jednostavno klon roditelja. Sa druge strane primjenom druge strategije ukrštanja-ili mutacije, omogućava se ili ukrštanje ili mutacija, ali ne i oboje. Ova strategija dopušta fleksibilnost u izboru da li će se primijeniti ukrštanje ili mutacija, u zavisnosti od različitih faktora. Čak i tada, kloniranje je i dalje moguće korišćenjem operacije ukrštanja, ukoliko su oba roditelji previše slična. Odlučivanje o tome da li će se određena strategija sprovesti, obično se vrši putem pravila zasnovanog na slučajnom odabiru. Ako pseudo-slučajna vrijednost koja se generiše slučajnim odabirom, premaši definisani prag vrijednosti, tada se operacija izvodi. U kontekstu ukrštanja, ovaj prag vrijednosti se često naziva stopom ukrštanja i označena je simbolom λ . Što se tiče mutacije, postoji opcija da se opisuje broj mutacija po stringu ili po bitu. Češći pristup je mutacija po bitu, pri čemu se stopa mutacije obično označava simbolom μ [50].

Pri svakoj iteraciji genetičkog algoritma, za svaku jedinku u populaciji, pseudo-slučajna vrijednost se generiše. Ako ta vrijednost premaši odgovarajući prag (stopu), primenjuje se ili ukrštanje (sa određenom stopom ukrštanja) ili mutacija (sa određenom stopom mutacije). Ova pravila slučajnog odabira dodaju element stohastičnosti genetičkom algoritmu i doprinose raznovrsnosti populacije tokom evolucije. U slučaju ILI pristupa, postoji dodatna mogućnost modifikacije relativnih proporcija između ukrštanja i mutacije, kako pretraga napreduje. Različite stope prikladne su u različitim fazama: visoka stopa ukrštanja na početku, visoka stopa mutacije kako populacija konvergira ka rješenju [41].

3.5. Selekcija

Osnovna ideja selekcije je da treba biti povezana sa prilagođenošću odnosno "fitnes", dok je originalna šema njene implemetacije poznata kao metoda ruleta (eng. *roulette-wheel selection - RWS*). Selekcija se vrši na osnovu raspodjele vjerovatnoće, pri čemu je vjerovatnoća izbora pojedinačnih jedinki proporcionalna njihovoj prilagođenosti.

Slika 3.1 pruža jednostavan primjer selekcije primjenom metode ruleta. Prilagođenost svake jedinke se definiše u opsegu od 0 do 1, gde je 1 rezervisano za najprilagođenije jedinke. Na taj način se stvara "rulet" sa poljima proporcionalnim prilagođenosti.



Slika 3.1. Prikaz operacije selekcije primjenom RWS metode

Pseudo-slučajni brojevi se generišu jedan po jedan i koriste se za odabir stringova koji će postati roditelji. Na primjer, na slici 3.1, broj 0.13 bi odabrao string 1, a broj 0.68 bi odabrao string 4. Ovaj proces omogućava prilagođenijim jedinkama veće šanse za odabir, simulirajući princip "sreće" ili "slučajnosti" u evoluciji. Pretpostavimo da u populaciji postoji 5 stringova (jedinki) sa vrijednostima prilagođenosti ("fitnes" funkcijom) {32, 9, 17, 17, 25}, respektivno. Vjerovatnoća odabira svakog pojedinca je proporcionalna površini sektora ruleta (jedinka sa većom prilagođenošću zauzima veću površinu na ruletu). Na lijevoj strani imamo standardnu selekciju ruletom sa jednim pokazivačem koji se mora okrenuti 5 puta. Ovaj pristup poznat je kao "rulet-selekcija" (eng. *roulette-wheel selection*), odnosno RWS metoda. Na desnoj strani prikazana je "stohastička univerzalna selekcija" (eng. *stochastic universal selection*), odnosno metoda uzorkovanja bez ponavljanja (SUS metoda), koja koristi povezane jednako razmaknute pokazivače. Jedno okretanje obezbjeđuje selekciju za svih 5 jedinki.

Primjena RWS metode pruža efikasan način za selekciju jedinki na osnovu njihove prilagođenosti, s'obzirom na to da bolje prilagođene jedinke imaju veću vjerovatnoću da budu izabrane. Nalaženje odgovarajućeg broja na osnovu unaprijed generisanog pseudoslučajnog broj r , zahtijeva pretragu niza vrijednosti koje okvirno obuhvataju r . Za populaciju veličine M , nalaženje odgovarajućeg broja može biti izvršeno u vremenu $O(\log M)$. Međutim, selekcija primjenom RWS metode, ima visok stepen stohastičke prirode i stvaran broj puta kada se hromozom C izabere u bilo kojoj generaciji može biti vrlo različit od očekivanog. Iz tog razloga, može se koristiti uzorkovanje bez ponavljanja (SUS), kako bi se obezbedilo da se svaka jedinka iz populacije odabere tačno jednom tokom procesa selekcije, dok se djelovi jedinki za dalje genetske operacije poput ukrštanja ili mutacije dodjeljuju pomoću slučajnog uzorkovanja. Ovaj pristup pomaže očuvanju raznovrsnosti u populaciji i doprinosi efikasnosti genetičkog algoritma [57, 58, 59]. Uporedo sa tim, pronalaženje odgovarjuće mjere prilagođenosti za članove populacije predstavlja povezan problem. Samo korišćenje vrijednosti ciljne funkcije $f(x)$ u nekim slučajevima nije dovoljno, jer je važna skala na kojoj se mjeri ciljna funkcija (na primjer, razlika između vrijednosti 10 i 20 mnogo je uočljivija nego između 1010 i 1020). S'toga se obično primjenjuje neki oblik skaliranja prilikom pronalaženja odgovarjuće mjere prilagođenosti [60].

3.6. Ukrštanje

U kontekstu genetičkih algoritama, ukrštanje je proces zamjene određenih gena iz jednog roditelja odgovarajućim genima drugog roditelja u cilju generisanja potomstva. Pretpostavimo da imamo 2 genetska stringa a i b , svaki sastavljen od 6 promjenljivih, odnosno:

$$(a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6) \quad i \quad (b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6)$$

Ukrštanje sa jednom tačkom (jednopoloziciono ukrštanje - $1x$) predhodno je opisano. Ukrštanje sa dvije tačke (dvopoloziciono ukrštanje - $2x$) podrazumijeva nasumičan odabir dva prelomna mjesta (dvije pozicije u nizu) i kombinaciju gena između prelomnih mjesta kod oba roditelja. Prelomna mjesta se biraju nasumično. Ovaj proces generiše dva potomka, kod kojih se kombinuju genetske informacije oba roditelja. Na primjer, ako su prelomna mjesta 2 i 4, rješenja za "potomstvo" bi bila

$$(a_1 a_2 b_3 b_4 a_5 a_6) \quad i \quad (b_1 b_2 a_3 a_4 b_5 b_6)$$

Istraživanja različitih vrsta ukrštanja, imaju za cilj razumijevanje uticaja ovih postupaka na ponašanje genetičkog algoritma. Analizira se uticaj pristrasnosti na operaciju ukrštanja u genetičkom algoritmu. Pristrasnost u ovom kontekstu se odnosi na tendenciju genetičkog algoritma da favorizuje određene vrste informacija ili djelove hromozoma tokom procesa ukrštanja (distributivna pristrasnost), kao i na odabir određenih pozicija u hromozomu kao bitnih za rješenje problema (poziciona pristrasnost). Osnovna svrha je pronaći optimalne strategije ukrštanja koje doprinose poboljšanju rezultata u rješavanju problema. Na osnovu analize različitih tačaka ukrštanja, kroz istraživanja ukazano je da kod klasičnog ukrštanja sa jednom tačkom ne postoji distributivna pristrasnost, jer se tačka ukrštanja bira nasumično. Međutim, ova odsutnost u nekim slučajevima može ograničiti razmjenu informacija između roditelja. Uporedo sa tim, istražene su mogućnosti promjene ovih pristrasnosti, posebno korišćenjem višepozicionog ukrštanja, a dokazi snažno podržavaju sumnju da ukrštanje sa jednom tačkom najčešće nije prikladno za korišćenje.

Još jedna očigledna alternativa, koja eliminiše bilo kakvu pristrasnost, jeste da se postupak ukrštanja učini potpuno nasumičnim. Ovaj vid ukrštanja naziva se uniformno ukrštanje. U implementaciji ovog postupka, operator ukrštanja se predstavlja binarnim nizom ili maskom, gdje svaki bit u maski odgovara određenom genu u hromozomu. Ako je bit postavljen na 1, odgovarajući gen je uzet iz jednog roditelja, a ako je bit postavljen na 0, gen je uzet iz drugog roditelja. Na primjer, maska:

1 1 0 0 1 1

predstavlja dvo-tačkasto uniformno ukrštanje, gde 1 znači da aleli (geni) potiču od prvog roditelja, dok 0 znači da potiču od drugog. Generisanjem obrasca 0 i 1 stohastički (korišćenjem Bernulijeve distribucije), dobija se uniformno ukrštanje (UX), koje može generisati masku poput:

1 0 1 0 0 1

što znači da se aleli 1., 3. i 6. uzimaju od prvog roditelja, dok se ostali uzimaju od drugog. Ovdje Bernulijev parameter p , postavljen je na vrijednost 0.5 i predstavlja vjerovatnoću (između 0 i 1) da se polovina alela uzmu od prvog roditelja, a polovina od drugog. Naravno, ovo nije nužno: UX može se prilagoditi prema jednom od roditelja odabirom odgovarajućeg parametra p [61]. Dakle, kod uniformnog ukrštanja (UX), koji se generiše stohastički, koristeći Bernulijevu distribuciju, količinu razmjene informacija između roditelja tokom operacije ukrštanja možemo prilagoditi biranjem različitih vrijednosti parametra p . Veće vrijednosti parametra p čine da se više alela uzima od prvog roditelja, dok manje vrijednosti p favorizuju alele drugog roditelja. Ova kontrola omogućava prilagodljivost u uticaju ukrštanja na genetički algoritam, u zavisnosti od specifičnosti problema koji se rješava [62].

Naravno, postoje i mnogi praktični faktori koji utiču na implementaciju ukrštanja. Koliko često ga primjenjujemo? Nekada se ukrštanje sprovodi uvijek, dok se nekada koristi stohastički pristup, primjenjujući ukrštanje sa vjerovatnoćom $\lambda < 1$. Parametar λ se postavlja unaprijed i predstavlja vjerovatnoću da će operacija ukrštanja biti primijenjena nad svakim parom roditelja tokom jedne generacije genetičkog algoritma. Ovaj parametar obično ima vrijednost između 0 i 1, gdje vrijednost bliska 1 ukazuje na čestu primjenu ukrštanja, dok vrijednost bliska 0 označava rijetku primjenu. Odluka o primjeni ili ne primjeni ukrštanja za svaki par roditelja vrši se generisanjem slučajnog broja i poređenjem sa λ . Ako generisani slučajni broj bude manji od λ , primenjuje se ukrštanje; u suprotnom, ukrštanje se preskače za dati par roditelja. Zatim, postavlja se pitanje da li treba generisati

jedno ili dva potomstva tokom svake operacije ukrštanja. U nekim slučajevima, par roditelja može proizvesti dva potomka, dok u drugim, može biti relevantno generisati samo jedno potomstvo. Kada biramo samo jedno od dva generisana potomstva, kako to radimo? U skladu sa stohastičkom prirodom genetičkog algoritma, možemo odlučiti da biramo jedno od potomstava nasumično. Druga mogućnost je da donesemo odluku uz pristrasnost, koristeći neko drugo svojstvo, poput prilagođenosti novih jedinki ili gubitka (dobitka) raznovrsnosti koji proizlazi iz odabira jednog umjesto drugog.

Kroz istraživanja, ustanovljena je dobit uvođenja adaptivne stope ukrštanja. Ova stopa mijenja se u skladu sa karakteristikom nazvanom "procentualno uključivanje" (ova karakteristika predstavlja procenat trenutne populacije koja stvara potomstvo). Recimo, ako je "procentualno uključivanje" visoko, to može ukazivati na to da je veći dio populacije aktivan u procesu stvaranja potomstva, pa bi se vjerovatnoća ukrštanja mogla povećati kako bi se očuvala raznovrsnost i izbjegla preuranjena konvergencija. Sa druge strane, ako je "procentualno uključivanje" nisko, možda se želi smanjiti vjerovatnoća ukrštanja kako bismo očuvali raznovrsnost u populaciji. Ovo je jednostavno procenat trenutne populacije koja stvara potomstvo - suviše mala vrijednost povezana je sa gubitkom raznovrsnosti i preuranjenom konvergencijom [63].

3.6.1. Nelinearno ukrštanje

U kontekstu problema kodiranja koji nijesu linearne prirode (geni su organizovani u strukturu koja nije direktno prepoznatljiva kao string bitova ili decimalnih brojeva), ukrštanje (eng. *crossover*) se mora drugačije interpretirati. Jedan od često prisutnih problema javlja se u situaciji gdje je skup mogućih rješenja nekog problema predstavljen permutacijama brojeva od 1 do l . Drugim riječima, svako rješenje u ovom prostoru (prostoru definisanom kao Π_l) predstavlja jedinstveno poređanje brojeve od 1 do l . Ovo je često slučaj kod mnogih problema raspoređivanja, uključujući i poznati problem trgovačkog putnika (TSP). Osnovna postavka TSP je sljedeća: Dat je skup gradova i udaljenosti između svakog grada. Trgovački putnik treba posjetiti svaki grad tačno jednom i vratiti se u početni grad, tako da ukupna dužina pređenog puta bude minimalna.

Na primjeru trgovačkog putnika, jednostavna primjena $1x$ u sljedećem slučaju daje neizvodljivo rješenje:

$$\begin{array}{cc}
 P1: 1\ 6\ 3\ 4\ 5\ 2 & 01: 1\ 6\ 1\ 2\ 6\ 5 \\
 X & \\
 P2: 4\ 3\ 1\ 2\ 6\ 5 & 02: 4\ 3\ 3\ 4\ 5\ 2
 \end{array}$$

Dati primjer predstavlja problem trgovačkog putnika, gdje će prvo potomstvo posjeti gradove 1 i 6 dva puta, a nikada ne stigne do gradova 3 ili 4. Iz toga proizilazi da je potrebno sofisticiranije rješenje, kako bismo adekvatno rješavali ove vrste problema.

Jedna od prvih ideja za rješavanje problema kod kojih prostor rješenja predstavlja permutaciju brojeva, bila je upotreba djelimičnog mapiranog ukrštanja (eng. *partially mapped crossover*), odnosno PMX operatora [64]. Dvije tačke ukrštanja se biraju uniformno nasumično između 1 i l , gdje je l dužina permutacije. Sekcija između ovih tačaka definiše djelove stringa prvog roditelja koji će biti zamijenjeni sa elementima drugog roditeljskog stringa tokom operacije ukrštanja. Dakle, u prethodno navedenom primjeru, PMX bi mogao funkcionisati na sljedeći način:

P1: 1 6 3 4 5 2

01: 3 5 1 2 6 4

X

P2: 4 3 1 2 6 5

02: 2 1 3 4 5 6

Ovdje tačke X i Y određuju koje vrijednosti ili elementi jednog roditeljskog niza zamjenjuju odgovarajuće vrijednosti ili elementi drugog roditeljskog niza.

3 ↔ 1

4 ↔ 2

5 ↔ 6

Zamjena se vrši tako što se blok između tačaka X i Y u jednom roditeljskom nizu zamijeni blokom iz istog segmenta u drugom roditeljskom nizu. Druga mogućnost je primjena binarne maske, kao kod linearnog ukrštanja, ali sa drugačijim značenjem. Takva maska, generisana primjenom uniformnog ukrštanja (UX) mogla bi biti sljedeća:

1 0 1 0 0 1

Sada, ovu masku primenjujemo na dva roditelja. Prva komponenta u maski je 1, pa kopiramo odgovarajuću komponentu iz prvog roditelja u potomak. Zatim, sljedeća komponenta u maski je 0, pa uzimamo komponentu iz drugog roditelja i postavljamo je u potomak prvog roditelja. Ovaj proces se ponavlja redom sve do kraja maske. Dakle, prethodni primjer generiše sljedeće parove stringova:

P1: 1 6 3 4 5 2 → 1 _ 3 _ _ 2 → 01: 1 4 3 6 5 2

P2: 4 3 1 2 6 5 → 4 _ 1 _ _ 5 → 01: 4 6 1 3 2 5

3.7. Mutacija

U slučaju kada se koristi operacija ukrštanje-ILI-mutacija, najprije je potrebno odlučiti da li se vrši operacija mutacije. Pretpostavljajući da se vrši, koncept mutacije je čak i jednostavniji od procesa ukrštanja i opet, može se jednostavno predstaviti kao bitni string. Generiše se maska poput:

1 0 1 0 0 1

koristeći Bernulijevu distribucija za svaki lokus, sa malom vrijednošću p (procentualni broj mutacija u hromozomu), u ovom slučaju. Generisana maska se zatim primjenjuje na roditeljski hromozom. Bitovi u roditeljskom hromozomu gde je maska 1 zadržavaju svoje vrijednosti, dok se vrijednosti bitova gdje je maska 0 mijenjaju (Navedeni primjer bi zatim implicirao da su drugom i šestom genu dodijeljene nove vrijednosti alela). Međutim, postoji nekoliko načina za implementaciju ove jednostavne ideje koji mogu značajno uticati na performanse genetičkog algoritma (GA). Jedna od ideja bila bi generisanje slučajnog broja za svaki gen u nizu i upoređivanje sa vrijednošću μ . Međutim ovaj pristup može biti potencijalno neisplativ u smislu računanja, u slučaju dugih stringova i velike populacije.

Umjesto da se za svaki gen u hromozomu generiše zasebni slučajni broj i poredi sa vrijednošću μ (kako je prethodno opisano), efikasnija alternativa je generisanje slučajne varijable m iz Poasonove distribucije sa parametrom λ , gde je λ prosječan broj mutacija po hromozomu. Drugim riječima ako

se sa λ označi prosječna stopa mutacije po hromozomu, Poasonova distribucija daje vjerovatnoću da će se tačno m mutacija desiti u hromozomu. Nakon što se ustanovi da ima (na primjer) m mutacija, generiše se m slučajnih brojeva (bez ponavljanja) koji su ravnomjerno raspoređeni između 1 i l , kako bi odredili lokuse na kojima će se vršiti mutacija. Ovo omogućava precizno određivanje pozicija u hromozomu, na kojoj će se izvršiti operacija mutacije. U slučaju binarnih nizova, mutacija jednostavno znači komplementiranje odabranih bitova. Međutim, ukoliko postoji nekoliko mogućih vrijednosti alela za svaki gen, pri odluci da se promijeni određeni alel, potrebno je obezbijediti neki način odlučivanja o njegovoj novoj vrijednosti. Ukoliko svaki gen ima nekoliko mogućih vrijednosti (na primjer, gen može biti A, B, C ili D), mutacija znači odabir jedne od tih vrijednosti. Ovdje je ključno pitanje kako odabrati novu vrijednost za gen. Jedan od načina je nasumičan izbor, što znači da bi se moglo nasumično izabrati nova vrijednost iz svih mogućih vrijednosti za taj gen. Međutim, u nekim slučajevima postoji određeni redosljed između ovih vrijednosti. Na primjer, može postojati situacija gdje su vrijednosti A, B, C i D poređane po nekom redosljedu. U takvim slučajevima, umjesto potpuno nasumičnog izbora, može se razmotriti prilagođavanje izbora tako da nove vrijednosti budu bliske trenutnoj vrijednosti gena. Ovo može poboljšati performanse genetičkog algoritma u nekim problemima, posebno ako postoji neka vrsta redosljeda ili strukture među mogućim vrijednostima gena [65, 66, 67].

3.8. Nova populacija

Originalni genetički algoritam Holanda podrazumijevao je rad sa populacijom jedinki gdje se procesi selekcije, rekombinacije i mutacije primjenjuju na populaciju od M hromozoma u cilju generisanja novog skupa od M jedinki. Taj skup postao bi nova populacija. Sa gledišta optimizacije, nekada nije isplativo - možda se ulaže značajan napor u cilju pronalaženja dobrog rješenja, samo da bi se suočili sa rizikom da ga odbacimo i time spriječimo da učestvuje u daljem reprodukcivanju. Iz tog razloga uvode se novi pojmovi etilizma i preklapanja populacija. Elitistička strategija osigurava opstanak dosad najbolje jedinke tako što je čuva i zamjenjuje samo preostalih $(M - 1)$ članova populacije novim nizovima. Preklapanje populacije ide korak dalje, zadržavajući dio postojeće populacije prilikom stvaranja nove generacije. Ova praksa može pomoći u očuvanju raznovrsnosti i sprječavanju gubitka dobrih rješenja.

Na kraju, dolazi se do tzv. postupnih ili inkrementalnih strategija, u kojima se generiše samo jedan novi hromozom (ili ponekad par) u svakom koraku. Ovakav pristup omogućava pažljivo razmatranje svake novonastale jedinke prije nego što se uključi u populaciju, čime se smanjuje rizik od gubitaka korisnih rješenja.

Često se koriste nešto drugačije strategije kod evolutivnih strategija (ES), koje se označavaju kao (λ, μ) , ili kao $(\lambda + \mu)$ [68]. U prvom slučaju, potomstvo se generiše od roditelja, a zatim se najbolji od tog potomstva bira da započne narednu generaciju. Sa druge strane, strategija $(\lambda + \mu)$ uključuje generisanje potomstva, a najbolji pojedinci biraju se iz ukupnog skupa koji čine roditelji i potomstvo zajedno. Ove dvije strategije razlikuju se u načinu odabira najboljih jedinki za formiranje sljedeće generacije.

3.9. Održavanje raznovrsnosti

Jedan od ključnih elemenata za postizanje visokih performansi u genetičkim algoritmima je održavanje raznovrsnosti u populaciji. Selekcija, koja je prvi i osnovni korak u genetičkim algoritmima, može smanjiti raznovrsnost populacije. Kako bi se ovo ublažilo, često se koriste veće populacije, veće stope mutacije ili druge tehnike koje podržavaju očuvanje genetske raznovrsnosti. Očuvanje raznovrsnosti ključno je za sprječavanje gubitka potencijalno korisnih genetskih informacija i pomaže algoritmu da istražuje šire područje prostora rješenja.

Popularan pristup u održavanju raznovrsnosti u genetičkom algoritmu, jeste korišćenje strategije bez duplikata (eng. *no-duplicates*). Ovo znači da potomci nijesu dozvoljeni u populaciji ako su samo klonovi postojećih jedinki. Nedostatak ove strategije jeste potreba za poređenjem svake trenutne jedinke sa novim kandidatom, čime se dodatno komplikuju računarski zahtjevi, naročito kod velikih populacija [69]. Moguće je preduzeti određene strategije kako bi se umanjila šansa za kloniranje prije generisanja potomstva. Na primjer, kod $1x$, gdje su data dva stringa:

1 1 0 1 0 0 1

1 1 0 0 0 1 0

prije primjene ukrštanja, roditelji se analiziraju, kako bi se pronašle odgovarajuće tačke ukrštanja, a ovaj postupak podrazumijeva izračunavanje "ekskluzivne-OR" (XOR) operacije između gena roditelja. XOR operacija stvara novi string u kojem su jedinice postavljene na pozicije gdje se geni roditelja razlikuju. Dobijeni string predstavlja redukovani zamjenski string, a samo pozicije na kojima se nalazi vrijednost 1 u redukovanom zamjenskom stringu smatraju se odgovarajućim tačkama ukrštanja.

0 0 0 1 0 1 1

Dakle u navedenom primjeru pozicije 4, 6, i 7 se mogu smatrati odgovarajućim tačkama ukrštanja [51].

3.10. Reprezentacija

Genetički algoritam često se može koristiti u cilju optimizacije različitih problema primjenom odgovarajućeg načina kodiranja i funkcije prilagođenosti. U ovom dijelu istraženo je kako se prostor pretrage, odnosno skup mogućih rješenja, može konstruisati u nekim opštim slučajevima. Kada se koristi genetički algoritam (GA) za rješavanje problema, ključno je odabrati odgovarajući prostor pretrage koji odražava prirodu problema. Način na koji se prostor pretrage konstruiše može zavisi od vrste problema, tipa podataka koji se obrađuje i drugih karakteristika problema koje utiču na izbor reprezentacije jedinki u populaciji genetičkog algoritma, odnosno načina predstavljanja potencijalnih rješenja problema unutar genetske populacije.

3.10.1. Binarni problemi

U nekim situacijama, binarno kodiranje može se prirodno javiti kao odgovarajući način predstavljanja informacija u okviru genetičkog algoritma.

Primjer 3.1 (Problem “ranca” 0–1). Skup od n stavki dostupan je za pakovanje u ranac kapaciteta C jedinica. Stavka i koja treba biti spakovana, ima vrijednost V_i i koristi C_i jedinicu kapaciteta ranca. Cilj je odabrati podskup stavki (označen sa I) tako da se maksimizuje ukupna vrijednost stavki u skladu sa kapacitetom ranca.

Problem ranca može biti definisan kao:

$$\sum_{i \in I} V_i \quad (3.8)$$

tako da je:

$$\sum_{i \in I} C_i < C \quad (3.10)$$

Ukoliko se definiše:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko je } i - \text{ti element spakovan u rancu} \\ 0, & \text{ukoliko } i - \text{ti element nije spakovan u rancu} \end{cases} \quad (3.11)$$

postaje jasno da rješenje problema možemo definisati kao binarni niz dužine n , gdje svaki element niza određuje da li je određena stavka uključena u ranac ili ne. U ovom slučaju, ne postoji razlika između genotipa (binarnog niza), i fenotipa (konkretnog rješenja problema).

Ovi problemi koji uključuju ograničenja nijesu jednostavni za rješavanje upotrebom genetičkog algoritma (GA). Kod nekih problema, kao što je problem ruksaka (eng. *0-1 knapsack problem*), gdje je broj predmeta koji se pakuje u ruksak ograničen kapacitetom ruksaka, prisustvo ograničenja može izazvati poteškoće, ukoliko se rješava korišćenjem genetičkog algoritma (GA). Iako se predmeti mogu binarno kodirati (u zavisnosti od toga da li je predmet uključen ili nije), stvaranje potomstva od dva roditelja može biti izazov, osim ako se ne konstruišu posebni operatori ukrštanja. Zapravo ovakvi problemi, uprkos privlačnosti binarnog kodiranja, često se bolje rješavaju drugim metodama, posebno kada postoje specifična ograničenja koja se moraju zadovoljiti [70]. Genetički algoritam, iako moćan alat za mnoge probleme optimizacije, može se suočiti sa određenim izazovima pri radu sa određenim vrstama problema, a jedan od tih izazova je upravo vezan za probleme sa ograničenjima.

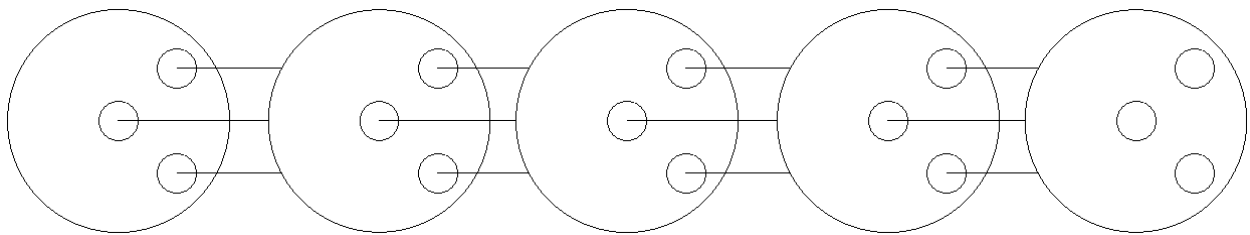
3.10.2. Diskretni (ne binarni) problemi

U nekim slučajevima, diskretni problemi zahtijevaju korišćenje alfabeta čije različite vrijednosti, odnosno broj stanja može biti veći od 2. U binarnom kodiranju postoje dva moguća stanja (0 ili 1) za svaki bit. U nekim problemima, koji ne obuhvataju binarno kodiranje, svaki element može imati više od dva moguća stanja. Ova situacija često nastaje kada rješavamo probleme gdje elementi

nisu binarni, već pripadaju diskretnom skupu vrijednosti. Jedan od primjera za to jeste primjer sklapanja rotora [71].

U kontekstu problema sa rotorima, svaki rotor može biti postavljen u određeni položaj, što predstavlja diskretnu vrijednost. Kardinalnost alfabeta je u ovom slučaju broj različitih orijentacija ili položaja koje rotor može zauzeti. Ovaj pristup omogućava modelovanje problema gdje diskretni elementi imaju više od dva moguća stanja.

Primjer 3.2: Neka je dat skup od n rotora, pri čemu svaki rotor ima k broj otvora. U problemu sastavljanja rotora, isti se moraju postaviti u jednu jedinicu tako da budu složeni i pričvršćeni jedan na drugi, kako je prikazano slikom 3.2.



Slika 3.2. Prikaz problema sklapanja rotora

Sa obzirom na to da rotori nijesu potpuno ravni, postavljanje u različite orijentacije daće sklopove sa različitim karakteristikama odstupanja od stvarne simetrije. Ovo odstupanje ima efekat ljuljanja postavljene jedinice, dok se okreće. Cilj problema je pronaći kombinaciju orijentacija rotora koja proizvodi najmanje odstupanje od stvarne simetrije. Ovo se obično postiže analizom različitih kombinacija orijentacija rotora, kako bi se identifikovala ona koja minimizuje ukupno odstupanje. Genetički algoritmi se mogu koristiti za pretragu prostora mogućih kombinacija orijentacija, pri čemu se prilagođenost svake jedinice ocjenjuje na osnovu stepena odstupanja od simetrije i sličnih kriterijuma. Broj stanja u ovom slučaju obuhvata broj različitih orijentacija ili položaja koje rotor može zauzeti i veći je od 2. Kod ovakvih problema, prirodno je koristiti takozvano “k-ary” kodiranje. Rješenje se predstavlja nizom dužine n , gdje svaki gen odgovara datom rotoru, a aleli, izvučeni iz skupa $\{1, \dots, k\}$, predstavljaju orijentaciju otvora. Na primjer, string (1322) predstavlja rješenje problema sa 4 rotora, gde je otvor 1 prvog rotora poravnat sa otvorom 3 drugog rotora, otvor 2 trećeg rotora i četvrtog rotora. Dodjela oznaka otvorima rotora je proizvoljna, što dovodi do problema suprotstavljenih konvencija (eng. *competing conventions*). Na primjer, uz prirodan redosljed označavanja svakog rotora, string (3211) predstavlja isto rješenje kao i string (1322). Ovaj problem može se ublažiti, u ovom slučaju fiksiranjem oznake za jedan rotor, tako da se rješenje može kodirati nizom dužine $(n - 1)$. Ovim se postiže jednostavnija reprezentacija rješenja.

3.10.3. Problemi permutacije

U nekim problemima reprezentacija pojedinca (načina predstavljanja potencijalnih rješenja problema) nije nad skupom vrijednosti, već nad permutacijom tih vrijednosti. Drugim riječima, svaka jedinka u populaciji nije direktno predstavljena kao skup vrijednosti, već kao permutacija tih vrijednosti. TSP (problem trgovačkog putnika) je jedan od takvih problema. Kao dodatni primjer,

uzmimo problem permutacionog “flowshop” sekvenciranja (eng. *permutation flowshop sequencing problem*), često označavanog kao PFSP [72].

U problemu permutacionog “flowshop” sekvenciranja, svaka jedinka može biti predstavljena kao permutacija redosljeda zadataka koji se obrađuju na različitim mašinama. Svaki element permutacije može odgovarati jednom od zadataka, a redosljed elemenata u permutaciji određuje redosljed izvršavanja tih zadataka na mašinama.

Primjer 3.3: Pretpostavlja se da postoji n broj poslova koje treba obraditi na m broju mašina, gdje je vrijeme obrade za posao i na mašini j dato sa $p(i, j)$.

Određivanje ukupnog vremena $C(\pi_i, j)$ za koje će svaki od definisanih $\{\pi_1, \pi_2, \dots \dots \dots \pi_n\}$ poslova biti završen, imajući u vidu odabranu permutaciju, odnosno odabrani redosljed završavanja poslova dat je kao:

$$C(\pi_1, 1) = p(\pi_1, 1) \quad (3.12)$$

$$C(\pi_i, 1) = p(\pi_{i-1}, 1) + p(\pi_i, 1) \text{ za } i = 2, \dots \dots n \quad (3.13)$$

$$C(\pi_1, j) = p(\pi_1, j - 1) + p(\pi_1, j) \text{ za } j = 2, \dots \dots m \quad (3.14)$$

$$C(\pi_i, j) = \max\{C(\pi_{i-1}, j), C(\pi_i, j - 1)\} + p(\pi_i, j) \quad (3.15)$$

za vrijednosti $i = 2, \dots \dots, n$; $j = 2, \dots \dots, m$.

PSFP problem se svodi na pronalaženje permutacije π^* , u skupu svih permutacija Π poslova tako da se optimizuje određena mjera performansi:

$$f(\pi^*) \leq f(\pi), \forall \pi \in \Pi \quad (3.16)$$

Ove mjere mogu uključivati maksimalno ili prosječno vrijeme završetka poslova. Ovdje prirodno kodiranje jednostavno predstavlja permutaciju redosljeda poslova u cilju izračunavanja vremena njihovog završetka. Na primjer, rješenje (1462537) znači da je posao 1 prvi na svakoj mašini, zatim slijedi posao 4, pa posao 6, i td. Svaki broj u permutaciji označava jedinstveni posao, a redosljed tih brojeva određuje raspored poslova na mašinama. Ovakvo kodiranje omogućava reprezentaciju rasporeda poslova u problemu PFSP. Kada se koriste standardni operatori ukrštanja, poput jednostrukog tačkastog ukrštanja ili uniformnog ukrštanja, koji su često zasnovani na kombinaciji gena roditelja, dolazi do toga da redosljed elemenata, odnosno permutacija, nije očuvan na zadovoljavajući način [73]. Odnosno, kod standardnih operatora ukrštanja često se gubi karakteristika permutacije koja je bitna u problemima kao što je problem “flowshop” sekvenciranja poslova (PFSP).

3.11. Generisanje slučajnih brojeva

Budući da su GA stohastičke prirode, jasno je da je pouzdan izvor slučajnih brojeva veoma važan. Većina računarskih sistema ima ugrađene funkcije poput rand(), koje se obično koriste za generisanje slučajnih brojeva [74]. Međutim, važno je napomenuti da nisu svi generatori slučajnih brojeva pouzdani, pa je preporučljivo koristiti one koji su temeljno testirani

GLAVA 4

PRIMJENA GENETIČKOG ALGORITMA ZA OPTIMIZACIJU ENERGETSKOG MENADŽMENTA MIKROMREŽE

Razvoj elektroenergetskih sistema, uključujući integraciju energije vjetra i solarne energije, doveo je do povećanja kompleksnosti originalne topologije elektroenergetskih mreža. Mikromreže koje kombinuju distribuirane izvore energije, sisteme za skladištenje energije i sisteme za upravljanje opterećenjem, ističu se svojom fleksibilnošću, omogućavajući međusobno povezivanje, integraciju sa postojećom elektroenergetskom mrežom, kao i nezavisno djelovanje [75].

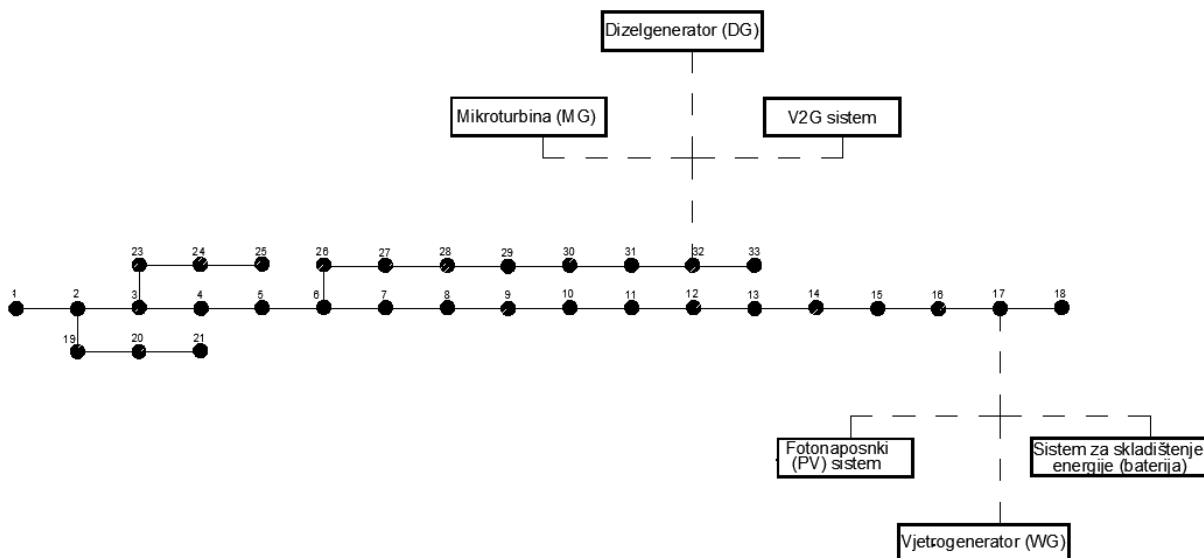
Ovo poglavlje bavi se analizom optimalnog energetskog menadžmenta u mrežno povezanoj mikromreži. Cilj je smanjenje gubitaka aktivne i reaktivne snage, kao i devijacije napona, kroz optimizaciju proizvodnje električne energije, uzimajući u obzir dostupne resurse i ekonomske faktore. Izvršena je analiza različitih scenarija, uključujući prisustvo ili odsustvo tradicionalnih izvora električne energije, kao i varijacije u prisustvu ili odsustvu obnovljivih izvora električne energije. Pored toga, obuhvaćena je simulacija različitih vremenskih uslova u kojima obnovljivi izvori energije rade sa smanjenim kapacitetom, pružajući optimizaciju mikromreže i u takvim uslovima. Za postizanje ovih ciljeva primijenjen je genetički algoritam. Genetički algoritam se koristi za definisanje optimalne proizvodnje električne energije aktivnih resursa unutar mikromreže, sa ciljem minimizacije devijacije napona i gubitaka u sistemu. Ovaj pristup omogućava pažljivo prilagođavanje proizvodnje aktivne snage svakog od resursa mikromreže, kako bi se postigla energetska efikasnost, stabilnost napona i ekonomska isplativost.

Nakon određivanja optimalne proizvodnje aktivne snage za svaki element mikromreže, u situaciji njenog potpunog angažmana, sprovedena je i analiza različitih scenarija, uključujući varijacije u odsustvu pojedinih resursa mikromreže. Cilj ove analize jeste optimizacija proizvodnje dostupnih resursa unutar mikromreže, u različitim uslovima. Takođe, obuhvaćena je simulacija promjenljivih vremenskih uslova, uključujući varijacije u temperaturi, radijaciji zračenja i brzini vjetra, kako bi se utvrdilo kako različiti faktori utiču na efikasnost i ekonomsku isplativost mikromreže u različitim situacijama.

4.1. Struktura korišćene mikromreže

Za prikaz tradicionalnog elektroenergetskog sistema, na koji se povezuje mikromreža, korišćen je testni 33-čvorni elektroenergetski sistem opisan u Poglavlju 2. Arhitektura proučavane mikromreže integrisana je u ovaj testni sistem, što je prikazano na slici 4.1. Čvorovi 17 i 32 predstavljaju osjetljive tačke sistema, na kojima su resursi mikromreže povezani. Uporedo sa tim, ova

čvorna mjesta imaju mikroizvore energije, uključujući fotonaponski panel (PV), vjetrogenerator (WT), mikroturbinu (MT), dizel generator (DG), sistem za skladištenje energije, kao i V2G (eng. *vehicle to grid*) sistem.



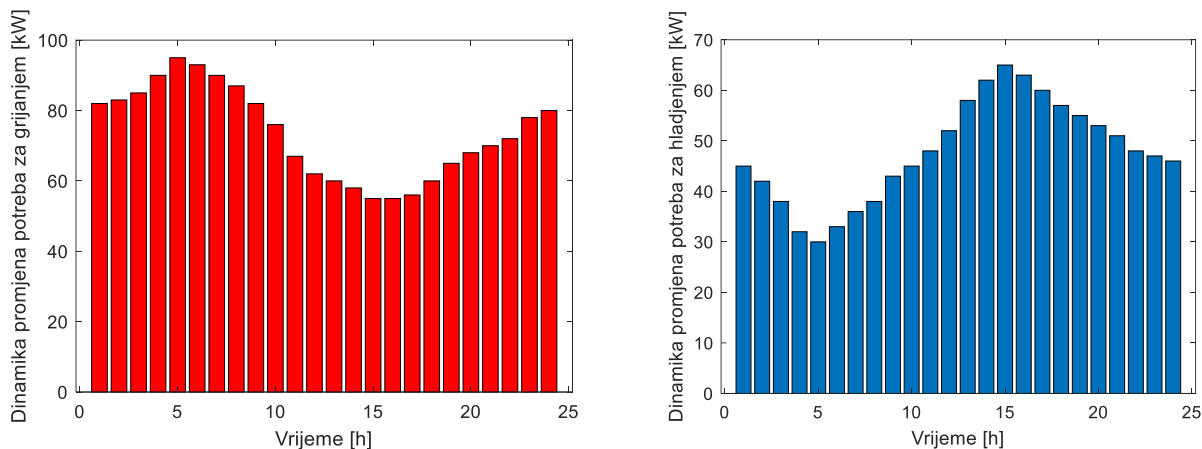
Slika 4.1. Arhitektura mikromreže implementirane u 33-čvorni testni sistem

Gorivo je potrebno samo za rad DG i MT, s'obzirom na to da WT i PV predstavljaju obnovljive izvore energije i koriste energiju vjeta i sunčevu svjetlost za proizvodnju električne energije. Da bi zadovoljila potražnja za električnom energijom, mikromreža može proizvoditi električnu energiju direktno putem PV, WT, DG, MT ili sistema za skladištenje energije. Dizel gorivo koristi se za rad DG, dok se prirodni gas koristi za rad MT. Svaka komponenta mikromrežnog sistema modelovana je odvojeno, uzimajući u obzir njene karakteristike i ograničenja. Podaci o karakteristikama nekih od resursa, poput vjetrogeneratora i dizel generatora, dostupni su od strane proizvođača.

4.2. Analiza opterećenja 33-čvornog sistema

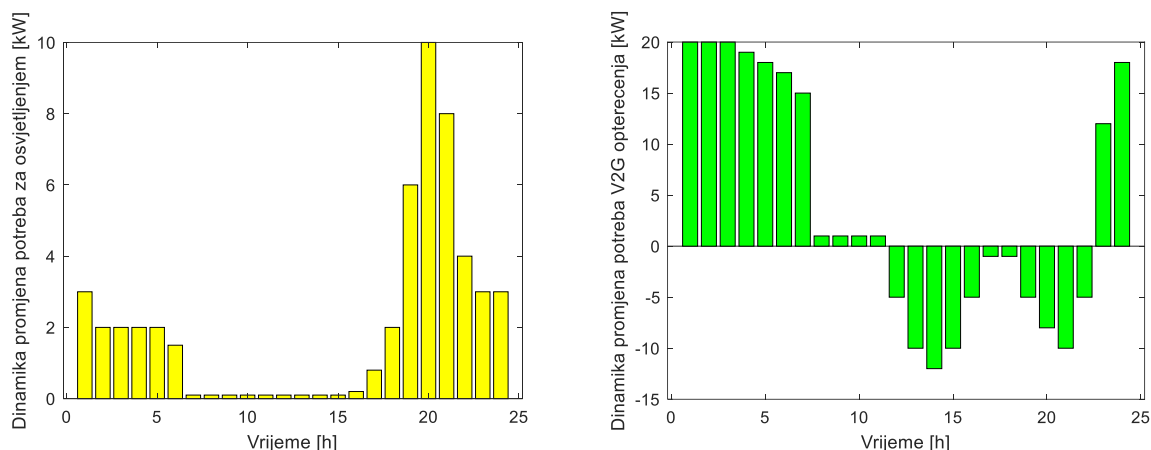
U ovom dijelu, data je dinamika opterećenja unutar sistema, koja se sastoji od varijabilnih faktora, kao što su potrebe za grijanjem, hlađenjem, osvjetljenjem, kao i integrisanim V2G sistemom. Fokus je stavljen na detaljnom razumijevanju fluktuacija opterećenja tokom različitih perioda dana i analizi uticaja ovih faktora na efikasnost i performanse mikromreže unutar testnog 33-čvornog sistema. Prvi aspekt analize obuhvata potrebu za održavanjem, odnosno regulacijom temperature, bilo u stambenim ili industrijskim jedinicama, ili tokom termičkih procesa. Ovi zahtjevi rezultiraju potrebom za dodatnom toplotnom energijom putem sistema za grijanje. Važno je naglasiti da se ove potrebe mijenjaju tokom dana, zahtijevajući prilagodljivost mikromreže u snabdijevanju električnom energijom.

Lijevi grafik na slici 4.2. prikazuje dinamiku promjena termičkih potreba potrošača tokom jednog dana, pružajući uvid u to kako se ove potrebe mijenjaju u različitim vremenskim periodima. Drugi aspekt analize obuhvata potrebu za električnom energijom u cilju hlađenja stambenih ili industrijskih jedinica. Desni grafik na slici 4.2. vizualizuje dinamičnost promjena ovih potreba tokom jednog dana.



Slika 4.2. Dinamika promjena zahtjeva potrošača za grijanjem/hlađenjem

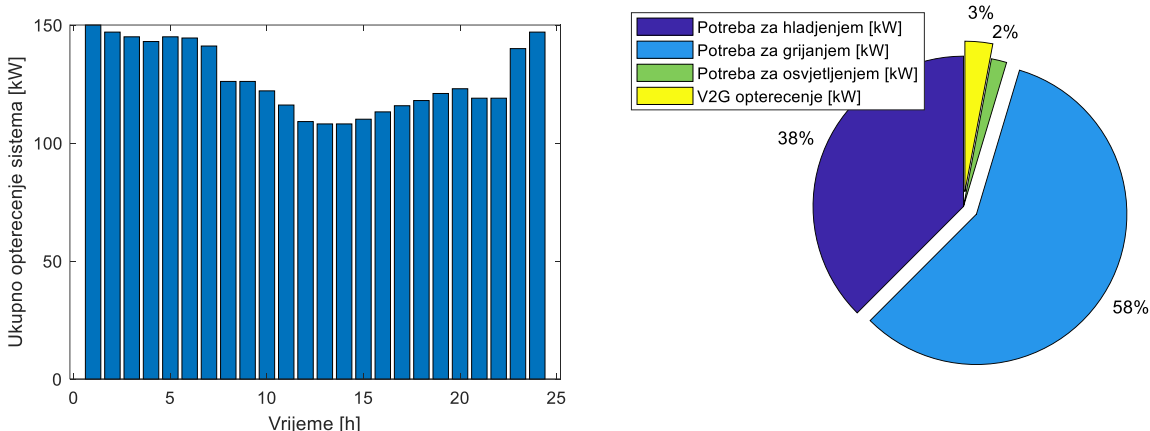
Treći aspekt analize obuhvata potrebe za električnom energijom povezane sa osvjetljenjem stambenih i industrijskih jedinica. Lijevi grafik na slici 4.3. prikazuje promjene zahtjeva za ovim potrebama tokom različitih djelova dana. Na kraju, implementacija V2G sistema uvodi dodatne dinamičke faktore, što zahtijeva analizu doprinosa ovog sistema na cjelokupno opterećenje elektroenergetskog sistema. Na desnom grafiku prikazanom na slici 4.3, ilustrovano je ponašanje ovih sistema tokom različitih djelova dana.



Slika 4.3. Dinamika promjena zahtjeva za osvjetljenjem i V2G sistemom

U određenim periodima (00h-11h; 22h-24h), V2G sistemi funkcionišu kao potrošači električne energije, koristeći energiju iz elektroenergetske mreže. Međutim, u ostalim vremenskim intervalima (11h-22h), oni skladištenu električnu energiju vraćaju nazad u elektroenergetsku mrežu, pružajući dinamičan odgovor na promjenljive energetske potrebe. Opterećenje sistema, koje obuhvata potrebe za grijanjem, hlađenjem, osvjetljenjem i V2G sistemom, igra ključnu ulogu u utvrđivanju stabilnosti i efikasnosti elektroenergetskog sistema. Dinamika opterećenja i njegova raspodjela tokom vremena direktno utiče na performanse sistema. Lijevi dijagram (Slika 4.4), daje prikaz ukupnog opterećenja elektroenergetskog sistema. Prikaz obuhvata ukupne zahtjeve opterećenja tokom jednog dana. Desni dijagram (Slika 4.4), prikazuje procentualni udio svakog pojedinačnog opterećenja u ukupnoj potrošnji električne energije. Ovaj pristup daje detaljnu analizu i pruža identifikaciju ključnih faktora koji utiču na stabilnost i efikasnost elektroenergetskog sistema. Uporedo sa tim, omogućava se

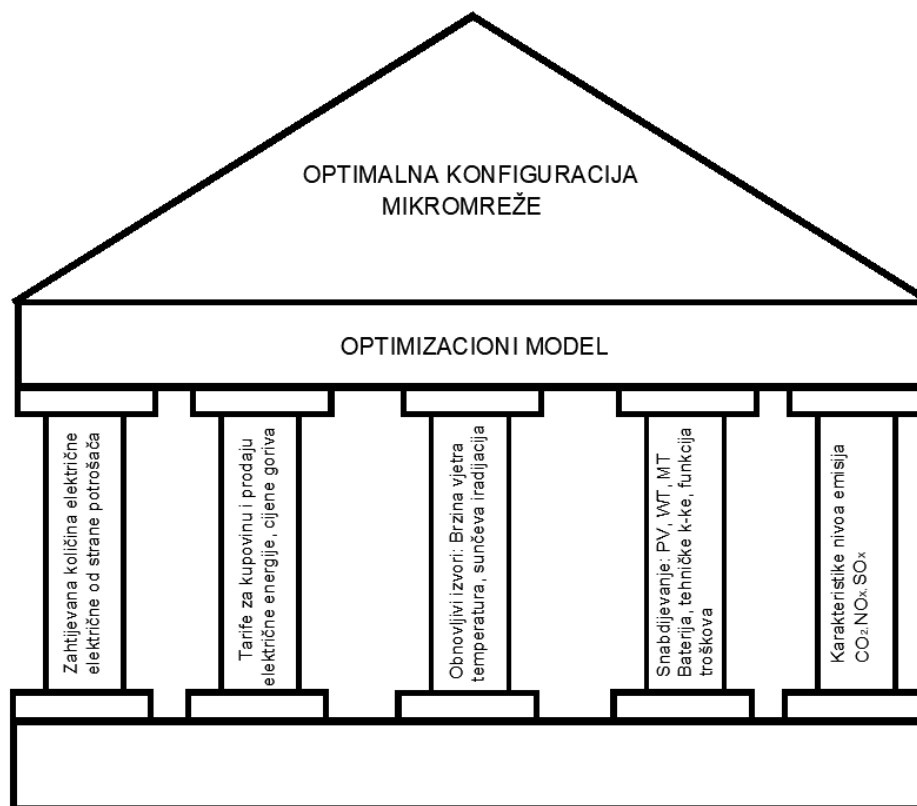
konfiguracija mikromreže kako bi se optimalno zadovoljile potrebe opterećenja za električnom energijom.



Slika 4.4. Prikaz ukupnog opterećenja i procentualni prikaz udjela pojedinačnog na ukupno opterećenje

4.3. Optimizacioni model

Model optimizacije proizvodnje aktivne snage pojedinačnih elemenata mikromreže, uz istovremenu minimizaciju cijene troškova angažmana istih, formulisan je sa ciljem postizanja optimalne konfiguracije mikromreže, uzimajući u obzir niz faktora koji uključuju tehničke performanse resursa, dostupne energetske resurse, karakteristike opterećenja, dnevne tarife za nabavku i distribuciju električne energije, operativne troškove i troškove održavanje.



Slika 4.5. Optimizacioni model mikromreže

Slika 4.5. ilustruje ovaj model, a njegovi ulazi obuhvataju potražnju snage, podatke o dostupnim energetske resursima poput brzine vjetrova, temperature i solarnog zračenja, cijene goriva za distribuirane generatore i cijene prirodnog gasa, kao i dnevne tarife za kupovinu i prodaju električne energije [76]. Uporedo sa tim uključene su i tehničke karakteristike resursa mikromreže koje uključuju maksimalnu snagu za fotonaponske panele, karakterističnu krivu snage za vjetrogeneratore, kao i karakteristike potrošnje goriva za tradicionalne izvore energije.

4.4. Funkcija cilja u optimizacionom modelu

Razmatranjem ekonomske isplativosti u kontekstu izvora energije, elektroenergetske mreže, opterećenja i sistema za skladištenje energije, uspostavljen je međusobni model saradnje između njih. Osnovni cilj ovog modela jeste minimizacija operativnih troškova mikromreže, obuhvatajući varijabilne faktore, kao što su proizvodnja energije putem obnovljivih izvora energije, sistema za skladištenje energije, kao i promjene u opterećenju u toku jednog dana. U cilju minimizacije cijene troškova angažmana resursa mikromreže, uz istovremeno osiguranje efikasnog i pouzdanog snabdijevanja električnom energijom, prvi korak je utvrđivanje cijene operativnih troškova mikromreže. U tom kontekstu, potrebno je detaljno analizirati cijenu angažmana svakog od pojedinih resursa mikromreže.

4.4.1. Cijena angažmana vjetrogeneratora

Angažman vjetrogeneratora ključan je aspekt u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Efikasnost rada vjetrogeneratora u proizvodnji električne energije uslovljena je vremenskim uslovima. Trošak angažmana vjetrogeneratora određen je brzinom vjetrova, gdje se cijena angažmana istog može prilagoditi u zavisnosti od različitih raspona brzine vjetrova [77].

Proizvedena aktivna snaga vjetrogeneratora data je kao:

$$P_{wt}(v) = \begin{cases} 0, & \text{za } 4 < v < 8 \\ P_r * (0.2 + 0.2 * v + 0.003 * v^2), & \text{za } 8 < v < 12 \\ P_r, & \text{za } 12 < v < 14 \end{cases} \quad (4.1)$$

gdje P_r predstavlja referentnu snagu vjetrogeneratora i zavisi od tehničkih karakteristika vjetrogeneratora i uslova okoline, dok v predstavlja brzinu vjetrova u određenim vremenskim intervalima. Sada se cijena angažmana vjetrogeneratora može definisati kao:

$$C_{wt}(P_{wt}) = 85 + 1.05 * P_{wt} \quad (4.2)$$

gdje je C_{wt} ukupna cijena troškova angažmana vjetrogeneratora, dok je P_{wt} snaga proizvedena od strane vjetrogeneratora prema prethodnoj definisanoj formuli. Izrazom (4.2) omogućava se proračun ukupne cijene angažmana vjetrogeneratora, uzimajući u obzir dinamiku njegove proizvodnje električne energije u različitim uslovima brzine vjetrova.

4.4.2. Cijena angažmana solarnog panela

Angažman solarnih panela značajno utiče na ukupnu proizvodnju električne energije u mikromreži. U tom kontekstu, određivanje cijene angažmana solarnog panela u okviru mikromreže predstavlja ključni faktor za određivanje i minimizaciju troškova operativnog rada mikromreže [78, 79]. U cilju definisanja funkcije troškova angažmana solarnog panela, potrebno je krenuti od izraza za proizvodnju aktivne snage od strane solarnog panela u određenom trenutku, datog kao:

$$P_{PV}(t) = \left[P_{PV,STC} * \frac{G_T(t)}{1000} * [1 - \gamma * (T_j - 25)] \right] * N_{PVs} * N_{PVp} \quad (4.3)$$

$P_{PV,STC}$ predstavlja maksimalnu izlaznu snagu solarnog panela, odnosno maksimalnu izlaznu električnu energiju pri optimalnim uslovima i data je tehničkim karakteristikama panela. Insolacija ($G_T(t)$) označava sunčevu radijaciju, čija vrijednost varira tokom dana i utiče na proizvodnju električne energije. U izrazu 4.3, dalje N_{PVs} i N_{PVp} predstavljaju broj redno, odnosno paralelno povezanih solarnih jedinica, dok (γ) predstavlja koeficijent temperaturne zavisnosti. Temperatura ćelije solarnog panela (T_j) data je izrazom:

$$T_j = T_{amp} + \frac{G_T}{G_{T,STC}} * (NOCT - 20) \quad (4.4)$$

gdje T_{amp} predstavlja temperaturu okoline, G_T trenutnu vrijednost insolacije, $G_{T,STC}$ vrijednost insolacije u standardnim uslovima testiranja, iznosi $1000 \frac{W}{m^2}$ i koristi se kao referentna vrijednost za mjerenje performansi solarnih panela. NOCT (eng. *normal operating cell temperature*) se odnosi na predviđenu temperaturu ćelije solarnog panela tokom njegovog normalnog rada u stvarnom okruženju.

Sada se cijena angažmana rada solarnog panela definiše kao:

$$C_{PV} = 29.55 + 1.15 * P_{PV} \quad (4.5)$$

gdje je P_{PV} proizvodnja aktivne snage solarnog panela u određenom trenutku. Cijena angažmana solarnog panela (C_{PV}) prilagođava se dinamički, u skladu sa fluktuacijama proizvodnje električne energije. Ovaj prilagodljivi pristup omogućava optimizaciju troškova rada mikromreže, uzimajući u obzir stvarne uslove rada solarnog panela.

4.4.3. Cijena angažmana dizel generatora

Cijena angažmana dizel generatora može varirati u zavisnosti od uslova rada samog generatora, a ove promjene imaju direktan uticaj na ukupne ekonomske performanse mikromreže. Dinamički faktor cijene angažmana dizel generatora u određenom trenutku t , definisan kao $CF_{Dg,t}^{EMI}$, utvrđuje se na osnovu cijene troškova emisija gasova, uključujući ugljen-dioksid (CO_2), sumpor-dioksid (SO_2) i azot-oksidi, odnosno plin (NO_x). Ovi gasovi nastaju sagorijevanjem fosilnih goriva, tokom rada dizel generatora [80].

Matematički izraz za računanje ovog faktora dat je kao:

$$CF_{Dg,t}^{EMI} = (C_{CO_2} * CO_2 + C_{SO_2} * SO_2 + C_{NO_x} * NO_{x_{dg}}) * P_{dg} \quad (4.6)$$

gdje su $C_{CO_2} = 1.24$, $C_{SO_2} = 2.41$, i $C_{NO_x} = 1.28$, cijene troškova emisije ugljen-dioksida, sumpor-dioksida i azot-oksida po jedinici proizvedene energije, respektivno, dok P_{dg} predstavlja proizvedenu aktivnu snagu tokom anagažmana dizelgeneratora.

U procesu optimizacije, cijena angažmana dizel generatora, računa se kao zbir fiksnih i varijabilnih troškova, uz dodatak dinamičkog faktora cijene angažmana dizel generatora i data je izrazom:

$$C_{dg} = (431 + 6.53 * P_{dg} + 1.04^{-4}) + CF_{Dg,t}^{EMI} \quad (4.7)$$

Ovaj faktor direktno utiče na ukupne operativne troškove mikromreže. Analizom i smanjenjem emisija gasova tokom rada dizel generatora, moguće je postići finansijske benefite ili optimizaciju troškova angažmana mikromreže.

4.4.4. Cijena angažmana mikroturbine

Slično kao i kod dizel generatora, određivanje cijene angažmana mikroturbine zahtijeva definisanje dinamičkog faktora $CF_{MT,t}^{EMI}$. Ovaj faktor, kao i kod dizel generatora, zavisi od cijene troškova emisija gasova, uključujući ugljen-dioksid (CO_2), sumpor-dioksid (SO_2) i azot-oxid, odnosno plin (NO_x), koji se oslobađaju tokom rada mikroturbine. Dinamički faktor cijene angažmana, prilagođava se u skladu sa trenutnom proizvodnjom mikroturbine, a njegovo precizno određivanje omogućava bolje upravljanje troškovima, uzimajući u obzir ekološke aspekte i specifičnosti rada mikroturbine unutar mikromreže [81].

Dinamički faktor cijene angažmana mikroturbine u određenom trenutku t , označen kao ($CF_{MT,t}^{EMI}$), definisan je izrazom:

$$CF_{MT,t}^{EMI} = (C_{CO_2} * CO_2 + C_{SO_2} * SO_2 + C_{NO_x} * NO_{x_{MT}}) * P_{MT} \quad (4.8)$$

gdje su, kao i kod dizelgeneratora $C_{CO_2} = 1.24$, $C_{SO_2} = 2.41$, i $C_{NO_x} = 1.28$, cijene troškova emisije ugljen-dioksida, sumpor-oksida i azot-oksida po jedinici proizvedene energije, respektivno, dok se P_{MT} odnosi na proizvodnju mikroturbine u određenom trenutku.

Definisanjem dinamičkog faktora cijene mikroturbine, može se odrediti cijena njenog angažmana:

$$C_{MT} = (551.21 + 4.26 * P_{mt} + 0.94^{-4}) + CF_{MT,t}^{EMI} \quad (4.9)$$

Posmatrajući relaciju (4.9), uočavamo da je cijena angažmana mikroturbine definisana zbirom fiksnih i varijabilnih troškova uz dodatak dinamičkog faktora, kao što je slučaj i sa dizelgeneratorima.

4.4.5. Cijena angažmana sistema za skladištenje energije

Sistemi za skladištenje energije, poput baterija, doprinose ostvarivanju efikasnosti i pouzdanosti u upravljanju električnom energijom unutar mikromreže. Ova tehnologija doprinosi optimizaciji energetskega tokova, omogućavajući sistemima mikromreže da efikasno manipuliraju proizvodnjom, skladištenjem i potrošnjom električne energije. S tim u vezi, određivanje cijene angažmana baterije igra ključnu ulogu u definiranju cijene operativnih troškova i optimizaciji mikromreže [82].

Cijena angažmana baterije može se odrediti koristeći relaciju:

$$C_{baterije} = \frac{P_{baterije}}{\eta} * C_{punjenja} + C_{investicija} + C_{integracije} \quad (4.10)$$

Relacija 4.10 pruža holistički uvid u troškove vezane za integraciju i rad baterije kao sistema za skladištenje energije u mikromreži. Snaga baterije ($P_{baterije}$) direktno je povezana sa koeficijentom efikasnosti punjenja i pražnjenja baterije η . Vrijednost koeficijenta η postavljena je na 0.92. Efikasnost baterije ključna je za određivanje stvarne cijene angažmana, dok investicioni troškovi $C_{investicija}$ predstavljaju ulaganje u samu bateriju. Troškovi povezivanja $C_{integracije}$ obuhvataju sve potrebne resurse za integraciju baterije unutar mikromreže. Analiza cijene angažmana baterije omogućava precizno planiranje i upravljanje resursima mikromreže, uzimajući u obzir kako finansijske, tako i funkcionalne aspekte rada baterije.

4.4.6. Cijena prilagođavanja potrošnje električne energije u skladu sa proizvodnjom

Prilagođavanje potrošnje električne energije, (eng. *demand response*), igra važnu ulogu u dinamičnom upravljanju mikromrežom i ima za cilj optimizaciju potrošnje električne energije u skladu sa trenutnim zahtjevima proizvodnje [83]. Ovaj pristup prikazuje potrebu za ravnotežom između proizvodnje i potrošnje električne energije, a cijena angažmana ovog prilagođavanja, označena kao C_{dr} , data je relacijom:

$$C_{dr} = 8.2 * P_{dr} \quad (4.11)$$

U relaciji (4.11), P_{dr} predstavlja snagu (električnu energiju) koja se može prilagoditi u skladu sa potrebama sistema ili cijenama električne energije. Drugim riječima, P_{dr} predstavlja veličinu potrebe za prilagođavanjem, čime se ocjenjuje koliko je potrebno prilagoditi potrošnju električne energije, kako bi se optimalno odgovorilo na dinamiku elektroenergetskog sistema. Dakle, cijena angažmana ovog prilagođavanja u sebi uključuje i finansijski aspekt vezan za efikasno upravljanje potrošnjom električne energije. Kroz povećanje svijesti potrošača i prilagođavanje potrošnje prema dinamici proizvodnje, često se postiže efikasnije korišćenje resursa, čime se dovodi ne samo do smanjenja ukupnih troškova električne energije, već se i doprinosi održivosti elektroenergetskog sistema.

4.4.7. Cijena angažmana javnog distributera električne energije

Angažman distributera električne energije, neophodan je u održavanju stabilnosti mikromreže, naročito u situacijama kada proizvodnja električne energije unutar mikromreže nije dovoljna za pokrivanje potrošnje [84].

Cijena angažmana distributera električne energije $C_{distributera}$ data je kao:

$$C_{distributera} = 100 + 8.1 * P_{distributera} \quad (4.12)$$

gdje $P_{distributera}$ predstavlja snagu (električnu energiju) koju mikromreža preuzima od električnog distributera. Data relacija pokazuje da cijena angažmana raste proporcionalno količini preuzete električne energije od distributera. Fiksni dio predstavlja osnovnu cijenu, dok je varijabilni dio proporcionalan količini preuzete električne energije. Dakle, povećanjem korišćenja usluga električnog distributera, održava se kontinuirano snabdijevanje električnom energijom, iako to može rezultirati dodatnim troškovima za mikromrežu. Stoga, u procesu donošenja odluka, treba pažljivo razmotriti balans između potrebe za neprekidnim snabdijevanjem i pratećih finansijskih implikacija, kako bi se postigao optimalan rezultat koji zadovoljava i tehničke i ekonomske aspekte mikromreže.

4.4.8. Analiza devijacije napona

U okviru razvoja mikromreže, devijacija napona igra ključnu ulogu u ocjeni doprinosa i ekonomske isplativosti integracije mikromreže unutar elektroenergetskog sistema. Devijacija napona, označena sa (VD) predstavlja mjeru odstupanja stvarnih vrijednosti napona (V_i) na različitim mjestima elektroenergetske mreže od referentnih vrijednosti napona ($V_{standardno}$), koje se smatraju standardnim [85].

Devijacija napona najčešće je data relacijom:

$$VD = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{V_{standardno}}{V_{bazno}} - \frac{V_i}{V_{bazno}} \right)^2} \quad (4.13)$$

gdje V_{bazno} predstavlja referentni napon elektroenergetske mreže i često se postavlja na 1.0 pu., dok $V_{standardno}$ označava očekivani standardni, odnosno željeni napon. U relaciji (4.13) sumiraju se kvadrati relativnih odstupanja stvarnih vrijednosti napona od referentnih vrijednosti. Veća vrijednost VD ukazuje na veće odstupanje napona, dok je devijacija napona bliža nuli, ukoliko je odstupanje napona manje. Analizom devijacije napona omogućava se identifikacija i brza reakcija na odstupanja u naponu, koja utiču na stabilnost i rad sistema. Uporedo sa tim, ova analiza doprinosi optimizaciji performansi rada sistema i povećava njegovu pouzdanost.

4.4.9. Aktivni i reaktivni gubici

Analiza gubitaka unutar elektroenergetskog sistema, integrisanog sa mikromrežom predstavlja značajan aspekt u procjeni performansi rada cjelokupnog sistema. Aktivni gubici, predstavljaju dio električne energije koji se gubi u obliku toplote, zbog otpora elemenata unutar sistema.

Mjera gubitaka aktivne snage između dva čvora (čvora i i čvora j), data je kao:

$$P_{gubici} = \frac{|V|^2}{R_z} \quad (4.14)$$

gdje R_z predstavlja aktivnu otpornost grane između čvora i i čvora j , dok $|V|^2$ predstavlja kvadrat razlike napona između definisanih čvorova. Sa druge strane, reaktivni gubici Q_{gubici} , mjereni reaktivnom snagom, nastaju zbog nesavršenosti komponenti i dati su kao:

$$Q_{gubici} = \frac{|V|^2}{X_z} \quad (4.15)$$

gdje X_z predstavlja reaktansu grane između čvora i i čvora j .

Prilikom izračunavanja cijene troškova angažmana mikromreže, poseban naglasak se stavlja na uključivanje gubitaka, koji direktno utiču na ukupnu proizvodnju električne energije i njenu distribuciju potrošačima. Efikasno upravljanje i minimizacija ovih gubitaka igraju ključnu ulogu u smanjenju operativnih troškova i unaprjeđenju održivosti elektroenergetskog sistema [86]. U kontekstu integrisane mikromreže unutar elektroenergetskog sistema, pristup analizi gubitaka postaje još značajniji. Strategije optimizacije koje se razvijaju uzimaju u obzir ove gubitke kako bi se postiglo efikasno upravljanje. Mikromreža, kao dio ovog sistema, igra ključnu ulogu u smanjenju ukupnih gubitaka. Njena prisutnost omogućava dinamično prilagođavanje proizvodnje odnosno potrošnje električne energije, minimizujući gubitke aktivne i reaktivne snage u procesu distribucije. Ovaj integrativni pristup omogućava mikromreži da deluje kao aktivni učesnik u smanjenju gubitaka u širem elektroenergetskom sistemu. Osim što obezbjeđuje pozdanost u snabdijevanju potrošača električnom energijom, mikromreža doprinosi efikasnosti elektroenergetskog sistema.

4.4.10 Predložena kriterijumska funkcija za angažman mikromreže

U istraživanju ovog master rada fokus je stavljen na minimizaciji troškova cijene angažmana mikromreže i efikasnom korišćenju resursa, uz istovremeno smanjenje gubitaka i održavanje stabilnosti napona unutar definisanih granica. Da bi se postigli ovi ciljevi, neophodno je detaljno definisati kriterijumsku funkciju angažmana, prilagođavajući je specifičnostima mikromreže.

Relacija kojom se definiše kriterijumska funkcija angažmana mikromreže data je kao:

$$\begin{aligned} \text{Kriterijumska funkcija} = & \{C_{PV} * P_{PV} + C_{WT} * P_{WT} + C_{MT,t} + C_{DG,t} + C_{baterije}\}_{normalizovano} + \\ & + \{C_{distributera} + C_{DR}\}_{normalizovano} + VD_{normalizovano} + Gubici_{normalizovano} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Najprije, troškovi angažmana solarnog panela ($C_{PV} * P_{PV}$) i vjetrogeneratora ($C_{WT} * P_{WT}$) predstavljaju cijenu proizvodnje električne energije putem obnovljivih izvora, povećavajući otpornost sistema na različite spoljašnje uticaje ili cijene određenih izvora energije. Mikroturbine $C_{MT,t}$ i dizel generatori $C_{DG,t}$ doprinose stabilnosti sistema, pružajući alternativni izvor energije tokom promjenljivih vremenskih uslova. Cijena angažmana baterije ($C_{baterije}$) odnosi se na cijenu skladištenje energije i regulaciju napona. Troškovi javnog distributera ($C_{distributera}$) predstavljaju troškove angažmana javnog distributera električne energije u slučaju potreba, čime se osigurava neprekidnost u snadbijevanju potrošača. Uz to, prilagođavanje potrošnje (C_{dr}) proizvodnji električne energije, omogućava upavljanje potrošnjom, dok devijacija napona (VD) i gubici u sistemu ($Gubici$) igraju ključne faktore u kontekstu stabilnosti i efikasnosti rada mikromreže. Minimizacija cijene troškova angažmana mikromreže postiže se upotrebom genetičkog algoritma (GA), koji omogućava dinamičko prilagođavanje optimalne proizvodnje električne energije putem pojedinačnih resursa u mikromreži, uz postizanje minimalne cijene troškova njihovog angažmana i istovremeno neprekidno snadbijevanje potrošača električnom energijom.

4.5. OSNOVNE KARAKTERISTIKE GENETIČKOG ALGORITMA U CILJU OPTIMIZACIJE MIKROMREŽE

U cilju postizanja maksimalne energetske efikasnosti i smanjenja troškova, predloženi algoritam ima za cilj efikasno upravljanje mikromrežom putem optimizacije proizvodnje električne energije i adekvatnog korišćenja resursa.

Predloženi algoritam izdvaja se na osnovu nekoliko ključnih karakteristika:

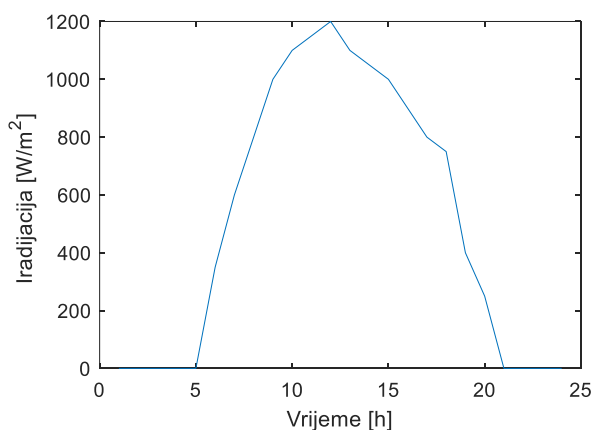
- Proračun izlazne snage vjetroturbine (WT), odnosi se na proračun trenutne proizvodnje snage od strane vjetroturbine, uzimajući u obzir trenutnu brzinu vjetra.
- Proračun izlazne snage fotonaponskog sistema (PV), odnosi se na proračun trenutne snage koju proizvodi fotonaponski sistem, uzimajući u obzir uticaj temperature i solarne radijacije kao faktora koji variraju u odnosu na standardne uslove ispitivanja.
- Upravljanje baterijom, odnosi se na proces punjenja i pražnjenja baterije u zavisnosti od toga da li proizvedena električna energija zadovoljava potrebe opterećenja, uz fokus na minimizaciju cijene troškova njenog angažmana.
- Odlučivanje o angažmanu ostalih resursa mikromreže, uključuje proces donošenja odluka o odabiru alternativnih izvora energije, kao što su mikroturbine ili dizel generatori, u skladu sa predefinisanim ciljevima optimizacije.
- Integracija sa glavnom elektroenergetskom mrežom, odnosi se na situacije kada proizvedena snaga nije dovoljna, pa se uporedo sa tim zahtijevana energija nabavlja iz glavne elektroenergetske mreže.
- Zahtjev za redukcijom potrošnje električne energije, odnosi se na zahtjev za smanjenje opterećenja od strane potrošača, u skladu sa trenutnom proizvodnjom električne energije

Ove karakteristike omogućavaju algoritmu da efikasno upravlja mikromrežom, optimizuje proizvodnju električne energije, minimizuje troškove korišćenja resursa i održava stabilnost sistema, čime se postiže njena optimalna efikasnost i ekonomska održivost.

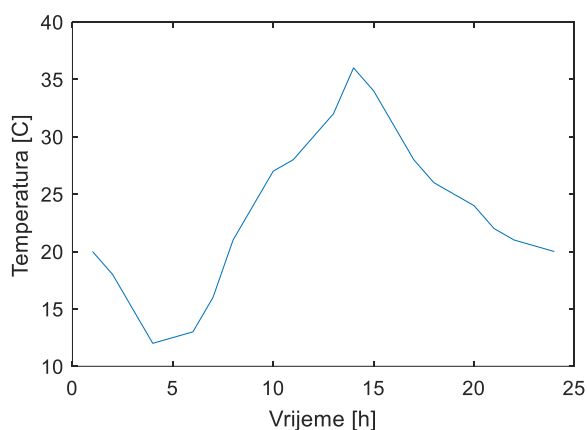
4.6. REZULTATI SIMULACIJA

4.6.1. Analiza rada mikromreže u situaciji angažmana svih njenih resursa

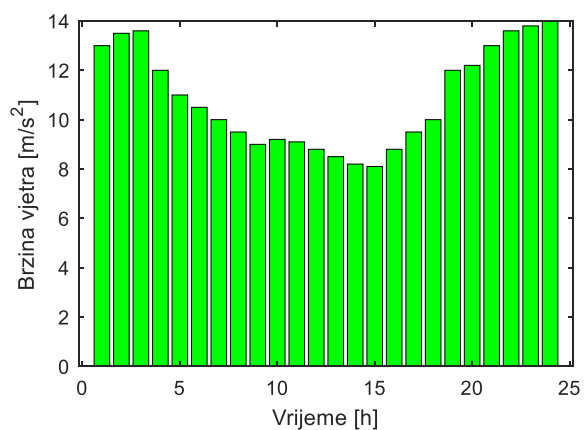
Prvi model optimizacije analizira rad mikromreže, u kojem svi njeni resursi aktivno učestvuju u proizvodnji električne energije. Ukupni zahtjevi opterećenja prije primjene modela optimizacije mikromreže dati su na slici 4.4 i uključuju potrebe za grijanjem, hlađenjem, osvjetljenjem, kao i sistem za upravljanje vozilom-na-mreži (V2G sistem). Cilj optimizacije je efikasno korišćenje svih resursa mikromreže, uz istovremenu minimizaciju cijene troškova njihovog angažmana, upotrebom genetičkog algoritma. S'obzirom na to da mikromreža koristi obnovljive izvore energije, poput fotonaponskog sistema i vjetrogeneratora, na slikama (Slika 4.6, 4.7 i 4.8) su prikazane promjene solarne radijacije, temperature i brzine vjetra u toku jednog dana. Na dijagramu prikazanom na slici 4.6, uočava se da je najveći intenzitet sunčevog zračenja zabilježen oko 12 časova. Uporedo sa tim, na dijagramu prikazanom na slici 4.7 primjećuje se da i temperatura u istim intervalima postiže svoj maksimum. S'obzirom na ove podatke, očekuje se da je proizvodnja energije od strane solarnog panela najveća u pomenutim časovima.



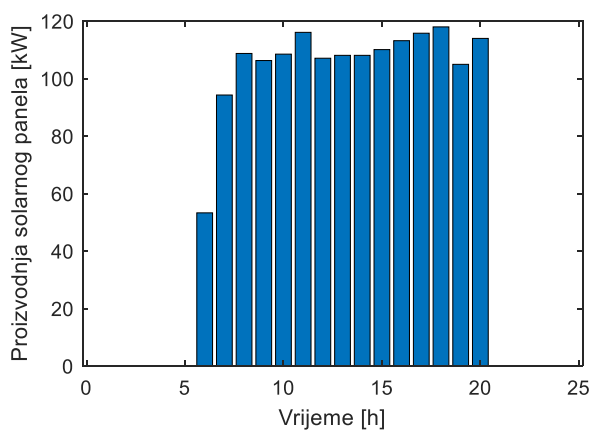
Slika 4.6. Promjena radijacije u toku dana



Slika 4.7. Promjena temeprature u toku dana

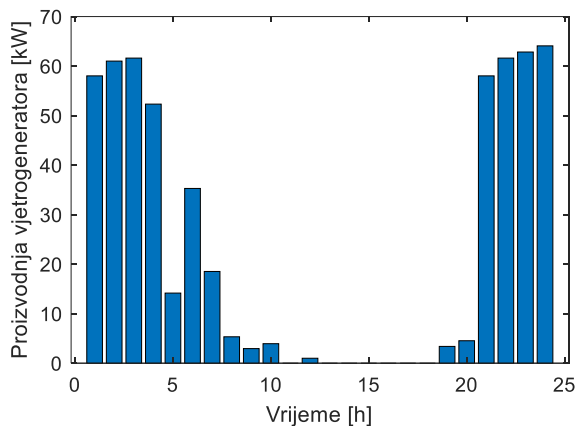


Slika 4.8. Promjena brzine vjetra u toku dana

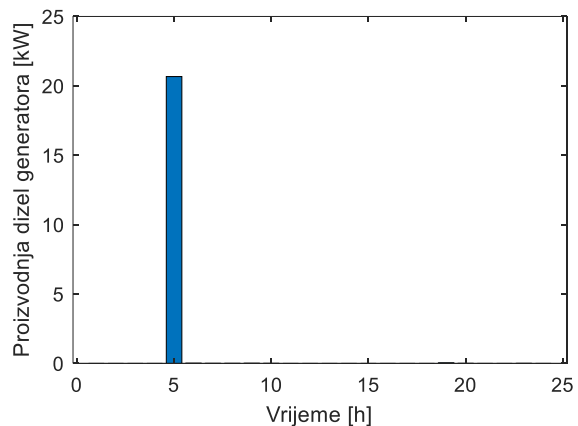


Slika 4.9. Proizvedena snaga PV sistema

Kada je u pitanju proizvodnja energije od strane vjetrogeneratora, koja je srazmjerna brzini vjetra, posmatrajući dijagram prikazan na slici 4.8, pretpostavlja se da bi najveća proizvodnja energije bila ostvarena u periodu oko 00h do 04h, kao i periodu oko 21h do 24h.

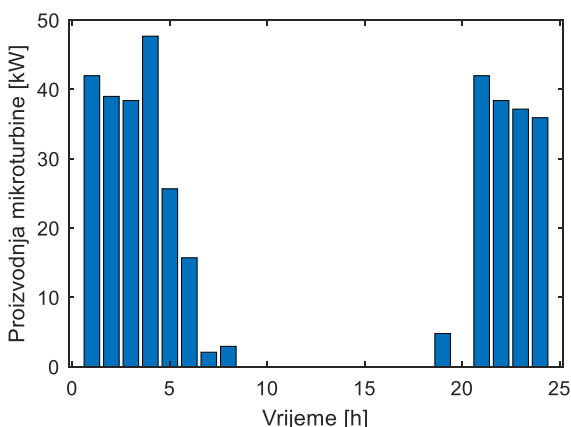


Slika 4.10. Proizvedena snaga vjetrogeneratora

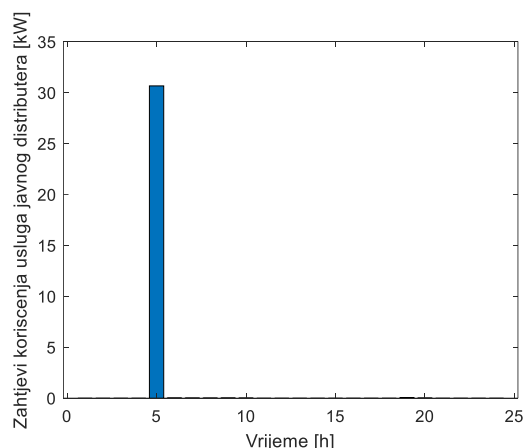


Slika 4.11. Proizvedena snaga dizel generatora

U cilju optimalnog angažmana svih resursa mikromreže neophodno je ustanoviti proizvodnju električne energije od strane obnovljivih izvora energije nakon procesa optimizacije mikromreže. U skladu sa tim, na dijagramima predstavljenim na slici 4.9 i 4.10, dat je prikaz proizvedene snage od strane fotonaponskog panela i vjetrogeneratora. Ovi dijagrami potvrđuju način rada ovih sistema i pružaju detaljan uvid u proizvodnju električne energije tokom određenih vremenskih intervala, uz minimizovane troškove njihovog angažmana. U skladu sa zahtjevima potrošača za električnom energijom, postaje očigledna potreba za uključivanjem dodatnih resursa mikromreže. Slika 4.11 pruža detaljan uvid u proizvodnju električne energije od strane dizel generatora, dok slika 4.12 prikazuje proizvodnju električne energije od strane mikroturbine, tokom jednog dana. Ovi resursi doprinose ukupnom energetsom bilansu mikromreže i prilagođavaju se dinamici potrošnje električne energije tokom različitih vremenskih intervala.



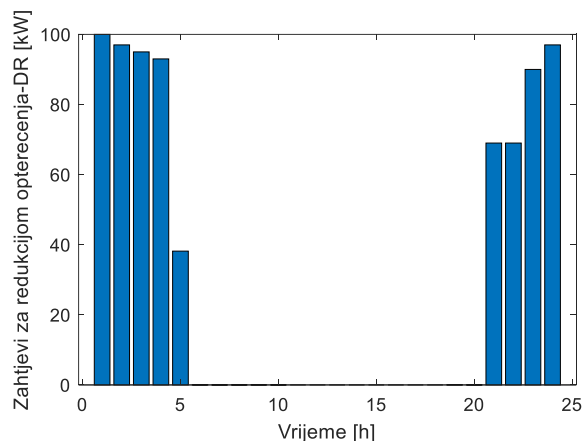
Slika 4.12. Proizvedena snaga mikroturbine



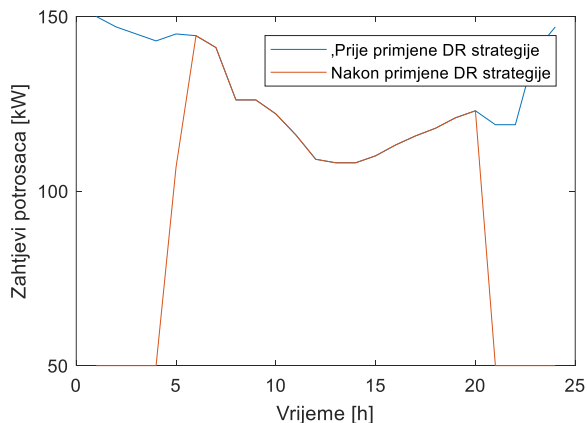
Slika 4.13. Korišćenje usluga javnog distributera

Analizom prikazanih grafika zaključuje se da je optimalno angažovati dizel generator u kratkim intervalima, kako bi se efikasno koristili resursi mikromreže i istovremeno minimizovali troškovi. Sa druge strane, angažman mikroturbine se preporučuje u vremenskim periodima kada nema dostupne generisane energije od strane fotonaponskog panela. Da bi se održala ravnoteža između

efikasnosti i ekonomske održivosti mikromreže, neophodno je periodično koristiti energiju iz glavne elektroenergetske mreže. Ovaj pristup omogućava mikromreži da djelimično pokriva tražene zahtjeve za električnom energijom, korišćenjem usluga javnog distributera. Na dijagramu prikazanom na slici 4.13, jasno su označeni vremenski intervali kada se ovaj pristup primjenjuje.

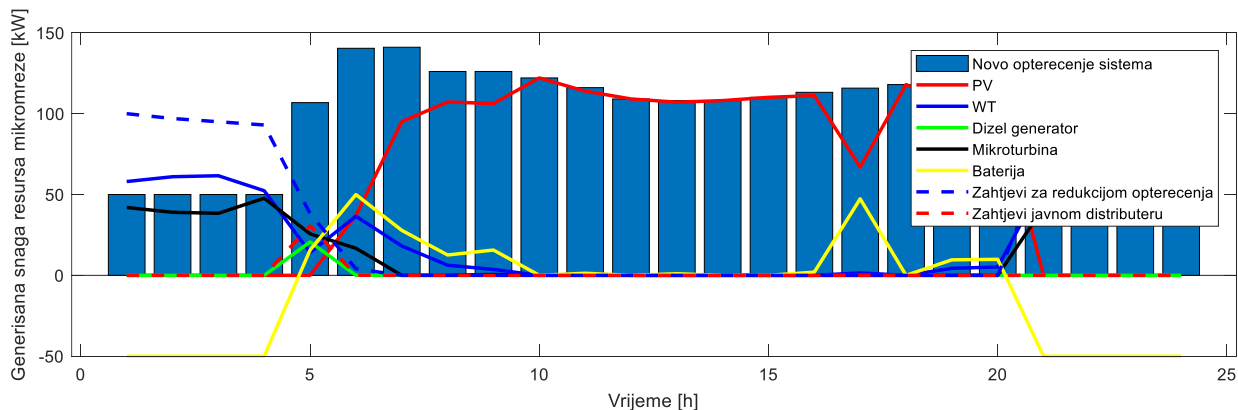


Slika 4.14. Zahtjevi za redukcijom opterećenja



Slika 4.15. Grafik opterećenja prije i nakon primjene DR

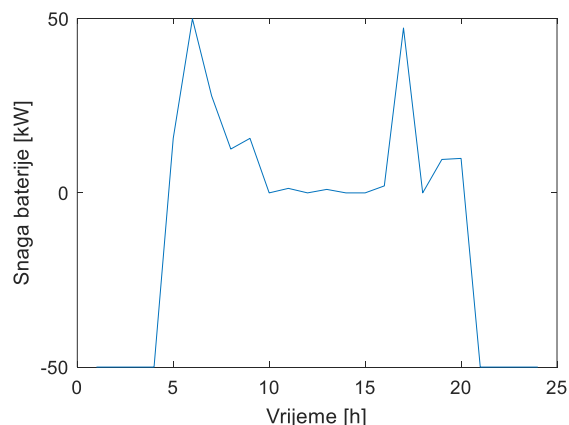
U cilju postizanja stabilnosti sistema tokom perioda povećane potrošnje i ograničene proizvodnje resursa, sa istovremenim ciljem minimizacije cijene troškova, primjenjuje se pristup upravljanja potrošnjom električne energije (eng. *demand response*), odnosno DR strategija. Ovaj pristup podrazumijeva dinamičko prilagođavanje potrošnje električne energije u skladu sa trenutnim uslovima u elektroenergetskom sistemu, što uključuje varijacije u dostupnosti energije ili promjene u cijenama. Na slici 4.14 jasno su vizualizovani zahtjevi potrošačima za smanjenom potrošnjom električne energije u različitim vremenskim intervalima. Uporedo sa tim, na slici 4.15 istaknut je i grafik ukupnog opterećenja sistema prije i nakon primjene DR strategije. Ova vizualizacija jasno pokazuje kako se promjenama u potrošnji električne energije, ostvarenim kroz DR pristup, može uticati na ukupno opterećenje u elektroenergetskom sistemu.



Slika 4.16. Uvid u proizvodnji aktivne snage angažmanom svih resursa mikromreže

Na slici 4.16 pružen je sveobuhvatan uvid u angažman svih resursa mikromreže. Ovaj prikaz objedinjuje doprinos svakog od resursa, pružajući jasan uvid u način na koji se različiti elementi mikromreže integrišu, kako bi se zadovoljile ukupne energetske potrebe sistema, uz istovremenu minimizaciju cijene troškova njihovog angažmana.

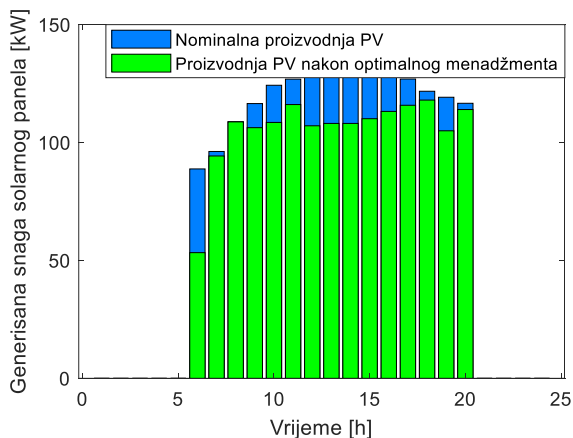
Unutar mikromreže, uključen je i sistem za skladištenje energije, poput baterije, čiji je angažman prikazana na slici 4.17.



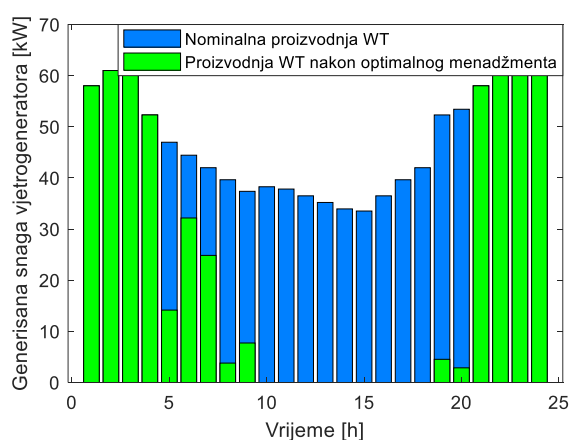
Slika 4.17. Snaga baterije

Analizom prikazanog dijagrama, primjećuje se da u određenim vremenskim intervalima (period oko 24h do 04h), kada je opterećenje smanjeno, sistem za skladištenje energije preuzima dio proizvedene energije koji nije korišćen za snabdijevanje potrošača, puneći se. U periodima vršnog opterećenja, (period oko 05h do 10h), ovaj sistem, zajedno sa drugim izvorima energije, koristi se za snabdijevanje potrošača. Na kraju, u određenim vremenskim intervalima, (period oko 10h do 15h), ovaj sistem nije ni proizvođač ni potrošač električne energije. Ovi trenuci obuhvataju periode kada je baterija ispražnjena (napunjena), ali je proizvodnja ostalih resursa mikromreže ekvivalentna potrebama potrošača i nema dostupne energije za punjenje baterije (odnosno, nema potrebe za njenim pražnjenjem).

S'obzirom na predviđeni pristup optimalnog angažmana mikromreže, koji prioritarno koristi obnovljive izvore energije u cilju zadovoljenja energetske potrebe potrošača, sprovedena je analiza performansi rada tih izvora i prije procesa optimizacije. Cilj ove analize jeste procjena njihovog efikasnog korišćenja u procesu optimizacije mikromreže. U tu svrhu, na slikama 4.18 i 4.19 prikazana je nominalna proizvodnja snage solarnog panela i vjetrogeneratora u poređenju sa njihovom proizvodnjom nakon primjene optimalnog menadžmenta. Posmatrajući ove grafike proizvodnje aktivne snage od strane obnovljivih izvora energije, uočava se da nakon procesa optimizacije ovi izvori rade smanjenim kapacitetom.

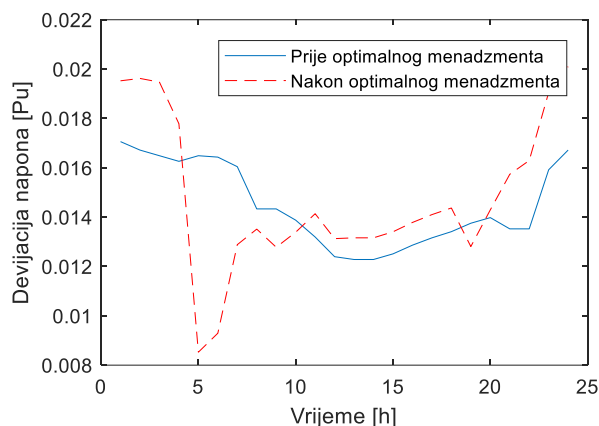


Slika 4.18. Generisana snaga PV



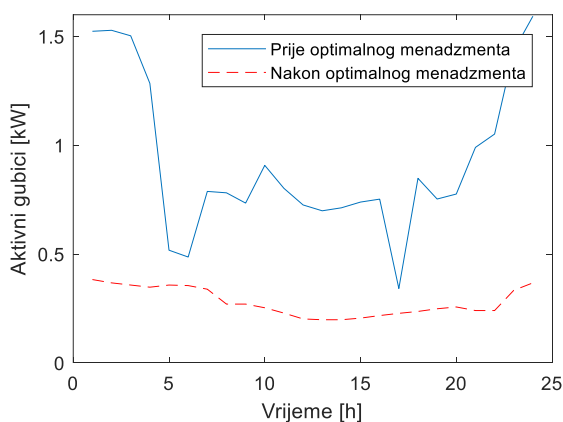
Slika 4.19. Generisana snaga WT

Dakle, zbog ekonomskog menadžmenta odlučeno je da se ne koristi puni kapacitet solarnog panela i vjetrogeneratora, kako bi se izbjegli visoki troškovi njihovog održavanja. U skladu sa tim preferira se upotreba drugih izvora energije, kako bi se zadovoljile energetske potrebe i minimizovala njena potrošnja. Prema tome, kod solarnog panela i vjetrogeneratora iako postoji mogućnost podešavanja regulatora na rad u tački maksimalne snage, primenjuje se takav tip regulacije kojim se ograničava rad istih ispod vrijednosti maksimalne snage. Ovakav pristup omogućava upravljanje radom ovih elektrana na nižem nivou snage, odnosno uzimanjem manje energije vjetra i sunca od dostupne.

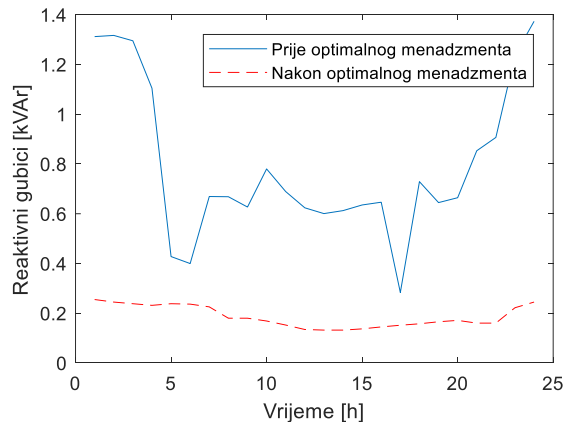


Slika 4.20. Grafik analize devijacije napona

U analizi prednosti i nedostataka upotrebe mikromreže, u kontekstu devijacije napona prikazan je grafik na slici 4.20, dok su gubici aktivne i reaktivne snage unutar elektroenergetskog sistema prikazani na slici 4.21 i slici 4.22, respektivno.



Slika 4.21. Grafik analize aktivnih gubitaka



Slika 4.22. Grafik analize reaktivnih gubitaka

Analizom dijagrama na slici 4.20, uočava se smanjenje devijacije napona u sistemu nakon primjene optimizacione metode, u poređenju sa prethodnim stanjem. Smanjena devijacija napona nakon optimizacije mikromreže, može se pripisati boljem upravljanju i koordinaciji između različitih izvora energije, uključujući obnovljive izvore, sistem za skladištenje energije, kao i tradicionalne izvore energije. Kada se posmatraju gubici aktivne i reaktivne snage u okviru elektroenergetskog sistema, uočava se i njihovo smanjenje primjenom optimizacionog modela. Smanjenjem gubitaka aktivne i reaktivne snage unutar elektroenergetskog sistema, postiže se povećanje efikasnosti prenosa

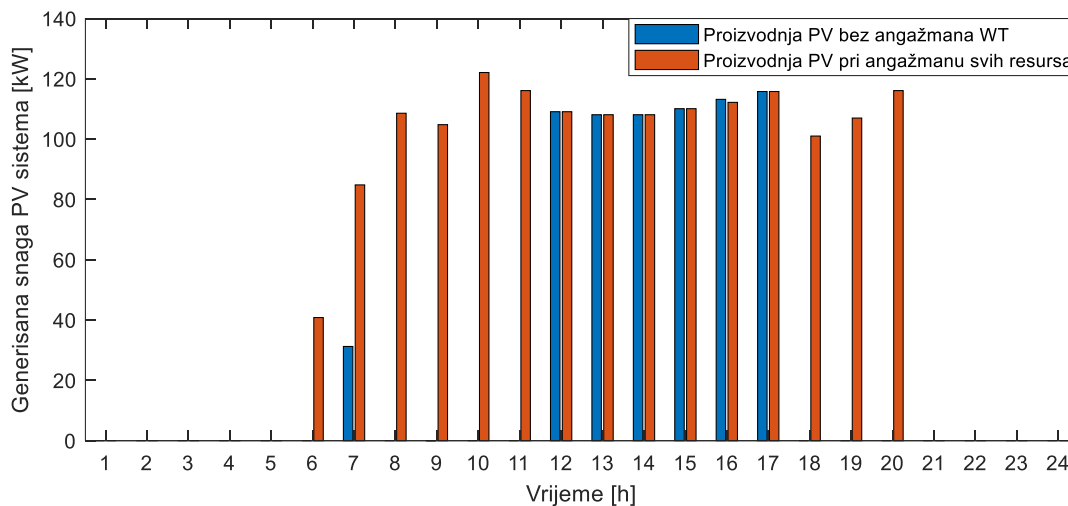
električne energije. S tim u vezi se zaključuje, da se primjenom optimizacionog modela mikromreže postiže smanjenje troškova, optimizacija stabilnosti napona u sistemu, smanjenje zahtjeva za dodatnom proizvodnjom energije u cilju nadoknade gubitaka, čime se doprinosi održivijem i ekonomski isplativijem energetsom sistemu.

Na kraju, primjećuje se da genetički algoritam predstavlja efikasan alat za optimizaciju upravljanja mrežno povezanom mikromrežom. Njegova primjena omogućava precizno podešavanje resursa, čime se postize njihovo efikasnije korišćenje, smanjuju se operativni troškovi i na taj način se optimizuje održivosti i ekonomska isplativosti mikromreže.

4.6.2. Analiza rada mikromreže bez vjetrogeneratora

U ovoj sekciji analiziran je rad prethodno opisane mikromreže ali bez prisustva vjetrogeneratora. Zahtjevi potrošača ostaju nepromijenjeni u odnosu na prethodni model optimizacije, i prikazani su na slici 4.4. Što se tiče sunčeve radijacije i temperature, nema odstupanja u odnosu na prethodno definisani slučaj. Sunčeva radijacija dostiže maksimalnu vrijednost oko 12h, iznoseći $1200 \frac{W}{m^2}$, dok temperatura postiže maksimalnu vrijednost u periodu oko 14h (Slika 4.6 i 4.7).

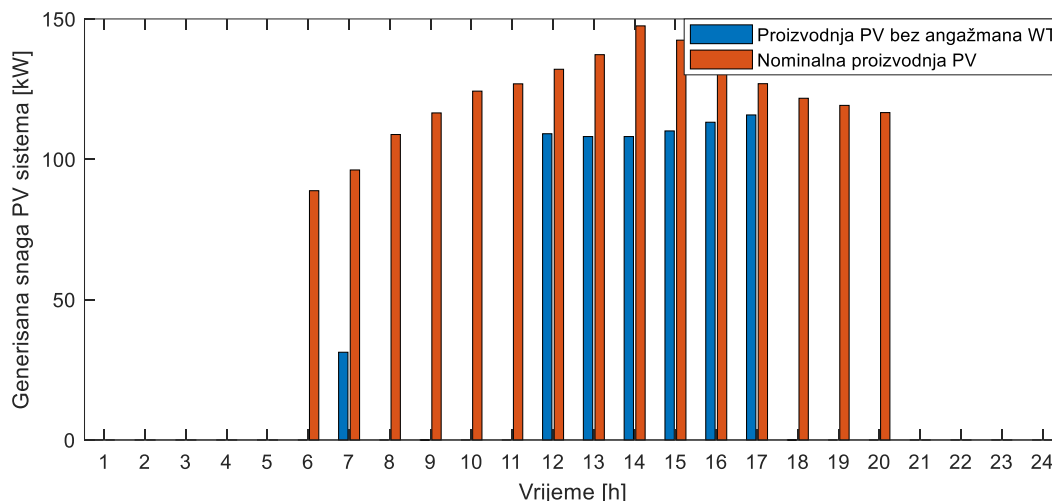
Međutim, iako su vrijednosti temperature i radijacije iste kao i u prethodnom slučaju, potrebno je ostvariti drugačiji angažman fotonaponskog sistema, u cilju minimizacije troškova angažmana mikromreže. Ovo podrazumijeva promjenu u proizvodnju aktivne snage, u odnosu na prethodno definisani slučaj, sa obzirom na nedostatak vjetrogeneratora, u ovim uslovima. Proizvodnja aktivne snage od strane solarnog panela u navedenoj situaciji, u poređenju sa njegovom proizvodnjom u situaciji gdje su angažovani svi resursi mikromreže, prikazana je grafikom na slici 4.23.



Slika 4.23. Generisana snaga PV sistema

Fokusirajući se na obnovljive izvore energije, u situaciji u kojoj se kao aktivni resurs mikromreže koristi isključivo fotonaponski panel, ostvaruje se njegova manja proizvodnja, u poređenju sa situacijom kada su oba resursa mikromreže u paralelnom radu (Slika 4.23). U ovom scenariju proizvodnja solarnog panela umanjena je za oko 29 % u odnosu na prethodno definisani slučaj, dok je u odnosu na njegovu nominalnu proizvodnju umanjena za oko 54%, što je prikazano grafikom na slici 4.24. Ovaj pristup primijenjen je u cilju minimizacije cijene korišćenja solarnog

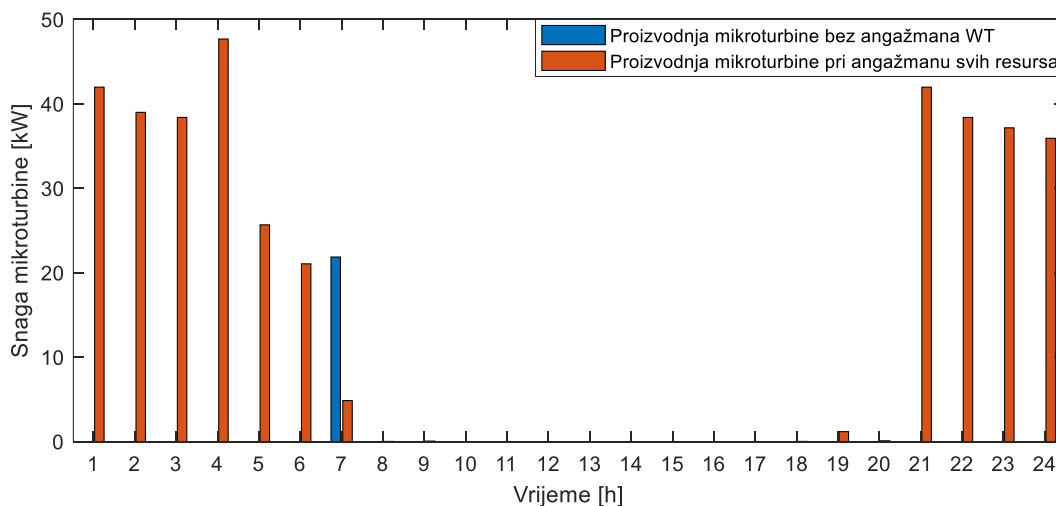
panela. Cijena angažovanja solarnog panela, prikazana relacijom 4.5, obuhvata pored fiksnih i varijabilne troškove održavanja, koji zavise od trenutne proizvodnje aktivne snage. S'tim u vezi, u ovakvim situacijama, posmatrano sa ekonomske strane, povoljnije je ostvariti angažman mikromreže koji uključuje redukciju korišćenja solarnog panela.



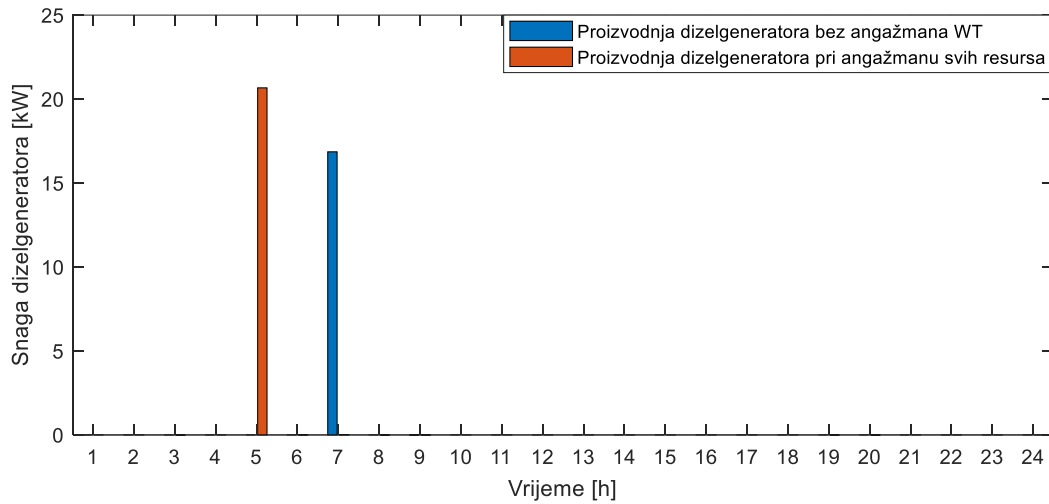
Slika 4.24. Generisana snaga PV sistema u poređenju sa njegovom nominalnom proizvodnjom

Primijenjena metoda doprinosi ukupnoj ekonomskoj efikasnosti sistema. Upotrebom GA definiše se proizvodnja, odnosno angažman dostupnih resursa unutar mikromreže, kako bi se optimizovala cijena njihovog korišćenja u skladu sa trenutnim uslovima i potrebama sistema.

Angažman tradicionalnih izvora energije za navedene uslove prikazan je graficima na slici 4.25 i 4.26. Prilikom analize grafika proizvodnje mikroturbine i dizel generatora, uočava se značajan pad proizvodnje mikroturbine, dok se i kod dizel generatora bilježi manja proizvodnja u poređenju sa scenarijem u kojem su svi resursi, uključujući i vjetrogenerator, integrisani u okviru mikromreže. Ovaj rezultat je posljedica optimizacije sistema genetičkim algoritmom, koji se fokusira na efikasno zadovoljavanje potreba potrošača uz minimalne troškove, što može dovesti do redistribucije angažmana resursa unutar mikromreže.

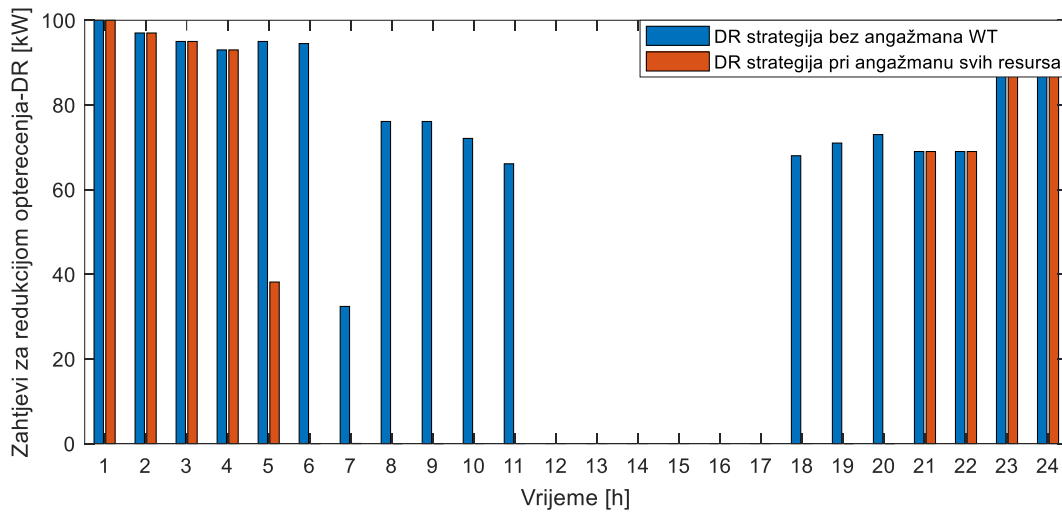


Slika 4.25. Proizvedena snaga mikroturbine

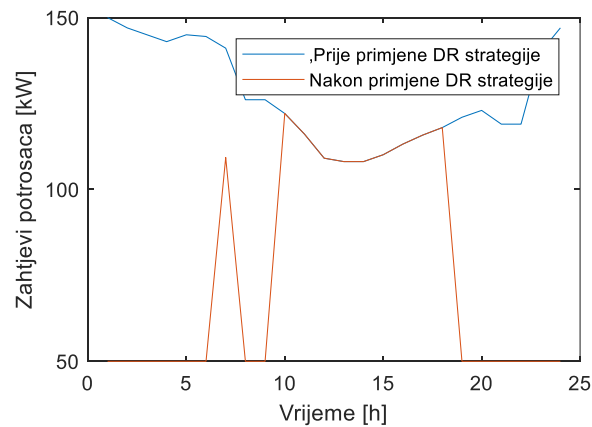


Slika 4.26. Proizvedena snaga dizelgeneratora

Sa druge strane, analizirajući grafik zahtjeva potrošačima za smanjenom potrošnjom električne energije (Slika 4.27), primjećuje se porast ovih zahtjeva u poređenju sa prethodnim scenarijem.



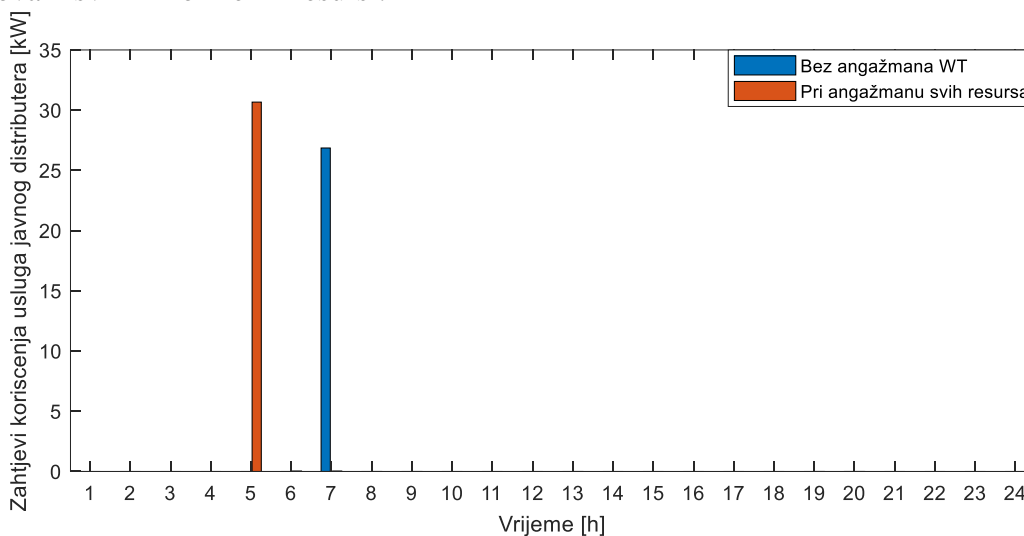
Slika 4.27. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom



Slika 4.28. Zahtjevi potrošača za redukcijom opterećenja

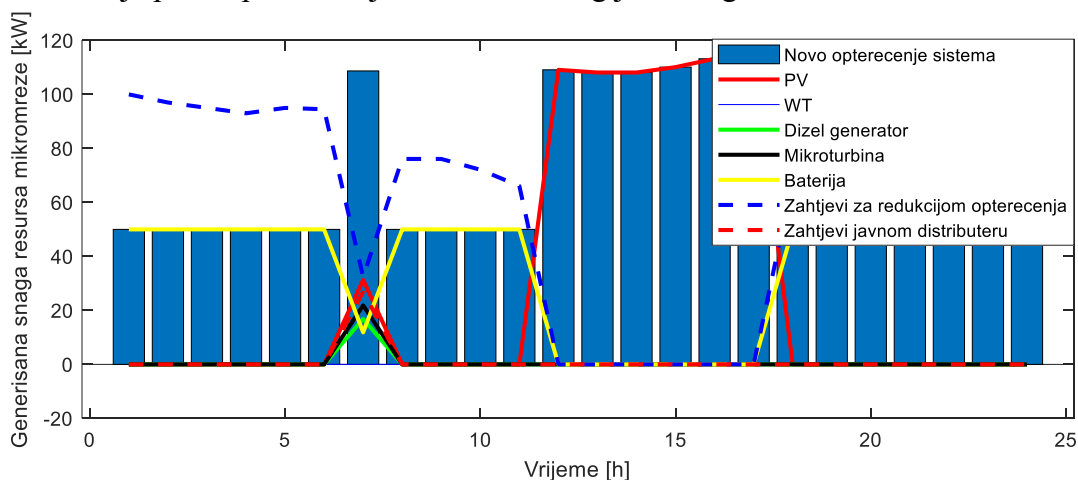
Ovaj trend ukazuje na umanjenu potražnju za električnom energijom u sistemu, što dalje objašnjava manju potrebu za angažmanom ostalih resursa mikromreže, uključujući mikroturbinu, dizel generator i fotonaponski sistem. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom su posljedica primjene genetičkog algoritma, čime se postiže optimalno prilagođavanje mikromreže prema trenutnim zahtjevima sistema. U skladu sa tim, može se zaključiti da ukoliko vjetrogenerator nije dostupan kao aktivni resurs mikromreže, zahtjevi za smanjenom potrošnjom postaju izraženiji, kako bi se održala ravnoteža između proizvodnje i potrošnje električne energije, uz istovremeno ekonomično korišćenje mikromreže. Ukupno opterećenje sistema prije i nakon primjene ove strategije, prikazano je na slici 4.28.

Na dijagramu prikazanom na slici 4.29 predstavljeni su zahtjevi za korišćenjem električne energije od strane javnog distributera. Ovaj pristup, primjenjuje se u slučaju kada je javni distributer električne energije potreban kako bi se osiguralo neprekidno snabdijevanje električnom energijom, a istovremeno minimizovali troškovi korišćenja mikromreže u okviru elektroenergetskog sistema. Analizirajući dati dijagram uočava se neznatno smanjenje ovih zahtjevi u odnosu na situaciju u kojoj su angažovani svi mikromrežni resursi.



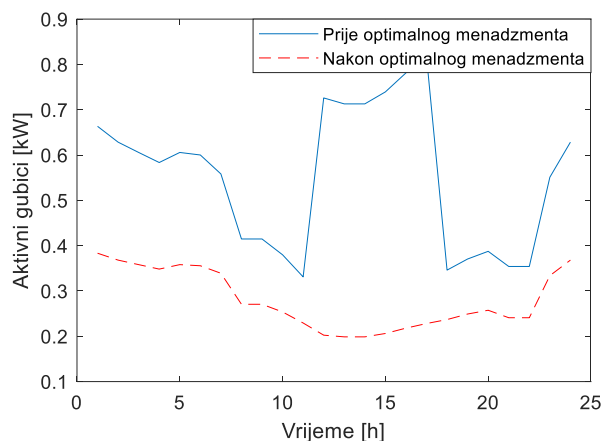
Slika 4.29. Zahtjevi za korišćenjem usluga javnog distributera

Na slici 4.30, dat je prikaz proizvodnje električne energije svakog od resursa mikromreže.

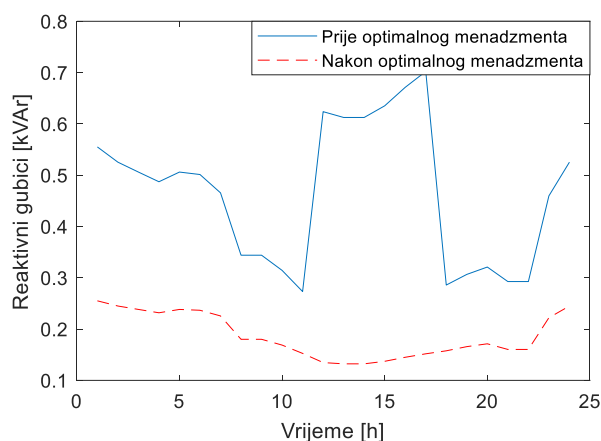


Slika 4.30. Uvid u proizvodnju aktivne snage angažmanom dostupnih resursa mikromreže

Sa prikazane slike zaključuje se da je upravljanje dostupnim resursima mikromreže organizovano sa ciljem minimizacije troškova njihove upotrebe i osiguravanja proizvodnje potrebne količine električne energije u skladu sa njenom potrošnjom.

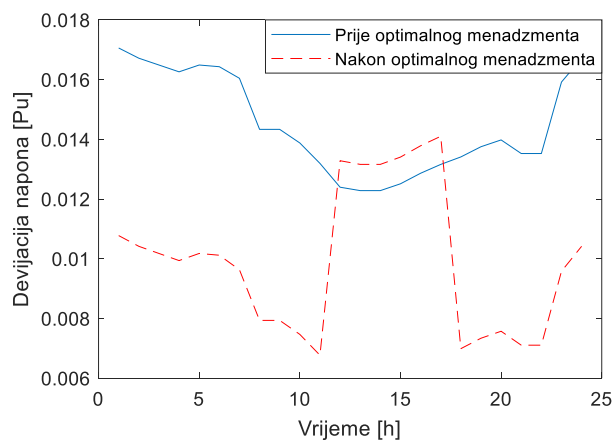


Slika 4.31. Grafik analize aktivnih gubitaka



Slika 4.32. Grafik analize reaktivnih gubitaka

Uvođenjem mikromreže u elektroenergetski sistem ostvaruje se smanjenje gubitaka aktivne i reaktivne snage u sistemu, čak i u situaciji u kojoj vjetrogenerator nije uključen kao aktivan resurs, kako se prikazuje na slici 4.31 i 4.32. Ovim se doprinosi povećanju energetske efikasnosti sistema i optimizaciji prenosa energije.

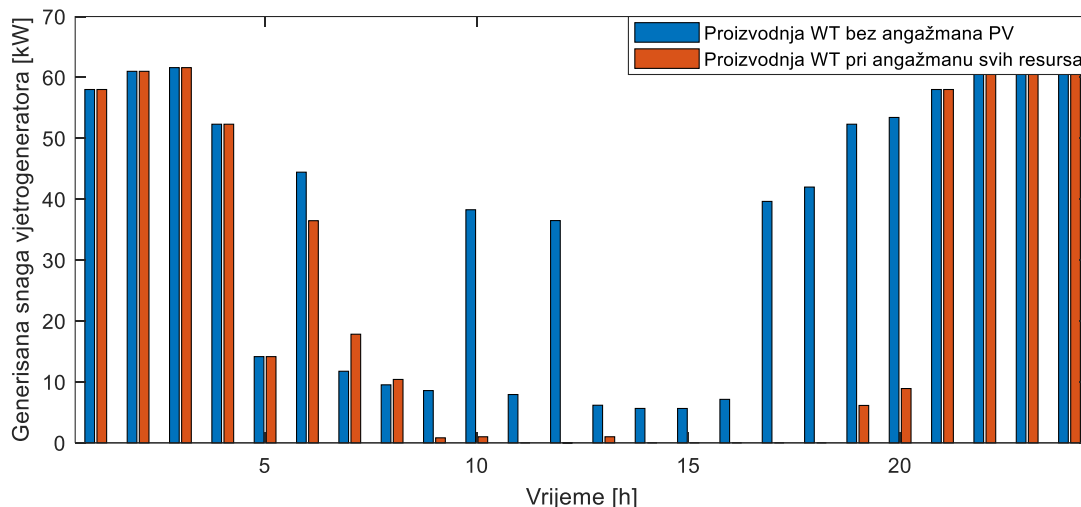


Slika 4.33. Grafik analize devijacije napona

Analizom devijacije napona (Slika 4.33), uočavaju se minimalna odstupanja od referentnih vrijednosti napona unutar elektroenergetskog sistema, uz istovremeno smanjenje devijacije napona, ukazujući na očuvanje stabilnosti napona u sistemu. Ovi rezultati ukazuju na pozitivan doprinos mikromreže u kontekstu smanjenja gubitaka i održavanja kvaliteta napona unutar elektroenergetskog sistema, čak i u situaciji u kojoj vjetrogenerator nije aktivni element mikromreže.

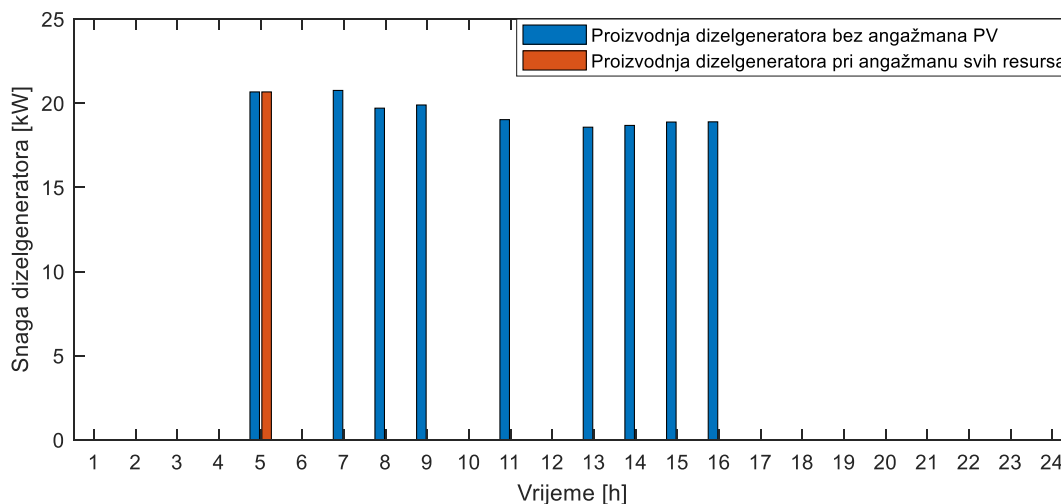
4.6.3. Analiza rada mikromreže bez solarnog panela

U ovom dijelu rada analiziran je angažman mikromreže u situaciji u kojoj solarni panel nije dostupan kao jedan od njenih resursa. Zahtjevi potrošača prije primjene modela optimizacije ostali su nepromijenjeni i prikazani su graficima na slici 4.4. Osim toga, promjena brzine vjetra tokom jednog dana prati prvi model optimizacije (Slika 4.8), što omogućava detaljan uvid u značaj prisustva fotonaponskog panela u mikromrežnom sistemu.

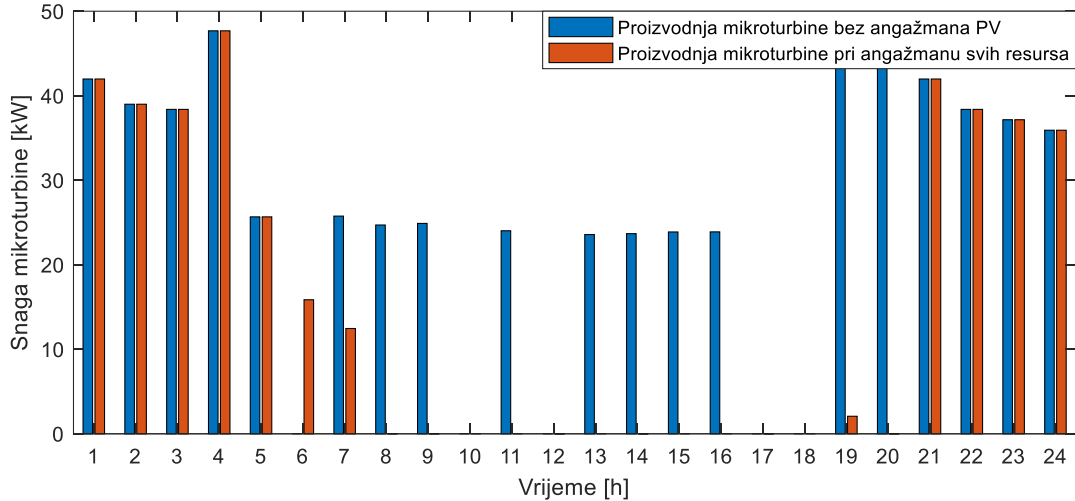


Slika 4.34. Proizvedena snaga vjetrogeneratora

Optimalni angažman vjetrogeneratora u ovom scenariju, kao i u kontekstu angažmana svih resursa mikromreže prikazan je na slici 4.34. Pored toga, angažmani tradicionalnih izvora energije za oba navedena slučaja, detaljno su prikazani na slici 4.35 (dizel generator) i 4.36 (mikroturbina).

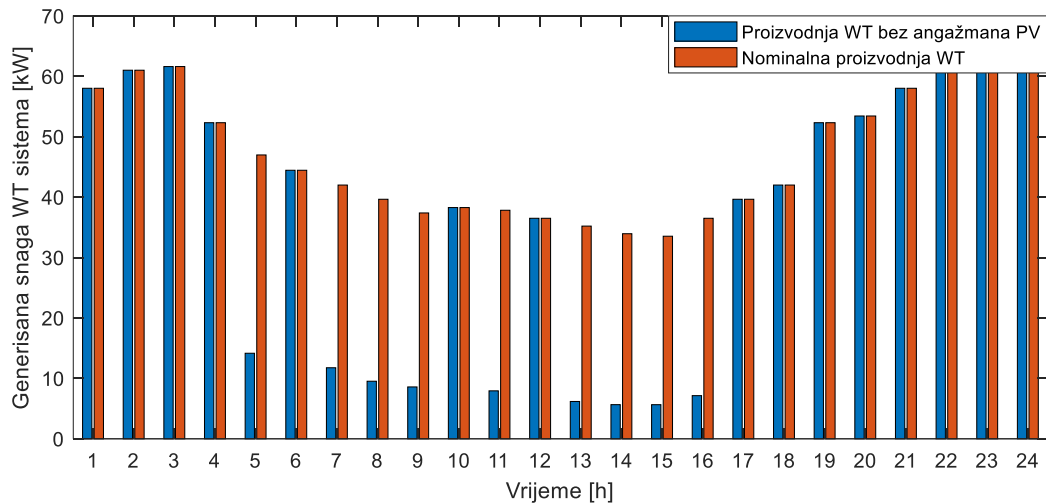


Slika 4.35. Proizvedena snaga dizelgeneratora



Slika 4.36. Proizvedena snaga mikroturbine

Posmatrajući navedene grafike, primjećuje se da odsustvo solarnog panela kao aktivnog resursa dovodi do uvećanog angažmana vjetrogeneratora i tradicionalnih izvora, u odnosu na konfiguraciju mikromreže u kojoj su dostupni svi njeni resursi. I u ovoj situaciji, kako bi se izbjegli visoki troškovi održavanja, primjenjuje se takav tip regulacije kojim se ograničava rad vjetrogeneratora ispod maksimalne snage. Poput cijene angažmana solarnog panela, i cijena angažmana vjetrogeneratora, prikazana relacijom 4.2 pored fiksnog sadrži i varijabilni dio troškova, koji se odnosi na cijenu održavanja vjetrogeneratora. Kako bi se ostvarila optimalna upotreba vjetrogeneratora, u ovoj situaciji povoljnije je regulator vjetrogeneratora ne postaviti u maksimalnoj tački snage, već na nizu vrijednost. Na ovaj način ostvaruje se ekonomičnija upotreba vjetrogeneratora. Konkretno, u ovoj situaciji regulator vjetrogeneratora je podešen na oko 78% maksimalne snage (Slika 4.37), što predstavlja porast u odnosu na njegov angažman kada su svi resursi uključujući i solarni panel dostupni.

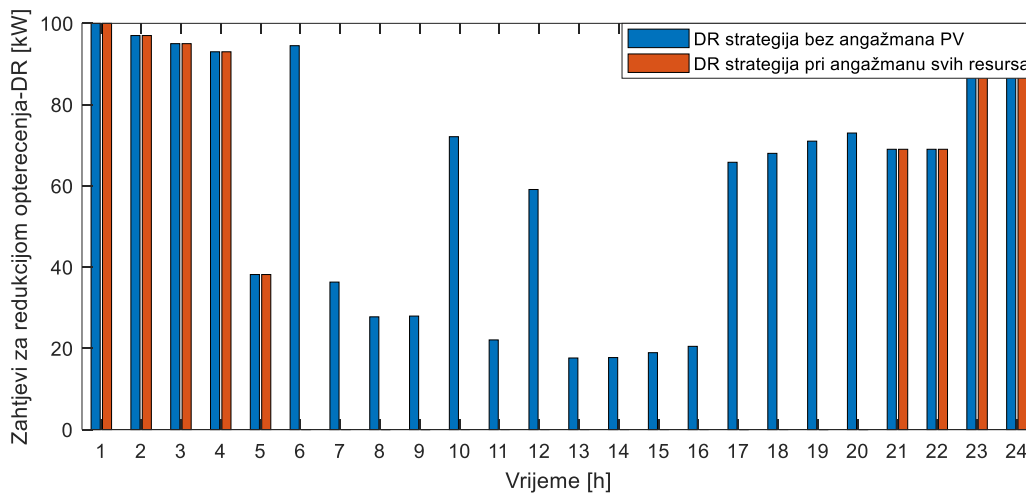


Slika 4.37. Generisana snaga WT u poređenju sa njegovom nominalnom proizvodnjom

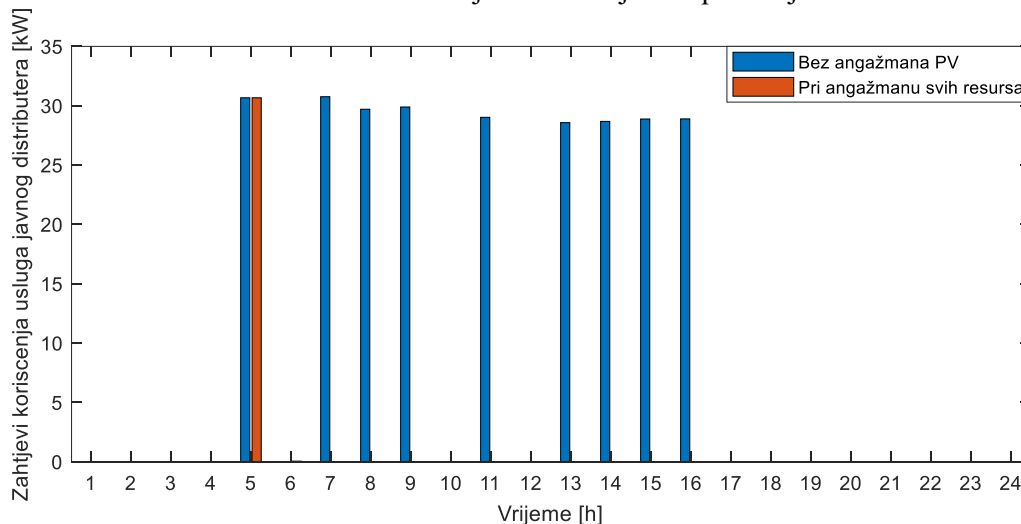
Uvećani angažman vjetrogeneratora, dizel generatora i mikroturbine pokazuje izazove koji proizilaze iz fluktuacija u proizvodnji energije, a uporedo sa tim ističe se važnost solarnog panela kao

distribuiranog izvora energije unutar mikromreže. Analizom prethodnih grafika, naglašava se da je integracija solarnog panela unutar mikromreže, ključna za održavanje efikasnosti, smanjenje troškova i ima značajan doprinos u kontinuiranom snabdijevanju potrošača. Međutim u situacijama u kojima solarni panel nije dostupan kao jedan od izvora energije, ovako definisan način angažmana predstavlja optimalno rješenje za pokrivanje potreba potrošača uz minimizaciju troškova, ukazujući na potrebu za raznovrsnošću resursa u cilju održavanja stabilnosti i efikasnosti mikromreže u različitim uslovima.

Dalje, na slici 4.38 i 4.39, dati su zahtjevi potrošačima za redukcijom opterećenja, kao i zahtjevi za korišćenjem energije od strane javnog distributera, respektivno, gdje se uočava njihov porast, u poređenju sa ovim zahtjevima u situaciji u kojoj su svi resursi mikromreže aktivni. Bez dostupnog solarnog panela, potrošači su izloženi većim zahtjevima za redukcijom opterećenja, što predstavlja izazov za održavanje stabilnosti elektroenergetskog sistema. Uvećani zahtjevi za korišćenje energije od strane javnog distributera ukazuju na značajan porast zavisnosti od glavne elektroenergetske mreže.



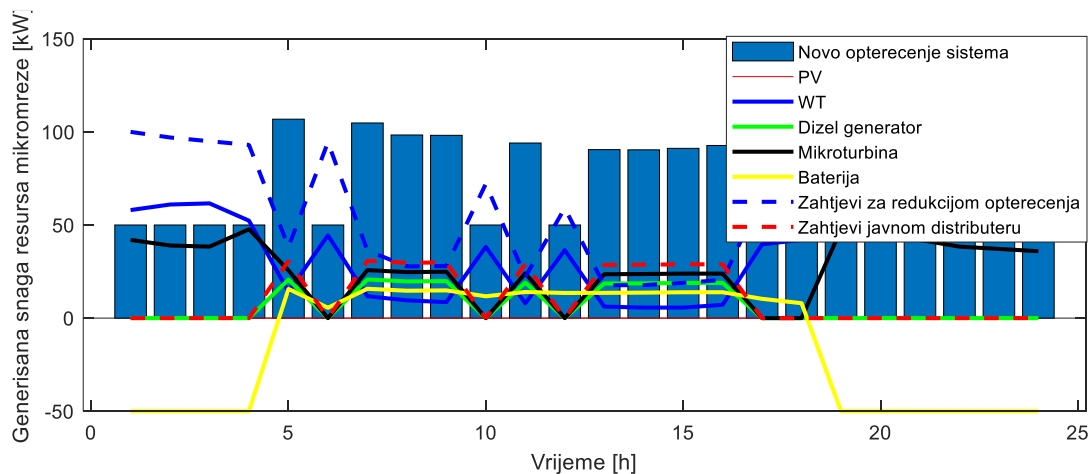
Slika 4.38. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom



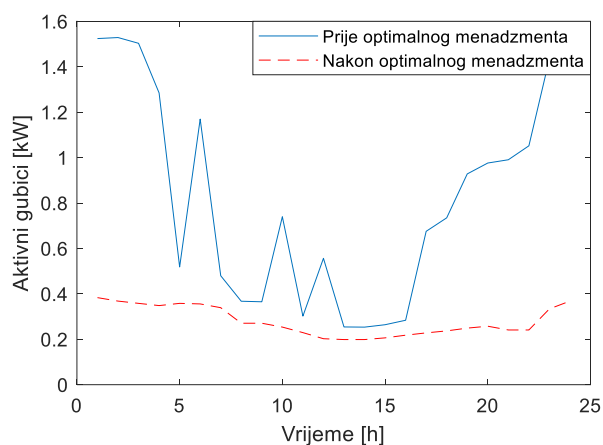
Slika 4.39. Korišćenje usluga javnog distributera

Analizom ukupnog angažmana pojedinačnih resursa mikromreže (Slika 4.40), jasno se ukazuje i na uvećanu potrebu za korišćenjem sistema za skladištenje energije. U odsustvu solarnih panela,

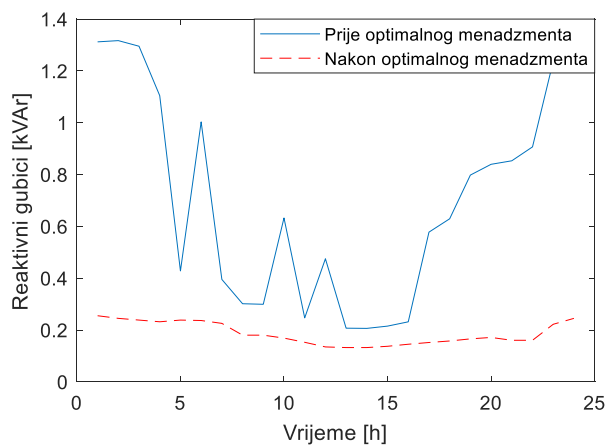
baterije su neprekidno angažovane, puneći se ili prazneći. Stalni angažman baterija proizlazi iz nedostupnosti upotrebe fotonaponskog panela, čime se povećava zavisnost od drugih izvora električne energije. Znači, odsustvo solarnog panela nameće zahtjeve za većim angažmanom ostalih resursa mikromreže, kako bi se zadovoljili energetske zahtjevi potrošača.



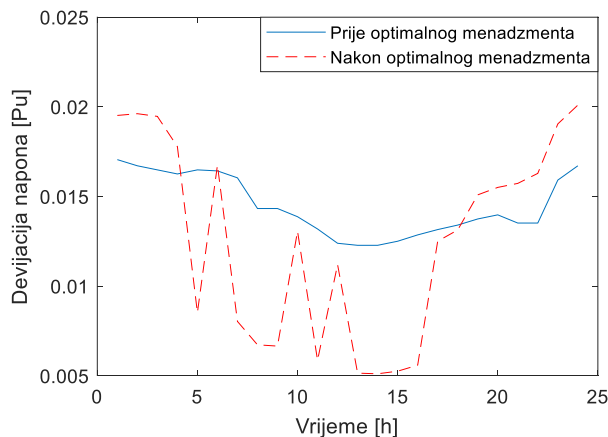
Slika 4.40. Uvid u proizvodnju aktivne snage angažmanom dostupnih resursa mikromreže



Slika 4.41. Grafik analize aktivnih gubitaka



Slika 4.42. Grafik analize reaktivnih gubitaka

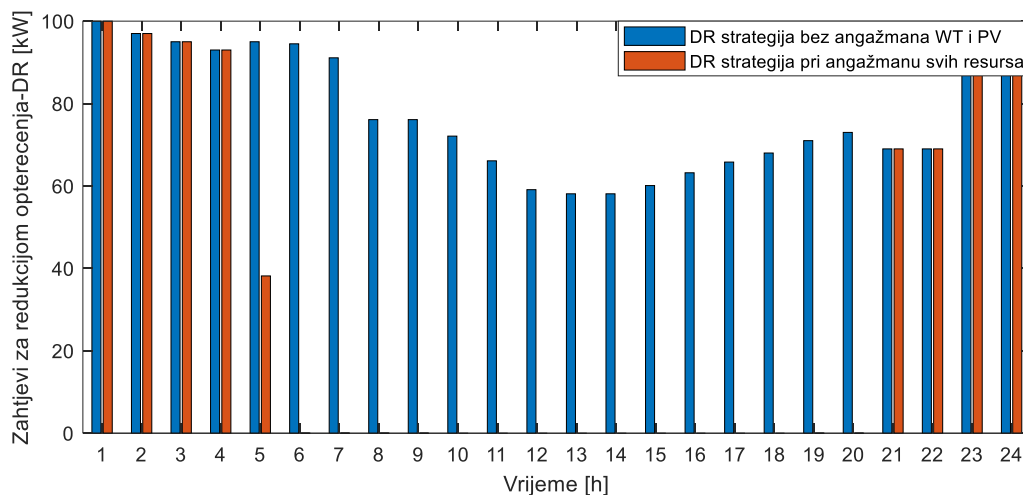


Slika 4.43. Grafik analize devijacije napona

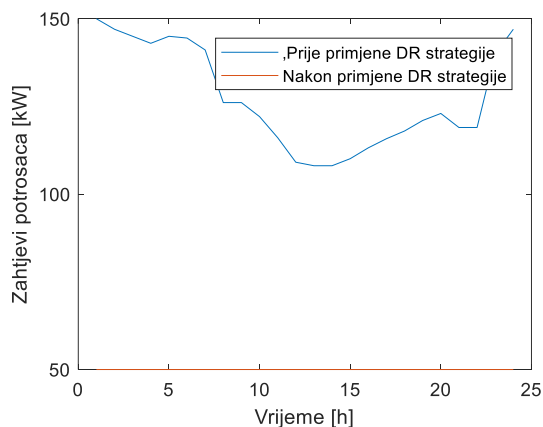
Posmatrajući slike koje se odnose na aktivne, reaktivne gubitke, kao i devijaciju napona u okviru sistema (Slika 4.41, Slika 4.42 i 4.43), zaključuje se da se postižu manji gubici u odnosu na situaciju kada mikromreža nije integrisani dio elektroenergetskog sistema. Uporedo sa tim, postiže se i smanjena devijacija napona, što za rezultat ima veću stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sistema. Ovaj zaključak potvrđuje važnost integracije mikromreže unutar elektroenergetskog sistema, čak i u uslovima kada njeni ključni resursi nijesu dostupni. Optimalnim smanjenjem gubitaka i devijacije napona poboljšava se efikasnost elektroenergetskog sistema, naglašavajući značajan doprinos kroz integraciju mikromreže.

4.6.4. Analiza rada mikromreže bez obnovljivih izvora energije

U ovoj sekciji analiziran je angažman mikromreže u situaciji u kojoj nije uključen rad obnovljivih izvora energije (vjetrogenerator i fotonaponski sistem). U takvim okolnostima zahtjev potrošačima za redukcijom opterećenja, odnosno DR strategija ima veliki uticaj na dinamiku sistema. Kroz ovakav pristup, postiže se značajno smanjenje ukupne potrošnje električne energije. Drugim riječima, ukoliko obnovljivi izvori energije nijesu dostupni kao aktivni resursi u okviru mikromreže, zahtjevi za redukcijom opterećenja, značajno se povećavaju, što je prikazano na slici 4.44. Promjene u opterećenju elektroenergetskog sistema prije i nakon primjene DR strategije, prikazane su na slici 4.45.

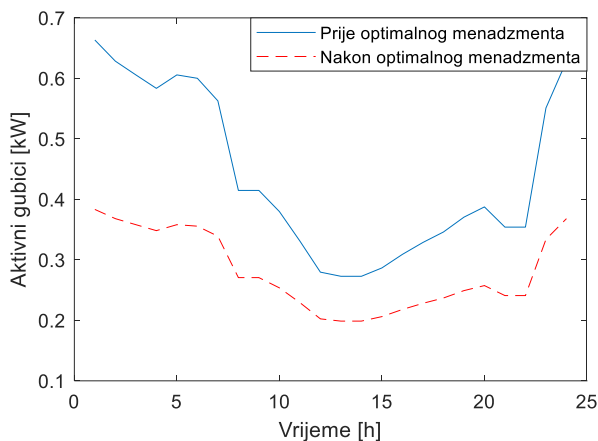


Slika 4.44. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom

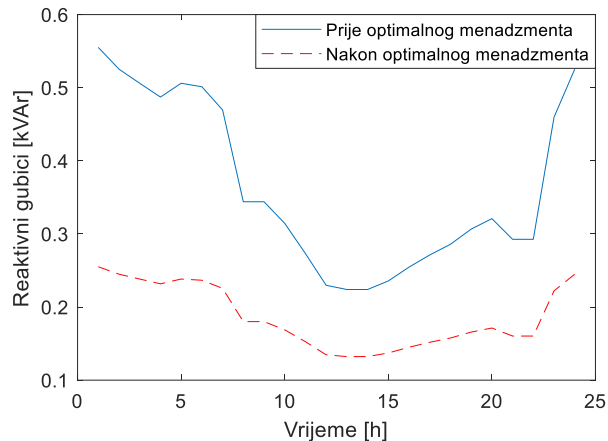


Slika 4.45. Zahtjevi potrošača prije i nakon DR

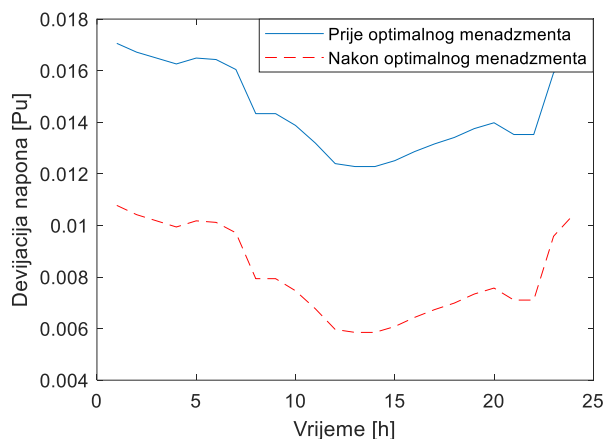
Iako se može uočiti da su gubici aktivne i reaktivne snage, kao i devijacija napona (Slika 4.46, Slika 4.47 i 4.48) ostali relativno nepromijenjeni u odnosu na situaciju u kojoj je ostvaren angažman svih resursa mikromreže, ključna je činjenica da je upravo DR strategija održala ove parametre unutar zadovoljavajućih granica.



Slika 4.46. Grafik analize aktivnih gubitaka



Slika 4.47. Grafik analize reaktivnih gubitaka



Slika 4.48. Grafik analize devijacije napona

Primjenom DR strategije nije postignuto samo smanjenje opterećenja već je na ovaj način i očuvana stabilnost sistema. Gubici i devijacija napona, iako nominalno isti, bili bi značajno veći bez primjene navedene strategije. Uvećani zahtjevi za smanjenjem opterećenja direktno doprinose održavanju energetske ravnoteže unutar mikromreže, sprečavajući potencijalno povećanje gubitaka i devijacije napona u sistemu.

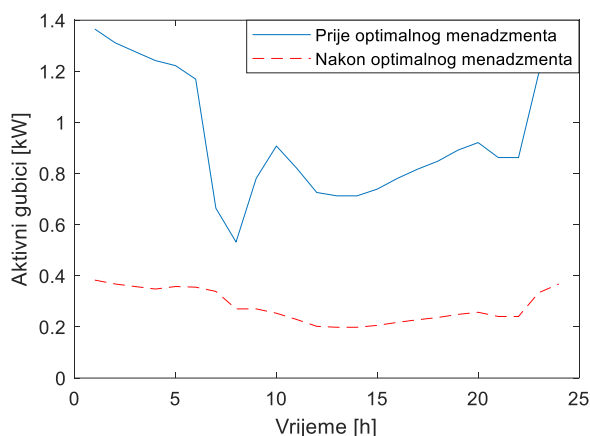
Dakle, ova analiza naglašava značajnu ulogu primjene DR strategije u situaciji u kojoj obnovljivi izvori energije nijesu dostupni. Potvrđuje se da je ovaj pristup upravljanja mikromrežom od suštinskog značaja za očuvanje njene funkcionalnosti, kao i za održavanje gubitka i devijacije napona u okviru zadovoljavajućih granica, uz istovremenu optimizaciju cijene troškova angažmana dostupnih resursa. Međutim, iako ovaj pristup održava relativnu stabilnost sistema, nosi sa sobom značajne nedostatke u poređenju sa situacijom u kojoj obnovljivi izvori energije aktivno učestvuju u proizvodnji električne energije. DR strategija, efikasno smanjuje ukupnu potrošnju električne energije, podstičući potrošače da redukuju svoje energetske potrebe tokom određenih vremenskih intervala. Ipak, istovremeno uvodi određena ograničenja u okviru fleksibilnosti upravljanja

potrošnjom, budući da potrošači moraju prilagoditi svoje aktivnosti i potrošnju prema zahtjevima DR strategije. Povećanje zahtjeva za redukcijom opterećenja ograničava sposobnost mikromreže u vidu proizvodnje zahtijevane energije. Umjesto toga, od potrošača se zahtijeva da redukuju opterećenje i prilagode ga proizvodnji energije u datim trenucima, što može biti nepovoljno s'obzirom na dinamiku energetskeg tržišta.

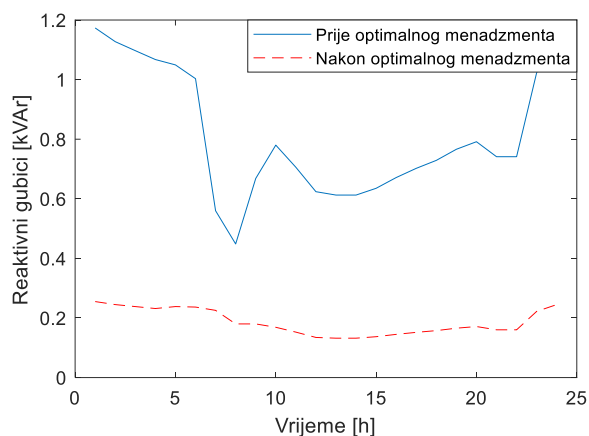
4.6.5. Analiza rada mikromreže bez baterije

U ovom segmentu istraživanja analiziran je rad mikromreže u situaciji u kojoj je baterija nedostupna kao aktivni resurs za proizvodnju i skladištenje električne energije.

U tom kontekstu, prikazan je uticaj nedostatka ovog mikromrežnog resursa na devijaciju napona, gubitke aktivne i reaktivne snage, kao i angažman ostalih resursa. U skladu sa tim, na slici 4.49 i 4.50, dati su gubici aktivne i reaktivne snage, dok je na slici 4.51 pružen uvid u devijaciju napona u okviru elektroenergetskog sistema.

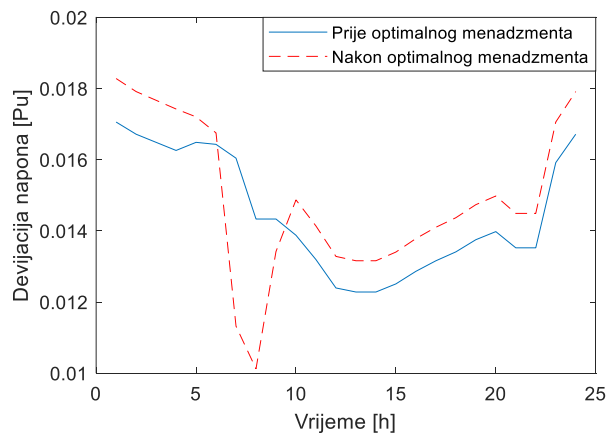


Slika 4.49. Grafik analize aktivnih gubitaka



Slika 4.50. Grafik analize reaktivnih gubitaka

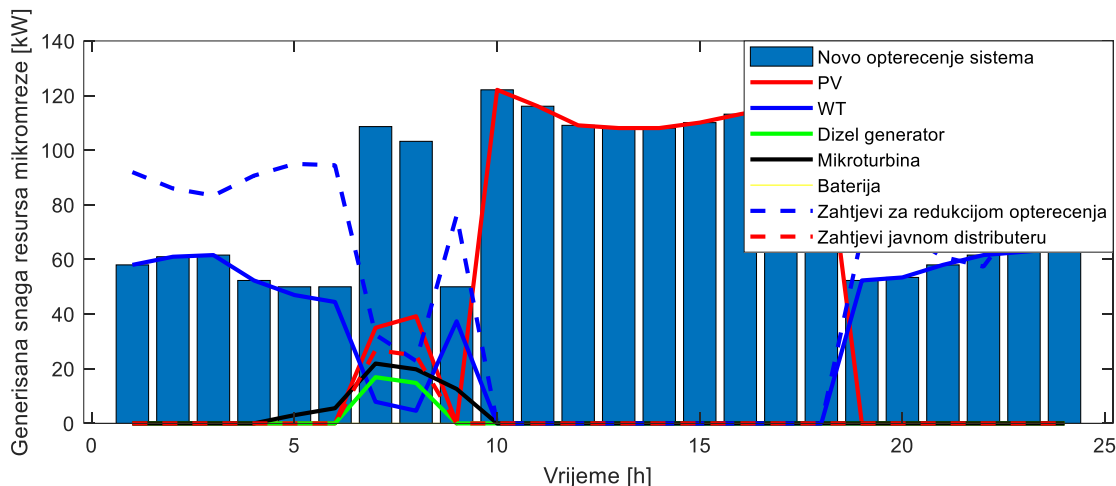
Analizirajući ove parametre sistema, uočava se smanjenje aktivnih i reaktivnih gubitaka usljed integracije mikromreže, čak i u situacijama u kojima nije moguće uključiti bateriju kao sistem za proizvodnju i skladištenje energije. Međutim, posmatrajući sliku koja ilustruje devijaciju napona u sistemu, uočava se njen porast u određenim vremenskim intervalima.



Slika 4.51. Grafik analize devijacije napona

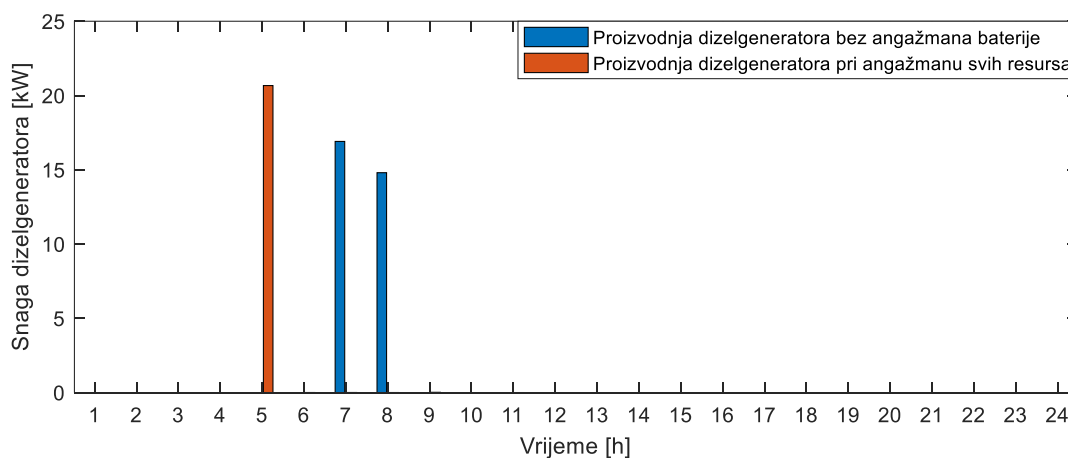
Baterije pružaju stabilnost, upravljajući frekvencijom, čime doprinose održavanju ravnoteže u sistemu. Njihovo odsustvo može uzrokovati manju fleksibilnost u reagovanju na fluktuacije u potrošnji i proizvodnji energije, čime se povećava devijacija napona. Uvećana devijacija napona ukazuje na izazove u održavanju stabilnosti sistema i naglašava važnost upotrebe baterije unutar mikromreže. Međutim, iako je u pojedinim trenucima devijacija napona uvećana i dalje ostaje unutar zadovoljavajućih granica, čime se potvrđuje ekonomska isplativost i tehnička opravdanost integracije mikromrežnog sistema.

Analiza individualnog doprinosa resursa unutar mikromreže u proizvodnji električne energije, prikazana je na slici 4.52.



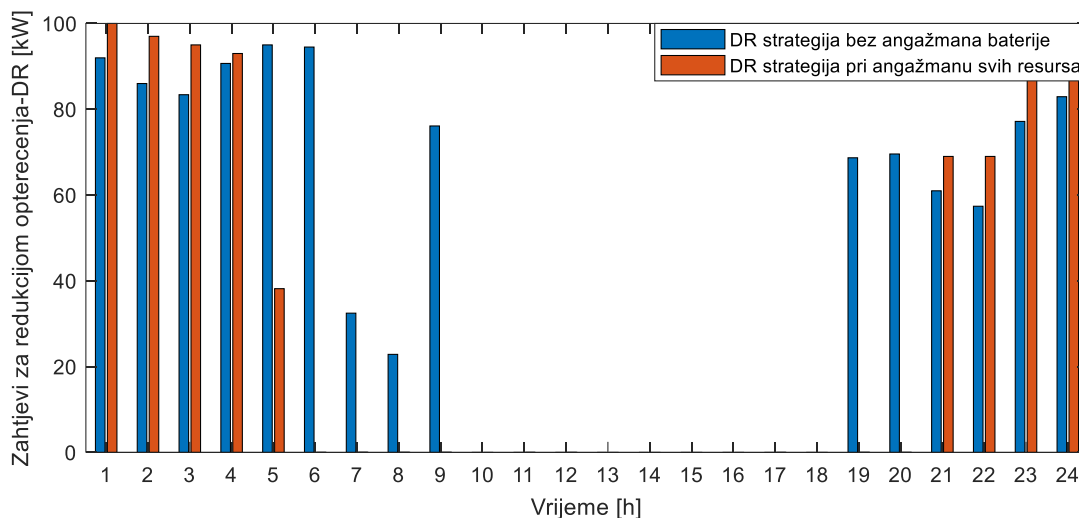
Slika 4.52. Uvid u proizvodnju aktivne snage angažmanom dostupnih resursa mikromreže

Posmatrajući sliku 4.53 na kojoj je prikazan angažman dizel generatora u ovakvim uslovima, primjećuje se njegov uvećan angažman, u poređenju sa situacijom kada su svi resursi mikromreže aktivni. Iako ovo uvećanje nije značajno, neophodno je u cilju održavanja stabilnosti i zadovoljenja energetske potreba potrošača.

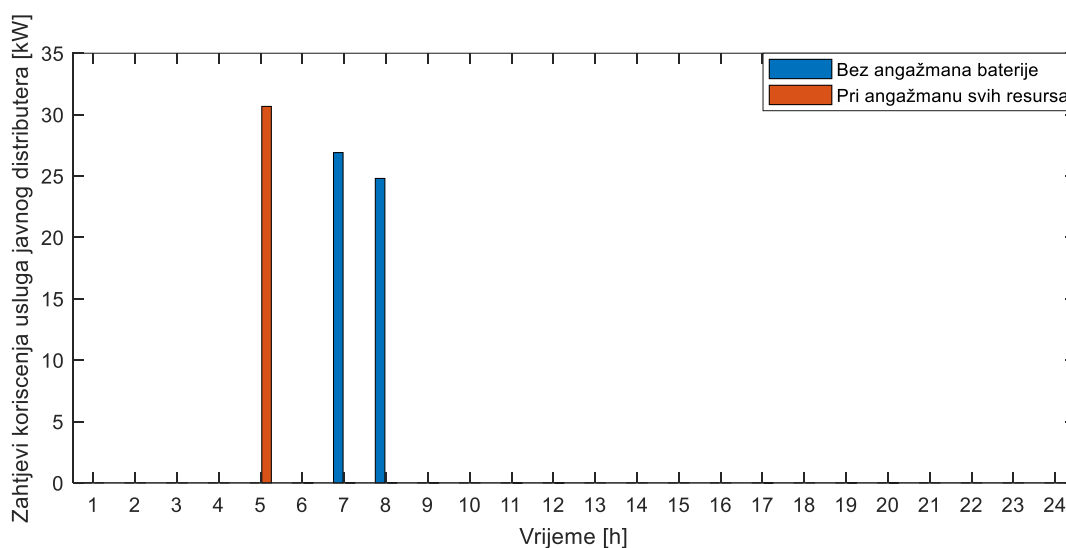


Slika 4.53 Generisana snaga dizelgeneratora

U ovoj situaciji, dolazi i do uvećanih zahtjeva potrošačima za redukcijom potrošnje električne energije, a uporedo sa tim i do uvećanih zahtjeva za korišćenjem usluga javnog distributera (Slika 4.54 i 4.55).



Slika 4.54. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom



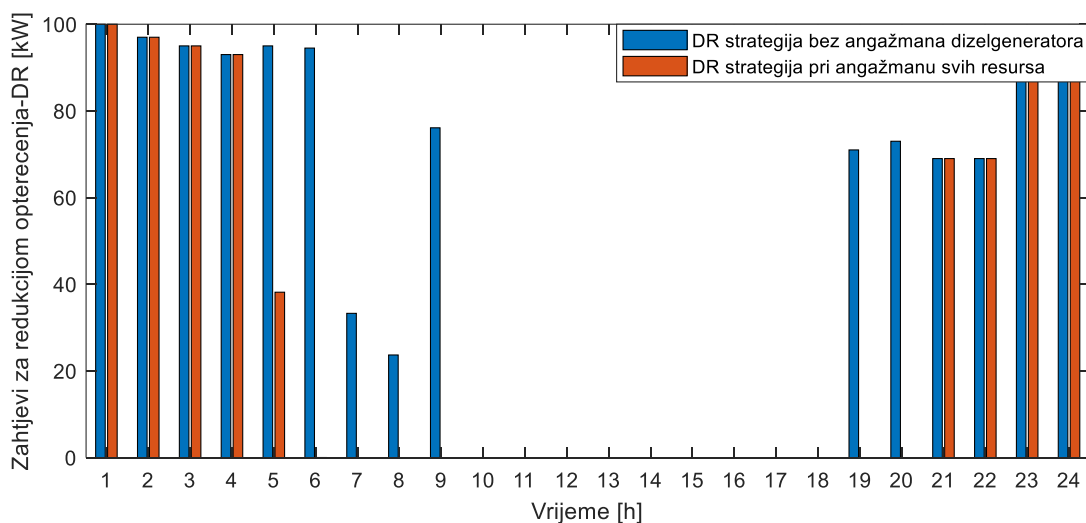
Slika 4.55. Korišćenje usluga javnog distributera

Uvećana potreba za preuzimanjem energije od glavne elektroenergetske mreže, dovodi do neefikasnosti u ostvarivanju samostalnog rada mikromreže. Koncept mikromreže osmišljen je sa ciljem postizanja autonomije, odnosno smanjenja zavisnosti od glavnog elektroenergetskog sistema. Međutim, kako zahtjevi za korišćenjem električne energije od strane javnog distributera nijesu značajno porasli, opravdanost koncepta mikromreže i u ovakvim situacijama postaje očigledna.

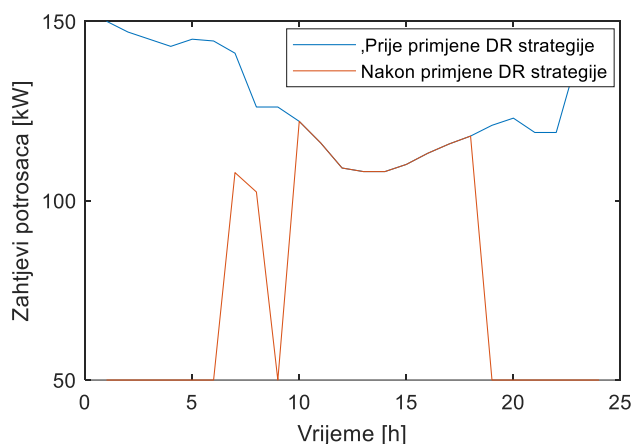
Na kraju, zaključuje se da odsustvo baterije kao dostupnog resursa u mikromreži ima najveći uticaj na devijaciju napona, što može potencijalno izazvati nestabilnost u elektroenergetskom sistemu. Uzimajući u obzir činjenicu da uvećana devijacija napona postavlja izazove u održavanju stabilnosti i efikasnosti sistema, ističe se značaj implementacije baterija u okviru mikromreže.

4.6.6. Analiza rada mikromreže koji isključuje angažman dizelgeneratora

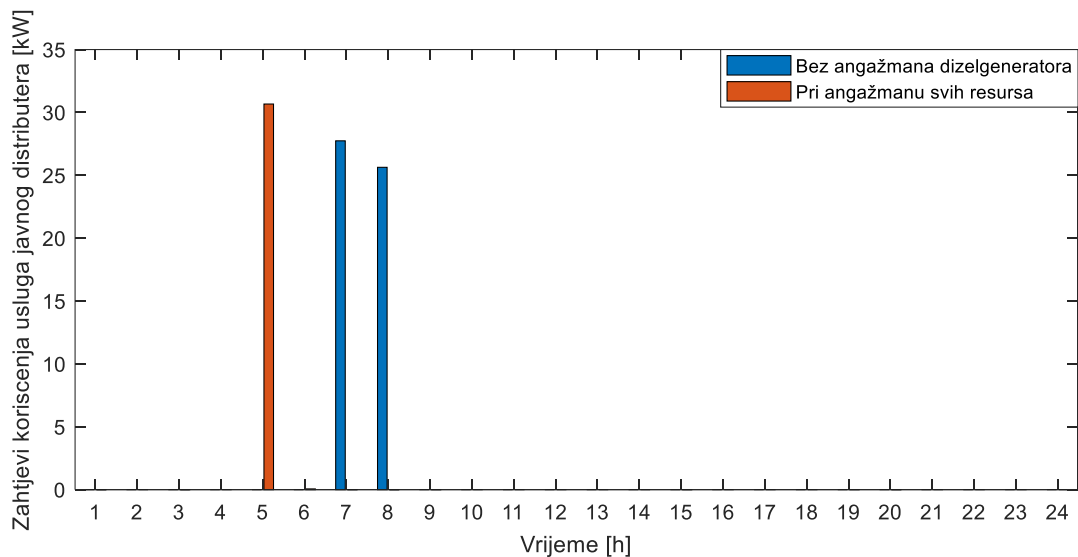
U ovoj sekciji analiziran je rad mikromreže u situaciji u kojoj je dizel generator isključen kao dostupan resurs mikromreže. Akcentat je stavljen na minimizaciju troškova angažmana ostalih dostupnih resursa, analizirajući uporedo promjene u zahtjevima za redukcijom opterećenja (Slika 4.56 i 4.57) kao i zahtjevima korišćenja usluga javnog distributera električne energije (Slika 4.58). Posmatrajući navedene grafike, uočava se uvećanje zahtjeva za redukcijom opterećenja, što predstavlja izazov za potrošače, naročito ukoliko se uzmu u obzir fluktuacije u proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Međutim, treba naglasiti da se ovakvim konceptom anagažmana mikromreže i dalje postiže pouzdano snabdijevanje potrošača električnom energijom, a istovremeno se i minimizuje cijena njenog angažmana.



Slika 4.56. Zahtjevi za smanjenom potrošnjom



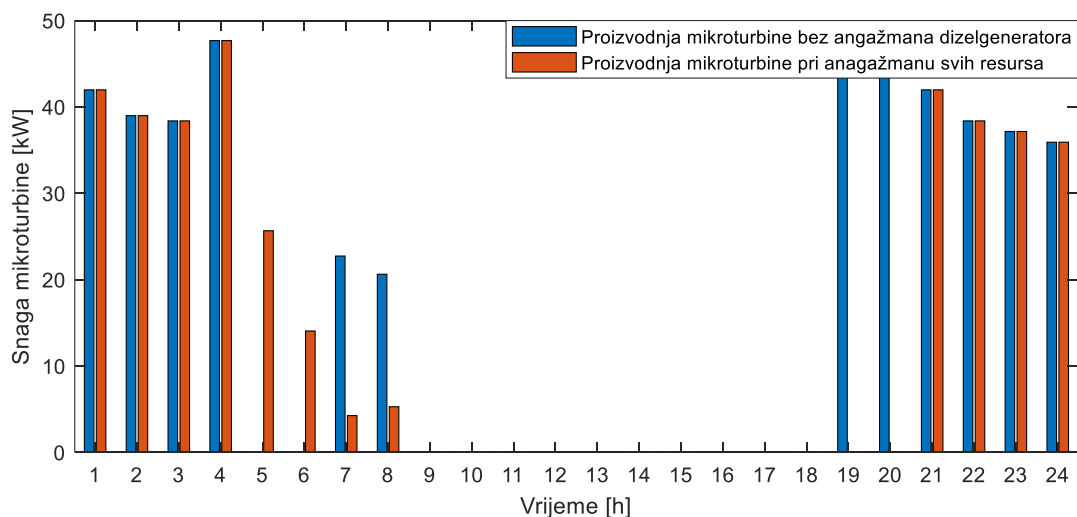
Slika 4.57. Zahtjevi potrošača prije i nakon DR



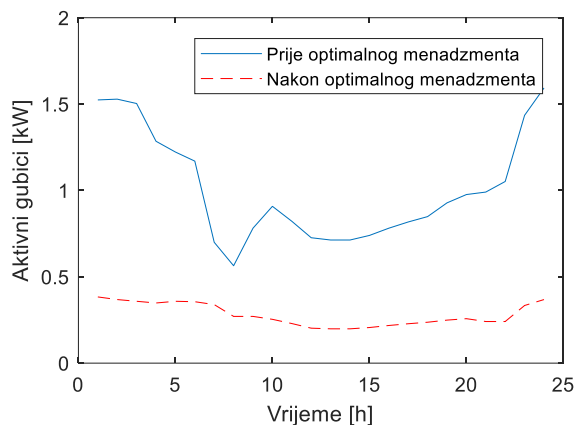
Slika 4.58. Korišćenje usluga javnog distributera

Osim toga, nedostatak dizel generatora, dovodi i do povećane zavisnosti mikromreže od usluga javnog distributera električne energije. U takvoj situaciji mikromreža intenzivnije koristi glavnu elektroenergetsku mrežu kako bi se zadovoljile potrebe potrošača, a istovremeno i održala stabilnost sistema (u poređenju sa situacijom kada su svi njeni resursi aktivni). Ovo predstavlja izazov u ostvarivanju samostalnosti rada mikromreže.

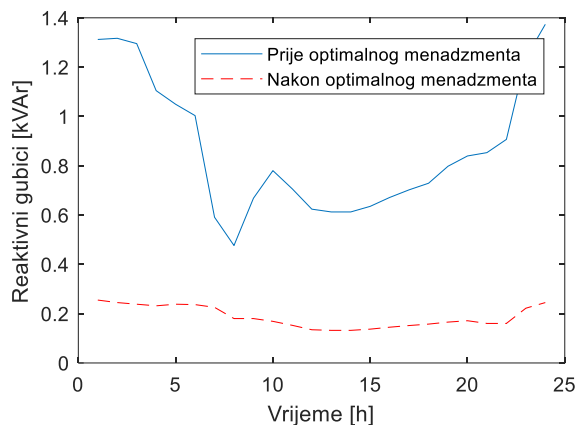
Posmatrajući grafik na slici 4.59, uočeno je da se povećava i angažman mikroturbine u cilju proizvodnje zahtijevane električne energije. Iako je mikroturbina pouzdan izvor za proizvodnju električne energije, njen uvećan angažman može rezultirati većom potrošnjom goriva i operativnim troškovima. Uprkos tome, ova strategija pokazala se najefikasnijom, u okviru ekonomskog aspekta angažmana mikromreže.



Slika 4.59. Proizvedena snaga mikroturbine



Slika 4.60. Grafik analize aktivnih gubitaka



Slika 4.61. Grafik analize reaktivnih gubitaka

Daljom analizom ustanovljeni su smanjeni aktivni i reaktivni gubici u sistemu (Slika 4.60 i 4.61), u poređenju sa situacijom kada mikromreža nije integrisani dio sistema, čime se doprinosi ukupnoj efikasnosti sistema. Iako se u ovoj situaciji suočavamo sa uvećanim zahtjevima za redukcijom opterećenja, a istovremeno i sa većom zavisnošću od usluga javnog distributera, smanjenje gubitaka aktivne i reaktivne snage predstavlja ključne benefite, kojima se opravdava integracija mikromreže unutar elektroenergetskog sistema.

Analizom prethodno navedenih scenarija, gdje je simuliran rad različitih konfiguracija mikromreže u različitim vremenskim uslovima, zaključuje se da se upotrebom genetičkog algoritma može ostvariti optimalna konfiguracija mikromreže u smislu efikasnog angažmana njenih dostupnih resursa. Time se postiže pouzdano snabdijevanje električnom energijom potrošača uz minimizaciju troškova njenog angažmana. Najbolji slučaj angažmana mikromreže s'obzirom na gubitke i devijaciju napona jeste situacija u kojoj su svi resursi mikromreže angažovani. Međutim, usljed promjenljivih uslova i fluktuacija u obnovljivim izvorima energije, može doći do rekonfiguracije rada mikromreže. Čak i u takvim situacijama, primjenom genetičkog algoritma može se postići optimalan angažman resursa uz istovremenu minimizaciju troškova i održavanje devijacije napona i gubitaka unutar sistema, u okviru optimalnih granica. Ovim se opravdava integracija mikromreža u okviru elektroenergetskog sistema.

Važno je napomenuti da se pri nepotpunom angažmanu resursa mikromreže povećavaju zahtjevi potrošačima za redukcijom opterećenja, što nije poželjno zbog održivosti sistema. Takođe, povećavaju se i zahtjevi za korišćenjem usluga javnog distributera, čime se utiče na veću zavisnost od glavne elektroenergetske mreže. S'toga je važno smanjiti ove zahtjeve koliko god je to moguće i osigurati da ne budu trajni ili česti. Primjenom genetičkog algoritma svi ovi aspekti su zadovoljeni, uz ispunjenje ključnog kriterijuma - održavanje devijacije napona na što nižoj vrijednosti i maksimalno smanjenje gubitaka u sistemu, uz istovremenu minimizaciju troškova angažmana dostupnih resursa mikromreže.

ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju, sprovedena je identifikacija optimalnih strategija upravljanja mikromrežom primjenom genetičkog algoritma. Kroz ovaj pristup postignuta je optimalna konfiguracija mikromreže, unutar koje je ostvarena efikasna proizvodnja električne energije svakog od njenog resursa, u cilju obezbjeđivanja pouzdanog i ekonomičnog snabdijevanja električnom energijom. Uporedo sa tim, ostvarena je minimizacija devijacije napona, kao i smanjenje aktivnih i reaktivnih gubitaka. Ovi rezultati jasno potvrđuju validnost primjene genetičkog algoritma za postizanje optimalnog upravljanja u kontekstu mrežno povezane mikromreže. Drugim riječima, zaključuje se da upotreba genetičkog algoritma za optimizaciju mikromreže predstavlja inovativan pristup, čime se postiže efikasno upravljanje resursima. Identifikovane optimalne strategije upravljanja resursima, koji obuhvataju solarni panel, vjetrogenerator, mirkoturbinu, bateriju i dizel generator, pružile su detaljan uvid u njihov međusobni uticaj i doprinos ukupnoj efikasnosti sistema. Ova metoda ne samo da obezbjeđuje optimizaciju proizvodnje električne energije, već i ukazuje na optimalno korišćenje različitih izvora energije u mikromreži, što predstavlja značajan doprinos u razvoju održivih energetske rješenja.

Dalje, sprovedena je temeljna analiza različitih konfiguracija mrežno povezane mikromreže, obuhvatajući prisustvo ili odsustvo njenih resursa, poput solarnog panela, vjetrogeneratora, baterije i dizel generatora. Ova analiza sprovedena je sa ciljem detaljne procjene doprinosa svakog od elemenata unutar mikromreže. Uporedo sa tim, vršena je i analiza uticaja različitih vremenskih uslova na performanse mikromreže, pružajući dublji uvid u optimizaciju proizvodnje svakog elementa mikromreže, kako bi se osiguralo pouzdano snabdijevanje električnom energijom tokom jednog dana.

U procesu optimizacije troškova korišćenja elemenata mikromreže, uzeti su u obzir i troškovi prilagođavanja trenutne potrošnje električne energije od strane potrošača, kao i troškovi zahtjeva za korišćenjem električne energije od strane javnog distributera, ukoliko je potrebno. Rezultati simulacija ukazuju da pri niskim brzinama vjetra (brzinama vjetra ispod $8 \frac{m}{s}$), zahtjevi potrošačima za smanjenjem proizvodnje se značajno povećavaju. Ovi zahtjevi ključni su za očuvanje devijacije napona unutar zadovoljavajućih granica, kao i za smanjenje aktivnih i reaktivnih gubitaka unutar sistema, uz istovremeno ekonomično korišćenje mikromreže. Drugim riječima, ovim načinom optimizacije, postiže se pozitivan doprinos mikromreže u kontekstu smanjenja gubitaka i održavanja kvaliteta napona, čak i u situacijama u kojima vjetrogenerator nije angažovan. U situacijama u kojima nema radijacije sunčevog zračenja, fotonaponski sistem postaje nedostupan kao ključni element mikromreže. U takvim scenarijima, rezultati simulacija naglašavaju nagli porast angažmana ostalih resursa mikromreže. Istovremeno, primijećen je i značajan porast zahtjeva potrošačima za smanjenjem opterećenja kako bi se očuvala devijacija napona unutar optimalnih granica, uz istovremenu minimizaciju gubitaka i osiguranje ekonomske isplativosti integracije mikromreže.

Rezultati takođe ukazuju i na ključnu ulogu obnovljivih izvora energije u smanjenju devijacije napona, aktivnih i reaktivnih gubitaka. Na kraju, zaključuje se da je u situacijama kada obnovljivi izvori energije nijesu dostupni, potrebno povećati zahtjeve potrošačima za smanjenjem opterećenja, jer u suprotnom postoji realna opasnost od porasta devijacije napona i gubitaka u sistemu, što bi ozbiljno ugrozilo vjerodostojnost integracije mikromreža. Međutim dugoročni zahtjevi potrošačima za redukcijom opterećenja, doveli bi do ekonomske neisplativosti integracije mikromreže, s'obzirom na konstantnu potrebu za smanjenjem opterećenja. Usklađivanje sa povremenim, manjim zahtjevima za redukcijom opterećenja potrošačima, predstavlja održiv pristup. Ovom strategijom se obezbjeđuje prilagođavanje potrošnje električne energije, bez nametanja nepotrebnog i konstantnog tereta potrošačima, što doprinosi ravnoteži između zadovoljstva potrošača i efikasnosti energetskeg sistema. U scenarijima u kojima se baterije, kao dostupan resurs mikromreže ukidaju, analizom rezultata primjećuje se uvećana devijacija napona. S'tim u vezi zaključuje se da baterije, kao sistemi za skladištenje energije, igraju ključnu ulogu u stabilizaciji sistema i održavanju ravnoteže putem regulacije frekvencije. Njihovo odsustvo može uzrokovati manju fleksibilnost u reagovanju na fluktuacije u potrošnji i proizvodnji energije. Rezultati simulacija ukazuju i na važnost integracije tradicionalnih izvora energije, koji uključuju dizelgenerator i mirkoturbinu unutar mikromreže. U situacijama, gdje se tradicionalni izvori energije isključuju iz angažmana, bilježi se nagli porast zahjeva za korišćenjem dijela električne energije od strane javnog distributera, čime se umanjuje efikasnost i autonomija mikromreže.

Ovim istraživanjem doprinosi se evoluciji naprednih strategija za upravljanje električnom energijom u mikromrežama, čime se postiže optimizacija održivosti i pouzdanosti u savremenim elektroenergetskim sistemima. Analize simulacija, sprovedene u okviru istraživanja, produbljuju razumijevanje dinamike mikromreža i ističu benefite njihove integracije unutar elektroenergetskih sistema. Postepeno uklanjanje pojedinačnih komponenti mikromreže, usljed različitih vremenskih uslova, ne samo da je doprinijelo identifikaciji kritičnih tačaka sistema, već je i omogućilo detaljno sagledanje dinamike sistema, pružajući uvid u njegovu fleksibilnost i adaptivnost.

Posebna pažnja posvećena je važnosti mikromreža u ruralnim okruženjima, gdje su ekonomska isplativost, pouzdanost i održivost ključni faktori. Ovim istraživanjem naglašeno je da mikromreže ne samo da zadovoljavaju osnovne energetske potrebe zajednica, već i stvaraju šire mogućnosti za socioekonomski napredak. Na kraju, primjenom genetičkog algoritma (GA) identifikovane su optimalne konfiguracije mikromreže, sa ciljem minimizacije troškova njihovog angažmana, osiguravajući istovremeno pouzdano i efikasno snabdijevanje potrošača. Time se ostvaruje značajan doprinos razvoju održivih i efikasnih rješenja, prilagođenih savremenim izazovima u sektoru elektroenergetike.

Buduća istraživanja u oblasti mikromreža mogla bi se usmjeriti na unaprjeđenje genetičkog algoritma (GA) kako bi se povećala preciznost i brzina optimizacije, što uključuje proučavanje različitih varijacija GA. Takođe, istraživanje bi se moglo proširiti na uključivanje dodatnih faktora, kao što su ekološki uticaji i optimizacija u realnom vremenu. Integracija ovih faktora omogućila bi dublje razumijevanje mikromreža. Na kraju, fokus budućih istraživanja može biti na praktičnoj implementaciji teorijskih zaključaka, što uključuje dizajn i implementaciju mikromreža u stvarnim uslovima. Ovo bi omogućilo provjeru primjenjivosti rezultata u realnom svijetu i dalji napredak u oblasti energetske efikasnosti i održivosti.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] A. Hirsch, Y. Parag, J. Guerrero, "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 90, July 2018, Pages 402-411.
- [2] F. Canziani, Ó. Melgarejo, "Design and Implementation of Rural Microgrids", in: A. Zambroni de Souza, M. Castilla, "Microgrids Design and Implementation", pp. 477-504, 2019.
- [3] A.H. Hubble, T.S. Ustun, "Composition, placement, and economics of rural microgrids for ensuring sustainable development", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2017.
- [4] M. Shahbazitabar, H. Abdi, H. Nourianfar, A. Anvari-Moghaddam, B. Mohammadi-Ivatloo, N.Hatziargyriou, "An Introduction to Microgrids, Concepts, Definition, and Classifications" in: A. Anvari-Moghaddam, H. Abdi, B. Mohammadi-Ivatloo, N.Hatziargyriou "Microgrid-Advances in operation, control and protection", pp 3-16.
- [5] A. Dubey, "Load flow analysis of power systems", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 5, May-2016.
- [6] S. Gaya, O. Sokunbi, I. O. Habiballa, "Recent Review On Load/power Flow Analysis", *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 11, Issue 12, December-2020.
- [7] J. A. May Alvarez, I. G. Zurbriggen, F. Paz and M. Ordonez, "Microgrids Multiobjective Design Optimization for Critical Loads" in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 1, pp. 17-28, Jan. 2023.
- [8] K. Gao, T. Wang, C. Han, J. Xie, Y. Ma, R. Peng, "A Review of Optimization of Microgrid Operation", *Special Issue Advanced Analytics in Renewable Energy*, 14 May 2021.
- [9] C.Gamarra, J. M. Guerrero, "Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 48, August 2015, Pages 413-424.
- [10] G. S. Thirunavukkarasu, M. Seyedmahmoudian, E. Jamei, B. Horan, S. Mekhilef, A. Stojcevski, "Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review", *Energy Strategy Reviews*, Volume 43, September 2022.
- [11] Q. Deng, X. Gao, H. Zhou and W. Hu, "System modeling and optimization of microgrid using genetic algorithm," *2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, Harbin, China, 2011, pp. 540-544.

- [12] T. Adefarati, S. Potgieter, R. C. Bansal, R. Naidoo, R. Rizzo and P. Sanjeevikumar, "Optimization of PV - Wind-Battery Storage Microgrid System Utilizing a Genetic Algorithm," 2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Otranto, Italy, 2019, pp. 633-638.
- [13] F.H. Aghdam, M. Abapour, "Reliability and cost analysis of multistage boost converters connected to PV panels", IEEE J. Photovolt. 6(4), 981–989, 2016.
- [14] Virginia Tech, "Introduction to Distributed Generation", 2007.
- [15] Electric Power Research Institute, Jan 1998, web.stranica: <http://www.epri.com/gg/newgen/disgen/index.html>.
- [16] T. Ackermann, G. Andersson, L. Soder, "Distributed generation: a definition. Electr. Power Syst.", *Rez.* 57(3), 195–204, 2001.
- [17] M.T. Hagh, F.H. Aghdam, "Smart hybrid nanogrids using modular multiport power electronic Interface", IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), pp. 618–623, 2016.
- [18] F.H. Aghdam, M.T. Hagh, M. Abapour, "Reliability evaluation of two-stage interleaved boost converter interfacing PV panels based on mode of use", 7th IEEE Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), pp. 409–414, 2016.
- [19] Federal Energy Regulatory Commission, Federal Energy Regulatory Commission Assessment of Demand Response & Advanced Metering, Staff Report and Excel Data, 29 Dec 2008.
- [20] M.S. Saleh, A. Althaibani, Y. Esa, Y. Mhandi, A.A. Mohamed, "Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts", IEEE International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), pp. 195–200, 2015.
- [21] Smart Grids, ETP Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future, European Commission, 2006.
- [22] F.H. Aghdam, S. Ghaemi, N.T. Kalantari, "Evaluation of loss minimization on the energy management of multi-microgrid based smart distribution network in the presence of emission constraints and clean productions", Volume 196, pp. 185-201, 20 September 2018.
- [23] F.H. Aghdam, J.Salehi, S.Ghaemi, "Assessment of power flow constraints impact on the energy management system of multi-microgrid based distribution network", *Journal of Energy Management and Technology (JEMT)* Vol. 2, Issue 3, pp. 31–41, 2018.
- [24] A. Maitra, "Microgrid controllers: expanding their role and evaluating their performance", *IEEE Power and Energy Magazine*, Volume: 15, Issue: 4, pp. 41–49, July-Aug. 2017.
- [25] E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir, R. Perez, "Microgrid testbeds around the world: state of art", *Energy Convers. Manag.* pp. 132–153, 2014.
- [26] E. Kabalci, Y. Kabalci, "SmartGrids and Their Communication Systems", Springer, Berlin, 2018.
- [27] T.S. Basso, R.D. DeBlasio, "IEEE P1547-Series of Standards for Interconnection", pp. 556–561, September 2003.

- [28] C. Keles, B.B. Alagoz, M. Akcin, A. Kaygusuz, A. Karabiber, “A photovoltaic system model for Matlab/Simulink simulations”, IEEE Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), pp. 1643–1647, 2013.
- [29] S. Nema, R. Nema, G. Agnihotri, “Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification”, Int. J. Energy Environ., Volume 1, Issue 3, 2010 pp.487-500, 2010.
- [30] F.H. Aghdam, M.T. Hagh, “Security Constrained Unit Commitment (SCUC) formulation and its solving with Modified Imperialist Competitive Algorithm (MICA)”, J. King Saud Univ. Eng.Sci., 2017.
- [31] F.A. Farret, M.G. Simoes, “Integration of Alternative Sources of Energy”, Wiley-IEEE Press, 2006
- [32] F. Blaabjerg, Z. Chen, S.B. Kjaer, “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems”, IEEE Trans. Power Electron. Volume: 19, Issue: 5, pp.1184–1194, September 2004.
- [33] H. Xu, L. Kong, X. Wen, “Fuel cell power system and high power DC-DC converter”, IEEE Trans. Power Electron. Volume: 19, Issue: 5, pp.1250–1255, 2004.
- [34] F.H. Aghdam, J. Salehi, S.Ghaemi, “Contingency based energy management of multi-microgrid based distribution network”, Sustain. Cities Soc. 41, pp. 265–274, 2018.
- [35] S. Eckroad, I. Gyuk, “EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications”, Electric Power Research Institute, Inc., pp. 3–35, 2003.
- [36] Nikos D. Hatziargyriou, “Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids”, January 2004.
- [37] F. Xavier, B. Llavall, “Reliability Worth Assessment of Radial System With Distributed Generation”, Illinois Institute of Technology, 2011.
- [38] R. Almasri, “Advanced CSP Teaching Materials”, Chapter 13, Electrical Power Transmission, 2011.
- [39] CA Warren, “Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices”, IEEE, 2003.
- [40] V.K. Mehta and R. Mehta, “Principles of Power System”, 2011.
- [41] Y. Latreche, H.R.E.H. Bouchekara, K. Naidu, H. Mokhlis, W.M. Dahalan, “Comprehensive Review of Radial Distribution Test Systems”, June 2020.
- [42] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989.
- [43] T. Tewari, A. Mohapatra, and S. Anand, “Coordinated control of oltc and energy storage for voltage regulation in distribution network with high pv penetration”, IEEE Trans. Sustain. Energy, pp. 1–1, 2020.

- [44] Baran ME, Wu FF, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, *Power Deliv IEEE Trans* 4:1401–1407, 1989a.
- [45] J.H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975; re-issued by MIT Press 1992.
- [46] K. F. Man, K.S. Tang, S. Kwong, “Genetic Algorithms: Concepts and Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No.5, October 1996.
- [47] L. Haldurai, T. Madhubala, R. Rajalakshmi, “A Study on Genetic Algorithm and its Applications”, *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, Vol-4, Issue-10, ISSN-2347-2693.
- [48] Immanuel Savio D., Udit Kr. Chakraborty, “Genetic Algorithm : An Approach on Optimization”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 2019.
- [49] C.R. Reeves, “Genetic algorithms for the Operations Researcher”, *INFORMS Journal on Computing*, 9, 231–250, 1997.
- [50] Michel Gendreau, Jean-Yves Potvin, “Handbook of Metaheuristics”, pp. 109-139, 2009.
- [51] C.R. Reeves “Using genetic algorithms with small populations”, *Proceedings of 5th International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 92–99. 1993.
- [52] M.D. Vose “ Modeling simple genetic algorithms”, in L.D. Whitley (ed.), “Foundations of Genetic Algorithms 2”, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 63–73, 1 June 1993.
- [53] J. Rees and G.J. Koehler “An investigation of GA performance results for different cardinality alphabets”, in L.D. Davis, K. DeJong, M.D. Vose and L.D. Whitley (eds.), “Evolutionary Algorithms”, *IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, Vol. 111. Springer-Verlag, New York, 191–206, 1999.
- [54] A. Kapsalis, G.D. Smith and V.J. Rayward-Smith “Solving the graphical steiner tree problem using genetic algorithms”, *Journal of Operational Research Society*, 44, 397–106, 1993.
- [55] D. Levine “GAs: A practitioner’s view”, *INFORMS Journal on Computing*, 9, 256–257, 1. August 1997.
- [56] L. Davis, “Handbook of Genetic Algorithms”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [57] J.E. Baker, “Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 14–21, 1987.
- [58] S.L. Lohr, “Sampling: Design and Analysis”, Duxbury Press, Pacific Grove, CA, 1999.
- [59] P.J.B. Hancock, “An empirical comparison of selection methods in evolutionary algorithms”, T.C. Fogarty (ed.), *Evolutionary Computing: AISB Workshop*, Leeds, UK, April 1994; *Selected Papers*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 80–94, 1994.

- [60] D.E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1988.
- [61] L.J. Eshelman, R.A. Caruana and J.D. Schaffer, “Biases in the crossover landscape”, Proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms, George Mason University, Fairfax, Virginia, USA, June 1989.
- [62] K. A. De Jong and W.M. Spears, “A formal analysis of the role of multi-point crossover in genetic algorithms”, *Annals of Maths. and AI*, 5, pp. 1–26, 1992.
- [63] L.B. Booker “Improving search in genetic algorithms”, in L. Davis (ed.), “Genetic Algorithms and Simulated Annealing”, Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, pp. 61–73, 1987.
- [64] D.E. Goldberg and R. Lingle, “Alleles, loci and the traveling salesman problem”, in J.J. Grefenstette (ed.), “Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications”, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, pp. 154–159, 1985.
- [65] H.J. Bremermann, J. Rogson and S. Salaff, “Global properties of evolution processes”, In H.H. Pattee (ed.), “Natural Automata and Useful Simulations”, pp. 3–42, 1964.
- [66] D.B. Fogel “An overview of evolutionary programming”, in L.D. Davis, K. DeJong, M.D. Vose and L.D. Whitley (eds.), “Evolutionary Algorithms: IMA Volumes in Mathematics and its Applications”, Vol. 111. Springer-Verlag, New York, pp. 89–109.
- [67] T.C. Fogarty (1989) “Varying the probability of mutation in the genetic algorithm”, Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, pp. 104–109, December 1989.
- [68] K.A. De Jong “An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems”, Doctoral dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [69] L. Davis, “Handbook of Genetic Algorithms”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [70] N.J. Radcliffe and F.A.W. George “A study in set recombination”, Proceedings of 5th International Conference on Genetic Algorithms. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 23–30, 1993.
- [71] S. McKee and M.B. Reed “An algorithm for the alignment of gas turbine components in aircraft”, *IMA J Mathematics in Management*, pp. 133–144, 1987.
- [72] N.J. Radcliffe and P. Surry “Formae and the variance of fitness”, 1995., in D. Whitley and M. Vose (eds.), “Foundations of Genetic Algorithms 3”, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp. 51–72.
- [73] P. Ross, “Genetic Algorithms Digest”, 1997.
- [74] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery, “Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing”, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
- [75] Zhang, Y., Li, C., Ma, H., “Research on energy scheduling of multimicrogrid based on optimal path”, *Distrib. Energy* vol.7, no.5, pp. 1–8, 2022.

- [76] Faisal A. Mohamed, H. N Koivo, “Modelling and Environmental/Economic Power Dispatch of Micro Grid Using MultiObjective Genetic Algorithm Optimization”, in In book: “Fundamental and Advanced Topics in Wind Power”, 2011.
- [77] Chedid R., Akiki H., Rahman, S.,(March ,1998) “A Decision Support Technique For The Design Of Hybrid Solar- Wind Power Systems”, IEEE Transaction on Energy Conversion., Vol. 13, No. 1, pp.76-83, 1, March 1998.
- [78] Gavanidou E. S., Bakirtzis A. G, “Design of a Stand Alone System with Renewable Energy Sources using Trade off Methods”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1 pp. 42-48, March 1992.
- [79] Lasnier, F. and Ang, T. G., “Photovoltaic Engineering Handbook”, 1st. Edition ISBN0-85274-311-4, 1990.
- [80] Wood, A. J. and Wollenberg, B. F, “Power Generation, Operation and Control”, Third edition, 2013.
- [81] Yinger, R. J. “Behaviour of capstone and Honeywell microturbine generators during load changes”, Lawrence Berkeley National Laboratory, July 2001.
- [82] Chedid, R., and Rahman, S., “Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, (1997),Vol. 12, No. 1, pp. 79-85, March 1997.
- [83] G. M. Españaa, R. M. Gordónb, J. Sijma, “Modelling Demand Response in Power Systems”, September 2019.
- [84] M. Manbachi, “Impact of Distributed Energy Resource Penetrations on Smart Grid Adaptive Energy Conservation and Optimization Solutions”, in “Operation of Distributed Energy Resources in Smart Distribution Networks”, pp. 101-138, 2018.
- [85] N. Zohrabia , J. Shib , S. Abdelwahedc, “An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 104, pp. 680-693, January 2019.
- [86] A. R.A. Manito, U.H. Bezerra, T. M. Soares, J. P.A. Vieira, M. V.A. Nunes, M. E.L. Tostes, R. C. de Oliveira, “Technical and non-technical losses calculation in distribution grids using a defined equivalent operational impedance”, in special issue: “Emerging Trends in System Integrity Protection Schemes (SIPS) for Improving the Performance of Smart Grid”, Volume13, Issue8, pp.1315-1323.