

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

BILJANA IVANOVIĆ

**OPTIMIZACIJA POGONA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA SA
VJETROELEKTRANAMA**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2019.

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

BILJANA IVANOVIĆ

**OPTIMIZACIJA POGONA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA SA
VJETROELEKTRANAMA**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2019.

PODACI O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Biljana Ivanović

Datum i mjesto rođenja: 20.03.1989, Kotor, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:
Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Odsjek za Energetiku i Automatiku, 2011.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Optimizacija pogona elektroenergetskog sistema sa vjetroelektranama

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 16.06.2016.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 22.09.2016.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

Prof. dr Ilija Vujošević, ETF Podgorica

Doc. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica

Doc. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica

Mentor: doc. dr Zoran Miljanić

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Ilija Vujošević, predsjednik,

Doc. dr Zoran Miljanić, mentor,

Doc. dr Vladan Radulović, član

Komisija za odbranu rada

Prof. dr Ilija Vujošević, predsjednik,

Doc. dr Zoran Miljanić, mentor,

Doc. dr Vladan Radulović, član

Lektor

Datum odbrane: 23.12.2019.

Datum promocije

IZJAVA O AUTORSTVU

Ja, ispod potpisana Biljana Ivanović, izjavljujem da sam ovaj magistarski rad napisala sama, uz konsultacije sa mentorom, uz upotrebu pomoćnih sredstava specificiranih u radu (literatura, softverski alati). Pojmovi preuzeti direktno ili indirektno iz drugih izvora označeni su kao takvi te su adekvatno navedeni u popisu literature. Ovaj rad nije prethodno prezentovan u identičnoj ili sličnoj formi nijednoj crnogorskoj ili stranoj ispitnoj komisiji.

Podgorica, 18.12.2019.

Biljana Ivanović

Predgovor

Obnovljivi izvori električne energije, koji su se do nedavno svrstavali u grupu nekonvencionalnih izvora, sve više nalaze primjenu u praksi i polako postaju dio svakodnevice i ne samo kao samostalni izvori već kao složeni hibridni sistemi. Priključivanje ovakvih izvora ne predstavlja samo spremnost i odlučnost na rizik iskorišćenja promjenljivih primarnih oblika energije (vjetar, voda, sunce), već je to podjednako veliki izazov za (optimalno) upravljanje cjelokupnim elektroenergetskim sistemom. Sigurno i pouzdano snabdijevanje potrošača osnovni je zadatak pri upravljanju elektroenergetskim sistemom, iz tog razloga jednako je važno precizno predvidjeti i isplanirati funkcionalnosti svih objekata elektroenergetskog sistema koji su od značaja za snabdijevanje potrošača. Za potrebe optimalnog planiranja u ovom radu, izvršena je analiza rada upravljivih (konvencionalnih) proizvodnih jedinica i neupravljivih obnovljivih izvora sa promjenljivom proizvodnjom. Osim toga, od velikog značaja za optimizaciju troškova električne energije je i način nabavke, pri čemu je akcenat stavljen na opciju uvoza električne energije kada su cijene uvoza niže od cijena proizvodnje iz domaćih proizvodnih kapaciteta. Postoji veliki broj programskih alata koji se bave ovom problematikom, međutim ispitivanjem i upoređivanjem rezultata došlo se do zaključka da veliki broj faktora utiče na to da genetički algoritam daje najbolje rezultate po pitanju preciznosti, brzini generisanja rezultata kao i uzimanja u obzir velikog broja različitih vrsta ulaznih podataka. Osim toga, genetički algoritam je fleksibilan alat koji je lako prilagodljiv svim strukturnim promjenama elektroenergetskog sistema, što je omogućilo kreiranje inovativnih i naprednijih kodova koji rezultiraju preciznijim izlaznim podacima. Uobičajena procedura procjene troškova zasniva se na uporednoj analizi cijena proizvodnje iz domaćih izvora i prekograničnog uvoza električne energije, međutim predloženim kodom uvršteni su rezultati detaljnog istraživanja troškova proizvodnje za svaku elektranu pojedinačno kao i prioriteta proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana (koje pripadaju grupi povlašćenih proizvođača sa garantovanom otkupnom cijenom). Takođe, način generisanja rezultata je unaprijeđen sa grafičkim i tabelarnim prikazom koji pružaju jednostavnije praćenje i upoređivanje troškova proizvodnje/uvoza. Za potrebe testiranja predložene metode uzeto je za primjer nekoliko karakterističnih scenarija u toku jedne godine. Različiti scenariji podrazumijevaju ekstremne vremenske uslove koje direktno utiču na optimalno angažovanje generatorskih jedinica i na kojima se može najbolje prikazati funkcionalnost predloženog algoritma. Rezultati dobijeni primjenom genetičkog algoritma imaju minimalna odstupanja kada se uporede sa realizovanim upravljačkim aktivnostima, stoga ovi rezultati mogu predstavljati okvirni plan ili prijedlog za upravljanje elektranama za dan unaprijed u satnoj rezoluciji. Osim za planiranje, predloženi algoritam svoju primjenu može pronaći i prilikom upravljanja u realnom vremenu, ukoliko je to dozvoljeno pravilima poslovanja, i na taj način uticati na pristup upravljanja sistemom.

Izvod rada

Sve veća integracija obnovljivih izvora električne energije dovodi do postepene prevlasti istih nad procesom sagorijevanja fosilnih goriva za potrebe proizvodnje električne energije. Ove promjene imaju značajan tehnički i ekonomski uticaj na sve elemente elektroenergetskog sistema i na način upravljanja sistemom. Oportimalno upravljanje elektroenergetskim sistemom u prisustvu obnovljivih izvora zahtijeva potpuno drugačiji pristup u odnosu na to kako se to obavljalo sa konvencionalnim izvorima, odnosno minimizacija troškova proizvodnje poprima drugačiji model upravljanja koji će biti u skladu sa pravilima funkcionisanja sistema i zakonskih normi. U ovom radu prikazana je mogućnost smanjivanja troškova proizvodnje i uvoza, tako što će se u većoj mjeri eksploatirati jedinice sa nižom cijenom proizvodnje uz obavezno prisustvo obnovljivih izvora električne energije pri čemu će snabdijevanje potrošača biti sigurno i pouzdano.

Sa nedovoljno iskorišćenim potencijalom za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, crnogorski elektroenergetski sistem predstavlja idealno okruženje za razvijanje i primjenu algoritma za optimalan proračun troškova proizvodnje kao i njegovu dalju nadogradnju sa porastom implementacije obnovljivih resursa. Kako se posmatrani elektroenergetski sistem suočava sa intezivnim razvojem mreže, u tom smislu, vrlo je važno da predloženo algoritamsko rješenje ima mogućnost prilagođavanja novonastalim okolnostima. U tom kontekstu, a za potrebe ovog rada, sprovedena je analiza optimalnog upravljanja elektroenergetskim sistemom Crne Gore primjenom genetičkog algoritma u okviru programskog paketa MATLAB. Procedura optimizacije troškova zasniva se na uporednoj analizi cijena proizvodnje iz domaćih izvora i prekograničnog uvoza električne energije, međutim predloženim kodom uvršteni su rezultati detaljnog istraživanja troškova proizvodnje za svaku elektranu pojedinačno kao i prioriteta proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora.

Rezultat ovog istraživanja je minimizacija troškova proizvodnje električne energije (dan unaprijed ili sat unaprijed) sa dominantnim prisustvom obnovljivih izvora električne energije, pri čemu je izuzetna fleksibilnost izražena kroz primjenu većeg broja ugrađenih funkcija u okviru koda. Osim tabelarnog prikaza, rezultati se generišu i u grafičkoj formi koji pružaju jednostavnije praćenje i upoređivanje troškova proizvodnje/uvoza.

Kroz određeni broj primjera i uporedne analize prikazane su višestruke prednosti rezultata dobijenih primjenom genetičkog algoritma. Rezultati ovog istraživanja imaju praktičnu primjenu za potrebe planiranja proizvodnje (dan unaprijed) ili upravljanja elektroenergetskim sistemom u realnom vremenu. U cilju dobijanja željenih rezultata, prilikom ovog istraživanja, svoje podatke i informacije ustupili su Elektroprivreda Crne Gore, Crnogorski elektroprenosni sistem i Mađarska berza električne energije.

Ključne riječi: optimizacija elektroenergetskog sistema, genetički algoritam, obnovljivi izvori, plan proizvodnje.

Abstract

The increasing integration of renewable energy sources is leading to their gradual dominance over the fossil fuel combustion process for the needs of the electricity production. These changes have a significant technical and economic impact on all elements of the electricity system and system management. Optimal management of the electricity system in the presence of renewable sources requires a completely different approach compared to how it was done with conventional sources, i.e. minimization of production costs takes a different model of management that will be in accordance with the system rules and legal norms. This paper presents the possibility of reducing production and import costs by exploiting units with lower production costs to a greater extent with the obligatory presence of renewable electricity sources, while keeping the customer supply secure and reliable.

With underutilized potential for the electricity production from renewable sources, the Montenegrin electricity system is an ideal environment for developing and applying an algorithm for optimal calculation of production costs as well as its further upgrading with increasing implementation of renewable resources. As the observed system faces the intensive network development, in this sense, it is very important that the proposed algorithmic solution has the ability to adapt to the new circumstances. In this context, for the purpose of this paper, an analysis of optimal management of the power system of Montenegro was conducted using a genetic algorithm within the MATLAB software package. The cost optimization procedure is based on a comparative analysis of the production prices from domestic sources and cross-border electricity import; however, the proposed code includes the results of a detailed study of the production costs for each power plant individually as well as priority electricity production from renewable sources.

The result of this research is to minimize the electricity production cost (day in advance or hour in advance) with the dominant presence of renewables, with exceptional flexibility expressed through the application of a number of built-in functions within the code. In addition to the spreadsheet, the results are also generated in a graphical form that provides easier tracking and comparison of the costs incurred.

Through a number of examples and comparative analyses, the multiple advantages of the results obtained using the genetic algorithm have been demonstrated. The results of this research have practical application for the purposes of planning production (day in advance) or managing the power system in real time. In order to obtain the desired results, in the course of this research, data and information were provided by the Electric Power Company of Montenegro, the Montenegrin Electricity Transmission System and the Hungarian Power Exchange.

Key words: power system optimization, genetic algorithm, renewable resources, day ahead forecast.

Sadržaj:

1. UVOD	16
2. ENERGIJA VJETRA	19
2.1 Vjetroelektrane i njihova integracija u EES	22
2.2 Potencijali vjetroelektrana u Crnoj Gori	27
2.3 Uticaj vjetroelektrana na EES i okolinu	29
2.4 Metode za prognozu proizvodnje iz vjetroelektrana	35
2.4.1 Alat za prognozu proizvodnje vjetroelektrana	39
2.4.2 Predviđanje metodom neuronskih mreža	40
2.4.3 Rasplinuta logika	42
3. OPTIMALNI POGON ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA	47
3.1 Osnova problema izbora i angažovanje agregata	49
3.2 Metode za optimizaciju pogona EES za klasičnu postavku problema	52
3.2.1 Metoda grananja i ograničavanja	55
3.2.2 Metod prioritete liste	57
3.2.3 Dinamičko programiranje	57
3.2.4 Lagrange-ov relaksacioni metod	62
3.2.5 Tabu pretraživanje	65
3.2.6 Simulirano kaljenje	68
3.2.7 Linearno programiranje	69
3.3 Metaheurističke metode za optimizaciju pogona elektroenergetskog sistema	71
3.3.1 Genetički algoritam	71
3.3.2 Optimizacija rojem čestica	77
4. OPTIMIZACIJA POGONA EES SA VJETROELEKTRANAMA UPOTREBOM GENETIČKOG ALGORITMA	80
4.1 Genetički algoritam kao optimizacioni alat	80
4.1.1 Klasična formulacija problema optimalnog angažovanja agregata	80
4.1.2 Postavka genetičkog algoritma	82
4.1.3 Postavka optimizacionog problema za primjer crnogorskog EES	85
4.2 Opis optimizacionog algoritma predloženog radom	87

4.3 Opis interfejsa i primjena razvijene aplikacije sa primjerima	96
4.4 Usporedna analiza savremenih optimizacionih metoda za planiranje pogona dan unaprijed	114
5. ZAKLJUČAK.....	118
6. LITERATURA	120

Lista skraćenica:

EES – Elektroenergetski Sistem
EWEA – European Wind Energy Association
CSP – Concentrated Solar Power
HAWT - Horizontal-axis Wind Turbine
VAWT - Vertical-axis Wind Turbine
SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition
SCR - Short circuit ratio
DC - Direct Current
NGCC-Natural Gas Combined Cycle
VOC-Volatile Organic Compound
NWP - Numerical Weather Prediction System
WPPT - Wind Power Prediction Tool
ANNs - Artificial Neural Networks
AI - Artificial Intelligence
ANFIS - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
TE - Termoelektrana
US - Unit Scheduling
UC - Unit Commitment
ED - Economic Dispatching
USR - Up Spinning Reserve
DSR - Down Spinning Reserve
ENTSO-e – European Network of Transmission System Operators for Electricity
HUPX – Hungarian Power Exchange
EPCG – Elektroprivreda Crne Gore
OIE – Obnovljivi izvori električne energije
THD- Total Harmonic Distortion

Popis slika:

2.1	Strujanje vazduha od Ekvatora ka polovima	19
2.2	Promjena mjerene vrijednosti brzine vjetra u toku dana	20
2.3	Pregled instalacije novih i uklonjenih proizvodnih kapaciteta u 2017. godini	21
2.4	Postrojenja koja koriste turbinu na vjetar	22
2.5	Izgled kabine na vrhu tornja vjetrenjače sa osnovnim djelovima	23
2.6	Rad vjetrogeneratora u zavisnosti od brzine vjetra	24
2.7	Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem	26
2.8	Stvarni energetski potencijal vjetra [W/m^2] na 50 m i.n.t	28
2.9	Fluktuacija ukupne proizvodnje svih vjetroelektrana u prenosnom sistemu Njemačke ..	36
2.10	Specifična i raspoloživa (teorijski iskoristiva) snaga vjetra, mehanička snaga na vratilu i električna na stezaljkama generatora	37
2.11	Konfiguracija WPPT za složeni energetski sistem	39
2.12	Primjer neuronske mreže	40
2.13	Procesuiranje informacije u vještačkom neuronu	41
2.14	Primjer prognozirane proizvodnje vjetroelektrane sa prognoziranom vjerovatnoćom odstupanja od plana u odnosu na ostvarenu proizvodnju bez nepredviđenih okolnosti	42
2.15	Konvencionalna fukcija pripadanja	43
2.16	Kontinualna funkcija pripadanja	43
2.17	Tri funkcije pripadanja koje opisuju brzinu vjetra	44
2.18	Tipična struktura ANFIS	45
3.1	Dekompozicija problema angažovanja agregata (US) na problem izbora agregata (UC) i raspodjele opterećenja na agregate u pogonu (ED).....	48
3.2	Ekonomična raspodjela opterećenja između agregata u pogonu	48
3.3	Klasifikacija metoda optimizacije	53
3.4	Algoritam rješavanja problema metodom grananja i ograničavanja	56
3.5	Graf stabla pretrage u širinu i u dubinu	57
3.6	Grafički prikaz dinamičkog programiranja	60
3.7	Primjena dinamičkog programiranja kroz algoritam	61
3.8	Tabu lista: izbjegavanje kruženja	65
3.9	Primjena tabu pretraživanja kroz algoritam	67

3.10 Šema genetičkog algoritma	72
3.11 Prikaz generacija i etapa u jednoj iteraciji	73
3.12 Ukrštanje u više tačaka	75
3.13 Promjena položaja čestice	79
4.1 Dva pristupa rješavanju problema pomoću genetičkog algoritma	80
4.2 Popunjavanje dnevnog dijagrama opterećenja	81
4.3 Lokacija vjetroparka sa priključenim energetskim objektima	86
4.4 Prikaz geografske lokacije vjetroparka Možura i okoline	87
4.5 Blok šema	88
4.6 Kriva proizvodnje vjetroelektrane	90
4.7 Kombinacija angažovanja generatora HE Piva sa energijom iz uvoza u cilju optimalnog rada sistema	91
4.8 Troškovi angažovanja elektrana i uvoza električne energije	94
4.9 Količina proizvodnje/uvoza električne energije.....	95
4.10 Dijagram proizvodnje/uvoza električne energije	95
4.11 Stanje akumulacija (Vrtac, Slano, Pivsko) u 2017.godini (MWh).....	96
4.12 Komandni prozor Matlab-a	98
4.13 Rezultati genetičkog algoritma za 31.01.2017.	98
4.14 Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 31.01.2017. u €/MWh	99
4.15 Komandni prozor Matlab-a	100
4.16 Rezultati genetičkog algoritma za 19.07.2017.	101
4.17 Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 19.07.2017. u €/MWh	102
4.18 Komandni prozor Matlab-a	103
4.19 Rezultati genetičkog algoritma za 27.03.2017.	104
4.20 Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 27.03.2017. u €/MWh	105
4.21 Komandni prozor Matlab-a	106
4.22 Rezultati genetičkog algoritma za 19.11.2017.	106
4.23 Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 19.11.2017. u €/MWh.....	107
4.24 Komandni prozor Matlab-a.	108
4.25 Rezultati genetičkog algoritma za 6.06.2017.....	109
4.26 Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 6.06.2017. u €/MWh.....	110
4.27 Komandni prozor Matlab-a.....	111

4.28	Rezultati genetičkog algoritma za 27.11.2017.....	111
4.29	Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 27.11.2017. u €/MWh.	112
4.30	Ostvareni troškovi proizvodnje električne energije kao rezultati genetičkog algoritma i linearnog programiranja za izrazito sušni period.	115
4.31	Rezultati linearnog programiranja za izrazito sušni period.....	115
4.32	Troškovi genetičkog algoritma i linearnog programiranja bez rada termoelektrane. . .	116
4.33	Vrijeme izvršenja genetičkog algoritma i linearnog programiranja.....	117

Popis tabela:

2.1 Granične vrijednosti jačine flikera u prenosnom sistemu	31
2.2 Granične vrijednosti sadržaja viših harmonika u prenosnom sistemu	33
3.1 Lista generatora (primjer)	58
3.2 Lista prioriteta	58
3.3 Podaci o generatorima (primjer)	61
3.4 Optimizacija pogona pomoću liste prioriteta	61
3.5 Kombinacije angažovanja generatora	62
4.1 Ulazni parametri (primjer za 31.01.2017)	97
4.2 Rezultati algoritma (primjer za 31.01.2017)	98
4.3 Ulazni parametri (primjer za 19.07.2017)	100
4.4 Rezultati algoritma (primjer za 19.07.2017)	101
4.5 Ulazni parametri (primjer za 27.03.2017)	103
4.6 Rezultati algoritma (primjer za 27.03.2017)	104
4.7 Ulazni parametri (primjer za 19.11.2017).....	105
4.8 Rezultati algoritma (primjer za 19.11.2017).....	107
4.9 Ulazni parametri (primjer za 6.06.2017).....	108
4.10 Rezultati algoritma (primjer za 6.06.2017).....	109
4.11 Ulazni parametri (primjer za 27.11.2017).....	110
4.12 Rezultati algoritma (primjer za 27.11.2017).....	111
4.13 Uporedni troškovi podmirivanja potrošnje iz genetičkog algoritma i uvoza električne energije	113

1. UVOD

Široka primjena električne energije u svakodnevnom životu, u velikoj mjeri zaslužna je za današnji stepen razvoja čovječanstva, što se može poistovjetiti sa činjenicom da bi bez električne energije sve stalo. Konverzija primarnih oblika energije u sekundarnu, električnu i dalje u druge oblike finalne energije obavlja se pomoću skupa elektrana, vodova, transformatora i potrošača, međusobno povezanih koji čine jedinstvenu procesnu cjelinu nazvanu elektroenergetskim sistemom. Elektroenergetski sistem je složeni dinamički sistem koji obezbjeđuje proizvodnju, prenos, distribuciju i potrošnju električne energije i stoga se može razdvojiti na četiri funkcionalno nezavisna, ali međusobno spregnuta podsistema: podsistem proizvodnje, podsistem prenosa, podsistem distribucije i podsistem potrošnje. Podsistem proizvodnje čini proizvodnja električne energije koja se obavlja u generatorima, zatim, ista prolazi kroz transformator, koji je smješten u elektrani i koji mijenja napon sa nižeg na viši. U podsistemu prenosa odvija se prenos električne energije visokonaponskim prenosnim vodovima do distributivnih trafostanica. Iz distributivnih trafostanica električna energija se razvodi i upotrebljava za pogon potrošača što čini podsistem distribucije. Podsistem potrošnje čine krajnji korisnici električne energije i oni predstavljaju zadnju kariku u lancu elektroenergetskog sistema. Objedinjavanjem najprije u lokalne i regionalne, zatim u nacionalne sisteme i, najzad, u moćne kontinentalne interkonekcije, elektroenergetski sistemi su tokom proteklih godina prerasli u najkompleksnije dinamičke tehnološke sisteme koje poznaje savremena civilizacija. Osnovni zadatak elektroenergetskog sistema je sigurno i pouzdano snabdijevanje raznih vrsta potrošača kvalitetnom električnom energijom uz minimalne pogonske troškove. Svaki EES karakterišu sljedeća svojstva složenosti:

- dimenzionalnost sistema (fizička i matematička);
- otvorenost sistema (nemogućnost potpune identifikacije i neizvjesnost prirode unutrašnjih i spoljašnjih veza);
- vremenska (dinamička) promjenljivost unutrašnje strukture;
- složenost informacione strukture pri upravljanju sistemom.

Budući da se fosilna goriva, kao primarni oblici energije, nalaze u ograničenim količinama u prirodi, krajem prošlog i početkom ovog vijeka, kod ljudi se probudila svijest o ekologiji i očuvanju životne sredine kao i o tome da čovječanstvo polako iscrpljuje preostale zalihe fosilnih goriva. To su dovoljni razlozi za:

- istraživanje postojanja dodatnih rezervi konvencionalnih oblika energije i mogućnosti njihove eksploatacije;
- poboljšanje postupaka i primjena novih tehnologija pri eksploataciji postojećih i budućih nalazišta i racionalnija upotreba;
- podsticanje razvoja obnovljivih izvora energije i drugih nekonvencionalnih oblika.

Nekonvencionalni izvori električne energije ne samo da predstavljaju adekvatnu zamjenu za neobnovljive izvore (ili dopunu u proizvodnji), već oni doprinose razvoju društva, postavljajući savremene standarde energetike i ekonomije na jako visokom nivou. Sam naziv obnovljivi, potiče od činjenice da se energija troši u iznosu koji ne premašuje brzinu kojom se stvara u prirodi. Pored energetske efikasnosti i energetske uštede, obnovljivi izvori energije igraju ključnu ulogu u svakoj održivoj zemlji u energetskej politici. Osim što umanjuju zavisnost same države od uvoza energenata, utiču na obezbjeđivanje rezervi, manje oslanjanje na nestalne cijene nafte, gasa i urana, oni takođe daju svoj doprinos i u borbi protiv klimatskih promjena. Raspoloživost električne energije, dobijene iz obnovljivih izvora, je nestalna i teško predvidiva,

zbog toga priključenje ovakvih izvora ima veliki uticaj na rad elektroenergetskog sistema. Pri bilo kojem priključenju treba analizirati:

- analizu tokova snaga i naponskih prilika u mreži;
- analize kratkog spoja i provjeru rasklopne opreme;
- koordinaciju sa zaštitama mreže (sistema) na koju se priključuje OIE;
- analizu pouzdanosti i sigurnosti (n-1) kod kvara na jednom od priključnih vodova;
- mjerenje i analizu kvaliteta električne energije prije i nakon priključenja OIE na mrežu.

Mada, i pored postignutih uspjeha u razvoju obnovljivih izvora energije, današnja saznanja još uvijek ne pružaju veliki optimizam u pogledu značajnijeg korišćenja nekonvencionalnih oblika energije. Nešto se više može očekivati od korišćenja neposredne energije sunčevog isijavanja za grijanje, pripremu tople vode i za proizvodnju električne energije, kao i od znatno većeg korišćenja kinetičke energije vjetra. Iako vjetar sadrži značajan energetska potencijal, njegovo značajnije korišćenje kao energetska izvora je ograničeno malom koncentracijom energije na jedinicu površine, zatim značajnim i čestim promjenama pravca, smjera, brzine i intenziteta, kao i temperature i sastava vazduha. Ovi faktori su značajna ograničenja za korišćenje energije vjetra u skladu sa mogućom proizvodnjom energije iz raspoloživog potencijala. Iako se intenzivno radi na istraživanjima za što većim korišćenjem ovog potencijala, energija vjetra se danas uglavnom koristi za zadovoljenje energetska potreba u dosta ograničenom obimu i namjeni, pri čemu se postrojenja koja koriste energiju vjetra najčešće koriste za supstituciju drugih vrsta goriva i redukovanje troškova goriva.

Kako je ekonomičnost jedan od pokazatelja uspješnog poslovanja preduzeća, tako je i efikasnost upravljanja elektroenergetskim sistemom jedan od faktora koji utiču na smanjivanje troškova upravljanja. Otuda ideja za analizom optimalnog rada sistema, pri čemu se troškovi mogu redukovati postavljanjem prirota prilikom angažovanja agregata (i uvoza). Poseban izazov uključuje rad intermitentnih izvora, tj. u ovom slučaju rad vjetroelektrana koje sa svojom promjenljivom potrošnjom zahtijevaju nešto kompleksniji pristup. Sve veći udio vjetroelektrana u elektroenergetskim sistemima u svijetu stvara sve veće probleme vezane za regulaciju elektroenergetskih sistema, što dalje prouzrokuje i veće finansijske troškove za balansiranje. Najveći problemi vezani su za stohastičku prirodu vjetra, kao izvora energije, odnosno intermitirajuću vrstu proizvodnje električne energije. Kako je ideja ovog rada minimizacija troškova (proizvodnje i balansiranja) stoga je vrlo bitno što tačnije predvidjeti proizvodnju, tačnije izlaznu snagu vjetroelektrana da bi se mogle planirati i potrebne mjere regulacije aktivne snage i frekvencije. Sa tim u vezi, u radu su predstavljene neke od metoda za prognozu proizvodnje vjetroelektrana koje se danas vrlo uspješno koriste, međutim kako vjetroelektrane predstavljaju samo jedan dio elektroenergetskog sistema Crne Gore, za optimizaciju cjelokupnog pogona potrebno je koristiti kompleksnije metode. Pored precizne prognoze proizvodnje, kojom bi se smanjili troškovi balansiranja sistema, paralelan rad vjetroelektrana sa ostalim elektranama bio je dodatan motiv za istraživanje matematičkih metoda pomoću kojih će se pronaći najpovoljnije rješenje za angažovanje agregata, a da troškovi budu što manji. Očekivani rezultati predstavljaju prognozu proizvodnje generatorskih jedinica za dan unaprijed u satnoj rezoluciji, za čije potrebe će se koristiti matematički metod, genetički algoritam, kodiran na način da se uvažavaju minimalni troškovi snabdijevanja.

Problematika optimizacije sistema predstavljena je kroz tri radna poglavlja, ukoliko se izuzme Uvod na početku, Zaključak i pregled literature na kraju.

Može se reći da na našem prostoru, instalacija solarnih panela i vjetroagregata je tek u usponu. S obzirom da su u crnogorskom elektroenergetskom sistemu solarni paneli priključeni na

distributivnu mrežu, u prvom dijelu rada će se analizirati uticaj vjetroelektrana koji su u ovom slučaju priključeni na prenosnu mrežu i samim tim imaju značajnu ulogu pri upravljanju sistemom. Elektrane koje kao primarni oblik energije koriste energiju vjetra imaju najbrži rast u eksploataciji od svih alternativnih izvora energije. Iako globalni potencijali ovog oblika energije daleko prevazilaze svjetske potrebe za električnom energijom, danas se uglavnom koriste za zadovoljenje energetske potrebe u dosta ograničenom obimu, međutim uz intenzivna istraživanja očekuje se da će ovaj oblik energije podmirivati gotovo trećinu od ukupnih potreba za električnom energijom u Evropi. Jedan od faktora koji utiču na bržu eksploataciju vjetroelektrana su razvijene i dokazane metode za prognozu proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana. Neke od metoda koje se danas uspješno koriste, a koje se uglavnom baziraju na povezanosti između istorijskih podataka i meteoroloških uslova, elaborirane su u drugom poglavlju rada. U zavisnosti od kvaliteta prognoziranog proizvodnje, zavisi kakav će uticaj imati vjetroelektrane na sistem. Prisustvo vjetroelektrana svakako ima višestruk uticaj, stoga je precizna prognoza proizvodnje od ključnog značaja za sigurno upravljanje sistemom.

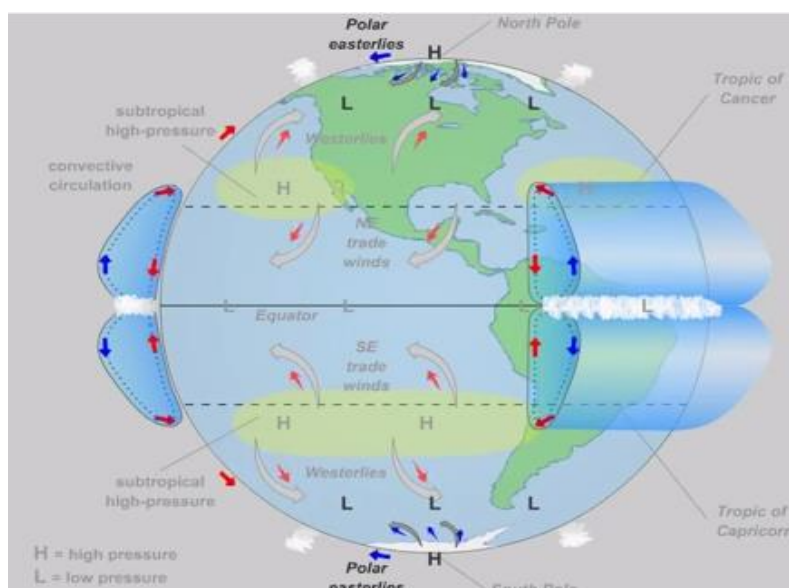
Treće poglavlje bavi se definisanjem problema optimizacije pogona pri čemu su predložene neke od aktuelnih metoda za rješavanje problema optimalnog rada sistema. U ovom poglavlju posebno su naglašene metode koje se mogu uspješno primijeniti kada su na sistem priključeni nekonvencionalni izvori električne energije, tj. kada postoje izvori sa nepredvidivom proizvodnjom što zahtijeva nešto detaljniju analizu. Upravo jedan od ovih metoda biće sredstvo za analizu problema izbora agregata pri radu vjetroelektrane, sa ciljem da troškovi proizvodnje i uvoza budu minimalni. Kao dobar izbor za rješavanje problema optimalnog izbora agregata pokazao se genetički algoritam u Matlab-u, čiji su rezultati prikazani u četvrtom poglavlju kroz tabelarne i grafičke forme.

Cilj ovog rada je istraživanje i analiza svih faktora koji će doprinijeti ekonomičnijem upravljanju elektroenergetskim sistemom, kao i prijedlog koda koji će generisati izlazne podatke. Svi podaci, koji su korišteni kroz primjere za analizu, su realni podaci iz elektroenergetskog sistema Crne Gore, kao i rezultati dobijeni genetičkim algoritmom su primjenjivi i prihvatljivi za siguran i ekonomičan rad sistema. Ovim radom se pokazalo da se izborom odgovarajućeg optimizacionog alata može razviti algoritam koji će, uz definisane uslove rada, generisati rješenja koja mogu dovesti do efikasnijeg upravljanja proizvodnim jedinicama u elektroenergetskom sistemu.

2. ENERGIJA VJETRA

Potreba za smanjenjem koncentracije ugljen dioksida, energetska kriza, promjene cijena na svjetskom tržištu energije i potreba za supstitucijom nafte gdje god je to moguće, izazvale su intenzivnija istraživanja energetske potencijala, što je dovelo do povećanja rezervi i otkrivanja novih nekonvencionalnih izvora električne energije. Danas komercijalno raspoloživi i masovnije korišteni nekonvencionalni izvori su: sunčevo zračenje (primjenom fotonaponskih ćelija), vjetar, mali vodotoci, biomasa (uključujući u biomasu i ogrijevno drvo korišteno na nekonvencionalan način), otpad, korištenje toplote okoline primjenom toplotnih pumpi i geotermalna energija. I pored postignutih rezultata, današnja saznanja još uvijek ne pružaju veliki optimizam u pogledu značajnijeg korišćenja nekonvencionalnih oblika energije.

Energija vjetra je transformisani oblik Sunčeve energije. Sunce neravnomjerno zagrijava različite djelove Zemlje i dolazi do nejednakog zagrijavanja vazdušnih masa. Tamo gdje je Sunčeva svjetlost najjača, na Ekvatoru, počinje stvaranje najvećih sistema vjetrova. Kada se vazduh zagrije, on se širi, postaje lakši, diže se na veliku visinu i širi se prema polovima (Južnom i Sjevernom), te se zakreće pod uticajem Zemljine rotacije. Kada pređe trećinu puta do polova, opet počinje da se hladi i kao teži popunjava nastale praznine i pada na Zemlju. Zatim se jedan njegov dio opet vraća prema Ekvatoru (gdje se opet zagrijava), a drugi nastavlja svoj put prema Sjevernom ili Južnom polu (Slika 2.1).



Slika 2.1: Strujanje vazduha od Ekvatora ka polovima

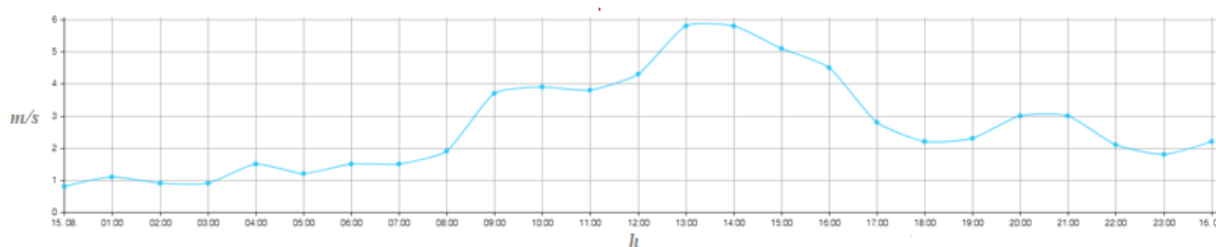
Postoje vjetrovi koji su dio svjetskog sistema vjetrova tj. stalni i lokalni. Stalnim vjetrovima se nazivaju vjetrovi koji duvaju u istom pravcu preko cijele godine i na tim područjima je iskorišćavanje energije vjetra najisplativije. Dobre pozicije za iskorišćavanje vjetropotencijala su obale okeana (priobalna vjetroelektrana) i pučina mora (plutajuća vjetroelektrana). Pučina se ističe kao najbolja pozicija, ali cijene instalacije i transporta energije koče takvu eksploataciju. Lokalni vjetrovi nastaju zbog globalne raspodjele pritiska i putujućih cirkulacijskih sistema, odnosno, u velikoj mjeri zavise od topografskog i geografskog obilježja kao što su: drveće, zgrade, jezera, more, planine i kotline.

Vjetar se najčešće opisuje dvijema jednostavnim komponentama: smjerom i jačinom. Za određivanje smjera koristi se vjetrovija, a označava se stranom svijeta sa koje dolazi. Jačina vjetra se određuje anemometrom ili pomoću Beaufortove skale, oznakama od 0 do 12, gdje 0 označava brzinu vjetra do 1 km/h, a 12 označava orkanski vjetar sa brzinom većom od 118 km/h. Vjetar se kao energetska izvor koristio još od davnina, najprije kao izvor energije u domaćinstvima i poljoprivredi za pogon vjetrenjača različitih namjena i pogon jedrenjaka, a kasnije i za druge namjene.

Korišćenje energije vjetra u proizvodnji električne energije počelo je da se razvija tridesetih godina prošlog vijeka i tada je počela izgradnja prvih vjetroelektrana. Progresivnim korišćenjem ovog potencijala dovelo je do toga da danas vjetar predstavlja neiscrpan ekološki izvor električne energije čiji globalni potencijali daleko prevazilaze svjetske potrebe za električnom energijom. Mogu se izdvojiti neke od prednosti korišćenja vjetroelektrana u odnosu konvencionalne izvore, a to su:

- ne troše gorivo, energija vjetra je, uslovno rečeno, besplatna;
- vjetroelektrane su poželjan oblik obnovljivog izvora energije u poređenju sa elektranama na fosilna goriva, jer se hemijski i biološki ne zagađuje okolina;
- vjetroelektrana može imati umjereno pozitivan uticaj na smanjenje snage vjetra u područjima koja su inače izložena suviše jakim vjetrovima;
- borba protiv globalnog zagrijavanja (efekat staklene bašte);
- smanjuje se nacionalna zavisnost o uvozu fosilnih goriva i povećanje domaće proizvodnje i smanjenje uvoza energije.

Vjetar sadrži značajan energetska potencijal, ali njegovo značajnije korišćenje kao energetska izvor je ograničeno malom koncentracijom energije na jedinicu površine, zatim značajnim i čestim promjenama pravca, smjera, brzine i intenziteta, kao i temperature i sastava vazduha. Na Slici 2.2 prikazana je promjenljiva priroda vjetra tj. izmjerene vrijednosti brzine vjetra u toku jednog dana, odakle se može vidjeti da je brzina dosta neravnomjerna, što predstavlja veliki problem za veće iskorišćenje energije vjetra.



Slika 2.2: Promjena mjerene vrijednosti brzine vjetra u toku dana

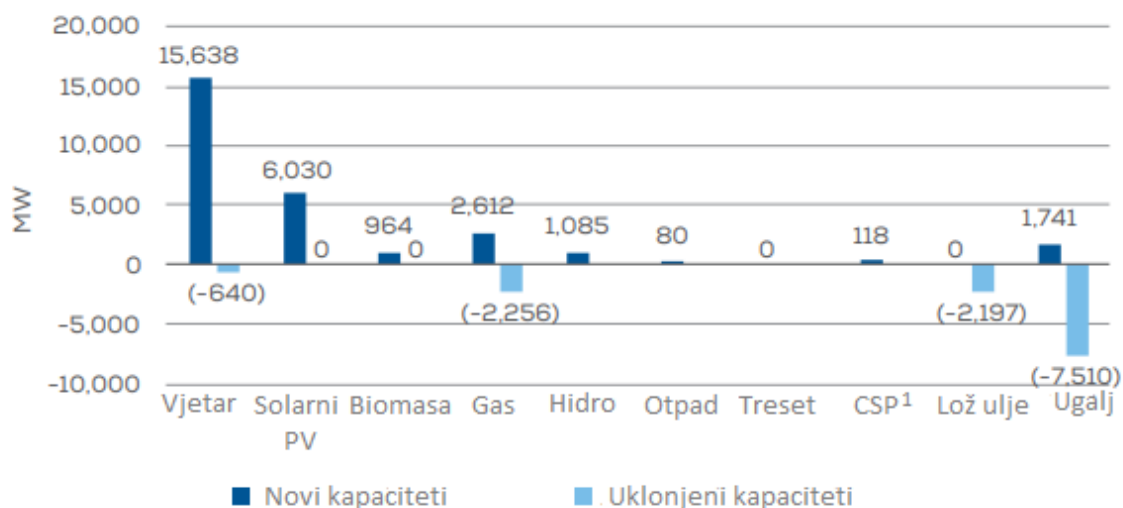
Zbog svoje intermitentne prirode ograničeno je korišćenje energije vjetra u skladu sa mogućom proizvodnjom energije iz raspoloživog potencijala. Tako da, pored gore navedenih prednosti, mogu se izdvojiti neki nedostaci:

- povremenost pogona, zavisno o meteorološkim karakteristikama područja primjene;
- nemogućnost akumulisanja ove energije u značajnijem obimu;
- veliki investicioni troškovi:
 - tehnička rješenja za spriječavanje oštećenja vjetrenjače pri olujnoj snazi i maksimalno iskorišćenje pri slabom vjetru;
 - za izradu visokih i stabilnih tornjeva i kvalitetnih elisa;
 - za održavanje pogona;
 - za kvalitetnu zaštitu visokih tornjeva od atmosferskih pražnjenja;

- za usklađivanje broja okretaja vjetroturbine sa brojem okretaja ugrađenog generatora potreban je reduktor s automatskom regulacijom brzine generatora [1];
- veliki troškovi investicije u odnosu na dobijenu energiju;
- podsticajna cijena za električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora je i do dva puta veća od električne energije proizvedene u termoelektrani, što može dovesti i do povećanja cijene električne energije za domaćinstva.
- kao i veliki broj faktora vezanih za uticaje ovih postrojenja na okolinu (raspoloživost slobodnog zemljišta, estetika, uticaj na biosferu, buku, radio i TV smetnje i sl.)

Iako se intenzivno radi na istraživanjima za što većim korišćenjem energije vjetra, ista se danas uglavnom koristi za zadovoljenje energetske potreba u dosta ograničenom obimu i namjeni, pri čemu se postrojenja koja koriste energiju vjetra najčešće koriste za supstituciju drugih vrsta goriva i redukovanje troškova goriva.

Vjetroelektrane imaju najbrži rast u eksploataciji od svih alternativnih izvora energije što se može vidjeti sa Slike 2.3.



Slika 2.3: Pregled instalacije novih i uklonjenih proizvodnih kapaciteta u 2017. godini

Instalisana snaga svih vjetroelektrana u svijetu iznosi preko 600 GW, a u Evropi 177,506 GW. Zemlja sa najvećom instalisanom snagom vjetroelektrana je Njemačka sa 56,132 GW (kraj 2017). Takođe, Danska proizvodi približno jednu petinu električne energije iz vjetroelektrana (5,476 GW), što je čini zemljom sa najvećim udjelom vjetroelektrana u sopstvenoj proizvodnji [2]. Za 2030. godinu EWEA predviđa ukupno instalisane kapacitete vjetroelektrana od 400 GW, koje će pokriti 28,5% potrošnje električne energije u Evropi. Očekuje se da će nakon 2020. g. opadati gradnja novih vjetroelektrana na kopnu, a znatno rasti gradnja pučinskih vjetroelektrana gdje duvaju stalni vjetrovi.

¹Koncentrovana solarna energija (engl. Concentrated Solar Power)

2.1 Vjetroelektrane i njihova integracija u EES

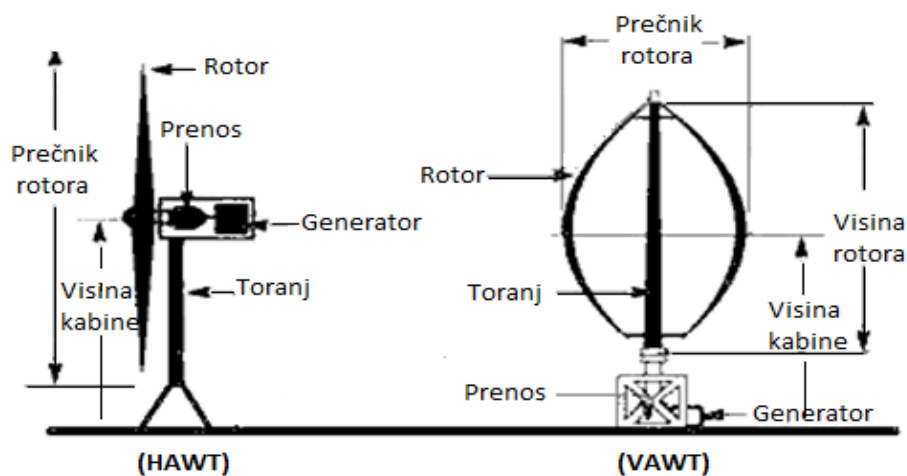
Vjetroelektrana je niz blisko smještenih vjetroagregata, istog tipa, izloženih istom vjetru i priključenih posredstvom zajedničkog razvodnog postrojenja na elektroenergetski sistem. Postrojenja za korišćenje energije vjetra se obično sastoje iz dva osnovna dijela:

- tornja, na kome se nalazi rotaciono kolo (elisa);
- pokretnog kola u kome se kinetička energija vjetra pretvara u mehaničku energiju.

Postoji više različitih podjela postrojenja za pretvaranje energije vjetra u električnu energiju, među kojima je najpopularnija podjela u zavisnosti od tipa turbine na vjetar (Slika 2.4):

- postrojenja koja koriste turbinu na vjetar sa horizontalnom osom – HAWT (*engl. Horizontal-axis Wind Turbine*);
- postrojenja koja koriste turbinu na vjetar sa vertikalnom osom – VAWT (*engl. Vertical-axis Wind Turbine*).

Vjetroelektrane sa horizontalnom (vodoravnom) osom se mogu češće naći u praksi. Tipična horizontalna vjetrenjača ima svoju osovinu za rotiranje horizontalno u odnosu na zemlju i skoro paralelno sa strujanjem vjetra. Tip vjetroturbine sa propelerom sa više lopatica je najčešći tip vjetroturbine sa horizontalnom osom. Lopatice su dizajnirane tako da vazduh prolazeći kroz njih, proizvedenom snagom pokreće elise. Broj lopatica na ovom tipu je raznovrstan i određuje se brzinom vjetra koja je potrebna da pokrene vjetroturbinu i brzinom rotacije datim vjetrom. Danas se najčešće koriste vjetroturbina sa dvije ili tri lopatice [3].

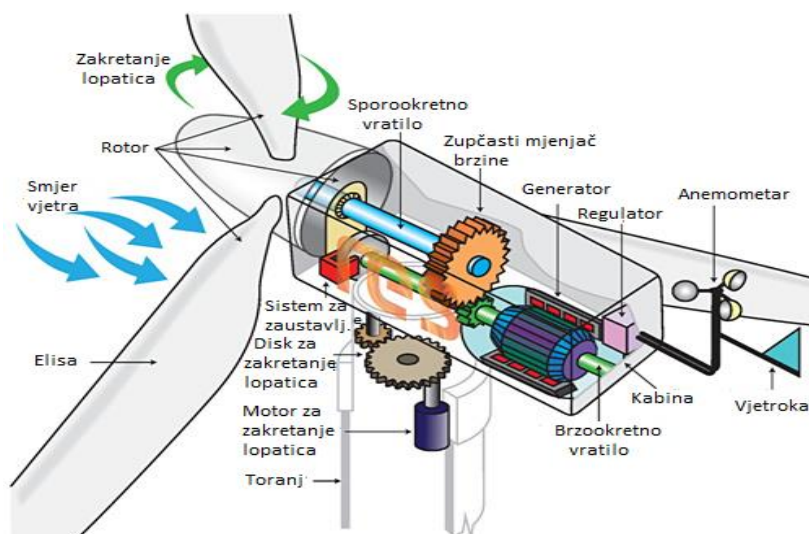


Slika 2.4: Postrojenja koja koriste turbinu na vjetar

Vjetroturbine sa vertikalnom osom su usmjerene na način da se njihove lopatice ili krila okreću oko centralne vertikalne ose. Postoje dva poznata tipa ovih vjetroturbina, to su: Savoniusov i Dariusov generator. Prednosti vjetroturbina sa vertikalnom osom su te što one ne moraju biti okrenute u pravcu duvanja vjetra i sami generator je smješten u temelju vjetroturbine pa su i lakše za održavanje. Sa druge strane, mana vjetroturbina sa vertikalnom osom je ta da je njihova aerodinamička efikasnost manja u odnosu na mašine sa horizontalnom osom, zatim ograničena mogućnost rotora da se sam pokrene i generalno manja rotaciona brzina.

Kao što je već pomenuto, u praksi se najčešće mogu naći vjetroturbine sa horizontalnom osom na čijem vrhu tornja je postavljena kabina u kojoj se nalaze osnovni djelovi: generator, sistem za zakretanje lopatica i sistem za zaustavljanje lopatica, zupčasti mjenjač brzine, sporookretno

i brzookretno vratilo, a na samom vrhu kabine smješten je anemometar za mjerenje brzine vjetra i vjetrokaz za određivanje smjera vjetra (Slika 2.5).



Slika 2.5: Izgled kabine na vrhu tornja vjetrenjače sa osnovnim djelovima

Postupak korišćenja energije vjetra je sljedeći, vjetroagregati preuzimaju kinetičku energiju vjetra tako što se vjetar dovodi u turbine na vjetar u kojima se vrši konverzija kinetičke energije vjetra u okretni momenat vratila koji preko zupčastog mjenjača okretni momenat predaje električnom generatoru u kome se vrši konverziju mehaničke energije u električnu. Rad vjetrogeneratora može se uprostiti do nivoa razmatranja ulaza i izlaza što se tiče energije. Ovo pojednostavljenje temelji se na osnovu prvog zakona termodinamike, zakonu očuvanja energije.

I Zakon termodinamike: Energija se ne može stvoriti ni iz čega niti se može uništiti, već se može samo prenijeti iz jednog oblika u drugi ili sa jednog tijela na drugo.

Matematička formulacija izlazne snage može se uprostiti prema izrazu:

$$P = \frac{\rho A \vartheta^3}{2} \quad (2.1)$$

gdje su:

P -snaga,

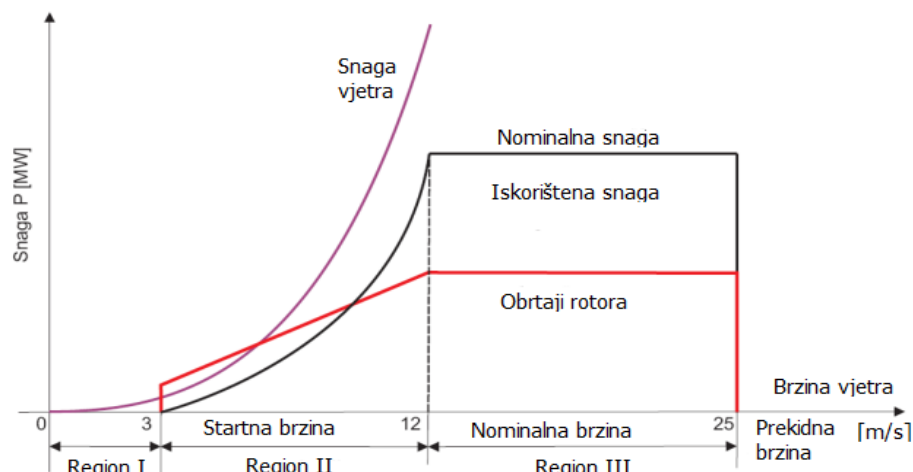
A - Površina obuhvaćena krilima rotora = $\frac{\pi d_{rotora}^2}{4}$,

ϑ – Brzina vjetra,

ρ – Gustina vjetra, koja se smatra konstantnom za mala vertikalna odstupanja.

Na Slici 2.6 prikazan je primjer rada generatora sa tri karakteristična regiona, odnosno oblasti rada vjetrogeneratora u zavisnosti od brzine vjetra. Pri malim brzinama vjetra, označeno kao region I, vjetroturbina je statična do startne brzine do 3 m/s, koja je neophodna za pokretanje rotora. Između startne i nominalne brzine, iskorišćena snaga ima porast jednak porastu brzine vjetra. Ovaj rast u regionu II ima kvadratnu karakteristiku praćenu ubrzanjem broja obrtaja rotora. Kada je dostignuta nominalna brzina okretanja krila dalje ubrzanje se zaustavlja i

zadržava se konstantan broj obrtaja rotora vjetrogeneratora – region III. Za navedeni model nominalna brzina vjetra iznosi 12 m/s i svaki dalji porast brzine vjetra ne utiče na izlaznu snagu koja ostaje na nominalnoj vrijednosti. Kada vjetar dostigne brzinu od 25 m/s aktivira se zaštita kako ne bi došlo do oštećenja konstruktivnih elemenata vjetrogeneratora i dolazi do njegovog zaustavljanja.



Slika 2.6: Rad vjetrogeneratora u zavisnosti od brzine vjetra

Pogon vjetroturbine u potpunosti je automatizovan. Generator samostalno počinje sa proizvodnjom električne energije kad brzina vjetra dostigne prosječnu brzinu od 3 m/s. Izlazna snaga generatora povećava se približno linearno s brzinom vjetra, sve dok vjetar ne dostigne brzinu od 12 m/s. Ukoliko prosječna brzina vjetra pređe granicu do koje turbina može raditi u normalnom pogonu (25 m/s), turbina se automatski isključuje zakretanjem lopatica u položaj vazdušnog kočnja. Vjetroagregat je opremljen mehanizmom za aktivno zakretanje lopatica rotora kojim se upravlja mikroprocesorskim upravljačkim uređajem. Ono obezbjeđuje optimalno prilagođavanje ugla zakretanja lopatica od ili ka pravcu vjetra u cilju zaštite turbine, odnosno postizanja maksimalne snage. Takođe, u slučaju velikih brzina vjetra, vjetroagregat mora biti opremljen mehanizmom za zaustavljanje lopatica (pasivna kontrola) ili još bolje sistemom koji ima mogućnost kombinacije mehanizma za zakretanje lopatica sa sistemom za zaustavljanje lopatica (aktivna kontrola). Time se postiže nominalna snaga turbine pri velikim brzinama vjetra. Osim toga, opremljen je i aktivnim mehanizmom za zakretanje kabine koji kontinuirano zakreće rotirajuće lopatice rotora u smjeru strujanja vjetra. Kombinacijom navedenih načina regulacije brzine obrtanja turbine, obezbjeđuje se optimalna proizvodnja električne energije u svim uslovima brzine vjetra kao i mehanička zaštita elise vjetroturbine u uslovima vrlo jakih vjetrova.

Sve funkcije vjetroturbine su automatizovane upotrebom multiprocerskog kontrolnog sistema koji ima sljedeće osnovne funkcije:

- prije priključenja na mrežu, generator se sinhronizuje sa mrežom da bi se ograničila struja uključivanja (*eng. cut-in current*);
- struja uključivanja je niža od nominalne;
- automatsko zakretanje kabine (*eng. yaw system*) u smjeru strujanja vjetra;
- zaustavljanje turbine u slučaju kvara;
- nadgledanje rada vjetroturbine.

Turbinski dio vjetrenjače sa rotorom, kočnicama i prenosnikom snage čini važan dio sistema čija je osnovna uloga pogon generatora. Generator je povezan na mrežu preko internog blok-

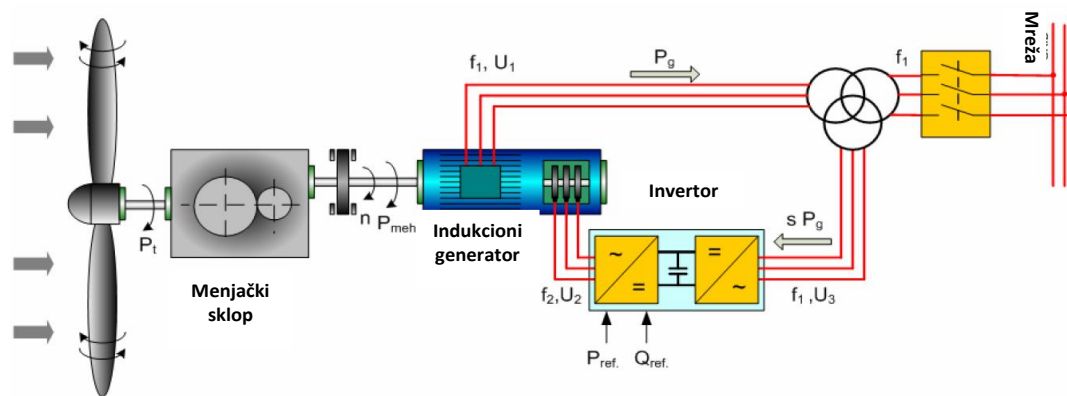
transformatora, koji transformiše napon sa nižeg na srednji ili viši nivo. Podjela generatora može se izvršiti na osnovu različitih kriterijuma:

- prema načinu rada:
 - paralelni rad sa postojećom distributivnom mrežom;
 - samostalni rad;
 - spregnuti rad sa drugim izvorima;
- prema vrsti električne struje koju generišu:
 - generatori jednosmjerne struje (zbog problema sa pouzdanosti rijetko se primjenjuju);
 - generatori naizmjenične struje;
- prema načinu okretanja:
 - generatori sa promjenljivom brzinom okretanja (češće se izvode danas):
 - sinhroni ili asinhroni generatori sa pretvaračem u glavnom strujnom krugu;
 - asinhroni generatori s upravljivim promjenljivim klizanjem;
 - asinhroni generatori sa nadsinhronom ili podsinhronom pretvaračkom kasakadom.

Generator sa promjenljivom brzinom okretanja priključen je na mrežu ili putem invertorskog sistema zasnovanog na energetskej elektronici ili napajanjem pobudnih namotaja generatora iz invertorskog sistema spoljašnje frekvencije. Brzina okretanja okretnog magnetskog polja generatora, te time i rotora, nezavisna je od frekvencije sistema. Rotor je u pogonu sa promjenljivom brzinom okretanja koja se prilagođava trenutnim stanjima brzine vjetra. Osnovni cilj pogona sa promjenljivom brzinom okretanja vjetroturbine pronalazi se u optimizaciji njegove efikasnosti, odnosno u maksimalnom iskorišćenju raspoložive energije vjetra.

- generatori sa konstantnom brzinom okretanja;
 - asinhroni generatori se priključuju na jake električne mreže koju karakterišu velika naponska i frekvencijska stabilnost. Sa sobom moraju da imaju kompenzatorski uređaj (kondenzatorske baterije) i priključni uređaj kako bi omogućio početnu sinhronizaciju sa mrežom i apsorpciju reaktivne snage koju generator uzima iz mreže;
 - sinhroni generatori se spajaju na ne tako jake mreže. Ovdje su potrebni pobudni sistemi i regulator brzine koji će održavati napon i frekvenciju [4].

Generatori sa konstantnom brzinom okretanja su direktno priključeni na mrežu. Frekvencija sistema određuje brzinu okretanja generatora, pa time i rotora. Niska brzina okretanja rotora vjetroturbine transformiše se u visoku brzinu okretanja generatora putem mjenjačke kutije sa prenosnikom. Brzina okretanja generatora zavisi od broja pari polova i frekvencije mreže [5]. Najčešće korišćeni tipovi generatora su: asinhroni, direktno spregnuti sa mrežom sa kratkospojenim rotorom ili sa namotajnim rotorom, zatim, dvostrano napajana asinhrona mašina kod koje je rotorsko kolo raspregnuto od elektroenergetskog sistema upotrebom back-to-back pretvarača i koji omogućava varijabilnu brzinu obrtanja, kao i regulaciju tokova aktivne i reaktivne snage. Najčešće korišćeni koncept za generatore velikih snaga je potpuno električno rasprezanje generatora (sinhroni sa permanentnim magnetima ili asinhroni) od elektroenergetskog sistema pomoću back-to-back konvertora.



Slika 2.7: Asinhroni generator sa dvostranim napajanjem

Na Slici 2.7 prikazan je primjer vjetrogeneratora kod kojeg električnu energiju generiše specijalni asinhroni generator sa kolutnim rotorom i kliznim prstenovima, kao i sa dvostranim napajanjem sa pretvaračem u kolu rotora, upravljani kontrolerom koji omogućava varijabilnu brzinu obrtanja, kao i regulaciju tokova aktivne i reaktivne snage. Generatorska jedinica je preko blok transformatora povezana na elektroenergetski sistem.

Prilikom instalacije parkova vjetroelektrana dolazi do izražaja još jedan nedostatak kad su vjetroelektrane u pitanju. Naime, može se reći da su troškovi proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana ekvivalentni početnim troškovima investicije, zato što se za samu proizvodnju ne koristi gorivo, što bi možda djelovalo kao olakšavajuća okolnost. Uzimajući u obzir gabaritnost svih dijelova jedne vjetroelektrane i to da je za njihov transport do mjesta instalacije, koja su uglavnom nepristupačni tereni, potrebno izgraditi dodatnu saobraćajnu infrastrukturu, problem investicije se dodatno usložnjava, a samim tim i početna cijena električne energije proizvedene iz vjetroelektrane može biti znatno veća u odnosu na električnu energiju iz konvencionalnih izvora.

Kao što je već prethodno pomenuto u upotrebi se najčešće mogu pronaći parkovi vjetroelektrana horizontalnog tipa ose, sa tri lopatice. Iako im je efikasnost veća, negativan uticaj na elektroenergetski sistem nije manji, a ponajmanje zanemarljiv. Naime, vjetar se odlikuje svojom vrlo intermitentnom i nepredvidivom prirodom, stoga je i plan proizvodnje iz ovakvih izvora dosta nesiguran, a za sigurno i pouzdano funkcionisanje elektroenergetskog sistema vrlo je važno planirati balans između proizvodnje odnosno uvoza i potrošnje odnosno izvoza. Za pokrivanje osnovnog i varijabilnog opterećenja potrebno je u periodu pripreme pogona napraviti plan angažovanja svih raspoloživih agregata. Pouzdan rad elektroenergetskog sistema zavisi od doprinosa svakog pojedinačnog generatora održavanju sigurnosti i pouzdanosti, pa samim tim i vjetroelektrana bez obzira ukoliko je proizvodnja zanemarljiva u odnosu na konzum. U procesu planiranja dnevnog balansa između ulaza i izlaza svaki megavat je od velikog značaja za sistem. Tako da se može reći da visoki stepen penetracije vjetroelektrana predstavlja izazov u očuvanju stabilnosti, sigurnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sistema. Neizvjesnost koja nastaje iz meteoroloških uslova utiče na širok raspon regulacijskih aktivnosti vezanih uz planiranje i vođenje pogona na nivou sistema. Neupravljaljivost izlaznih veličina predstavlja ozbiljnu prepreku koja često rezultira sa visokom procjenom troškova pomoćnih usluga iz upravljivih konvencionalnih elektrana. Troškove pomoćnih usluga snosi Operator prenosnog sistema, to znači da ukoliko dođe do nedozvoljenog odstupanja u sistemu, Operator prenosa je dužan da aktivira pomoćne usluge, odnosno pozitivnu ili negativnu regulacionu rezervu, u zavisnosti od toga da li je odstupanje od plana negativno ili pozitivno, iz konvencionalnih izvora. Ukoliko je odstupanje prouzrokovalo, nedovoljna ili premašena planom, proizvodnja iz vjetroelektrane, onda je kompanija, u čijem je

vlasništvu, dužna da kao balansno odgovorni subjekt snosi finansijsku odgovornost za nastalo odstupanje, kroz propisani balansni mehanizam koji sprovodi Operator tržišta električne energije. Osim finansijskog, mnogo važniji je uticaj tehničke prirode, odnosno uticaj na opterećenost ostalih elemenata u sistemu. Da bi se izvršili potrebni proračuni tokova snaga, naponskih prilika, kratkih spojeva i uticaja na prenosni sistem u pogledu odziva vjetroelektrane na poremećaje u sistemu kao i uticaja na kvalitet električne energije (flikeri, varijacije napona) potrebno je definisati uslove rada EES-a za vremenski horizont u kojem se planira puštanje vjetroelektrane u pogon. Pored toga potrebno je uvažiti postojeće planove razvoja posmatrane prenosne mreže kako bi se u analizi uzele u obzir godine u kojima je planiran ulazak novih elemenata u pogon a koji su od značaja za analizu uticaja vjetroelektrane. Integracijom dolazi i do povećanih tokova snaga po karakterističnim dalekovodima, ali njihovo opeterećenje može biti regulisano smanjenim angažovanjem konvencionalnih generatorskih jedinica na posmatranom području. Vjetroelektrane se mogu integrisati jedino u slučaju da je analizom dokazano da prije i nakon priključenja vjetroelektrane naponi ostaju u propisanim granicama i da nema opterećenih elemenata iznad dozvoljenih vrijednosti.

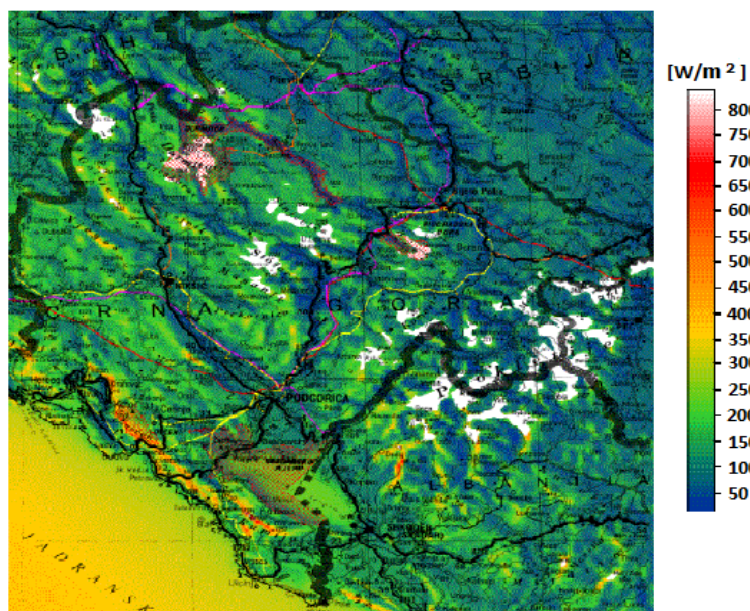
2.2 Potencijali vjetroelektrana u Crnoj Gori

Evropska Unija je 2001. godine usvojila Direktivu o obnovljivim izvorima (2001/77/EC) koja predstavlja obavezu za zakonodavstva zemalja članica Evropske Unije u smislu povećanja udjela obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije. U ukupnoj proizvodnji električne energije u 1997. godini prosječni udio obnovljivih izvora bio je 13,9%, koji se u 2010. godini morao podići na prosjek od 22,1%. U ukupan udio, prema Direktivi, uključene su i velike hidroelektrane, iako se radi o konvencionalnom izvoru energije. U okviru paketa zakona o čistoj energiji, Evropski parlamet usvojio je ciljeve za obnovljivu energiju na obaveznih 32% do 2030. godine. Tako i Crna Gora, koja trenutno nije članica Evropske Unije, ali teži priključenju, treba da radi na podsticanju razvoja obnovljivih izvora energije. Iako je bogata hidropotencijalom, samim tim već, pravno gledano, ispunila obaveze iz izglasane Direktive, razvojem vjetroelektrana dolazi do unaprijeđenja elektroenergetskog sistema i energetike u Crnoj Gori uopšte. Analizom za procjenu potencijala obnovljivih izvora u Crnoj Gori, pokazalo se da Crna Gora raspolaže solidnim potencijalom za razvoj energetskih sistema koji bi bili zasnovani na korišćenju obnovljivih izvora energije i koji, isto tako, mogu imati značajnu ulogu u elektroenergetskom bilansu. Međutim, takav perspektivni i pozitivni scenario treba da prevaziđe brojne prepreke koje onemogućavaju širu upotrebu obnovljivih izvora energije u Crnoj Gori, i na području Balkana uopšte, kao što su:

- niske cijene tradicionalnih energenata;
- nedostatak finansijskih sredstava i odsustvo investitora zainteresovanih za ulaganja u pomenute tehnologije;
- nekonkurentna potrošnja;
- nepostojanje potpune zakonodavne osnove neophodne za promovisanje upotrebe obnovljivih izvora energije;
- nepotpuno informisanje javnosti, koja nije na adekvatan način upoznata sa mogućnostima upotrebe obnovljivih izvora energije.

Prema Strategiji za razvoj energetike Crne Gore do 2030. godine, plan proizvodnje električne energije iz energije vjetra je za 2020. godinu 348 GWh, procjena za 2025. godinu je 387 GWh, a za 2030. godinu 436 GWh. Ova procjena korišćenja potencijala vjetra za proizvodnju električne energije izračunata je po metodologiji iz Direktive 2009/28/EC. Ukoliko se uzme u obzir 2014. godina, kada je ukupna potrošnja bila 3.254,922 GWh, a proizvodnja iz postojećih

izvora 3.009,637 GWh, može se reći da bi u budućnosti, kada vjetroelektrane uđu u pogon, njihova proizvodnja podmirivala nešto više od 10% ukupne potrošnje. Potencijal vjetra u Crnoj Gori je analiziran po prvi put u 2007. godini u studiji CETMA-e pod nazivom "Procjena potencijala obnovljivih izvora energije Republike Crne Gore". Vjetropotencijal je bio procijenjen na osnovu trodimenzionalnog makroskopskog numeričkog modela, uz kalibraciju rezultata putem mjerenja na terenu. Prilikom analize energetskog potencijala vjetra za Crnu Goru, najprije je izvršena teorijska procjena energetskog potencijala vjetra za čitavu teritoriju Crne Gore i na osnovu dobijenih rezultata došlo se do zaključka da Crna Gora ima značajan potencijal za korišćenje energije vjetra na pojedinim djelovima svoje teritorije. Rezultati analiza pokazuju da je na većem dijelu teritorije Crne Gore brzina vjetra manja od 5 m/s, što je tipično i za region Sjeverne Italije i za Centralnu Evropu. Ipak, procijenjene vrijednosti se povećavaju do 5-7 m/s krećući se ka primorju, dostižući vrijednosti od 7-8 m/s u određenim područjima duž obale, gdje su zapažene vrijednosti koje su tipične i za Južnu Italiju, Grčku ili Španiju. Takođe je interesantna oblast oko Nikšića sa prosječnim vrijednostima brzine vjetra u opsegu od 5,5-6,5 m/s. Tipične vrijednosti stvarnog energetskog potencijala vjetra iznose 100-300 W/m², dok u najvjetrovitijim područjima, na obroncima i vrhovima planinskih vijenaca, stvarni energetski potencijal vjetra dostiže vrijednosti od preko 400 W/m². Stvarni energetski potencijal vjetra na visini od 50 metara iznad nivoa tla prikazani su na Slici 2.8.



Slika 2.8: Stvarni energetski potencijal vjetra [W/m²] na 50 m i.n.t.

Analiza ukazuje da većina područja koja se nalaze u unutrašnjosti Crne Gore, a koja karakteriše velika brzina vjetra, gube na atraktivnosti zbog velike visine planinskih vijenaca koji dominiraju u datoj oblasti. Na preostalom dijelu teritorije, najvjetrovitija područja često se nalaze na obroncima planina i većina njih nije povezana sa postojećom putnom mrežom i infrastrukturom, u mnogim slučajevima je zapažena i značajna udaljenost ovih područja od električne mreže. Pošto u priobalnom području i oko Nikšića postoji dobro razvijena mreža dalekovoda i puteva, procjenjuje se da upravo ta područja predstavljaju najinteresantnije lokacije za iskorišćavanje energetskog potencijala vjetra. Takođe se pominju lokacije kao što su nacionalni parkovi, od njih, nacionalni park Lovćen kako zbog velike brzine vjetra, tako i zbog dobro razvijene infrastrukture.

Najatraktivnije lokacije za iskorišćavanje energetskog potencijala vjetra u Crnoj Gori jesu sljedeće:

- **Priobalni pojas:** najveće brzine vjetra u zemlji izmjerene su u oblasti Rumije, uzimajući u obzir tehnička, ekonomska i ekološka ograničenja. Još jedno interesantno područje su brda u zaleđu Petrovca (ovo područje se nalazi u blizini glavnih saobraćajnica i mreže od 220 kV). Ako se izuzme planina Lovćen, ostale pogodne lokacije mogle bi biti u planinskim zonama u zaleđu Herceg Novog i Orahovca. U svim ovim oblastima srednja brzina vjetra iznosi preko 6 m/s;
- **Brda oko Nikšića:** ovu oblast karakteriše srednja brzina vjetra u opsegu od 5,5-6,5 m/s. Pored toga, postojeća infrastruktura puteva i električne mreže obezbjeđuje dobru osnovu za razvoj projekata za korišćenje energetskeg potencijala vjetra.

Razmatrajući samo najpogodnije oblasti za instaliranje vjetrogeneratora, može se zaključiti da Crna Gora raspolaže energetskeg potencijalom vjetra od 100 MW računajući samo najvjetrovitija područja (gde su brzine vjetra iznad 7 m/s). Ukoliko se uzmu u obzir i zone sa srednjim potencijalom, ta vrijednost dostiže skoro 400 MW. Iskorišćenjem pomenutog energetskeg potencijala, u cilju proizvodnje električne energije, moglo bi se obezbijediti od 20% do 25% godišnje potrošnje električne energije u Crnoj Gori [6].

2.3 Uticaj vjetroelektrana na EES i okolinu

Priključenje vjetroelektrana, kao obnovljivog izvora sa intermitentnom prirodom proizvodnje, ima snažan uticaj na bilo koji elektroenergetski sistem. Intermitentnost obnovljivih izvora podrazumijeva varijabilnost i nepredvidivost proizvodnje. Varijabilnost proizvodnje obnovljivih izvora je posljedica zavisnosti proizvodnje od meteoroloških uslova čak i kada bi imali 100% tačnu prognozu. Priključenje vjetroelektrana na mrežu može imati trostruki uticaj: finansijski, tehnički i ekološki. Kada se govori o finansijskom uticaju proizvodnje vjetroelektrane na elektroenergetski sistem, to se odnosi na procjenu dodatnih kapaciteta potrebnih za sekundarnu i tercijarnu regulaciju odnosno potrebne kapacitete za pokrivanje odstupanja planirane proizvodnje vjetroelektrane od ostvarene. Varijabilnost proizvodnje vjetroelektrane zavisi od promjenljivosti intenziteta vjetra u svim vremenskim horizontima što zahtijeva prilagođavanje režima rada klasičnih elektrana pri koordinaciji rada sa vjetroelektranama. Do sada sprovedena istraživanja pokazuju da nivo penetracije vjetroelektrana do oko 10% vršnog opterećenja ne dovodi do značajnijih problema u regulaciji sistema. Pri manjim nivoima penetracije, varijacije u proizvodnji vjetroelektrana se uklapaju u uobičajene varijacije potrošnje i poremećaje u radu ostalih elektrana i razmjene električne energije. U svakom slučaju, od ključnog značaja je primjena i usavršavanje metoda za prognozu proizvodnje vjetroelektrana kako bi se minimizovala potreba za dodatnim kapacitetima za regulaciju odstupanja proizvodnje vjetroelektrana od plana.

Za procjenu dodatnih kapaciteta za regulacijom potrebno je sagledati karakteristike kratkoročne i dugoročne varijacije proizvodnje vjetroelektrana.

Kratkoročne varijacije proizvodnje električne energije iz vjetroelektrane su izazvane kratkoročnim varijacijama brzine vjetra i geografskom dispozicijom elektrane. Analizom izmjerenih podataka o brzini vjetra moguće je sa vrlo velikom tačnošću predvidjeti iznose varijacija koje se mogu očekivati u minutnim, satnim ili višesatnim intervalima.

Kratkoročne varijacije imaju najveći uticaj na rad elektroenergetskog sistema i one zavise od:

- ukupnog instalisanog kapaciteta vjetroelektrana;
- specifičnosti elektroenergetskog sistema (struktura i fleksibilnost proizvodnje, nivo penetracije obnovljivih izvora u odnosu na konvencionalne, geografska distribuiranost obnovljivih izvora);

- specifičnosti samog upravljanja (postojanje prognoze vjetra, strategija primjena kod balansiranja).

Neophodno je analizirati različite vremenske domene kratkoročnih varijacija proizvodnje u cilju procjene njihovog uticaja na različite vremenske domene sistemske rezerve. Vremenski domeni kratkoročnih varijacija mogu biti:

- sekundne varijacije (brže varijacije od 1 do 60 sekundi);
- minutne varijacije (do 10 minuta);
- satne varijacije (od 1 do nekoliko sati).

Iz navedene klasifikacije, sekundne varijacije imaju najmanji uticaj ili nemaju uopšte uticaj na rad elektroenergetskog sistema, pogotovo ukoliko u sistemu ima veći broj vjetroelektrana. Minutne varijacije su vrlo značajne jer se najteže predviđaju i mogu iznositi maksimalno od 10% do 20% instalisane snage generatora. Dok su satne varijacije takođe vrlo važne, ali se mogu dosta dobro predvidjeti uz određene neizvjesnosti i greške. Ovakve varijacije kreću se od 20% instalisane snage vjetroelektrane, povremeno i više. Ove varijacije se smanjuju korekcijama prognoze na dnevnom nivou. Varijacije proizvodnje u višesatnim intervalima predstavljaju važan aspekt u procesu planiranja rada EES-a ali se mogu uspješno predvidjeti dan unaprijed u zavisnosti od kvaliteta sistema za prognozu i istorijskih podataka.

Dugoročne varijacije proizvodnje uključuju mjesečne i sezonske varijacije proizvodnje vjetroelektrana, a koje su posljedica klimatskih efekata. Ove varijacije se uspješno procjenjuju na osnovu istorijskih podataka i imaju prije svega ulogu u dugoročnom planiranju i nijesu toliko važne za svakodnevni rad i upravljanje sistemom.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da se osnovni uticaj varijabilnosti proizvodnje vjetroelektrane najviše ogleda u kratkoročnim vremenskim periodima koje podrazumijevaju planiranje proizvodnje na dnevnom nivou i kao najbitnije za operatora prenosnog sistema, obezbjeđivanje rezerve za sekundarnu i tercijarnu regulaciju. Ovo se isto odnosi i na tercijarnu regulaciju. Sa tehničkog aspekta, priključenje obnovljivih izvora električne energije na mrežu, direktno se odražava na sve elemente u sistemu, na kvalitet električne energije u mreži i na funkcionisanje sistema uopšte. U okviru proračuna tokova snaga, vrši se analiza naponskih prilika i opterećenja elemenata prenosne mreže sa aspekta zadovoljenja dozvoljenih vrijednosti napona, odnosno dozvoljenog opterećenja elemenata u normalnom pogonu. Takođe se vrši poređenje opterećenosti prenosne mreže bez vjetroelektrane i nakon priključenja vjetroelektrane. Povezivanje vjetroelektrane je dozvoljeno ukoliko se u prenosnoj mreži u analiziranom periodu i karakterističnim režimima bez vjetroelektrane i nakon njenog priključenja, pokaže da su naponi u okviru propisanih granica i da nema opterećenih elemenata iznad dozvoljenih vrijednosti. U okviru proračuna mora se izvršiti analiza „n-1“ kriterijuma sigurnosti sa aspekta zadovoljenja dozvoljenih vrijednosti napona odnosno dozvoljenog opterećenja elemenata tokom ispada elemenata mreže. U zavisnosti od topologije mreže i naponskog nivoa na koji se priključuje vjetroelektrana, može doći i do povećanja gubitaka u sistemu. Ukoliko se priključenjem vjetroelektrane dodatno opterećuje mreža sa nižim visokim naponima, onda će definitivno doći do većeg povećanja gubitaka u sistemu.

Razmjena reaktivne snage svakog proizvodnog objekta sa prenosnim sistemom mora biti tako tehnički podešena da zadovolji propisane vrijednosti date od strane regulatornog tijela koja donosi pravila o funkcionisanju prenosne mreže. Prema uslovima propisanim u pravilima za funkcionisanje prenosne mreže, svaka generatorska jedinica mora ispuniti, kao osnovni zahtjev, isporuku reaktivne snage u tački priključenja minimalno u definisanom opsegu za različite vrijednosti napona u tački priključenja. Moderni vjetroagregati imaju velike mogućnosti proizvodnje reaktivne snage, a samim tim i regulacije napona u tački priključenja. Ove mogućnosti naročito dolaze do izražaja u situacijama kada na mikrolokaciji vjetroelektrane, u određenom trenutku ima vrlo malo ili nema vjetra uopšte, odnosno vjetroelektrana proizvodi

malo ili uopšte ne proizvodi aktivnu snagu. Regulacija izlaznih vrijednosti u tački priključenja se obavlja centralnim staničnim računarom sa instaliranim SCADA sistemom za optimizaciju pogona pojedinih vjetroegregata. U situacijama kada nema proizvodnje, vjetroelektrana se ponaša kao potrošač aktivne snage, budući da je određena aktivna snaga potrebna za sopstvenu potrošnju, odnosno pogon motora i ostalih uređaja neophodnih za normalan pogon vjetroelektrane. S obzirom na takvo pogonsko stanje, potrebno je uz saglasnost operatora mreže, bilo da se radi o operatoru distributivnog ili prenosnog sistema, sklopiti i ugovor o snabdijevanju sa snabdjevačem. U takvom ugovoru, vrlo često se definišu ograničenja pogona s obzirom na proizvedenu odnosno potrošenu reaktivnu snagu. Osim toga, u elektroenergetskim saglasnostima skoro svih vjetroelektrana, najčešće je naveden uslov proizvodnje reaktivne snage u opsegu $\cos\varphi = \pm 0,9$ (induktivno i kapacitivno). Kada vjetroelektrana ne proizvodi aktivnu snagu, ista može aktivno učestvovati u regulaciji napona i reaktivne snage proizvodnjom reaktivne snage pomoću sopstvenih kompenzatorskih uređaja izvedenih najčešće elementima energetske elektronike [7].

Postoje i dodatni uticaji na mrežu i kvalitet električne energije koji se moraju ispitati, a to su: uticaji na emisiju flikera, uticaji na harmonijska izobličenja, varijacije napona. Priključenjem vjetroelektrane na mrežu mijenja se i ukupna impedansa mreže, a kao posljedica, i struja i snaga kratkog spoja. Na osnovu izračunatih vrijednosti struja kratkog spoja može se izračunati faktor snage kratkog spoja SCR, kojim se karakteriše krutost mreže u tački priključenja vjetroelektrane u pogledu naponskih prilika. Faktor snage kratkog spoja se definiše kao odnos snage trolnog kratkog spoja u tački priključenja i ukupne nominalne prividne snage vjetroelektrane:

$$SCR = \frac{S_{3k}}{S_n} \quad (2.2)$$

Iako kriterijumi za procjenu ovog faktora nijesu standardizovani i mijenjaju se u zavisnosti od opreme za koju se računa (priključenje DC kabla, sinhronih mašina, vjetroelektrana...), ovaj faktor može da posluži kao dobra indikacija o krutosti, odnosno jačini mreže u tački priključenja. U opštem slučaju, što je veći SCR vjetroelektrana će se bolje ponašati u pogledu naponskih prilika². U svjetskim studijama koje se bave priključenjima vjetroelektrana koriste se različiti kriterijumi za procjenu SCR faktora prema kojima je mreža slaba ukoliko je vrijednost ovog faktora manja od 6-10, u većini slučajeva mreže u kojima je vrijednost ovog faktora veća od 10 se već smatraju jakim.

Treperenje napona ili flikeri, su oscilacije napona (prenaponi i propadi napona) koje se ponavljaju i koje nastaju ili zbog brzih promjena opterećenja potrošača/proizvođača, relativno velike snage u odnosu na snagu kratkog spoja u datoj tački mreže ili zbog kvarova u mreži. Nivo emisije flikera iz vjetroelektrane se definiše koeficijentima flikera P_{st} (kratkotrajni period od 10 minuta) i P_{lt} (dugotrajni period, niz od 12 vrijednosti P_{st}) koji u čvoru priključka ne smiju da pređu dozvoljene vrijednosti prikazane u Tabeli 2.1 [8]:

Tabela 2.1: Granične vrijednosti jačine flikera u prenosnom sistemu

Naponski nivo	P_{st}	P_{lt}
400 i 220kV	0,8	0,6
110kV	1	0,8

²Koncept čvora beskonačne snage je specijalan slučaj sa faktorom $SCR = \infty$ što znači da ovaj čvor može da održava napon konstantnim

Indeksi jačine flikera P_{st} i P_{lt} za N vjetrogeneratora priključenih na mrežu u posmatranom čvoru se računaju preko sljedećih izraza:

a) u stacionarnom režimu:

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_{k3}} \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i(\Psi_k, v_{sr}) \cdot S_{n,i}]^2} \quad (2.3)$$

b) u uslovima prekidnih operacija (prelaznih procesa):

$$P_{st} = \frac{18}{S_{k3}} \left\{ \sum_{i=1}^N N_{10,i} \cdot [k_{f,i}(\Psi_k) \cdot S_{n,i}]^{3.2} \right\}^{0.31} \quad (2.4)$$

$$P_{lt} = \frac{8}{S_{k3}} \left\{ \sum_{i=1}^N N_{120,i} \cdot [k_{f,i}(\Psi_k) \cdot S_{n,i}]^{3.2} \right\}^{0.31} \quad (2.5)$$

Korišćene oznake imaju sljedeća značenja:

N – broj generatora

S_{k3} – snaga trolnog kratkog spoja u čvoru priključka (MVA),

c_i – koeficijent flikera u stacionarnom režimu,

Ψ_k – fazni ugao impedanse mreže u čvoru priključka ($^\circ$),

v_{sr} – prosječna godišnja brzina vjetra na osi vratila vjetroturbine (m/s),

$S_{n,i}$ – nazivna snaga pojedinačnog vjetrogeneratora (MVA),

$N_{10,i}$ – broj prekidnih operacija i -te proizvodne jedinice u vremenskom intervalu od 10 min,

$N_{120,i}$ – broj prekidnih operacija i -te proizvodne jedinice u vremenskom intervalu od 120 min,

$k_{f,i}$ – koeficijent flikera tokom prelaznih procesa.

Parametri S_{k3} i Ψ_k zavise od mjesta priključka, a v_{sr} od predviđene brzine vjetra na osnovu prethodnih mjerenja. Koeficijent flikera označava osobinu elektrane da proizvodi flikere. Vrijednost koeficijenta flikera daje proizvođač, odnosno ovlašćena nezavisna institucija, posebno za svaki generator i elektranu kao cjelinu, na osnovu atesta o tipskom ispitivanju elektrane koja ima iste ili slične karakteristike kao elektrana koja se gradi. Vrijednost koeficijenta se daje posebno za emisije flikera u stacionarnom režimu $c_i(\Psi_k, v_{sr})$ i tokom prelaznih procesa $k_{f,i}(\Psi_k)$, za različite vrijednosti faznog ugla i za različite prosječne godišnje brzine vjetra (v_{sr}). Nakon završene gradnje elektrane i priključenja na sistem mora se mjerenjem potvrditi da koeficijent flikera ne prelazi vrijednosti koje su garantovane atestom o ispitivanju tipa. Mjerenje se vrši u realnim pogonskim uslovima [9]. Koeficijent emisije flikera tokom prelaznih procesa $k_{f,i}$, daje proizvođač opreme za različite vrijednosti faznog ugla impedanse na mjestu priključenja i daje se za sljedeće prekidne operacije:

- uključenje pri početnoj brzini vjetra,
- uključenje pri nominalnoj ili većoj brzini vjetra,
- najnepovoljniji slučaj preklapanja između generatora (primjenjivo kod vjetroturbina sa više generatora ili kod generatora sa više namotaja).

Priključenjem obnovljivih izvora na mrežu ima negativan uticaj i na sadržaj harmonika u mreži. Harmonici se definišu kao neželjene spektralne komponente izobličenog signala čija je frekvencija jednaka cjelobrojnom umnošku osnovne frekvencije (50Hz). Negativan uticaj može da odrazi na povećanje gubitaka u generatoru, pregrijavanju neutralnog provodnika, dodatno

grijanje transformatora, probleme sa kondenzatorskim baterijama, probleme sa radom releja, neispravan rad mjerne opreme i dodatne gubitke prilikom transporta i distribucije el. energije. Harmonijsko izobličenje svakog pojedinačnog harmonika u prenosnom sistemu može se izračunati:

$$D_n = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

gdje su:

- U_n - amplituda napona n-tog harmonika,
- U_1 - amplituda napona osnovnog harmonika.

Faktor ukupnog harmonijskog izobličenja, THD(%) definiše se kao:

$$THD = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \% \quad (2.7)$$

Najveći dozvoljeni sadržaj viših harmonika u prenosnom sistemu po naponskim nivoima prikazan je u Tabeli 2.2:

Tabela 2.2: Granične vrijednosti sadržaja viših harmonika u prenosnom sistemu

Naponski nivo	$D_n\%$	THD%
400 i 220kV	1	1,5
110kV	1,5	3

Na osnovu analiza vrši se proračun o ukupnim harmonijskim izobličenjima da ne prelaze vrijednosti koje su propisane u mrežnim pravilima.

Promjene napona u mreži izazvane pogonom vjetroelektrane definišu se koeficijentom d relativne promjene napona u odnosu na nominalnu vrijednost napona priključka:

$$d = \frac{\Delta U_{dyn}}{U_n} \quad (2.8)$$

pri čemu je ΔU_{dyn} apsolutna promjena napona, a U_n nominalni napon u čvoru priključka. Iznosi koeficijenta d se računaju za iste varijante sklopnih operacija kao i za emisiju flikera, pomoću izraza:

$$d = k_U(\Psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_{k3}} \quad (2.9)$$

pri čemu je:

S_n – nazivna snaga najveće jedinice (uz pretpostavku vrlo male vjerovatnoće da sklopnu operaciju radi istovremeno više od jedne jedinice),

k_U – step faktor promjene napona.

Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora, kao što je vjetar, smatra se ekološki prihvatljivijom od proizvodnje iz konvencionalnih izvora, poput termoelektrana na uglj ili velikih hidroelektrana. Kako za svoj rad ne koriste gorivo, vjetroelektrane, za razliku od termoelektrana, ne doprinose povećanju emisija gasova sa efektom staklene bašte koji su jedan

od glavnih pokretača klimatskih promjena. Tokom rada, vjetroelektrane ne opterećuju životnu sredinu niti ispuštanjem drugih štetnih gasova, poput ugljen-monoksida, sumpor-dioksida, kao niti mikroskopskih čestica koje u životnu sredinu ispuštaju ostale elektrane. Studijama je dokazano da je korišćenjem energije vjetra došlo do smanjenja emisije ugljen-dioksida od 0,33 do 0,59 tona po MWh u odnosu na korišćenje fosilnih goriva. Vjetroelektrane mogu da se sastoje od velikog broja stubova sa generatorima i tako zauzimaju veliku površinu, ali samo mali dio te površine (oko 1%) je potpuno zauzet temeljima generatora, pristupnim putevima i pratećim objektima, dok preostali dio površine ispod generatora može da se koristi za druge aktivnosti poput poljoprivrede. Negativni uticaji koje vjetroelektrane mogu da imaju na staništa u blizini kojih se nalaze, su:

- direktan gubitak staništa zbog izgradnje infrastrukture (kao što su temelji generatora, pristupnih puteva, deponije materijala...);
- degradacija staništa usljed promjena ili narušavanja, posebno zbog narušavanja hidrološkog režima što može da promjeni nivo podzemne vode ili snabdevanje staništa vodom (važno za tresetišta i vlažna staništa);
- fragmentacija staništa i pojačani efekat ruba (otvara se više rubova);
- degradacija i gubitak staništa izvan same lokacije vjetroelektrane do koje je došlo usljed zagađenja, erozije ili zbijanja tla na mjestu izgradnje [10].

Uticaji vjetroelektrana na životinjske vrste dešavaju se tokom faza izgradnje objekta i tokom rada elektrana. U fazi gradnje dolazi do narušavanja staništa građevinskim radovima i bukom izazvanom transportom djelova, zbijanja tla i otklanjanja vegetacije. Ovi negativni uticaji su uglavnom veoma lokalizovani i kratkotrajni. Vjetroelektrane imaju posebno negativan uticaj na ptice. Negativni uticaji na ptice se svrstavaju u četiri prepoznata tipa:

- Stradanje usljed sudara sa vjetrogeneratorima;
- Uznemiravanje i napuštanje staništa;
- Efekat barijere;
- Gubitak ili oštećenje staništa.

Fragmentacija i eventualni gubitak staništa zbog promjena u prostoru izazvanih izgradnjom vjetroelektrana može da ima dugotrajniji efekat na pojedine vrste koje su osjetljive na takav tip promjena. Osim promjene staništa, neke vrste reaguju i na promjene u životnoj sredini koje donosi rad vjetroelektrana, a tu se prvenstveno misli na buku, vibracije, rotacije generatora, kao i na samo prisustvo novih objekata u prostoru. Emisije buke zavisne su od obodne brzine okretanja rotora, koja se povećava dužinom lopatica i brzinom vjetra. Maksimalna buka kopnenih vjetroagregata na 10 m iznad tla (ispod vjetroagregata) rijetko prelazi 108 dB. Vjetroagregati su visoki objekti, relativno malog volumena, ali ipak mogu da zaklanjaju svjetlost, odnosno da stvaraju sjenku u blizini. Kada su u pogonu, može da dođe do neugodnog treperenja sjenke koje je uočljivo na udaljenostima do 10 prečnika rotora. Ti efekti su najizraženiji u svitanje i sumrak. Odgovarajućim lociranjem vjetroagregata može se izbjeći uticaj zasjenčavanja i treperenja. Kako bi se izbjegao negativan uticaj na lokalno stanovništvo, preporučuje se da trajanje zasjenčavanja na poslovnim i stambenim objektima u okviru radijusa od 500 metara ne bude duže od 30 časova godišnje, ili 30 minuta dnevno.

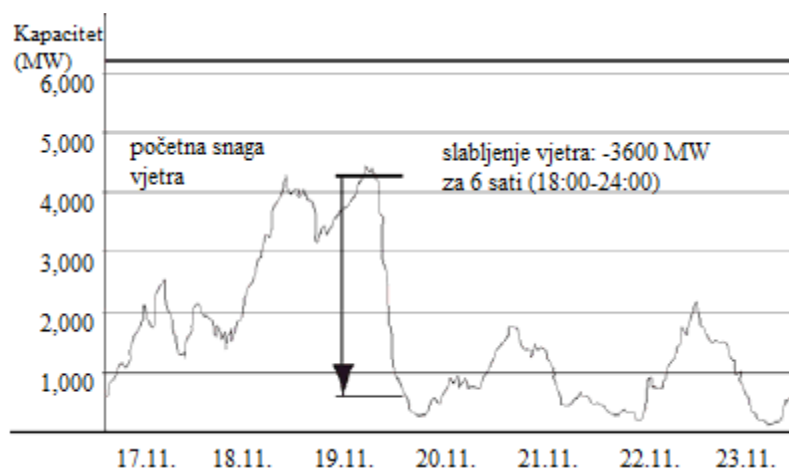
Vizuelni uticaj definiše se kao subjektivan i promjenljiv u vremenu (stav posmatrača se mijenja), naglašava se da i same vjetroelektrane nijesu stalan objekat u prostoru i da je njihovo otklanjanje nakon životnog vijeka (otprilike 20 godina) izvjesno. Vizuelni uticaj vjetroelektrana može da bude izrazito negativan ako se radi o područjima koja se smatraju pogodnim za razvoj turizma, jer u njima mogu da umanje primamljivost ponude koja je zasnovana na očuvanom prirodnom predjelu. Osim samih generatora i prenosna mreža dalekovoda može da ima određene negativne uticaje na prirodne vrijednosti. Oni se najviše ispoljavaju kao negativni vizuelni uticaji jer se radi o objektima koji se u prostoru ističu svojom veličinom, ritmičkim

rasporedom i u kontrastu su sa okolinom. Kako bi se umanjio ovaj uticaj, preporučuje se planiranje vjetroelektrana u blizini već postojećih dalekovoda, a sve potrebne nove komponente poželjno je planirati izvan vizuelno atraktivnih područja, odnosno planirati njihovu izgradnju u blizini puteva ili industrijskih zona. Fizičko zauzimanje staništa nije veliko za dalekovode i ima veći uticaj jedino tokom izgradnje. Uticaj prenosne mreže dalekovoda na ptice može da bude značajno negativan ukoliko se prilikom njenog planiranja ne pridržava standarda kvaliteta. Postavljanjem vodova pod zemlju potpuno se eliminiše rizik od negativnih uticaja na ptice. Prilikom izgradnje vjetroelektrana isključuju se područja koja čine ekološku mrežu, kao i sva ostala područja pod međunarodnim i nacionalnim režimima zaštite, te područja sa velikom gustinom ptica i svjetski migratorni koridori [10].

2.4 Metode za prognozu proizvodnje iz vjetroelektrane

Za stabilno korišćenje sistema, neophodno je svakog dana napraviti plan proizvodnje (hidroelektrane, termoelektrane, vjetroelektrane...) koji zajedno sa planom uvoza moraju biti jednaki planu potrošnje (distribucija i veliki potrošači) i planu izvoza, što se u praksi kratkoročnog planiranja naziva *vozni red*. Takav vozni red radi se za jedan dan unaprijed i mora biti izbalansiran, odnosno razlika između proizvodnje (i uvoza), i potrošnje (i izvoza), mora biti jednaka nuli. Poput drugih izvora električne energije, energija vjetra mora biti prilagođena određenom rasporedu potrošnje, odnosno, proizvodnja iz vjetroelektrana mora pratiti potrebe konzuma (i razmjene na granicama), a kako bi se izbjegla nedozvoljena odstupanja, proizvodnja vjetroelektrane se mora unaprijed isplanirati. Zbog toga se koriste metode prognoze izlazne snage vjetroelektrane, uglavnom bazirajući se na vremenskoj prognozi vjetra. Ali predviđanje iznosa dobijene energije iz vremenske prognoze vjetra nije uvijek najpouzdanija metoda. Jedan od razloga za to je vrlo česta pojava, da se pri većim brzinama vjetra dobijaju veće količine energije, koje dolaze u kraćim intervalima, odnosno na mahove, kao i vjetar. Posljedica toga je da vjetroelektrane nemaju stalnu snagu na izlazu kao što to imaju npr. termoelektrane, te postrojenja koja napajaju vjetroagregati moraju imati obezbjeđenu proizvodnju električne energije i iz nekog drugog izvora. Intermitentnost i nepredvidiva priroda vjetra povećavaju troškove za regulaciju, podižu radnu zalihu, a pri visokoj proizvodnji mogla bi dovesti do povećanja količine električne energije u sistemu, što može prouzrokovati probleme sa preopterećenjem. Sve veći udio vjetroelektrana u elektroenergetskim sistemima u svijetu stvara sve veće probleme vezane za regulaciju elektroenergetskog sistema. Najveći problem vezani su uz stohastičku prirodu vjetra, kao izvora energije, odnosno intermitirajuću vrstu proizvodnje električne energije. Stoga je vrlo bitno što tačnije predvidjeti proizvodnju, odnosno izlaznu snagu vjetroelektrana da bi se mogle planirati i potrebne mjere regulacije aktivne snage i frekvencije.

Na Slici 2.9 prikazan je primjer fluktuacije ukupne snage proizvodnje svih vjetroelektrana u prenosnom sistemu Njemačke na kojoj je vidljivo i smanjenje snage proizvodnje za 3640 MW u vremenu od 6 sati. Takav propad u proizvodnji aktivne snage desio se nekoliko puta, te je dovelo do znatnih poteškoća u regulaciji frekvencije i aktivne snage, što je uz određene probleme u prenosnoj mreži, nekoliko puta rezultiralo i raspadom sistema. Iz ovog razloga, operatori prenosnog sistema u Evropi i svijetu teže što tačnije predvidjeti proizvodnju aktivne snage vjetroelektrane u određenom budućem periodu sa ciljem ispravnog predviđanja potrebnih regulacijskih mjera, angažovanja rotirajuće rezerve, odnosno opšteg poboljšanja stabilnosti elektroenergetskog sistema.



Slika 2.9: Fluktuacija ukupne proizvodnje svih vjetroelektrana u prenosnom sistemu Njemačke

Električna energija dobijena iz energije vjetra varira iz sata u sat, dnevno i sezonski. Postoje i godišnje varijacije, ali nijesu toliko značajne. S obzirom na to, može se kratkoročno predvidjeti količina energije koju možemo dobiti. Da bi se mogla predvidjeti izlazna snaga vjetroelektrane, potrebno je otkriti koje veličine direktno utiču na izlaznu aktivnu snagu vjetroegregata. Specifična snaga vjetra proporcionalna je kubu brzine vjetra, pa je prosječna specifična snaga jednaka:

$$P_{vj} = \frac{1}{2T} \int_0^T \rho v^3(t) dt \quad (2.10)$$

Gustina vazduha funkcija je pritiska i temperature vazduha. Pritisak i temperatura vazduha funkcija su nadmorske visine pa se na nivou mora ($\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$) za specifičnu snagu vjetra može približno uzeti da je jednaka $P_{vj(0)}=0,6 \cdot v^3$.

Kinetička energija vjetra u struji vazduha u vremenu t dobija se množenjem snage sa vremenom prema izrazu (2.11):

$$E_{k,vj} = \int_0^t P_{vj}(t) dt \quad (2.11)$$

Odnosno za vremenski interval T u kojem se brzina vjetra uzima konstantnom (2.12):

$$E_{k,vj} = \frac{1}{2} \rho v^3 T \quad (2.12)$$

gdje je $E_{k,vj}$ kinetička energija vjetra.

Snaga vjetra u atmosferi je mnogo veća od sadašnje svjetske potrošnje. Najiscrpnija istraživanja kažu da je ukupna snaga vjetra na kopnu i blizu obale 72 TW, što je ekvivalentno 54×10^9 tona nafte godišnje ili pet puta više od svjetske potrošnje trenutno, u bilo kojem obliku. Najveći dio ukupne kinetičke energije vjetra se ne može iskoristiti, odnosno pretvoriti u kinetičku energiju obrtanja lopatice rotora, jer vjetar mora nastaviti strujanje kako bi omogućio nadolazak vjetra iza sebe. Ta činjenica naziva se Betz-ovim zakonom, a matematički se može izraziti stepenom aerodinamičkog pretvaranja koji je određen kao mjera snage na vratilu vjetroturbine i raspoložive snage u slobodnoj struji vjetra (2.13):

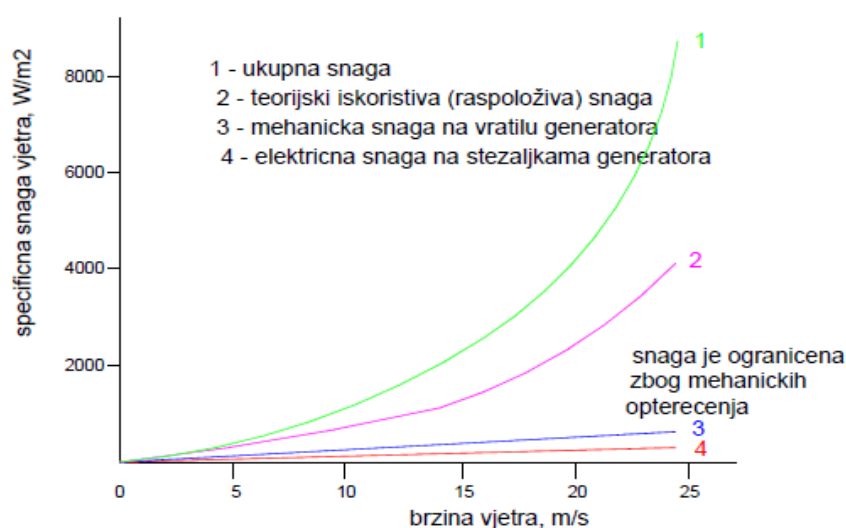
$$c_p = \frac{P_t}{P_{vj}} = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho v^3} \quad (2.13)$$

gdje je:

c_p - stepen aerodinamičke konverzije (0,45 za savremene vjetroturbine),

P_t - transformisana snaga.

Najveća moguća vrijednost stepena aerodinamičke konverzije naziva se Betz-ovom granicom i iznosi $c_{p,max} = 16/27 = 0,593$ pa se efikasnost nijednog postrojenja za iskorištenje energije vjetra nikakvim poboljšanjima ne može biti iznad 59,3%. Uzimajući u obzir sve gubitke pri pretvaranju energije u vjetroagregatu, dobija se, da se tek nešto manje od 1/2 početne kinetičke energije vjetra pretvara u korisnu električnu energiju (Slika 2.10).



Slika 2.10: Specifična i raspoloživa (teorijski iskoristiva) snaga vjetra, mehanička snaga na vratilu i električna na stezaljkama generatora.

Iz svega proizilazi da se izlazna aktivna snaga vjetroelektrane može izračunati iz podataka o brzini i smjeru vjetra, zatim temperature i pritisku vazduha. Takođe, ukoliko se može prognozirati buduća vrijednost istih parametara, može se predvidjeti i aktivna snaga na priključku vjetroelektrane na mrežu [11].

Ovakav način predviđanja izlazne snage vjetroelektrane može biti vrlo pouzdan za kratkoročnu prognozu od 4 do 6 sati unaprijed. Međutim, kao što je već pomenuto, predviđanje iznosa dobijene energije iz prognoze vjetra nije uvijek najpouzdanija metoda. Naprednije metode za kratkoročnu prognozu izlazne snage vjetroelektrane zasnivaju se prognozi meteoroloških varijabli koje služe kao ulazni podaci. Većina metoda predviđanja bazira se na rezultatima vremenske prognoze, Numerical Weather Prediction System (NWP). Ovakvi modeli se baziraju na jednačama koje regulišu pokrete i snage koje utiču na kretanje fluida. NWP sistemi daju tačan uvid trenutnog stanja u atmosferi bazirajući se na zakonima fizike, i tačnost te numeričke prognoze, čak i za period duži od željenog, je daleko bolji od drugih statističkih pristupa koji pokazuju prosječna statistička ponašanja. Takođe, NWP sistemi simuliraju razvoj atmosfere brojanom integracijom nelinearnih jednačina kretanja, počev od trenutnog atmosferskog stanja. Za kratkoročnu prognozu, zbog kompleksnosti podataka, ova metoda se koristi kao ulazni podatak za dalje opisane metode prognoze izlazne snage vjetroelektrane.

Metode, odnosno, sistemi za prognozu izlazne snage vjetroelektrane, mogu se podijeliti u dvije grupe:

- Statistički sistemi;
- Fizički sistemi,
- Heuristički sistemi.

Statistički modeli, baziraju se, kako im i samo ime kaže, na statistici podataka, odnosno na principu poređenja prognoziranih i ostvarenih vrijednosti koje se međusobno povezuju. Postoje različite metode poređenja, stoga postoji više različitih statističkih sistema. Među najpoznatijima su statistički modeli na principu vremenske prognoze, koja direktno povezuje prognoziranu brzinu vjetra sa ostvarenom izlaznom snagom vjetroelektrane, koje se svakako mogu naknadno proračunavati i doradivati. Takve metode se nazivaju *metode predviđanja snage vjetra* (eng. *Wind Power Prediction Tool*). WPPT čini nekoliko naprednih matematičkih modela koji u kombinaciji prognoziraju izlaznu snagu vjetroelektrane uzimajući u obzir karakteristike posmatranog predjela. Prednost ove metode je ta da se parametri automatski prilagođavaju na dugoročne promjene. Dalje, jedna od najpoznatijih metoda, koja će kasnije biti detaljnije opisana, je predviđanje metodom neuronskih mreža (eng. *Artificial Neural Networks*). Ovakav sistem obezbjeđuje estimaciju izlazne snage vjetroelektrane u realnom vremenu, koja je priključena na mrežu, na osnovu ekstrapolacionih mjerenja. I još, manje poznata, metoda zvana rasplinuta logika (eng. *fuzzy logic*). Za razliku od klasične logike, u kojoj iskazi mogu imati vrijednost tačno ili netačno, rasplinuta logika pruža analitički aparat kojim se mogu modelovati iskazi čija istinitosna vrijednost može pripadati kontinualnom prelazu od tačnog ka netačnom. Ovakva metoda koristi se za kratkoročnu prognozu izlazne snage vjetroelektrane, a bazira se na poređenju vremenske prognoze sa jedne strane i ostvarenih SCADA mjerenja sa druge strane [12]. Prednost statističkih sistema je ta da imaju mogućnost da se sami prilagođavaju na promjene koje se dešavaju u sistemu, kao i automatsku registraciju specifičnih terenskih uslova. S druge strane, jedan nedostatak jeste očitavanje mjerenja u realnom vremenu za veliki broj vjetroelektrana.

Fizički modeli, koriste pojmove iz atmosfere dinamike i meteorologije kako bi u specifičnim uslovima vršili obradu izlaznih podataka iz NWP sistema na licu mjesta. Meteorološka prognoza se obavlja za određene čvorove u mreži koja pokriva neku oblast. Ukoliko vjetroelektrane nijesu pozicionirane na lokacijama posmatranih čvorova, onda se dobijene prognozirane vrijednosti moraju izvesti na lokaciji na kojoj se nalazi vjetroturbina. Fizičke metode prognoziranja sastoje se iz nekoliko podmodela koje zajedno povezuju prognozu vjetra u datom trenutku sa izlaznom snagom vjetroelektrane za posmatrano područje. Svaki podmodel ima matematički opis fizičkog procesa koji odgovara datom izvodu. Suštinska ideja fizičkih modela je obrada ulaznih NWP koristeći fizička saznanja o terenu kao što su: hrapavost, orografija i prepreke. Razlikuju se dvije klase fizičkih sistema: prva, numeričke simulacije, modeli koji se zasnivaju na dinamičkoj simulaciji kretanja fluida, slični NWP sistemima, i druga, dijagnostički modeli koji koriste parametre iz graničnog sloja atmosfere (do 1km). Parametri koji se u ovom slučaju koriste dobijaju se iz osnovnih fizičkih principa u kombinaciji sa eksperimentalnim zapažanjima.

Takođe, postoje metode koje čine kombinaciju statističkih i fizičkih sistema – *heuristički modeli*. Sa velikim rastom broja vjetroelektrana, posljednjih godina, povećava se i broj načina, odnosno metoda za prognozu njene izlazne snage, koje će imati kvalitetnije i tačnije rezultate. Ukoliko se prognoza vrši za par dana unaprijed, koriste se numeričke metode, a u slučaju prognoze od nekoliko sati unaprijed (0-3h) uzimaju se u obzir trenutni uslovi u atmosferi. U nastavku rada biće opisani neki od najzastupljeniji statističkih metoda.

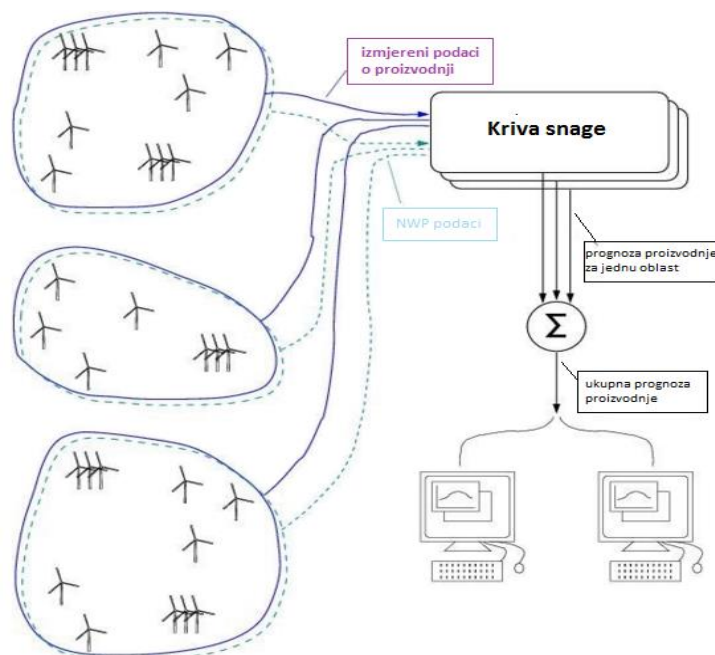
2.4.1 Alat za prognozu proizvodnje vjetroelektrana (WPPT)

Kao što je već prethodno navedeno, WPPT spada u grupu statističkih metoda za prognozu proizvodnje vjetroelektrane i predstavlja relaciju između prognozirane brzine vjetra i izmjerene izlazne snage vjetroelektrane. Kako bi se održao optimalan odnos između ove dvije veličine, vrši se neprekidna rekalkulacija. S obzirom da brzina vjetra nije deterministička veličina, ono se može prognozirati pomoću NWP sistema ili jednostavnim pristupom statističkih modela. Za potrebe ovog alata mogu se koristiti podaci proizvodnje u realnom vremenu kao i ostvarenja iz prošlosti. Ostale ulazne veličine WPPT, u zavisnosti od njihove konfiguracije, mogu biti:

- izmjereni podaci o proizvodnji svih (ili skoro svih) vjetroturbina u regionu (za regionalnu prognozu),
- meteorološke prognoze o brzini i pravcu strujanja vjetra na lokalitetu vjetroelektrana ili šire (ukoliko se radi regionalna prognoza),
- podaci o ostvarenoj raspoloživosti i skraćenjima,
- podaci o planu raspoloživosti i skraćenjima,
- drugi izmjereni podaci ili prognoze kao što su lokalna brzina vjetra, stabilnost, broj turbine u pogonu i drugi podaci koji mogu biti od koristi [13].

Kao izlazna veličina, na osnovu gore navedenih podataka, dobija se prognoza proizvodnje vjetroelektrane i do 48 sati unaprijed. Na Slici 2.11 predstavljen je primjer konfiguracije WPPT za jedan složeni elektroenergetski sistem na kojem su predstavljeni:

- parkovi vjetroelektrana ili samostalne vjetroelektrane;
- česte promjene u broju vjetroturbina koje su u pogonu ili rasporedu pogona kod vjetroparkova,
- dostupnost *off line* podataka o proizvodnji vjetroelektrane u rezoluciji od 15 minuta,
- na izlazu se dobija prognozirana proizvodnja za svaku cjelinu posebno, koje se dalje sabiraju i daju ukupnu prognozu.



Slika 2.11: Konfiguracija WPPT za složeni energetski sistem

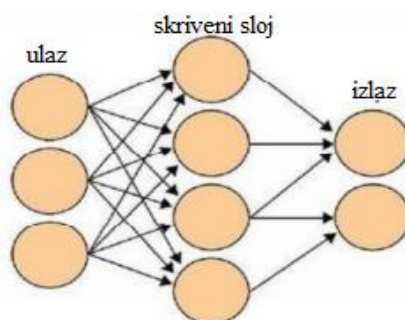
Ovaj alat ima veliku primjenu u slučajevima kad su vjetroagregati rasprostranjeni na širokom geografskom području. Tada se vrši grupisanje, regionalno, na osnovu geografskih lokacija ili

na osnovu zakonskih preporuka za određene vjetroagregate (povlašćeni ili nepovlašćeni proizvođači). Upravo se te grupe mogu vidjeti na Slici 2.11 i mjerenja o proizvodnji (*off line* ili *on line*), NWP podaci priključuju se iz svih grupa pojedinačno i spajaju u zajednički model koji će generisati izlazne podatke.

2.4.2 Predviđanje metodom neuronskih mreža

Jedna od statističkih metoda koja se nameće kao dobar izbor za procjenu izlazne snage vjetroelektrane na temelju mjerenja karakteristika vjetra je metoda koja se zasniva na vještačkim neuronskim mrežama. Vještačke neuronske mreže se posljednjih godina uspješno primjenjuju u mnogim oblastima. Prednosti koje nude vještačke neuronske mreže učinile su da one postanu nezaobilazni alat u rješavanju sve složenijih problema koji se javljaju u savremenom svijetu. Vještačke neuronske mreže predstavljaju jednu od najpopularnijih tehnika vještačke inteligencije (*eng. artificial intelligence*) struktuisane da radi na način kao što radi ljudski mozak. Ekspertni sistemi, vještačke neuronske mreže, genetički algoritmi i inteligentni agenti su kategorije vještačke inteligencije koje su u prošloj dekadi zabilježile nagli prodor i predstavljaju perspektivu poslovanja u budućnosti.

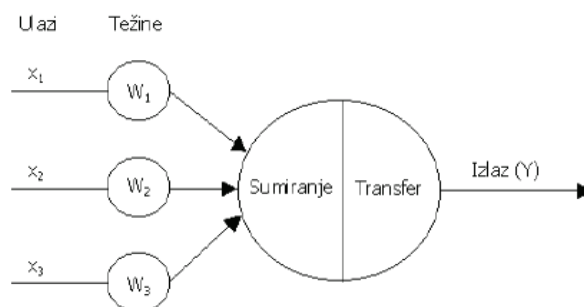
Vještačke neuronske mreže ili neuronska mreža, je matematički model ili računarski napravljen model koji nastoji da oponaša strukture ili funkcionalne aspekte bioloških neuronskih mreža. U većini slučajeva ANN je prilagodljiv sistem koji mijenja svoje strukture na osnovu vanjskih ili internih informacija koje teku kroz mrežu tokom faze učenja, a prepoznati su još kao i nelinearni alati za modelovanje statističkih podataka. Obično se koriste za modelovanje složenih relacija između ulaza i izlaza, ili da se pronađu obrasci u podacima. Sastoje se od velikog broja procesuirajućih elemenata tzv. neurona, po uzoru na mrežu ljudskih moždanih stanica i u cilju uspješne primjene potrebno je prikupiti što više podataka tj. pogodne su za fuziju podataka. Sastoje se iz velikog broja neurona koji su raspoređeni prema različitim modelima. Neuroni su grupisani u slojeve preko kojih je mreža povezana sa okolinom. Prvi sloj je uvijek ulazni, a posljednji je izlazni sloj. Neuronska mreža može da ima više ulaza koji može biti sirovi podatak ili izlaz iz nekog drugog neurona i jedan izlaz. Ako ima više slojeva, onda se unutrašnji slojevi nazivaju skriveni sloj. Moguće je realizovati matricu sa samo dva osnovna sloja, ali se složenije funkcije uvijek realizuju sa barem jednim skrivenim slojem. Način organizacije ovih slojeva i njihovog povezivanja čini arhitekturu ili topologiju neuronske mreže (Slika 2.12).



Slika 2.12: Primjer neuronske mreže

Šematski prikaz vještačkog neurona (Slika 2.13) je praćen matematičkim opisom. Neuron ima više ulaza i jedan izlaz. Svaki od ulaza (na slici su prikazana tri, može ih biti više ili manje) dovodi signal sa nekog od prethodnih neurona i taj signal se množi sa tkz. težinskim koeficijentom. Težinski koeficijenti povezuju izlaze iz okoline neurona, odnosno izlaze iz drugih neurona (aksone) s ulazima sumatora (dendriti). Izlaz iz drugih neurona i/ili okruženja

posmatranog neurona, koji se upućuju posmatranom neuronu, množe se težinskim faktorima i dovode do sumatora. U sumatoru se tako dobijeni proizvodi sumiraju, a njihova suma se odvodi na ulaz aktivacijske funkcije, koja će na svom izlazu dati izlaz neurona. Izlaz neurona je samo jedan, a može da se vodi na više neurona u sljedećem sloju mreže.

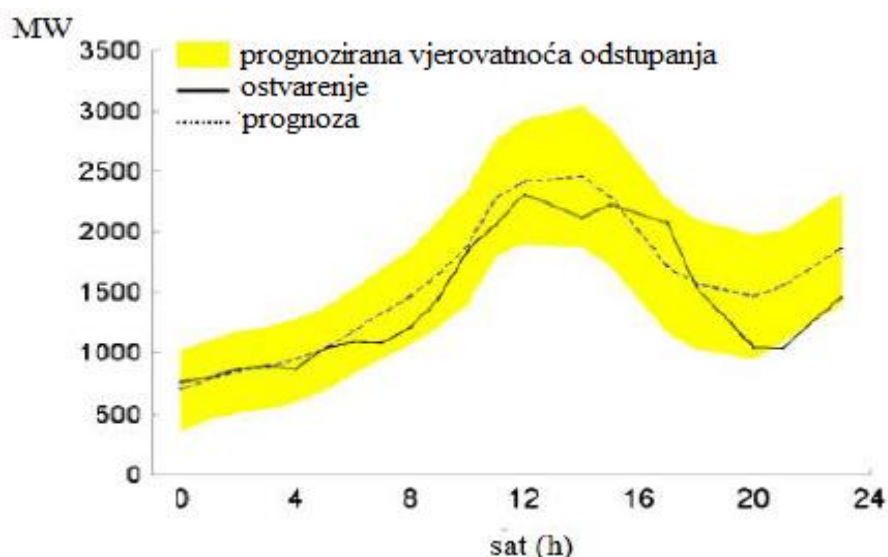


Slika 2.13: Procesuiranje informacije u vještačkom neuronu

Proces učenja (treniranja) mreže svodi se na to da se ulazi pobuđuju, pri čemu će ona na izlazima prikazivati neke numeričke vrijednosti. Nepovratne mreže u procesu učenja koriste takozvani algoritam sa povratnim prostiranjem, gdje mreža najprije u normalnom smjeru (lijeva na desno) generiše neki izlaz, pa onda u suprotnom smjeru svakom neuronu dodjeljuje količinu greške (razliku između željenog i realnog izlaza), pa u trećem prolazu (ponovo s lijeva na desno) koriguje težinske koeficijente koji pobuđuju taj neuron. Počinje se od nasumično postavljenih vrijednosti za težinske koeficijente. Tako neiskusna mreža ne može ništa da prepozna. Trening teče tako što korisnik zadaje ulazne i željene izlazne vrijednosti, dok se ne podese težinski koeficijenti tako da se više ne mijenjaju. Onda joj se promijene ulazi, pa se ponovi postupak učenja. Ovo se ponavlja za svaki ulazni podatak, poslije čega se težinski koeficijenti više ne mijenjaju – svaki od neurona ih ima u svojoj memoriji i mreža je spremna za rad. Mreža u početku pravi određene greške ali promjenom težinskih koeficijenata smanjuje se razlika dobijenih i zadatih izlaznih vrijednosti svakog neurona. Praksa pokazuje da je uvijek bolje početi sa malim koeficijentima, postepeno ih povećavati jer će tokom učenja korekcije biti sve manje, a onda ih opet smanjivati kako bi se vrijednosti težinskih koeficijenata fino podesile. Za potrebe prognoze proizvodnje vjetroelektrane ulazne veličine su: brzina i smjer vjetra, kao i parametri koji definišu gustinu vazduha (temperature i pritisak). Stoga je za ulazne podatke potrebno definisati:

- brzinu i smjer vjetra;
- temperaturu i pritisak vazduha.

Izlazna veličina iz ovakve neuronske mreže jeste proizvodnja vjetroelektrane, odnosno izlazna aktivna snaga na mjestu predaje električne energije. Kako svaka prognoza ima određeni opseg odstupanja (greška u prognozi), vrlo je važno imati saznanje o nepouzdanosti ove prognoze. Statistički metodi i metodi zasnovani na neuronskim mrežama se koriste, ne samo da bi prognozirali izlaznu snagu, već i pored toga se koriste za određivanje donje i gornje granice odstupanja. Sa Slike 2.14 se može vidjeti da greška predviđanja i širina predviđenog vremenskog intervala je veća u kasnijim satima jer se tačnost u predviđanjima smanjuje. U tom dijelu dana odstupanje od plana neće biti konstantno kako je to predviđeno u prvim satima, zbog prisustva npr. turbulencija.



Slika 2.14: Primjer prognozirane proizvodnje vjetroelektrane sa prognoziranom vjerovatnoćom odstupanja od plana u odnosu na ostvarenu proizvodnju bez nepredviđenih okolnosti

Neuronske mreže se danas uveliko koriste u procesnim upravljanjima, prepoznavanju teksta i likova, prognozi vremena i u sličnim domenima i pored toga treba imati u vidu da je ova tehnologija još uvijek u fazi razvoja i da su to tek početni rezultati. Neuronske mreže, koje je priroda tokom evolucije ugradila u naše nervne sisteme tako su složene da je malo vjerovatno da mogu biti konkurentne. Tim prije što je za njihov razvoj priroda imala milijarde godina evolucije na milijardama jedinki. Treniranje jedne prirodne neuronske mreže kod čovjeka traje oko 20 godina, a to je predugo za eksperiment sa neizvjesnim rezultatom [14].

2.4.3 Rasplinuta logika

Najprije je potrebno objasniti na kojem principu se bazira rasplinuta ili fazi logika (*eng. fuzzy logic*). Fazi logika odbacuje aksiome klasične logike. Logika rasplnutih (nejasnih) skupova predstavlja skup elemenata sa sličnim (a ne neophodno istim) svojstvima. Stepenn pripadnosti fazi skupu nekog elementa iz domena skupa može da ima vrijednost u opsegu od 0 do 1, pri čemu 0 i 1 označavaju granične slučajeve, pri kojima element uopšte ne pripada ili u potpunosti pripada skupu, kao kod klasičnih, diskretnih skupova. Zapravo, fazi skupovi su proširenje i uopštenje diskretnih skupova tako da granice skupova ne moraju da budu oštre. Kako bi se dodatno opisalo funkcionisanje rasplnute logike, mogu se definisati fazi (lingvističke) promjenljive. Lingvistička promjenljiva je ona čije su dozvoljene vrijednosti riječi prirodnog jezika. Na primjer, lingvistička promjenljiva, temperatura, može imati vrijednost veoma hladno, hladno, prohladno, svježe, prijatno, toplo, veoma toplo, vruće i vrelo. Riječi veoma, pomalo, baš, manje-više, pomalo, nazivaju se lingvističkim modifikatorima koji se primjenjuju na osnovne lingvističke vrijednosti, na primjer toplo i hladno. U opštem slučaju, vrijednosti lingvističkih promjenljivih se dobijaju kombinovanjem modifikatora, veznika i osnovnih vrijednosti, na primjer: pomalo hladno, veoma toplo, ni toplo ni hladno [15].

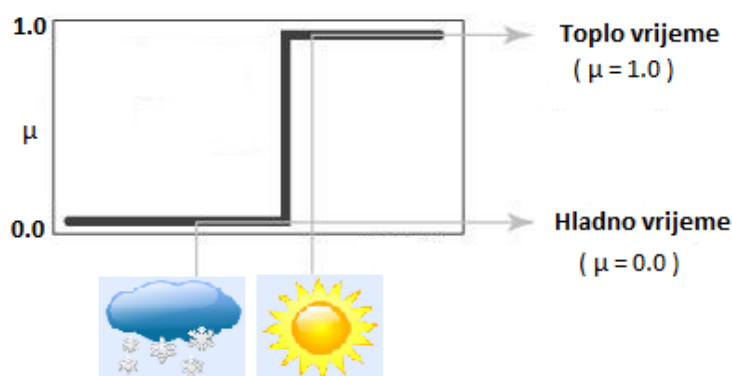
Koju vrijednost zapravo imaju lingvističke vrijednosti? Ovdje na scenu stupaju funkcije pripadanja. Funkcija pripadanja predstavlja matematički oblik fazi skupa i ona u stvari ilustruje prirodu lingvističkih vrijednosti. Ako se kaže da je vrijeme danas vruće, šta to u stvari podrazumijeva? Svakako ne podrazumijeva tačno određenu temperaturu spoljašnjeg vazduha, već izvjesni intuitivni opseg temperature. Funkcija pripadanja predstavlja kontinualno mjerilo sigurnosti da li je promjenljiva klasifikovana kao ta lingvistička vrijednost. Za definisani fazi

skup A , karakteristična funkcija dodjeljuje vrijednosti elementima univerzalnog skupa X vrijednosti realnih brojeva u opsegu $[0,1]$ (2.14).

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (2.14)$$

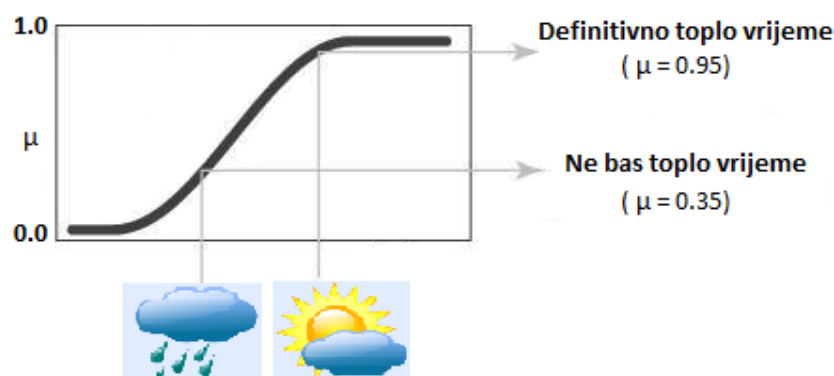
Ova funkcija određuje stepen pripadanja nekog objekta datom fazi skupu. Pri čemu, veće vrijednosti znače veće stepene pripadnosti tom skupu.

Praktično rješenje fazi logike može se predstaviti preko jednostavnog primjera za određivanje temperature vazduha odnosno vremenskih prilika. Kod konvencijalnog skupa, granica pripadnosti bi bila oštro određena jednom prekidnom funkcijom (Slika 2.15). Usvojena je granica do koje se smatra da je vrijeme toplo. Dvije različite temperature bi bile različito klasifikovane iako im je razlika u temperaturi samo par stepeni.



Slika 2.15: Konvencionalna funkcija pripadanja

Zato se uvodi kontinualna funkcija pripadanja koja određuje da li i u kojem stepenu je vrijeme toplo. Funkcija pripadanja mora da bude skalirana i da uzima vrijednosti od 0 do 1, kao valjane reprezente stepena pripadanja promenjive toj funkciji (Slika 2.16).



Slika 2.16: Kontinualna funkcija pripadanja

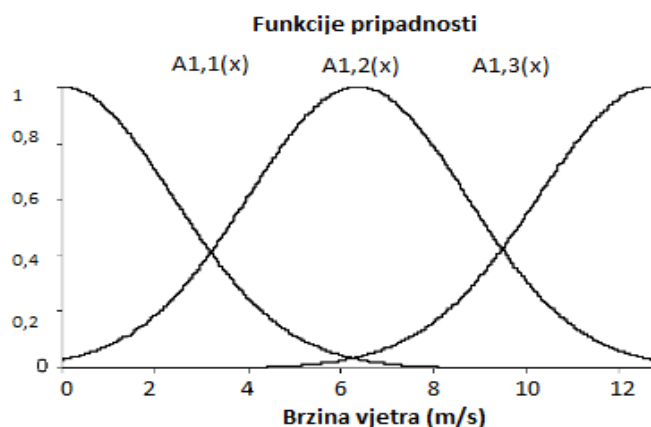
Ovakva logika poslužila je za prognozu brzine vjetrova, a samim tim i za prognozu proizvodnje električne energije iz vjetroelektrane. Ona se koristi u slučajevima kada ne postoji mogućnost preciznog modelovanja sistema ili u slučaju da postoje neke nejasnoće ili dileme prilikom formulacije problema. Jedan klasični fazi sistem čine:

- pravila koja se zasnivaju na određenom broju AKO-ONDA pravilima;

- zaključivanje na osnovu pravila predstavlja mehanizam za procjenjivanje koja kontrolna pravila su relevantna za trenutno stanje sistema i odlučuje logičkim sklopom kakav će biti upravljački signal, tj. ulaz u proces;
- fazifikacija - modifikuje signale ulaza tako da mogu biti pravilno protumačeni i upoređeni sa pravilima u bazi pravila, tj. klasičan (*eng. crisp*) signal pretvara se u adekvatan fazi oblik. U realnosti najčešće su ulazne vrijednosti predstavljene brojem, pri čemu se i izlazna vrijednost dobija u isto tako brojčanom obliku. Sa druge strane, u fazi sistemu dati sistem je opisan verbalno (kvalitativno) preko produkcionih pravila. Zbog toga, najprije se na određeni način fazifikuju (konvertuju) te brojčane vrijednosti;
- defazifikacija - transformiše fazi oblik u *crisp* oblik signala, koji je „razumljiv“ procesu. Defazifikacijom se dobija brojčana izlazna vrijednost.

Ukoliko se uzme da se jedan sistem sastoji od n pravila, koja se nazivaju AKO-ONDA. To znači da AKO dio svakog pravila, hipoteza ili uslovni dio, sadrži uslov za dato pravilo, ONDA dio svakog pravila, posljedica, sadrži zaključak datog pravila. Na osnovu ulazne veličine, tj. tvrdnje x da je A' , donosi se odgovarajući zaključak da y je B' . Pri čemu, $A', A_j \in F(X)$ i $B', B_j \in F(Y)$, $\forall j \in N_n$, gdje su X i Y skupovi vrijednosti promenljivih x i y .

Isto se pravilo može primijeniti u slučaju vjetroelektrana. Na Slici 2.17 su prikazane tri funkcije pripadnosti od kojih svaka opisuje brzinu vjetra. Funkcija $A_{1,1}(x)$ predstavlja malu brzinu, funkcija $A_{1,2}(x)$ srednju, a funkcija $A_{1,3}(x)$ veliku brzinu vjetra.



Slika 2.17: Tri funkcije pripadanja koje opisuje brzinu vjetra

Pretpostavljajući da je ulazna veličina (premise - AKO) brzina vjetra $x_{p,1}$, mogu se iskoristiti navedene tri funkcije pripadanja $A_{1,1}$, $A_{1,2}$ i $A_{1,3}$ kako bi se lingvistički predstavilo da li je brzina vjetra mala, srednja ili velika. Na primjer, konkretno, za brzinu vjetra od $x_{p,1} = 4$ m/s sa slike važi:

$$\mu_{A_{1,1}}(x_{p,1}) = 0.2, \quad \mu_{A_{1,2}}(x_{p,1}) = 0.62, \quad \mu_{A_{1,3}}(x_{p,1}) = 0.0$$

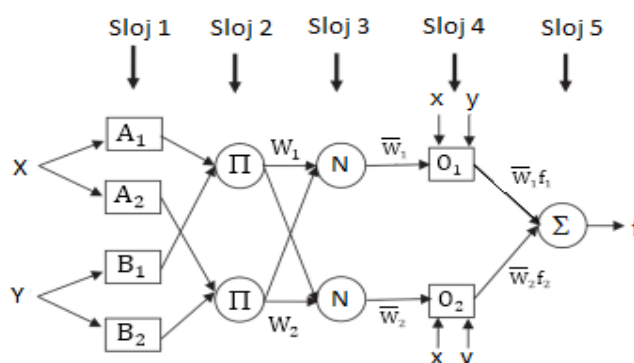
U ovom slučaju, može se reći, da $x_{p,1}$ spada u grupu male do srednje brzine vjetra (izlazno stanje - ONDA). Broj ulaznih veličina trebao bi da bude što je moguće manji, jedan ili dva, kako bi se broj pravila zadržao na prihvatljivom nivou.

Cilj fazi pristupa jeste da, umjesto jezikom matematike, što bolje riješi problem upravljanja sistemom, pritom omogućavajući implementaciju inženjerskog iskustva o procesu u sam algoritam kontrolera. Fazi sistemi i neuronske mreže mogu međusobno da se dopunjuju. Jedan

od takvih modela je prilagodljivi sistem neizrazitog zaključivanja zasnovan na neuronskoj mreži (eng. *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*). ANFIS model ili fazi-neuronske mreže zasnivaju se se na objedinjavanju koncepata fazi logike i vještačkih neuronskih mreža. Kod ANFIS modela preuzete su najbolje karakteristike fazi sistema i neuronskih mreža. U ANFIS modelu može da se eksperimentiše, tj. da se mijenjaju:

- ulazne i izlazne promjenljive i njihove funkcije pripadnosti,
- oblik funkcija pripadnosti,
- baza pravila,
- operatori,
- vrsta defazifikacije,
- način obučavanja, tj. učenja ANFIS modela [16].

Na Slici 2.18 prikazana je opšta struktura adaptivne neuro-fazi mreže koja se sastoji od pet slojeva.



Slika 2.18: Tipična struktura ANFIS

Sloj 1: X i Y su dvije tipične ulazne vrijednosti unesene u dva ulazna čvora koji nakon toga pretvaraju te vrijednosti u funkcije pripadnosti

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1,2 \quad (2.15)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i = 3,4 \quad (2.16)$$

gdje je X (ili Y) ulaz, dok je μ_{A_i} (ili $\mu_{B_{i-2}}$) niz povezan sa tim čvorom.

Sloj 2: Svaki čvor u ovom sloju umnožava ulazne signale. Izlaz O_i^2 čvora i moći će se izračunati:

$$O_i^2 = W_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2 \quad (2.17)$$

Sloj 3: Takvi umnošci se uprošćavaju. Sloj 2 i sloj 3 može biti skriveni sloj i predstavljaju fazi pravila.

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \quad i = 1,2 \quad (2.18)$$

Sloj 4: Čvor i u ovom sloju izračunava doprinos i -tog pravila u izlaznoj funkciji modela, koja se definiše na osnovu metode prvog reda kao:

$$O_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i(p_i X + q_i Y + r_i) \quad i = 1,2 \quad (2.19.)$$

gdje je \bar{W} izlaz iz sloja 3, dok su p_i , q_i , r_i niz parametara.

Sloj 5: Jedinim čvorom koji se nalazi u ovom sloju izračunava se težinski globalni izlazni podatak sistema sljedećom relacijom:

$$O_i^5 = \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (2.20)$$

U adaptivnim čvorovima (sloj 1 i sloj 4) vrše se podešavanja radi smanjenja greške koja se dobija na izlazu iz modela. Greška predstavlja razliku između poznatih izlaznih vrijednosti i vrijednosti koje se dobijaju na izlazu iz neuro-fazi mreže. Signali na mreži prostiru se unaprijed, a greške se prostiru unazad. Time se izlazna numerička vrijednost približava optimalnoj, tj. traženoj vrijednosti [17].

3. OTIMALNI POGON ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Osnovni cilj svakog elektroenergetskog sistema je, kvalitetno zadovoljiti potrebe potrošnje i razmjene električne energije sa drugim sistemima, sa ekonomičnom proizvodnjom električne energije, odnosno korišćenjem postojećih proizvodnih kapaciteta na što efikasniji i optimalan način. Prema tome, pojam optimizacija pogona podrazumijeva izbor najpovoljnijeg rješenja pri angažovanju proizvodnih kapaciteta, kako bi se zadovoljile potrebe potrošača za sigurnim i kvalitetnim snabdijevanjem električnom energijom uz smanjenje troškova obrade, povećanje produktivnosti i poboljšanje kvaliteta proizvoda.

Za optimalno upravljanje elektroenergetskim sistemom neophodna je analiza troškova cijelog sistema, koje će zadovoljiti zahtjeve bilansa i pouzdanosti.

Dvije osnovne komponente troškova:

1. Investicioni troškovi i
2. Eksploatacioni (pogonski) troškovi.

Investicioni troškovi su svi oni troškovi neophodni da se projekat izgradnje nekog objekta realizuje.

Komponente tih troškova na godišnjem nivou su:

1. otplata zajma (kredita) za izgradnju novog izvora,
2. kamata na pozajmljena sredstva,
3. porezi, doprinosi, takse i osiguranje.

Zajedno sa stalnim troškovima pogona i održavanja oni čine fiksne godišnje troškove.

Eksploatacioni (pogonski) troškovi su svi troškovi koji se ostvaruju pri radu proizvodnih agregata. Sastoje se iz stalnih i promjenljivih troškova goriva (samo u slučaju TE). Ukupni i prosječni troškovi proizvodnje električne energije čitavog proizvodnog sistema dobijaju se kao zbir investicionih i eksploatacionih troškova, ili zbir fiksnih i promjenljivih troškova.

Statička optimizacija rada elektroenergetskog sistema sastoji se u određivanju nivoa proizvodnje svih generatorskih jedinica, optimalnog plana napona i angažovanja regulacionih resursa za proizvodnju i/ili apsorpciju reaktivnih snaga i, ako je neophodno, rasterećivanjem potrošnje.

Problem optimizacije obuhvata više kriterijuma, a to su:

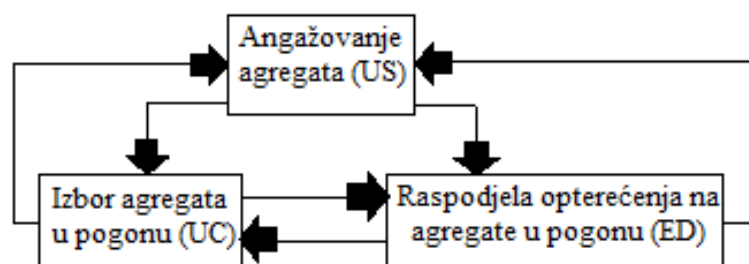
- *ekonomski*, kojim se minimizuju ukupni pogonski troškovi svih generatorskih jedinica (troškovi goriva i održavanja), polazeći od zavisnosti troškova svake jedinice od njegovog opterećenja,
- *ekološki*, kojim se minimizuje ukupan nivo zagađivanja okoline, polazeći od zagađivanja svakog agregata u zavisnosti od njegovog opterećenja,
- *kombinovani ekonomsko-sigurnosni*, kojim se uz funkciju troškova uvodi sigurnosna penalizaciona funkcija za preopterećenje vodova, odnosno grana, sa ciljem istovremenog zadovoljenja zahtjeva ekonomije i sigurnosti elektroenergetskog sistema,
- *kriterijum rasterećenja potrošnje*, kojim se primjenom težinskih faktora rasterećenja pojedinih PQ čvorova minimizuje ukupno rasterećenje potrošnje cjelokupnog sistema.

Svaki elektroenergetski sistem suočen je sa vremenski promjenljivim opterećenjima. Da bi sistem zadovoljio potrebe potrošača, u snazi i električnoj energiji, angažuju se raspoloživi izvori za proizvodnju električne energije, ili u slučaju deficita, uvozom iz susjednih sistema. Radi pokrivanja opterećenja, prije nego što se ono pojavi, na mrežu se moraju sinhronizovati odgovarajući proizvodni kapaciteti. Pored ovih kapaciteta, mora stojati na raspologanju i

neophodna obrtna rezerva kao sigurnost u slučajevima mogućih kvarova ili namjernog isključenja pojedinih generatorskih jedinica. Za pokrivanje osnovnog i varijabilnog opterećenja potrebno je u periodu pripreme pogona napraviti plan angažovanja raspoloživih agregata (*eng. Unit Scheduling*).

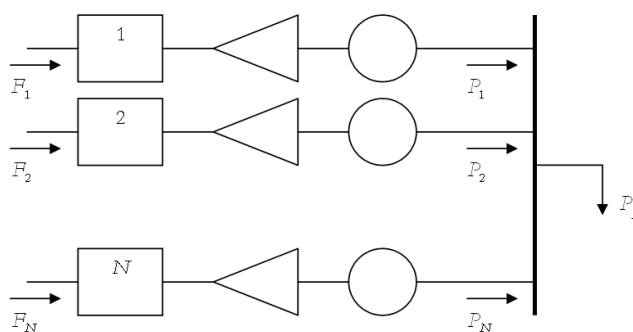
Problem angažovanja agregata se, u suštini, sastoji iz dva potproblema (Slika 3.1):

- potproblem izbora agregata (*eng. Unit Commitment*) i
- potproblem ekonomične raspodjele opterećenja na agregate koji su u pogonu (*eng. Economic Dispatching*) [18]



Slika 3.1: Dekompozicija problema angažovanja agregata (US) na problem izbora agregata (UC) i raspodjele opterećenja na agregate u pogonu (ED)

Pod prvim potproblemom podrazumijeva se vremensko određivanje, stavljanje u pogon i zaustavljanje proizvodnih jedinica u cilju postizanja maksimalne ekonomičnosti u radu sistema uz uvažavanje ograničenja sigurnosti. Drugi potproblem, koji se bavi pitanjima ekonomičnosti, bazira se na angažovanju agregata koji su već u pogonu uz ispunjenje određenih optimizacionih kriterijuma za dato opterećenje. Ekonomična raspodjela angažovanja agregata rezultiraće u najmanje pogonske troškove u sistemu (Slika 3.2).



Slika 3.2: Ekonomična raspodjela opterećenja između agregata u pogonu

Proizvodni troškovi pojedinih elektrana su različiti, pa određivanje ekonomične raspodjele opterećenja agregata za dati trenutni režim, ili za duži period predstavlja vanredno složen problem. U sistemima sa termoelektranama troškovi proizvodnje električne energije zavise od više faktora:

- faktori iskorišćenja agregata,
- troškovi za gorivo, radnu snagu, održavanje i zalihe,

U hidroelektranama, kao i kod svakog izvora električne energije koji ne koristi gorivo, praktično nema troškova koji su zavisni od količine proizvedene energije, već su svi troškovi stalni, bez obzira na količinu energije koju elektrana proizvodi. Proizvodna cijena električne energije u hidroelektrani je proporcionalna specifičnim investicijama (odnos troškova izgradnje

i moguće godišnje proizvodnje), tako da su kod hidroelektrana pogonski troškovi zanemarljivi u odnosu na troškove termoelektrane. Kod mješovitih hidro – termo sistema kriterijum optimizacije je minimizacija pogonskih troškova (ili ekvivalentnog utroška toplote) termoelektrana. Hidro-termo koordinacija predstavlja optimizaciju raspodjele opterećenja između angažovanih hidroelektrana i termoelektrana, sa postizanjem minimalnih troškova goriva u termoelektranama, uz iskorištenje prethodno utvrđenih količina vode u akumulacijama i zadovoljenje ograničenja i uslova nametnutih karakteristikama i zahtjevima elemenata elektroenergetskog sistema. Kako u slučaju hidroelektrana, kao obnovljivih izvora nema troškova koji su zavisni od količine proizvedene energije, tako i kod vjetroelektrana, ukupni troškovi proizvodnje jednaki su troškovima investicije i održavanja.

3.1 Osnova problema izbora i angažovanje agregata

Uspješno, ekonomski optimalno upravljanje elektroenergetskim sistemom i planiranje proizvodnje električne energije uvijek je imalo veliki značaj za sigurno snabdijevanje potrošača kvalitetnom električnom energijom. Za opisivanje složenih elektroenergetskih sistema vezuje se veliki broj podataka i pri određivanju optimuma može se pojaviti veliki broj njihovih kombinacija. Optimalno angažovanje agregata može se predstaviti pomoću algoritma diskretne, odnosno kombinatorne optimizacije. Kombinatorna optimizacija je matematička disciplina koja proučava probleme nalaženja ekstremnih vrijednosti funkcije definisane na konačnom skupu. Najpoznatiji primjer kombinatorne optimizacije je problem trgovačkog putnika (*eng. Traveling Salesman Problem*), koji datira još od 1832. godine. Sam problem je vrlo jednostavan, trgovački putnik ima unaprijed definisane gradove i sve međusobne udaljenosti među njima i mora posjetiti svaki grad samo jednom i vratiti se u početni grad. Pitanje je, kojim bi redoslijedom trgovački putnik morao obilaziti gradove, a da ukupna dužina bude minimalna? Na prvi pogled problem se ne čini preteškim, ali ako se uzme u obzir da ima faktorijelnu složenost, tj. da se najkraći put između N gradova nalazi negdje unutar prostora stanja koji je velik $N!/2N$, odnosno $((N-1)!)/2$ računanjem se dobije da već za 11 gradova postoji 1 814 400 mogućih redosljeda obilazaka [19]. Problem trgovačkog putnika spada u grupu NP-teških problema (*eng. non-polynomial hard problems*) i može se riješiti izradom algoritama za traženje tačnog rješenja (radi brzo za problem male veličine) ili izradom heurističkih algoritama, koji pružaju naizgled ili vjerovatno dobra rješenja, ali se isto tako ne moraju pokazati kao optimalna. Iste metode koje se koriste za rješavanje ovog problema mogu se primijeniti i pri rješavanju problema optimizacije pogona kako bi troškovi angažovanja agregata bili što manji.

Za početak, opisan je problem optimalnog izbora agregata, uključujući troškove i ograničenja. Algoritam optimalnog angažovanja agregata pronalazi optimalni vozni red u kome se N generatora angažuje tako da su im zbirni troškovi proizvodnje minimalni. To znači da je u svakom satu proizvodnja između generatora raspoređena na takav način da su ukupni troškovi proizvodnje u sistemu što je moguće manji.

Stohastička priroda proizvodnje vjetroelektrane kao i potrošnje, predstavljaju veliki izazov u procesu planiranja proizvodnje. Primjera radi, dalje će biti opisana dva nivoa modela programiranja koja u sebe uključuju moguća odstupanja. Posmatra se sistem kojeg čine termoelektrane i vjetroelektrane. Period planiranja obuhvata 24 sata u satnoj rezoluciji. Odlučujuće promjenljive se mogu kategorizovati na prvi i drugi nivo odluke. Promjenljive izbora agregata $u_{it} \in \{0,1\}$, $i = 1, \dots, I$ i $t=1, \dots, T$ predstavljaju prvi nivo odluke, dok drugi nivo odluke čini proizvodnja svih jedinica u datom vremenskom intervalu $p_{i,t}$, $i = 1, \dots, I$ i $t=1, \dots, T$ gdje su I ukupan broj agregata, a T je vremenski period za koji se vrši planiranje. Ukoliko se posmatra mreža sa brojem čvorova N_n , takođe se može reći da postoji N_n kontrolnih varijabli za svaku generatorsku jedinicu koja opisuje nivo proizvodnje u svakom čvoru mreže. Cilj

optimizacije je da se minimizuju direktni troškovi na nivou prve odluke (troškovi pokretanja agregata) i statistička srednja vrijednost troškova koja pritom podrazumijeva troškove iz prvog i drugog nivoa odluke (troškovi goriva). S obzirom da su troškovi proizvodnje iz vjetroelektrane zanemarljivi, ukupni troškovi se svode na sumu troškova za gorivo i troškove angažovanja agregata. Troškovi goriva se mogu prikazati preko formule (3.1):

$$FC_{i,t} = a_i + b_i p_{i,t} + c_i (p_{i,t})^2 \quad (3.1)$$

gdje su a_i , b_i i c_i koeficijenti eksponencijalne funkcije troškova goriva koji se mogu dobiti od proizvođača ili proračunati na osnovu poznatih troškova koje su ekvivalentni snazi generatora. Troškovi angažovanja agregata zavise od vremena koliko je agregat bio isključen prije pokretanja i mogu se približno dobiti iz eksponencijalne funkcije:

$$SC_{i,t} = \sigma_i + \delta_i \left(1 - e^{\left(\frac{-T_{i,t}^{off}}{\tau_i} \right)} \right) \quad (3.2)$$

gdje su σ_i i δ_i troškovi angažovanja iz tople i hladne rezerve, τ_i je vremenska konstanta hlađenja i $T_{i,t}^{off}$ je vrijeme kada je agregat bio isključen.

Opšta formula kojom se može opisati stohastički problem angažovanja agregata, kako bi se ukupni troškovi (troškovi goriva i troškovi angažovanja) sveli na minimum, je:

$$TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I SC_{i,t} u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I FC_{i,t} u_{i,t} \quad (3.3)$$

gdje je I ukupan broj termoagregata i T je planirani period. Navedene relacije opisuju troškove angažovanja agregata i suština optimizacije pogona je da se ti troškovi svedu na minimalne vrijednosti. Prilikom modelovanja troškova neophodno je navesti i određena ograničenja koja se moraju poštovati:

- 1) *Satna izbalansiranost sistema*. Ukupna proizvodnja mora biti jednaka potrošnji, P_D , u svakom trenutku:

$$\sum_{i=1}^I p_{i,t} + P_{W,t} = P_{D,t} \quad \forall t \in T \quad (3.4)$$

gdje je $P_{W,t}$ ukupna izlazna snaga vjetroagregata svih vjetroelektrana u vremenu t .

- 2) *Ukupna havarijska rezerva*. Rotirajuća rezerva je dio neiskorišćenih proizvodnih kapaciteta, koji su sinhronizovani na mrežu, čije se korišćenje može ostvariti u vrlo kratkom vremenskom periodu. Ovu vrst rezerve čine rotirajuća regulaciona rezerva i rotirajuća havarijska rezerva. Rotirajuća havarijska rezerva služi za pokrivanje iznadanah ispada proizvodnih kapaciteta iz pogona radi obezbjeđivanja normirane (ciljne) pouzdanosti snabdijevanja potrošača koja mora biti veća od 0,999. Pored rotirajuće, nerotirajuću rezervu čine agregati koji su u punoj pogonskoj spremnosti ali nisu sinhronizovani na mrežu: hladna nerotirajuća rezerva (startne elektrane – akumulacione hidroelektrane i gasne elektrane) i topla nerotirajuća rezerva (TE održavane u toplom stanju). Ukupnu havarijsku rezervu čine rotirajuća havarijska rezerva, hladna nerotirajuća i topla nerotirajuća rezerva. Pojave narušavanja normalne isporuke električne energije potrošačima, nastale ispadima iz pogona pojedinih proizvodnih agregata, slučajnog su karaktera, pa se za procjenu neophodne havarijske rezerve moraju koristiti metode teorije vjerovatnoće.

U većini slučajeva, količina rezerve, za pokrivanje gubitaka ili povećane potrošnje, je veća od potrebne, ali u slučaju vjetroelektrana, zbog promjenljive prirode vjetra, ona često može biti nedovoljna. Sa tim ciljem u nastavku su definisana ograničenja za pozitivnu i negativnu rezervu u prisustvu vjetroagregata. U slučaju da dođe do naglog smanjenja snage vjetra, dolazi do brzog angažovanja termoagregata (USR), u suprotnom, ako dođe do naglog povećanja snage vjetra, tada se proizvodnja termoagregata smanjuje (DSR).

U ovom slučaju, termoagregati moraju biti u stanju da se brzo sinhronizuju na mrežu ili, u suprotnom, da smanje proizvodnju:

$$USR_t = \sum_{i=1}^I US_{i,t} \geq MSR_t + us\% * P_{W,t} \quad \forall t \in T \quad (3.5)$$

$$US_{i,t} = \text{Min}(p_{i,t}^{max} - p_{i,t}, US_i^{max}) \quad (3.6)$$

$$DSR_t = \sum_{i=1}^I DS_{i,t} \geq ds\% * P_{W,t} \quad \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$DS_{i,t} = \text{Min}(p_{i,t} - p_{i,t}^{min}, DS_i^{max}) \quad (3.8)$$

gdje su $US_{i,t}$, $DS_{i,t}$ pozitivna (*eng. up*) i negativna (*eng. down*) rotirajuća rezerva, generatora i u vremenu t , MSR_t je najmanja rezervna snaga generatora za pokrivanje ispada ili planiranih isključenja, US_i^{max} , i DS_i^{max} su maksimalne dozvoljene količine rotacione rezerve generatora i , respektivno, $us\%$ i $ds\%$ su procentualni udjeli proizvodnje vjetroelektrane koji se odnose na rotacionu rezervu.

Rotirajuću rezervu obezbjeđuju termalne jedinice (pozitivnu i negativnu). Pozitivna rotirajuća rezerva, USR_t , jednaka je sumi minimalne snage generatora za pokrivanje ispada, MSR_t i snage koju mogu da pruže vjetroelektrane (3.5). Dok negativna rotirajuća rezerva ne može biti manja od rezerve koju mogu da pruže vjetrogeneratori (3.7). Prema formuli 3.6 pozitivna rotirajuća rezerva $US_{i,t}$ ograničena je na maksimalnu dozvoljenu rotirajuću rezervu generatora i , US_i^{max} , u slučaju da ista nije raspoloživa u punom kapacitetu, računa se razlika između maksimalne snage generatora i trenutne proizvodnje generatora. Negativna rotirajuća rezerva $DS_{i,t}$, prema formuli 3.7, jednaka je maksimalnoj dozvoljenoj negativnoj rotirajućoj rezervi DS_i^{max} , u slučaju da ista nije raspoloživa u punom kapacitetu, računa se razlika između trenutne proizvodnje i tehničkog minimuma proizvodnje generatora i .

- 3) *Ograničena proizvodnja termoagregata.* Maksimalna proizvodnja termoagregata predstavlja minimalnu vrijednost između maksimalne snage termoagregata i zbira proizvodnje iz prethodnog sata i maksimalne dozvoljene promjene proizvodnje (3.10), dok je donja granica proizvodnje termoagregata predstavlja maksimalnu vrijednost između minimalne snage agregata i zbira snage iz prethodnog sata i maksimalne dozvoljene negativne promjene snage agregata (3.12).

$$\sum_{i=1}^I p_{i,t}^{max} + P_{W,t} \geq P_{D,t} + MSR_t + us\% * P_{W,t} \quad (3.9)$$

$$p_{i,t}^{max} = \text{Min}(P_i^{max}, p_{i,t-1} + UR_i^{max}) \quad (3.10)$$

$$P_{D,t}^S - P_{W,t} \geq \sum_{i=1}^I p_{i,t}^{min} + ds\% * P_{W,t} \quad (3.11)$$

$$p_{i,t}^{min} = \text{Max}(P_i^{min}, p_{i,t-1} + DR_i^{max}) \quad (3.12)$$

gdje su UR_i^{max} , DR_i^{max} maksimalne dozvoljene promjene snage, pozitivne i negativne, generatora i , P_i^{max} i P_i^{min} označavaju dozvoljena gornju i donju granicu proizvodnje generatora i [20].

3.2 Metode za optimizaciju pogona EES za klasičnu postavku problema

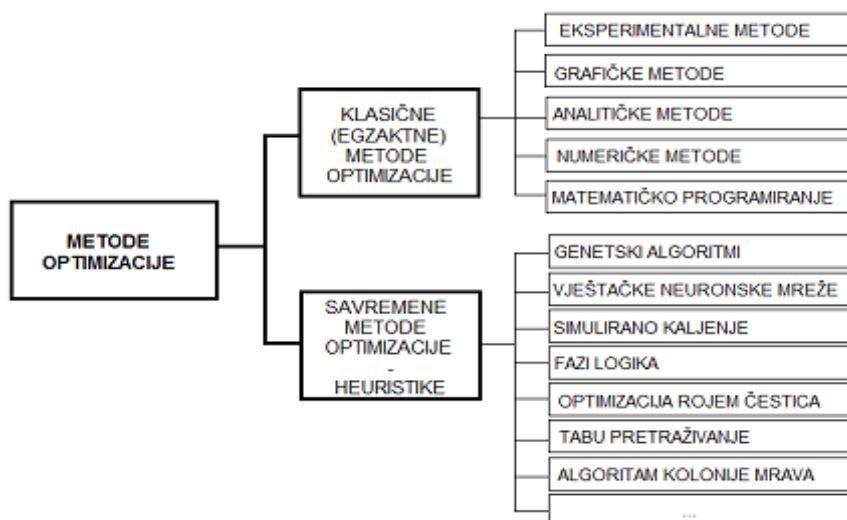
Teorija optimizacije se bavi razvojem modela i metoda kojima se nalaze optimalna rješenja matematički formuliranih problema. Bilo koje rješenje problema obilježava se sa x . Po pravilu, x predstavlja n -torku $x = (x_1, \dots, x_n)$. Komponente rešenja $x_j, j = 1 \dots, n$ nazivaju se *upravljачke promjenljive* ili *promjenljive odluke*. Ustaljeno je da se optimalno rješenje obilježava sa $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$.

Optimalno znači najbolje. Da bi se za neko rješenje reklo da je najbolje, treba imati mjeru kojom se određuje njegov kvalitet i koja omogućava njegovo poređenje sa drugim mogućim rješenjima. U matematičkom modelu radi toga mora da postoji funkcija u matematičkom obliku kojom se svakom rješenju pridružuje odgovarajuća vrijednost koja predstavlja njegovu mjeru kvaliteta. Ta funkcija pokazuje efikasnost izvršenja zadatka radi postizanja cilja i naziva se *kriterijum*, *kriterijumska funkcija*, *funkcija cilja* ili *indeks* ili *mjera performanse*. Uobičajeno se označava sa $f(x)$. Zadatak kombinatorne optimizacije je nalaženje rješenja koje daje ekstremnu vrijednost kriterijuma, najveću - zadatak maksimizacije, ili najmanju - zadatak minimizacije, kao i određivanje odgovarajuće vrijednosti kriterijuma. Promjenljive koje treba odrediti obično su uslovljene međusobnim relacijama i ograničenjima i nazivaju se zajedničkim imenom skup ograničenja. Svako rješenje koje zadovoljava postojeća ograničenja naziva se dopustivim. Dopustiva rješenja formiraju skup dopustivih rješenja ili dopustivi skup D . Dopustivi skup D je određen sistemom ograničenja koje su obično tipa nejednačina:

$$D = \{ x \in R^n \mid f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \}$$

gdje je i - indeks ograničenja, m - ukupan broj ograničenja, i $f_i(x)$ - funkcije ograničenja [21].

S obzirom da je za pokretanje generatora potrebno neko vrijeme, problem izbora agregata mora biti unaprijed isplaniran kako bi proizvodnja mogla adekvatno da odgovori na zahtjev potrošača i to sa odgovarajućom rezervom u slučaju da dođe do ispada nekog generatora ili dalekovoda, ili pak dođe do naglog povećanja/smanjenja potrošnje. Plan izbora agregata ima za cilj određivanje vremena uključenja i isključenja agregata u toku 24 sata, tako da ukupni troškovi angažovanja budu što manji. Cilj kombinatorne optimizacije je formiranje efikasnih algoritama za rješavanje složenih problema. Ukoliko za dati problem ne postoji efikasna egzaktna metoda, pristupa se približnom rješavanju pomoću odgovarajućih heurističkih metoda. Stoga, metode za rješavanje optimizacionih problema mogu se svrstati u dvije grupe: egzaktna i heuristička (Slika 3.3)



Slika 3.3. Klasifikacija metoda optimizacije

Egzaktne su najpoželjnije. One obezbjeđuju optimalno rješenje i verifikuju njegovu optimalnost, ali najčešće daju loše rezultate na problemima velikih dimenzija. U tim slučajevima pribjegava se primjeni heurističkih metoda. U klasične metode optimizacije spadaju: analitičke metode, numeričke (iterativne) metode, grafičke metode, eksperimentalne metode i metode matematičkog programiranja. Analitičke metode se zasnivaju na matematičkoj analizi izvoda funkcije cilja. Numeričke (iterativne) metode se zasnivaju na definisanju numeričkih iteracija za približnu aproksimaciju rješenja. Ovakve metode su najpogodnije za programiranje i dijele se u dvije grupe: na gradijentne i negradijentne metode, zavisno od toga da li se koristi ili ne izvod funkcije cilja. Grafičke metode koriste grafičko predstavljanje funkcije cilja i ograničenja. Ekstremum funkcije cilja dobija se pretraživanjem iz grafa funkcije. Ove metode se mogu primijeniti samo na funkcije cilja od jednog ili dva upravljačka parametra, a odlikuju se velikom preglednošću. Eksperimentalne metode određuju ekstremum na osnovu izvršene serije eksperimenata. Ove metode ne koriste matematički model procesa. Eksperimentalne metode se koriste samo u slučaju kada se matematički model objekta pokaže neadekvatnim. Metode matematičkog programiranja su često korišćene metode za rješavanje različitih zadataka optimizacije. U metode matematičkog programiranja spadaju: linearno i nelinearno programiranje, dinamičko programiranje, kvadratno programiranje, geometrijsko programiranje, cjelobrojno programiranje, stohastičko programiranje, višekriterijumsko programiranje i dr. [22].

Heuristika predstavlja kompromis između potrebe da algoritam bude jednostavan i želje da isti razlikuje dobre i loše odluke. Heuristički algoritmi su nastali eksperimentisanjem u cilju dobijanja zadovoljavajućeg rješenja. Mana algoritama je to što nijesu jednoznačno određeni. Heuristike su namijenjene za rješavanje posebnih vrsta problema optimizacije, poštujući pri tome svojstva i specifičnosti ovih problema. Postoji čitav niz osobina koje bi trebalo da neka heuristika zadovolji. Potrebno je da bude jednostavna, da bi se brzo izvršavala i da ne mijenja drastično svoje ponašanje za male promjene parametara problema. Potrebno je da je korisnik u mogućnosti utiče na proces dobijanja rješenja, tj. da ima mogućnost interaktivnog rada. Takođe, potrebno je da posjeduje mogućnost generisanja većeg broja dobrih rješenja, da bi korisnik mogao izabrati najprihvatljivije od njih. Princip rada heurističkih algoritama je sljedeći: prvo treba definisati prostor rješenja (koji se često naziva i pretraživački prostor) za dati problem. Zatim se odabere početno rješenje, pa se nakon toga prostor rješenja pretražuje u potrazi za što boljim rješenjima, a heuristički algoritmi između sebe razlikuju se po tome na koji način realizuju to pretraživanje.

Posljednjih godina bilježi se spektakularan pomak u ovoj oblasti, tako da se heuristike sve šire primjenjuju u praksi. Razlozi tako uspješne primjene se mogu ukratko opisati na sljedeći način:

- kvalitet dobijenih rješenja je uglavnom zadovoljavajući, pa se često može dobiti čak i optimalno rješenje, iako ovakve metode, najčešće same ne mogu verifikovati da je dobijeno rješenje zaista optimalno;
- posjeduju veliku mogućnost prevazilaženja lokalnog ekstremuma, i dostizanja globalnog optimalnog rješenja, čak i za probleme koji imaju veliki broj lokalnih ekstremuma;
- pored vrlo velikog broja heuristika vezanih za konkretan problem, postoje i opšte heuristike (metaheuristike), koje se mogu primijeniti na široku klasu problema: genetički algoritmi (*eng. genetic algorithms*), simulirano kaljenje (*eng. simulated annealing*), tabu pretraživanje (*eng. tabu search*), Lagrange-ova relaksacija (*eng. Lagrangian relaxation*);
- u velikom broju slučajeva je moguća hibridizacija nekoliko ovakvih heuristika i korišćenje dobrih strana svake od njih;
- heuristike se često uspješno mogu uklopiti u metode za tačno rješavanje problema, tako da se uspješno kombinuje brzina dobijanja rješenja sa verifikacijom optimalnosti.

Za razliku od klasičnih heurističkih metoda postoje i metaheurističke metode. Prefiks *meta* na grčkom jeziku znači *iznad*, što ukazuje da metaheuristike, kao metode kombinatorne optimizacije, rade na višem nivou od heuristika. Ideja metaheuristika je da se one, uz određene modifikacije, mogu primjenjivati na širu klasu problema kombinatorne optimizacije. Metaheurističke metode pretražuju skup dopustivih rješenja u cilju nalaženja što boljeg rješenja, pri čemu je dopušteno kretanje ka lošijem rješenju od trenutnog, proširivanje skupa na kome se traži rješenje nedopustivim elementima ili traženje rješenja kombinovanjem postojećih [23].

Problem kombinatorne optimizacije se može definisati kao:

$$\min f(x), \quad x \in X \quad (3.13)$$

gdje prostor dopustivih rješenja X ima konačno mnogo elemenata. Konkretna implementacija metaheuristika za rješavanje problema kombinatorne optimizacije zavisi od prirode svakog pojedinačnog problema. Postoje mnogobrojne vrste metaheuristika, a neke od njih su inspirisane ponašanjem određenih jedinki u prirodi. U ovu grupu spadaju: genetički algoritmi, simulirano kaljenje, tabu pretraživanje, analitički hijerarhijski proces (*eng. analytic hierarchy process*) i algoritam roja čestica (*eng. particle swarm optimization*).

Često se dešava da pojedini algoritmi budu tako dobro projektovani i optimizovani pri implementaciji, da u dužem vremenskom intervalu daju odlične rezultate, koji su zadovoljavajući čak i za najzahtjevnije korisnike. Međutim, kasnije se dimenzija datog problema u praktičnim primjenama toliko poveća, da rješavanje tom metodom postaje sporo ili čak vremenski nedostižno. Zbog toga se stalno vrši poboljšavanje već postojećih, kao i neprekidna potraga za potpuno novim metodama [24]. Takođe, treba naglasiti da ne postoji univerzalna metoda za rješavanje svih tipova optimizacionih zadataka. Koja od navedenih metoda se koristi, zavisi od samog zadatka. Dalje će biti opisane karakteristike neke od gore pomenutih metoda.

3.2.1 Metoda grananja i ograničavanja

Metoda grananja i ograničavanja (*eng. branch and bound*) predstavlja vrstu metode pretraživanja i koristi se za rješavanje problema optimizacije kod koga je skup pretraživanja konačan. Ideja metode je da se složeni početni problemi razlože na jednostavnije potprobleme i da se mnogi od ovih potproblema ni ne rješavaju ako se procijeni da nemaju bolje rješenje od trenutno najboljeg. Dijeljenje prostora rješenja obavlja se ograničavanjem vrijednosti pojedinih varijabli, dok se procjenom maksimalne vrijednosti rješenja u pojedinom dijelu mogu odbaciti djelovi prostora rješenja koji daje najbolje vrijednosti funkcije cilja.

Do trenutno najboljeg rješenja se može doći neposrednom provjerom ili nekim heurističkim postupcima u toku algoritma. Metoda grananja i ograničavanja sastoji se od tri osnovna koraka: grananje (*eng. branch*), ograničavanje (*eng. bound*) i procjenivanje (*eng. fathoming*). Funkcija grananje služi da domen iz kojih neka promjenljiva uzima vrijednosti, podijeli u podskupove. U slučaju binarne promjenljive to su uvek dvije grane - 0 i 1. U slučaju kontinualnih promjenljivih, domen se dijeli na konačan broj intervala. U slučaju diskretnih promjenljivih podjela je moguća ili na intervale ili na konkretan konačan skup dopustivih vrijednosti. Granica je funkcija koja određuje donju granicu bilo kog rješenja koje sadrži neko parcijalno rješenje R [25].

Ukoliko se posmatra problem (pretpostavlja se da se radi o problem minimizacije):

$$\min f(x), \quad x \in X(P) \quad (3.14)$$

X – diskretan skup

Problem (P) se razlaže na potprobleme sa ciljem da se neki od potproblema neće ni rješavati ako se ustanovi da nemaju bolje rješenja od trenutno najboljeg rješenja (rekorda). Drugim riječima, očekuje se da funkcija cilja na tim potproblemima ne može uzimati manje vrijednosti u odnosu na vrijednosti koje su do tada dobijene kao dopustivo rješenje problema P . Grananje problema P na potprobleme se može vršiti tako što se skup X pokrije unijom svojih djelova X_k , $k \in K$ i problem P zamjeni skupom potproblema:

$$\min f(x), \quad x \in X_k(P_k) \quad (3.15)$$

K – podskup skupa X

Optimalno rješenje polaznog problema je optimalno za bar jedan problem sa spiska. Razlaganje skupa X na podskupove je pogodno zato što skupovi mogu biti dovoljno sitni ili laki za rješavanje, pa se vrijednost funkcije na njima može lakše ocijeniti. U slučaju da je potproblem težak za rješavanje, može se olakšati izostavljanjem nekih ograničenja (umjesto funkcije $f(x)$ posmatra se funkcija $g(x)$ u kojoj je neko ograničenje izostavljeno) ili proširivanjem njegovog dopustivog skupa X_k na neki skup Y_k . Na taj način se dobija problem:

$$\min g(x), \quad x \in Y_k(Q_k) \quad (3.16)$$

koji se naziva relaksacioni problem.

Optimalna vrijednost relaksacionog problema Q_k nije veća od optimalne vrijednosti problema P_k , tj. važi: $v(Q_k) \leq v(P_k)$

U idealnom slučaju optimalne vrijednosti su jednake i početni problem je riješen. Ako problem nije riješen, dobija se ocjena odozdo $m(P_k) = v(Q_k)$ njegove optimalne vrijednosti. Neka je npr. trenutno najbolje pronađeno rješenje R ili je najbolje rješenje ograničeno R :

$$m(P_k) \geq R$$

U skupu X_k nema rješenja koje je bolje od onoga koje se dobilo kao tekući rekord zato što je:

$$v(P_k) \geq m(P_k) \geq R \geq v(P)$$

U trenutku kada se procijeni da problem neće dati bolja rješenja od tekućih, može se preći na sljedeći potproblem, a tekući problem eliminisati sa spiska potproblema.

Dakle, proces rješavanja problema P ide po sljedećem algoritmu:

Korak 1: Problem P se podijeli na skup potproblema, $P_k, k \in K$. Neka je S spisak tih problema. Trenutna vrijednost problema P je $v(P) = \infty$ ako je problem nemoguć ili $v(P) = -\infty$ ako je vrijednost problema neograničena odozdo. Donja ocjena optimalne vrijednosti problema je obilježena sa $m(P)$. Odnosno:

$$S = \{(P)\}, m(P) = -\infty, R = \infty$$

Korak 2: Potproblem P_k sa spiska S se rješava na sljedeći način:

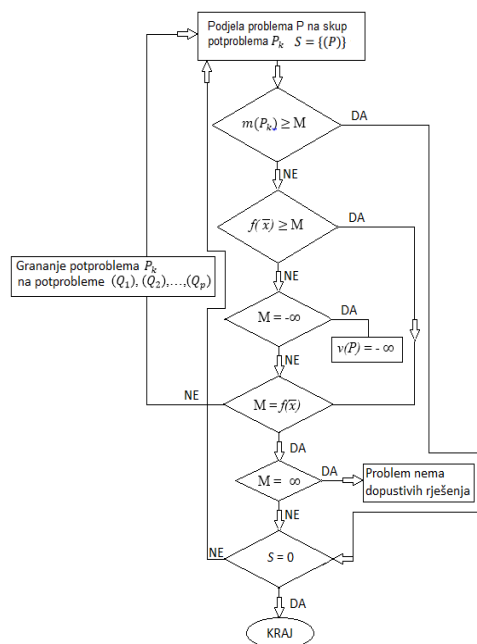
Izračuna se $m(P_k)$ tako što se računa neka relaksacija potproblema P_k . Ako je $m(P_k) \geq R$ ide se na korak 6, inače se ide na korak 3.

Korak 3: Traži se dopustivi skup rješenja: Ako je skup lak za rješavanje, traži se odgovarajuće \bar{x} kao rješenje problema P . Ako je $f(\bar{x}) \geq R$ ili ako je nalaženje rješenja teško, ide se na korak 5, inače se ide na korak 4.

Korak 4: Stavi se da je $R = f(\bar{x})$. Ako je $R = -\infty$ algoritam se zaustavlja i stavlja se da je $v(P) = -\infty$. Ako je R konačno i ako se može pokazati da je \bar{x} optimalno rješenje potproblema P_k ide se na korak 6. Inače se ide na korak 5.

Korak 5: Pošto je potproblem P_k težak za rješavanje, grana se na potprobleme $(Q_1), (Q_2), \dots, (Q_n)$ i postupak se vraća na korak 1.

Korak 6: Ukloni se problem P_k sa spiska S . Ako se spisak problema ispraznio postupak se prekida. Optimalna vrijednost problema jednaka je trenutnom rekordu R ukoliko je R konačan broj, a problem nema dopustivih rješenja ako je $R = \infty$. Ako se spisak ne isprazni, ide se na korak 1. Algoritam je predstavljen na Slici 3.4.

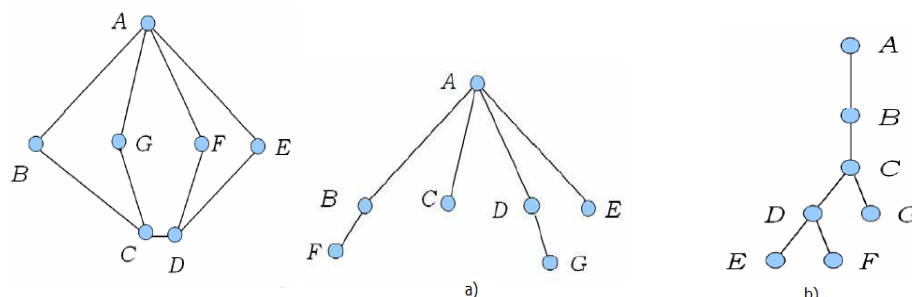


Slika 3.4: Algoritam rješavanja problema metodom grananja i ograničavanja

Ovaj postupak se najlakše može prikazati preko grafa čiji su čvorovi dobijeni grananjem. Dobijeni graf se naziva drvetom pretraživanja u kome je korijen polazni problem, a listovi najsitniji problemi (problemi koji ne mogu dati bolje rješenje daljim grananjem).

Pri izboru problema za grananje, postoje dvije osnovne taktike:

- grananje u širinu (Slika 3.5.a);
- grananje u dubinu (Slika 3.5.b).



Slika 3.5: Graf, a) stablo pretrage u širinu, b) stablo pretrage u dubinu

U početnoj fazi poželjnije je koristiti grananje u dubinu, jer na brži način se dolazi do dopustivog rješenja, dok je u kasnijoj fazi bolja taktika grananja u širinu, jer daje bolje odsijecanja.

U nastavku će biti opisane heurističke metode koje se mogu primijeniti za uspješno rješavanje problema optimalnog angažovanja agregata.

3.2.2 Metod prioritete liste

Metod prioritete liste (*eng. priority list*) je prosta metoda gdje se napravi lista svih generatora sa troškovima angažovanja i jednostavno se poređaju po prioritetima odnosno prema cijeni angažovanja. Prije svega treba analizirati troškove angažovanja generatora. Opšta funkcija izbora agregata (UC) sastoji se iz dva dijela, funkcije troškova i funkcije angažovanja (*eng. start up*) generatora. Takođe, važno je naglasiti da troškovi pokretanja agregata se razlikuju u zavisnosti od toga da li se agregat pokreće iz hladne ili tople rezerve. Troškovi angažovanja agregata iz hladne i tople rezerve mogu se izračunati preko eksponencijalne funkcije (3.2).

Lista prioriteta se kategorizuje prema minimalnim srednjim troškovima, a srednji troškovi se određuju prema relaciji (3.17):

$$\mu = \frac{F(P_G)}{P_G} \quad (3.17)$$

gdje je:

μ -srednja vrijednost troškova;

$F(P_G)$ - funkcija troškova generatora;

P_G -izlazna snaga generatora.

Minimalni srednji troškovi se dobijaju kada se izvrši diferencijacija prvog stepena:

$$\lambda = \frac{dF(P_G)}{dP_G} \quad (3.18)$$

Najjednostavniji način rješavanja problema izbora agregata pomoću pomenute metode, je da se kombinacijom generatora iz hladne i tople rezerve, uz uvažavanje srednjih minimalnih troškova angažovanja, napravi tabela koja će predstavljati listu prioriteta angažovanja [26].

Primjer 1.1

Posmatraju se 5 generatora zajedno sa njihovim minimalnim srednjim troškovima proizvodnje μ_{min} i maksimalnom i minimalnom snagom. (Tabela 3.1)

Tabela 3.1: Lista generatora

Generator	Minimalni srednji troškovi proizvodnje μ_{min} [€/MW]	Min [MW]	Max [MW]
G1	10,56	100	400
G2	9,76	120	500
G3	11,95	100	300
G4	8,90	50	600
G5	12,32	150	250

Lista prioriteta se formira na osnovu minimalnih srednjih troškova proizvodnje μ_{min} (Tabela 3.2):

Tabela 3.2: Lista prioriteta

Redosljed	Generator	Minimalni srednji troškovi proizvodnje μ_{min} [€/MW]	Min [MW]	Max [MW]
1	G4	8,90	50	600
2	G2	9,76	120	500
3	G1	10,56	100	400
4	G3	11,95	100	300
5	G5	12,32	150	250

Postupak primjene metode:

- **Korak 1:** Izračunati minimalne srednje troškove angažovanja svakog generatora i rangirati ih od najmanje ka najvećoj (lista prioriteta);
- **Korak 2:** Ukoliko dođe do povećanja potrošnje u tom satu, odrediti koliko generatora može biti pokrenuto za najmanje vremena. Tada od njih odrediti prioritete prema Tabeli 3.2;
- **Korak 3:** Ukoliko dođe do smanjenja potrošnje u datom satu, odrediti koliko jedinica može biti isključeno uvažavajući najkraće vrijeme zaustavljanja. Tada od izabranih jedinica napraviti listu prioriteta (Tabela 3.2) odakle će se najprije zaustaviti generatori na posljednjim pozicijama (u skladu sa količinom smanjenja potrošnje) jer će oni imati najveće troškove proizvodnje;
- **Korak 4:** Isti postupak ponoviti i za naredni sat.

Takođe postoje i druge vrste metoda priritetne liste, odnosno, različiti kriterijumi na osnovu kojih se vrši sortiranje po istom principu. U ovom slučaju to su bili minimalni troškovi, a mogu biti rastući troškovi ili prosječni troškovi pri punoj proizvodnji.

3.2.3 Dinamičko programiranje

Dinamičko programiranje (*eng. dynamic programming*) je naziv tehnike u programiranju kojom se drastično može smanjiti složenost algoritma: od eksponencionalne do polinomijalne. Riječ *programiranje* u samom nazivu tehnike se odnosi na tzv. tablični metod (pri čemu se podrazumijeva popunjavanje tabele pri rješavanju problema, a ne upotrebu programskog jezika ili računara). Ideja dinamičkog programiranja je da se rješavanje jednog kompleksnog problema svodi na rješavanje više potproblema manje složenosti, dakle vrši se participacija glavnog problema na više međusobno zavisnih potproblema. Takođe i potproblemi mogu imati svoje potprobleme koji se mogu preklapati. Zatim nastupa rekurzivno rješavanje potproblema, kako bi se njihovim spajanjem dobilo rješenje polaznog problema. Još jedna bitna karakteristika metoda dinamičkog programiranja jeste da se svaki potproblem rješava najviše jednom, čime se izbjegava novo računanje numeričkih karakteristika istog stanja (odatle "tablični metod", iz prostog razloga što se rješenja potproblema čuvaju u pomoćnim tabelama). Nakon što je rješenje potproblema jednom izračunato, svaki sljedeći put se koristi izračunata vrijednost prostim pristupom tabeli. To se naziva *memoizacija*. U suprotnom, primjenom rekurzivne funkcije bez prethodne memoizacije dolazi do nepotrebnog računanja i kombinatorne eksplozije. Na primjer, potproblemi X i Y mogu imati zajednički problem Z, tako da su potproblemi X i Y uslovljeni potproblemom Z, tj. da bi riješili potprobleme X i Y neophodno je prethodno riješiti potproblem Z. Dobijeno rješenje se pamti u pomoćnim tabelama i poziva u slučaju da se opet naiđe na isto.

Rješavanje problema korišćenjem dinamičkog programiranja se obično može podijeliti na sljedeća četiri koraka:

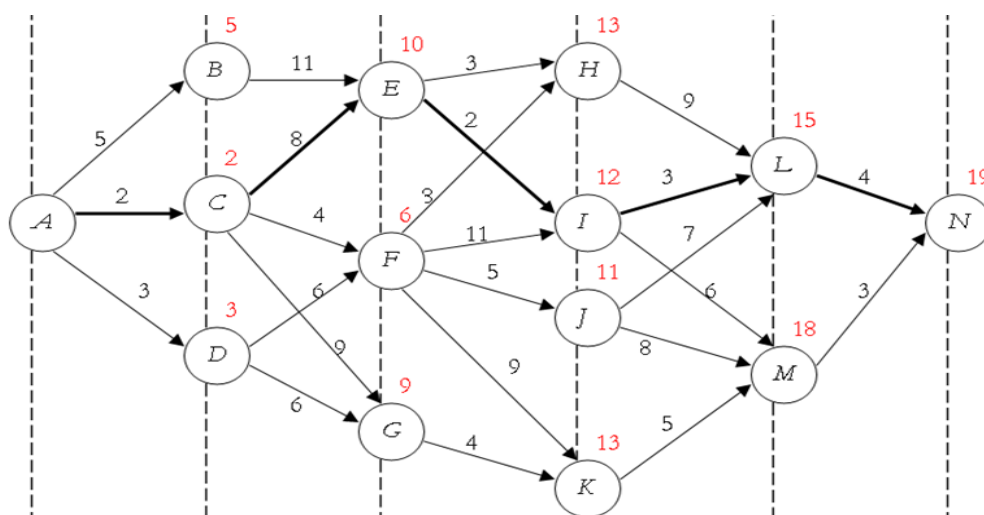
1. karakterizacija strukture optimalnog rješenja,
2. rekurzivno definisanje rješenja optimalnog rješenja,
3. računanje vrijednosti optimalnog rješenja odozgo ka dolje (*eng. top-down*) ili odozdo ka gore (*eng. bottom-up*) pristupom,
4. konstruisanje optimalnog rješenja na osnovu izračunatih informacija.

Koraci 1-3 su osnova dinamičkog programiranja, pri čemu se dobija optimalna vrijednost, dok se korak 4 može izostaviti ukoliko se traži samo određena vrijednost koja karakteriše rješenje, ali ne i samo rješenje.

Postoje dva pristupa, već gore pomenuta, za rješavanje algoritma:

- odozgo ka dolje – problem se rastavi na potprobleme, problemi se riješe i pamte se njihova rješenja u slučaju njihove kasnije upotrebe. Ovaj pristup predstavlja kombinaciju rekurzije i memoizacije.
- odozdo ka gore – svi potproblemi se redom rješavaju i koriste za nalaženje većih. Ovaj pristup je bolji zbog čuvanja memorijskog prostora i zbog bržeg pronalaska rješenja, ali je ponekad teško odrediti koji su sve potproblemi potrebni za traženje zadatog.

Na Slici 3.6 je prikazan primjer toka dinamičkog programiranja odozdo ka gore. Početna tačka je tačka A, a krajnja tačka je tačka N. Suština dinamičkog programiranja jeste da se do rješenja (tačka N) dođe što je moguće kraćim putem. Putevi su označeni strelicama i iznad svake od njih predstavljena je brojevana vrijednost, cilj je da krajnja suma bude što manja. Strelice koje su podebljane predstavljaju optimalan izbor puta od tačke A do tačke N.



Slika 3.6: Grafički prikaz dinamičkog programiranja

Problem najkraćeg puta sa slike 24 rješava se pristupom odozdo ka gore. U suprotnom, kada bi se postupak rješavao pristupom odozgo na dolje, prateći najkraće dužine puta iz tog smjera ne bi se dobilo optimalno rješenje. Primjena pristupa odozgo na dolje može se objasniti na primjeru Fibonačijevih brojeva ($F_1 = F_2 = 1$, $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ za $n > 2$). Prilikom računanja vrijednosti $F_{ib}(n)$, funkcije $F_{ib}(m)$, za $m < n$, se pozivaju veći broj puta. Za $n = 5$ važno bi sljedeće [27]:

$$\begin{aligned} F_{ib}(5) &= F_{ib}(4) + F_{ib}(3) \\ &= (F_{ib}(3) + F_{ib}(2)) + (F_{ib}(2) + F_{ib}(1)) \\ &= ((F_{ib}(2) + F_{ib}(1)) + F_{ib}(2)) + (F_{ib}(2) + F_{ib}(1)) \end{aligned}$$

Rekurzivna funkcija za rješavanje problema izbora agregata pri minimalnim troškovima, u satu t i kombinaciji I , je:

$$F_{t,c}(t, I) = \min_{\{L\}} [F(t, I) + S_c(t-1, L \Rightarrow t, I) - F_{t,c}(t-1, I)] \quad (3.19)$$

gdje je:

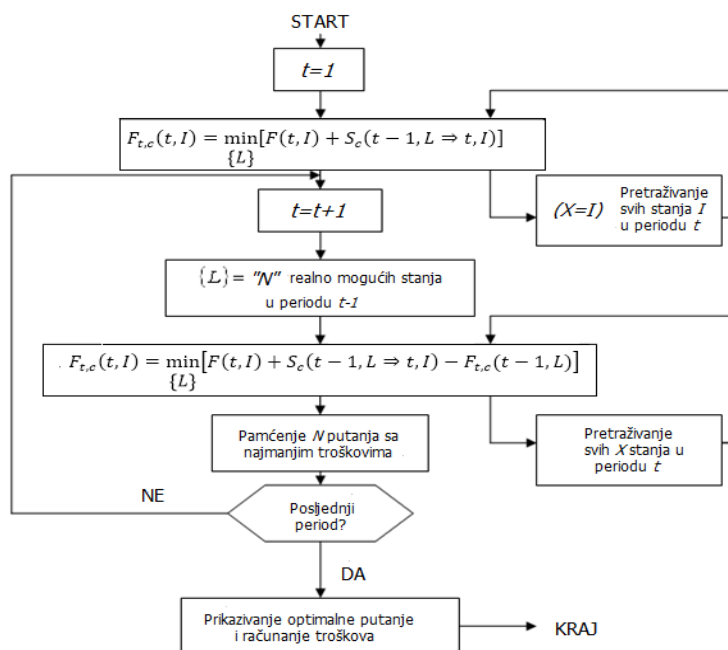
$F_{t,c}(t, I)$ - ukupni troškovi od početnog stanja do sata t i stanja I ;

$S_c(t-1, L \Rightarrow t, I)$ - prelazni troškovi iz sata $t-1$ i stanja L , ka satu t , i stanju I ;

$\{L\}$ - grupa izvodljivih stanja u satu $t-1$;

$F(t, I)$ - troškovi proizvodnje za stanje (t, I) .

Ista relacija se može primijeniti u algoritmu na Slici 3.7 u periodu t i $t+1$, odakle se može uočiti da stanje (t, I) označava I -tu kombinaciju u satu t . Varijable X i N predstavljaju u algoritmu broj realno mogućih stanja koje treba pretražiti i broj prihvatljivih stanja respektivno. Primjenom metode dinamičkog programiranja moraju biti ispunjeni uslovi sigurnog snabdijevanja potrošača kvalitetnom električnom energijom i uvažavanje donje i gornje granice angažovanja agregata.



Slika 3.7: Primjena dinamičkog programiranja kroz algoritam

Primjer 2.1

U Tabeli 3.3 navedeni su osnovni podaci generatorskih jedinica koji su raspoloživi za pokrivanje konzuma.

Tabela 3.3: Podaci o generatorima

Generator	Max MW	Min MW	Troškovi (€/h)	Prosječni troškovi (€/h)	Troškovi angažovanja (€/h)	Početno stanje(h)	Najkraće vrijeme pokretanja(h)	Najkraće vrijeme zaustavljanja(h)
G1	80	25	213,00	23,54	350	-5	4	2
G2	250	60	585,62	20,34	400	8	5	3
G3	300	75	684,74	19,74	1100	8	5	4
G4	60	20	252,00	28,00	0	-6	1	1

U priloženoj tabeli, u koloni početno stanje predznak “-“ označava da je generatorska jedinica van pogona. Prilikom rješavanja problema pomoću dinamičkog programiranja koristi se već prethodno pomenuta metoda prioritete liste.

Posmatra se sistem od n generatorskih jedinica gdje će broj kombinacija biti $2^n - 1$. Najprije se počne od liste prioriteta (Tabela 3.4) gdje su na samom vrhu tabele navedeni generatori sa najkraćim vremenom angažovanja i najmanjim troškovima, zatim se napravi lista sa brojem kombinacija za angažovanje agregata sa odgovarajućom snagom koja će se primijeniti u skladu sa zahtjevima potrošača.

Tabela 3.4: Optimizacija pogona pomoću liste prioriteta

Sat	Potrošnja	Angažovani generatori	Troškovi
1	450	G3,G2	9208
2	530	G3,G2	10648.36
3	600	G3,G2,G1	12265.36
4	540	G3,G2	10828.36
5	400	G3,G2	8308.36
6	280	G3	5573.54
7	290	G3	5748.14
8	500	G3,G2	10108.36

Ukupan broj kombinacija za 4 generatora je $2^n - 1 = 2^4 - 1 = 15$. Redosljed kombinacija ili stanja generatora ("1" ukoliko je generator uključen, "0" ukoliko je generator isključen) sortiran je na osnovu maksimalne snage u Tabeli 3.5.

Tabela 3.5: Kombinacije angažovanja generatora

Stanje	Kombinacija	Najveća snaga (MW)
15	1111	690
14	1110	630
13	0111	610
12	0110	550
11	1011	440
10	1101	390
9	1010	380
8	0011	360
7	1100	330
6	0101	310
5	0010	300
4	0100	250
3	1001	140
2	1000	80
1	0001	60
0	0000	0
Jedinica	1234	

U Tabeli 3.4 prikazani su rezultati optimalnog angažovanja agregata pomoću metode liste prioriteta koji se sortiraju prema prosječnoj cijeni angažovanja iz Tabele 3.3, zadovoljavajući pritom potrebe konzuma. Isti problem sada treba riješiti pomoću metode dinamičkog programiranja. Prvo se iz Tabele 3.5 posmatraju najprihvatljivija stanja koja mogu da zadovolje potrošnju u datom satu. Tako su za prva 4 sata najprihvatljivija stanja 12, 14 i 15, a za zadnja 4 sata 5, 12, 14 i 15. Tako da, gledajući svih 8 sati, najprihvatljivija stanja su 5, 12, 14, 15 i počinje se od stanja 12 [26].

3.2.4 Lagrange-ov relaksacioni metod

Rješavanje problema izbora agregata metodom dinamičkog programiranja predstavlja složen i komplikovan proces, pogotovo u većim sistemima sa većim brojem generatorskih jedinica. Što se tiče metode liste prioriteta, vrlo je jednostavan metod i ima veliku brzinu proračuna, ali ne daje uvijek optimalno rješenje. Sljedeći metod je Lagrange-ov relaksacioni metod koji može da prevaziđe gore navedene nedostatke. Ovaj metod zasniva se na dvostrukoj optimizaciji.

Na samom početku definisane su varijable x_i^t :

$$x_i^t = 0 \text{ ukoliko je generator } i \text{ isključen u periodu } t;$$

$$x_i^t = 1 \text{ ukoliko je generator } i \text{ uključen u periodu } t.$$

Sada će se definisati problem izbora agregata (UC) u matematičkom obliku, odnosno ograničenja koja utiču na izbor agregata:

I. Opšta funkcija:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_{Gi}^t) x_i^t + F_{Si}(t) x_i^t] = F(P_{Gi}^t, x_i^t) \quad (3.20)$$

II. Ograničenja:

1) balans između proizvodnje i potrošnje:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi}^t x_i^t = P_D^t \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, N \text{ i } t = 1, 2, \dots, T \quad (3.21)$$

2) ograničena proizvodnja generatora, minimalna i maksimalna snaga:

$$x_i^t P_{Gimin}^t \leq P_{Gi}^t \leq x_i^t P_{Gimax}^t \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, N \text{ i } t = 1, 2, \dots, T \quad (3.22)$$

3) ograničena količina rezerve:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gimax}^t x_i^t \geq P_D^t + P_R^t \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, N \text{ i } t = 1, 2, \dots, T \quad (3.23)$$

4) minimalno vrijeme stanja uključenosti i minimalno vrijeme stanja isključenosti generatora:

$$(U_{t-1,i}^{\text{up}} - T_i^{\text{up}})(x_i^{t-1} - x_i^t) \geq 0, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, N \text{ i } t = 1, 2, \dots, T \quad (3.24)$$

$$(U_{t-1,i}^{\text{down}} - T_i^{\text{down}})(x_i^{t-1} - x_i^t) \geq 0, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, N \text{ i } t = 1, 2, \dots, T \quad (3.25)$$

gdje su:

P_{Gi}^t - izlazna snaga generatora,

x_i^t - promjenljiva 0 ili 1,

F_{Si} - troškovi angažovanja generatora i u periodu t ,

P_R^t - rezerva snage u periodu t ,

$T_i^{\text{up}}[h]$ - minimalno vrijeme stanja uključenosti generatora i ,

$T_i^{\text{down}}[h]$ - minimalno vrijeme stanja isključenosti generatora i ,

$U_{t-1,i}^{\text{up}}[h]$ -broj uzastopnih sati rada pri podizanju generatora i do perioda t ,

$U_{t-1,i}^{\text{down}}[h]$ - broj uzastopnih sati rada pri zaustavljanju generatora i do perioda t .

Postoje i druga dodatna ograničenja koja se mogu jednostavno formulisati i dodati, neka od njih su: sigurnosna ograničenja pri prenosu električne energije, ograničena emisija štetnih čestica u vazduhu, obrtna rezerva i druga. U okviru problema izbora agregata mogu se izdvojiti dva tipa ograničenja: pojedinačna i zajednička ograničenja. Pojedinačna ograničenja, kao što su kapacitet, minimalno vrijeme stanja uključenosti, odnosno isključenosti jedinice, tiču se svakog pojedinačnog generatora. Sa druge strane, zajednička ograničenja podrazumijevaju ograničenja cjelokupnog sistema, odnosno ograničenja svih generatora u sistemu. Što znači da promjena na jednom generatoru utiče na sve ostale generatore u sistemu. U zajednička ograničenja spadaju balans između proizvodnje i potrošnje i rezerva. Lagrange-ov relaksacioni metod vrši "relaksaciju" zajedničkih ograničenja i pridružuje ih opštoj funkciji pomoću dvostruke optimizacije, tako da se opšta funkcija može razdvojiti na više nezavisnih funkcija koje se tiču svakog generatora pojedinačno. Opšta Lagrange-ova funkcija je:

$$L(P, x, \lambda, \beta) = F(P_{Gi}^t, x_i^t) + \sum_{t=1}^T \lambda_t \left(P_D^t - \sum_{i=1}^n P_{Gi}^t x_i^t \right) + \sum_{t=1}^T \beta_t \left(P_D^t + P_R^t - \sum_{i=1}^n P_{Gimax}^t x_i^t \right) \quad (3.26)$$

Uslov pri rješavanju problema izbora agregata je minimizacija relacije (3.26). Članovi Lagrange-ove funkcije su prethodno opisane relacije (3.20), (3.21) i (3.23). Kako bi se slučaj pojednostavio koristi se samo oznaka P i simboli x , λ i β , bez indikatora G_i i t .

$$q(\lambda, \beta) = \min_{P, x} L(P, x, \lambda, \beta) \quad (3.27)$$

Relacija (3.27) predstavlja donju granicu za ocjenu rješenja polaznog problema, Lagrange-ova relaksacija dodjeljuje odgovarajuće faktore (Lagrange-ovi množiocci) nekim od uslova zadatka, uključujući ih pri tome u vrijednosnu funkciju, dok relacija (3.28) pokušava da dođe do optimalne gornje granice rješenja, maksimizacijom ciljne funkcije.

$$q^*(\lambda, \beta) = \max_{\lambda, \beta} q(\lambda, \beta) \quad (3.28)$$

Ovo se radi u dva osnovna koraka:

1. Podešavanje koeficijenata λ, β kako bi se dobila što je moguća veća vrijednosti $q(\lambda, \beta)$
2. Pretpostavljajući sada da su koeficijenti λ, β fiksni, pronaći minimalnu vrijednost od $L(P, x, \lambda, \beta)$, prilagođavajući parametre $P_{G_i}^t, x_i^t$.

Iz relacije (3.26) eliminišu se konstantne vrijednosti: $\lambda_t P_D^t$ i $\beta_t (P_D^t + P_R^t)$, pa sada relacije izgleda:

$$q(\lambda, \beta) = \min_{P, x} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \{ [F_i(P_{G_i}^t) + F_{S_i}(t)] x_i^t - \lambda_t P_{G_i}^t x_i^t - \beta_t P_{G_i \max} x_i^t \} \quad (3.29)$$

Sada, ovdje se postigao cilj, a to je da su jedinice postale nezavisne jedna od druge. A to predstavlja relacija unutar velike zgrade:

$$\sum_{t=1}^T \{ [F_i(P_{G_i}^t) + F_{S_i}(t)] x_i^t - \lambda_t P_{G_i}^t x_i^t - \beta_t P_{G_i \max} x_i^t \} \quad (3.30)$$

Relacija (3.30) može se primijeniti na svaki generator pojedinačno, bez obzira na stanje drugih generatorskih jedinica u sistemu.

Minimizacija Lagrange-ove funkcije se dobija rješavanjem minimuma za svaki generator pojedinačno i za svaki vremenski period, uz uvažavanje relacije (3.22).

$$\min q(\lambda, \beta) = \sum_{i=1}^n \min \sum_{t=1}^T \{ [F_i(P_{G_i}^t) + F_{S_i}(t)] x_i^t - \lambda_t P_{G_i}^t x_i^t - \beta_t P_{G_i \max} x_i^t \} \quad (3.31)$$

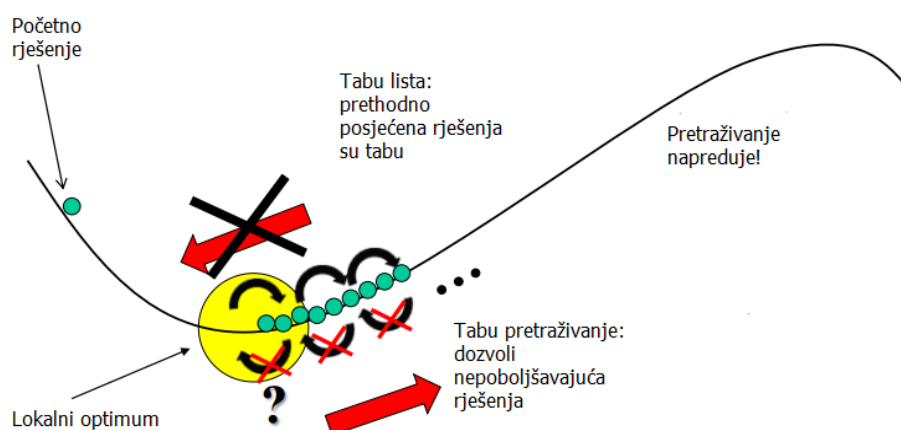
Minimizacija se vrši za svaki generator posebno, i sa različitim metodama kao što su dinamičko programiranje ili lista prioriteta. Dvostruka optimizacija podrazumijeva da se rješenja dobijena iz N nezavisnih potproblema koriste za dobijanje Lagrange-ovih množitelja. Za dvostruku optimizaciju, funkcija koja se optimizuje je konveksna, a promjenljive su neprekidne, pa se maksimizacijom druge funkcije dobija ista vrijednost kao i minimizovanjem prve funkcije. Međutim, za problem izbora agregata, promjenljive imaju vrijednost 0 ili 1, koje označavaju stanje agregata, koje nije ni neneprekidno i nekonveksno. Stoga se primjena dvostruke optimizacije na problem izbora agregata naziva "Lagrange-ova relaksacija". Tu postoji razlika između rezultata dobijenih maksimizacijom druge funkcije i minimizacijom prve funkcije. Cilj

Lagrange-ove relaksacije je da se pomoću iteracija ta razlika smanji, odnosno da bude što je moguće manja. Ukoliko se unaprijed definiše vrijednost razlike između dobijenih rezultata, onda se iteracije ponavljaju sve dok se ne postigne zadana vrijednost. Takođe, ukoliko se desi da je iteracijom dobijena manja razlika od one što je zadana, smatra se da se dostigao optimum. Dobrim izborom uslova koji se uključuju u vrijednosnu funkciju, može se dobiti jednostavniji novodobijeni problem, sa mnogo kraćim vremenom optimalnog rješavanja, a da im rješenja budu bliska [26].

Ova opšta funkcija koja predstavlja zajednička ograničenja, može da se razdvoji na više nezavisnih funkcija svakog generatora, kako bi se odredila i pojedinačna ograničenja, kapacitet i najmanja donja i gornja granica angažovanja.

3.2.5 Tabu pretraživanje

Tabu pretraživanje (*eng. tabu search*) se bazira na principu lokalnog pretraživanja i koristi kao svoju najvažniju komponentu takozvanu adaptivnu memoriju, tj. pamćenje nekih podataka o prethodnim fazama procesa pretraživanja, koji utiču na izbor sljedećih tačaka u ovom procesu. Pretraživanje se pokreće od nekog početnog rješenja na kojem, u svakoj iteraciji, radi niz lokalnih promjena koje poboljšavaju kvalitet rješenja dok se ne pronađe lokalni optimum. Tabu pretraživanje koristi memorijske strukture i kada pronađe potencijalno rješenje, označi ga kao tabu (zabranjeno) kako se više ne bi vraćalo na njega. Sva rješenja označena kao tabu pamte se u takozvanoj *tabu listi*. Algoritam tabu pretraživanja radi na sljedeći način: u svakoj iteraciji algoritma računaju se promjene vrijednosti funkcije cilja za sve moguće poteze iz okoline trenutnog rješenja i bira se najbolji potez. Moguće je da čak i najbolji potez ne poboljšava funkciju cilja. Na primjer, ukoliko se trenutno rješenje nalazi u lokalnom optimumu, svi potezi pogoršavaju funkciju cilja. Očigledno je da se kod ovakve optimizacijske procedure mogu pojaviti ciklična kruženja poteza, odnosno, može doći do situacije da se određeni slijed poteza stalno ponavlja (npr. ukoliko je u iteraciji ranije postojao lokalni minimum i nakon što je algoritam odabrao potez koji ga je najmanje udaljio od lokalnog minimum, sljedeći najbolji potez se ponovo vraća u isti lokalni minimum) (Slika 3.8).



Slika 3.8: Tabu lista: izbjegavanje kruženja

Kako se to ne bi dogodilo, uvodi se lista zabranjenih poteza koja definiše poteze koji nijesu dopušteni jer isti ne bi doveli do poboljšanja u pronalaženju optimalnog rješenja, takođe, pomoću liste će se spriječiti ciklično ponavljanje poteza.

Tabu pretraživanje sastoji se od dvije osnovne komponente, a to su:

1. odgovorna pretraga
2. adaptivna memorija.

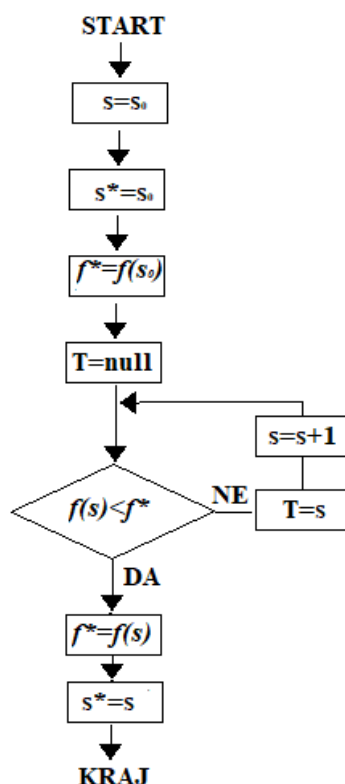
Odgovorna pretraga podrazumijeva pretpostavku da loš strateški izbor rješenja daje više informacija nego dobar slučajan izbor. U sistemu koji koristi memoriju, loš strateški izbor može da proizvede korisne informacije o tome kako je potrebno mijenjati strategiju. Dok adaptivna memorija, informacijama koje pruža, omogućuje implementaciju procedure pretraživanja tako da to pretraživanje bude ekonomično i efikasno. Memorija tabu pretraživanja ima 4 dimenzije: dimenzija bliske prošlosti (*eng. recency*), dimenzija učestalost (*eng. frequency*), dimenzija kvaliteta (*eng. quality*) i dimenzija uticaja (*eng. influence*). Dimenzije bliske prošlosti i učestalosti odnose se na svojstva memorije da čuva više različitih vrsta informacija. Informacije iz bliske prošlosti odnose se na podatke o dijelu procesa pretrage koji se odigrao neposredno prije tekućeg trenutka, dok se učestale informacije odnose na podatke o cijeloj pretrazi. Dimenzija kvaliteta u vezi je sa sposobnošću da se uočavaju dobre osobine rješenja posjećenih tokom pretrage. Memorija uočava elemente koji su zajednički za većinu dobrih rješenja ili puteve koji vode do njih. Ovi podaci su od velikog značaja za navođenje pretrage ka dobrim rješenjima, kao i odvratanje od loših. Četvrta dimenzija, uticaj, tiče se uticaja napravljenih izbora tokom pretrage ne samo na kvalitet već i na strukturu rješenja. Naravno, potrebno je da tabu lista bude odgovarajuće veličine. Međutim, budući da se u listu stavljaju samo potezi, a ne i cjelokupni kontekst u kojem je taj potez zabranjen, moguće je da zabranjivanje tog poteza, nakon što se algoritam nađe u nekom drugom rješenju, spriječi istraživanje moguće zanimljivih rješenja kojim bi taj potez vodio i moguće do potpune stagnacije procesa pretraživanja. Stoga se uvodi i aspiracijska funkcija pomoću koje se poništava tabu status nekog poteza i omogućava da se ono prihvati iako se nalazi u listi zabranjenih poteza. Klasična implementacija aspiracijske funkcije poništava potez u tabu status, ukoliko taj potez vodi do rješenja koje je bolje od do sada najboljeg pronađenog rješenja. Predloženo je da aspiracijska funkcija ne poklanja pažnju vrijednosti funkcije cilja, već da vrši ulogu diversifikacije rješenja. Smatra se da potez zadovoljava aspiracijsku funkciju ukoliko dodjeljuje obje jedinice na lokacije koje one nijesu okupirale unutar zadnjih t iteracija, gdje je t kontrolni parametar algoritma.

Memorija tabu pretraživanja takođe može biti eksplicitna ili atributna. Eksplicitna memorija čuva kompletna rješenja, dok atributna memorija čuva informacije o atributima (elementima) rješenja koji su se mijenjali prilikom prelaska sa jednog rješenja na drugo. Memorija se može podijeliti i na kratkoročnu i dugoročnu memoriju. Kratkoročna memorija (*eng. short-term memory*) sadrži informacije iz bliske prošlosti pretrage i najčešće se bilježi samo fiksna i ograničena količina informacija. U kratkoročnoj memoriji se čuvaju tabui pa se stoga ova memorija naziva i tabu lista. Pošto tabui najčešće nijesu cijela rješenja, ova memorija je atributna memorija. Dugoročna memorija (*eng. long-term memory*) se još naziva i frekventna memorija. Ova memorija obezbjeđuje informacije koje su komplementarne sa informacijama iz tabu liste. Dugoročna memorija je najčešće atributna memorija i čuva informacije o elementima (atributima) prisutnim u tekućem rješenju tokom cijelog procesa pretrage. Informacije koje se čuvaju predstavljaju frekvence atributa i postoje dvije mogućnosti za organizaciju ovih informacija. Dugoročna memorija može biti organizovana tako da za svaki atribut čuva broj iteracija u kojima je dati atribut bio prisutan u tekućem rješenju što predstavlja mjeru postojanosti tog atributa. Drugi način je da se za svaki atribut čuva broj iteracija u kojima je taj atribut mijenjao status, odnosno napuštao ili ulazio u rješenje što predstavlja mjeru prolaznosti tog atributa [28].

Najvažniji parametar tabu liste je njena dužina. Lista pamti nedavno posjećena rješenja ili korake (u zavisnosti od vrste memorije) i brani njihovo ponavljanje. Teoretski, dužina tabu liste mogla bi biti neograničena. To ne bi bilo dobro jer bi tokom pretraživanja tabu lista stalno rasla,

što povećava broj iteracija za dobijanje kvalitetnih rješenja, a samim tim i vrijeme potrebno za provjeru tabu statusa. Ukoliko je dužina tabu liste prevelika, tabu lista može biti suviše restriktivna i na taj način smanjiti izbor potencijalnih rješenja tokom pretrage. Dok, ukoliko je lista premala, može doći do cikličnog ponavljanja poteza, time bi se dopustili lošiji rezultati, ali bi se isto tako omogućila veća brzina izvođenja programa, što je u suprotnosti s onim što se heurističkim algoritmom želi postići. Veličina tabu liste zavisi od veličine problema koji se rješava i sa njom stoji u proporcionalnom odnosu (što je veći problem, potrebna je i veća tabu lista). Zbog toga se najčešće dužina tabu liste fiksira na određenu vrijednost koja zavisi od problema koji se razmatra i treba je pažljivo odabrati. Ta vrijednost predstavlja tabu mandat i određuje broj narednih iteracija u kojima će se zabranjeni izbori zapisivati u tabu listi. Novi tabu se dodaje na kraj liste, a ako je lista puna prije dodavanja najprije je potrebno izbaciti najstariji tabu iz liste. Dužina tabu liste može biti i promjenljiva tako da se slučajno mijenja unutar nekog intervala sa određenom frekvencijom.

Algoritam osnovnog algoritma tabu pretraživanja prikazana je ispod (Slika 3.9) sa zadatkom da se funkcija $f(s)$ minimizuje na nekom domenu. Navedena šema odnosi se na takozvani tabu algoritam sa najvećim poboljšanjem, jer se u svakoj iteraciji primjenjuje potez koji donosi najviše poboljšanja. To je i najčešće korišćena verzija tabu pretraživanja. Ova verzija tabu algoritma istražuje cijelu dozvoljenu okolinu $N(s)$ i pronalazi njen optimum u koji prelazi, a rješenja koja se odbacuju memorišu se u tabu listu (T).



Slika 3.9: Primjena tabu pretraživanja kroz algoritam

Teorijski, pretraživanje bi se moglo vršiti beskonačno, osim ukoliko je optimalno rješenje posmatranog problema unaprijed poznato. U praksi, pretraživanje se mora zaustaviti u nekom trenutku. Najčešće korišćeni kriterijumi zaustavljanja u tabu pretraživanju su:

- nakon određenog broja iteracija (ili određenog vremena procesora);
- nakon isteka zadatog vremena;
- nakon određenog broja iteracija bez poboljšanja vrijednosti funkcije cilja (najčešće korišćeni kriterijum);

- nakon što funkcija dostigne neku unaprijed definisanu vrijednost.

Kod kompleksnih tabu algoritama koji se sastoje iz više faza, pretraga staje kada se završe sve faze, a trajanje svake faze određuje se nekim od navedenih kriterijuma.

3.2.6 Simulirano kaljenje

Simulirano kaljenje (*eng. simulated annealing*) je metaheuristika za problem globalne optimizacije u primjenjenoj matematici, najčešće za pronalazak aproksimacije globalnog optimuma neke funkcije u velikom prostoru pretraživanja. Koristi se uobičajeno u problemima gdje je prostor pretraživanja diskretan. Inspiracija za ime dolazi od kaljenja u metalurgiji. Pri procesu metalurškog kaljenja čelika cilj je oplemenjivanje metala tako da on postane čvršći. Da bi se postigla čvrstoća metala potrebno je njegovu kristalnu rešetku pomjeriti tako da ima minimalnu potencijalnu energiju. Prvi korak u kaljenju čelika je zagrijavanje do određene visoke temperature, a zatim nakon kratkog zadržavanja na toj temperaturu počinje postepeno hlađenje. Pri postepenom hlađenju atomi metala nakon procesa kaljenja formiraju pravilnu kristalnu rešetku i time se postiže energetska minimum kristalne rešetke. Manja unutrašnja energija atoma znači veću stabilnost spoja i bolje karakteristike.

Analogno zakonima fizike, funkcija cilja za koju se traži globalni optimum se može posmatrati kao energija kristalne rešetke, ako je potrebno minimizovati funkciju cilja ili negativna energija kristalne rešetke, ako je potrebno maksimizovati funkciju cilja. Metoda počinje izborom početnog rješenja i postavljanjem početne temperature na relativno visoku vrijednost. Zatim se na slučajan način bira jedno rješenje iz okoline tekućeg rješenja. Ako je to rješenje bolje, onda ono postaje novo tekuće rješenje. Ako je novo rješenje lošije od tekućeg, ono ipak može da postane tekuće rješenje ali sa određenom vjerovatnoćom. Vjerovatnoća prihvatanja lošijeg rješenja obično zavisi od parametra koji predstavlja temperaturu i vremenom opada kako se algoritam izvršava. Ovakav pristup obezbjeđuje izlazak iz lokalnog optimuma. U početku je ta vjerovatnoća velika, pa će u cilju prevazilaženja lokalnog optimuma lošije rješenje biti prihvaćeno. Pred kraj izvršavanja algoritma vjerovatnoća prihvatanja lošijeg rješenja je jako mala i to se vjerovatno neće ni desiti, jer se smatra da je optimum dostignut ili se nalazi blizu najboljeg posjećenog rješenja, pa se izbjegava pogoršanje tekućeg rješenja.

Prirodno, algoritam SA sadrži parametar temperature i šemu hlađenja. Najčešće temperatura opada eksponencijalno sa parametrom p iz intervala $(0, 1)$. Ako parametar p ima veoma malu vrijednost, hlađenje je prebrzo što može dovesti do upadanja u lokalni optimum (pucanje metala). U suprotnom, ako je parametar p jako blizak jedinici, hlađenje je jako sporo, pa će se pretraga pretvoriti u nasumičnu pretragu velikog prostora rješenja zbog velike vjerovatnoće da se u početku bolja rješenja zamjenjuju lošijim. Iz tog razloga potrebno je odabrati parametar p tako da ima dovoljno veliku vrijednost i da temperatura pri kraju procesa bude niska što dovodi do stabilizacije rješenja u jednom lokalnom području [29].

Ova heuristika se u opštem obliku može prikazati na sljedeći način:

Početno stanje: Izabrati početno rješenje $x_1 \in X$ $x^* = x_1$, $f^* = f(x_1)$

Iterativni korak: $n=1,2,\dots$

Naći na slučajan način x u okolini $N(x_n)$ trenutnog rješenja x_n

Ako je $f(x) \leq f(x_n)$, tada $x_{n+1} = x$;

Ako je $f(x) < f^*$, tada $x^* = x$, $f^* = f(x)$;

Ako je $f(x) > f(x_n)$, izabrati slučajan broj p uniformno raspodijeljen na intervalu $[0,1]$;

Ako je $p \leq p_n$, tada $x_{n+1} = x$;

Ako je $p > p_n$, tada $x_{n+1} = x_n$;

Kraj: Ako je zadovoljen kriterijum zaustavljanja, niz iterativnih koraka se zaustavlja, a x^* se uzima za aproksimaciju optimalnog rješenja. Prihvatanje rješenja koje prouzrokuje povećanje funkcije cilja je glavna karakteristika algoritma simuliranog kaljenja. Vrijednost p_n predstavlja vjerovatnoću prihvatanja pogoršanja funkcije cilja u iteraciji n . U osnovnoj verziji simuliranog kaljenja ova vjerovatnoća je jednaka:

$$p_n = e^{-\frac{(f(x) - f(x_n))}{T_n}} \quad (3.32)$$

po analogiji sa procesom kaljenja, gdje je T_n vrijednost temperature u iteraciji n . Temperatura je pozitivan kontrolni parametar, čije su vrijednosti zadane nizom T_1, T_2, \dots , takvim da je $T_1 \geq T_2 \geq \dots$ i $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = 0$. Ovakav niz se naziva šema hlađenja i definiše način i brzinu smanjivanja temperature i tokom iteracija.

Metoda simuliranog kaljenja pokušava pronaći globalni optimum, ili mu se bar približiti u zadatom prostoru konfiguracija, pa se prema načinu djelovanja ubrajaju u metode usmjerenog slučajnog pretraživanja prostora rješenja (*eng. guided random search techniques*) u potrazi za globalnim optimumom. Za razliku od klasičnih determinističkih metoda, ovdje je moguće odrediti položaj globalnog optimuma sa više lokalnih ekstremuma. Kvalitet rješenja dobijen metodama simuliranog kaljenja je vrlo dobar, ali vrijeme izvršavanja je višestruko duže.

3.2.7 Linearno programiranje

Linearno programiranje predstavlja jedan vid matematičkog programiranja. Najčešće se koristi za rješavanje matematičkih modela koji odgovaraju maksimizaciji profita, odnosno minimizaciji troškova pri određenim uslovima. Model linearnog programiranja karakterišu neke zajedničke osobine, odnosno postoji određeni broj pretpostavki koje moraju biti zadovoljene da bi određeni model predstavljao model linearnog programiranja:

- linearnost - pretpostavka linearnosti podrazumijeva postojanje linearnih zavisnosti između promjenljivih u zadatku linearnog programiranja. Ova pretpostavka zadovoljena je tako što su funkcija cilja i ograničavajući uslovi u modelu linearnog programiranja izraženi linearnim funkcijama;
- izvjesnost - svi parametri modela linearnog programiranja su unaprijed jednoznačno određeni, što znači da su koeficijenti funkcije cilja i sistema ograničenja deterministički određeni i ne mijenjaju se u toku rješavanja modela. S obzirom na ovu osobinu, model linearnog programiranja smatra se determinističkim modelom;
- djeljivost - ova pretpostavka podrazumijeva da promjenljive u modelu linearnog programiranja ne moraju biti cijeli brojevi. Prema tome, u opštem obliku modela linearnog programiranja ne postavlja se tzv. uslov cjelobrojnosti rješenja, što znači da vrijednosti promjenljivih mogu biti izražene i u obliku decimalnih brojeva;
- nenegativnost - uslov nenegativnosti promjenljivih predstavlja jednu od osnovnih pretpostavki modela linearnog programiranja. Naime, kako opšti algoritam rješavanja modela linearnog programiranja predstavlja simpleks metod, to je za primjenu ovog metoda neophodno zadovoljenje uslova nenegativnosti promjenljivih, što čini metodološki aspekt uslova nenegativnosti promjenljivih.

Matematički se može predstaviti:

$$\begin{aligned} &\text{maksimizovati } \mathbf{c}^T \mathbf{x}, \\ &\text{pod uslovom } \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}, \text{ za } \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned}$$

Uvedene dodatne promjenljive, osim metodološke uloge u pretvaranju sistema nejednačina u sistem jednačina, imaju veoma značajan suštinski (ekonomski) značaj prilikom rješavanja zadatka linearnog programiranja. S obzirom da nejednačine sistema ograničenja problema maksimuma pokazuju način korišćenja ograničenog iznosa raspoloživih resursa (predstavljenih slobodnim članovima sistema ograničenja), to pozitivne vrijednosti dodatnih promjenljivih pokazuju iznos neiskorišćenih resursa u nekom od rješenja. Tako, vrijednosti dodatnih promjenljivih iz optimalnog rješenja pokazuju koliko resursa ostaje neiskorišćeno u situaciji kada su vrijednosti realnih promjenljivih optimalne, tj. kada funkcija cilja ostvaruje svoju maksimalnu vrijednost. Uslov nenegativnosti, koji se u osnovnom obliku modela odnosio na realne promjenljive, prema tome, mora biti zadovoljen i za dodatne promjenljive. Osim u sistemu ograničenja, dodatne promjenljive se uvode i u funkciju cilja, nakon čega će kompletan transformisani oblik problema biti:

$$f(x) = c_1x_1 + \dots + c_px_p + c_{p+1}x_{p+1} + \dots + c_{p+m}x_{p+m} \quad (3.35)$$

Sve vrijednosti promjenljivih za koji su zadovoljene nejednačine (jednačine) sistema ograničenja predstavljaju tzv. moguća rješenja, odnosno obrazuju skup mogućih rješenja (mogući skup) [30].

3.3 Metaheurističke metode za optimizaciju pogona elektroenergetskog sistema

Prethodno navedene metode mogu se primijeniti u sistemima sa konvencionalnim izvorima, odnosno kada proizvodnja električne energije u najvećoj mjeri ne zavisi od nepredvidivih vremenskih uslova. U slučaju da se na sistem priključi neki od obnovljivih izvora, čija proizvodnja utiče na snabdijevanje potrošača električnom energijom, tada problem optimizacije pogona postaje predmet neke od metoda nazvanim *metaheuristike*. Metaheuristike se mogu definisati kao skup algoritamskih koncepata koje se koriste za definisanje heurističkih metoda primjenljivih na širok skup problema. Može se reći da je metaheuristika, heuristika opšte namjene čiji je zadatak da usmjeri specifične heuristike prema području, u prostoru rješenja, u kojem se nalaze dobra rješenja. Njihova efikasnost nije teorijski dokazana, ali praktično, metaheuristike su uspješno primijenjene na skoro sve klasične probleme nelinearnog programiranja i kombinatorne optimizacije, kao i na veliki broj realnih problema. Velika grupa metaheurističkih algoritama koji se dobro nose sa teškim problemima nastala je proučavanjem procesa u prirodi. Priroda je čovjeku oduvijek bila inspiracija jer prirodni procesi optimizuju život već preko 4 milijarde godina. Proučavanjem ovih procesa i načina na koji živa bića rješavaju probleme, nauka je došla do velikog broja tehnika sa kojima može uspješno riješiti probleme. Neke od tih tehnika su genetički algoritmi, optimizacija rojevima čestica, optimizacija kolonijom pčela, optimizacija mravljim kolonijama i druge.

3.3.1 Genetički algoritam

Genetički algoritmi predstavljaju porodicu algoritama koji se služe nekim od genetičkih principa koji su prisutni u prirodi, a da bi riješili određene računске probleme. Ti prirodni principi su: nasljeđivanje, ukrštanje, mutacije, zakon jačeg (*eng. survival of the fittest*), migracije itd. Ovi algoritmi se mogu koristiti za rješavanje raznih klasa problema, jer su prilično opšte prirode. Načelno, oni se koriste kod problema optimizacije, odnosno, nalaženja optimalnih parametara nekog sistema. Klasični adaptivni algoritami mogu se uspješno

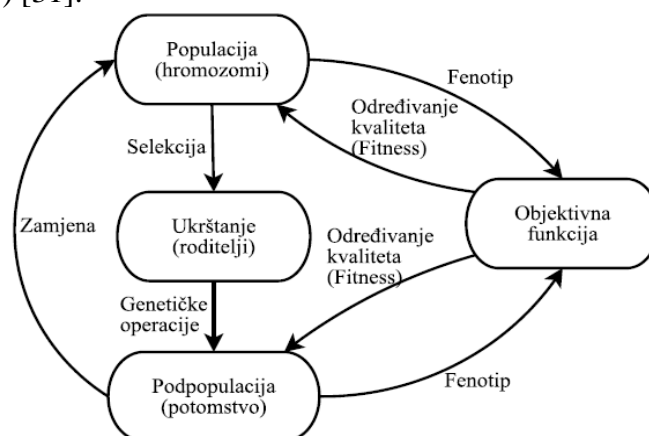
primijeniti na sisteme sa jednim optimumom (tj. jednim ekstremumom — maksimumom ili minimumom — parametra koji želimo da optimizujemo). Poteškoće se javljaju kod sistema sa više lokalnih ekstremuma, gdje se može desiti da algoritam "zakaže" oko nekog lokalnog ekstremuma, koji može biti prilično daleko od globalnog ekstremuma. Genetički algoritam pretražuje stohastički razne dijelove prostora pretrage i stoga je veća vjerovatnoća da će pronaći globalni ekstremum. Prostor pretrage može biti n-dimenzioni.

Genetički algoritmi su zasnovani na ideji Darwinove teorije o postanku vrsta i prirodnoj evoluciji, koja je nastala krajem 19. vijeka. Iako su prvi radovi koji se generalno mogu klasifikovati u ovu oblast nastali još 60-ih godina, kao idejni tvorac se zvanično uzima John Holland sa knjigom "Adaptation in natural and artificial systems". Genetički algoritmi su robusne i adaptivne metode koje se mogu koristiti za rješavanje problema kombinatorne optimizacije. Osnovna konstrukcija je populacija jedinki, kojih je najčešće između 10 i 200. Svaka jedinka predstavlja moguće rješenje u pretraživačkom prostoru za dati problem (prostoru svih rješenja) i predstavljena je genetičkim kodom nad određenom konačnom azbukom i kodiraju se kao *hromozomi* (stringovi). Hromozom se sastoji iz više gena, a gen je kodirana promjenljiva konkretnog problema. Najčešće se koristi binarno kodiranje, gdje se genetički kod sastoji od niza bitova. U nekim slučajevima pogodno je koristiti razne druge prikaze (matrice, nizovi realnih brojeva, itd.) i definišu se usko specijalizovani genetički operatori primjenjivi samo za određeni problem kako bi se izbjegla nemoguća rješenja.

Na primjer, ako se posmatra problem sa dvije promjenljive x_1 i x_2 , može se napraviti struktura hromozoma na način prikazan sljedećim primjerom:

$$\underbrace{1011010011}_{x_1} \underbrace{010111010100101}_{x_2}$$

Varijable x_1 i x_2 su predstavljene kao dva gena, x_1 je kodirano sa 10 bita, a x_2 sa 15 bita. Razlika u dužini bita može biti usljed toga što x_2 uzima vrijednosti iz nekog većeg skupa, ili ih uzima iz istog skupa kao i x_1 , ali sa većom preciznošću. Svakoј jedinki se dodjeljuje funkcija prilagođenosti (*eng. fitness function*) koja ocjenjuje kvalitet date jedinke, predstavljene kao pojedinačno rješenje u pretraživačkom prostoru. Poređenja radi, u prirodi, jedinka koja je najbolje prilagođena uslovima i okolini u kojoj živi, ima najveću vjerovatnoću preživljavanja i parenja, a time i prenošenja svog genetskog materijala na svoje potomke. Za genetički algoritam jedno rješenje je jedna jedinka. Genetički algoritam mora da obezbijedi način da stalno, iz generacije u generaciju, poboljšava apsolutnu prilagođenost svake jedinke u populaciji, kao i srednju prilagođenost cijele populacije. To se postiže uzastopnom primjenom genetičkih operatora *selekcije*, *ukrštanja* i *mutacije*, čime se dobijaju sve bolja rješenja datog konkretnog problema (Slika 3.10) [31].



Slika 3.10: Šema genetičkog algoritma

Koraci pri odabiru najpovoljnijeg rješenja su:

1. Slučajan odabir inicijalne populacije $X(0) = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$, gdje je N početni broj hromozoma (inicijalizacija),
2. Izračunati vrijednost *fitness* funkcije $F(x_i)$ za svaki hromozom x_i u tekućoj populaciji $X(t)$,
3. Kreirati nove hromozome $X_r(t)$ ukrštanjem tekućih (roditeljskih) hromozoma primjenjujući mutacije i rekombinacije,
4. Izbrisati određen broj hromozoma iz populacije da bi se napravilo mjesto za nove (umiranje hromozoma),
5. Izračunati vrijednost *fitness* funkcije novih hromozoma u populaciji $X_r(t)$,
6. Zaustavljanje postupka može biti nakon postizanja zadovoljavajućeg kvaliteta ili broja iteracija.

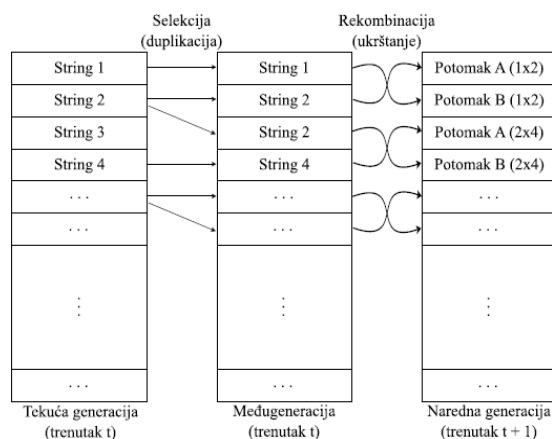
Reprodukcija

Reprodukcija je operator kojim se određuje kako genetički algoritam izrađuje novu generaciju. Mogućnosti su sljedeće:

- *Broj elitnih jedinki (eng. elite count)*. To su jedinke koje se izdvajaju iz populacije trenutne generacije i na njima se ne vrši nikakva daljnja operacija, kao što su ukrštanje ili mutacija. Dobro je postaviti što manje elitnih jedinki zbog obezbjeđivanja raznolikosti populacije. Elitne jedinke služe za usmjeravanje populacije, a ne smiju u njoj dominirati jer je tada moguća prerana konvergencija.
- *Broj jedinki koje će se dobiti ukrštanjem (eng. crossover fraction)*. Te jedinke su dakle frakcija populacije u sljedećoj generaciji dobijena operacijom ukrštanja jedinki iz prethodne generacije. Broj ovih jedinki određuje način rada algoritma, stoga je potrebno izabrati optimalan broj. To zavisi od funkcije cilja.

Selekcija

Mehanizam selekcije favorizuje natprosječne jedinke i njihove natprosječno prilagođene djelove (gene), koji dobijaju veću šansu za sopstvenom reprodukcijom pri formiranju nove generacije. Slabije prilagođene jedinke i geni imaju smanjene šanse za reprodukciju pa postepeno izumiru. Nakon računanja vrijednosti *fitness* funkcije za sve jedinke, izvršava se selekcija. U fazi selekcije, neposredno pred ukrštanje, nastaje svojevrsna međugeneracija (*eng. intermediate generation*). To je, praktično, pomoćna generacija u jednoj iteraciji genetičkog algoritma (Slika 3.11).



Slika 3.11: Prikaz generacija i etapa u jednoj iteraciji

Postoji više različitih tehnika nastanka novih generacija, od kojih zavisi sposobnost istih:

- *Stohastičko jednoliko* (eng. *stochastic uniform*). Izbor jedinki tako da se prva odabere na osnovu slučajnog broja, a ostale u pravilnim jednakim razmacima,
- *Ostatak* (eng. *remainder*). Dodjeljuje roditelje (eng. *parents*) novoj populaciji deterministički preko funkcije jačine, a ostatak jedinki se bira na principu ruleta,
- *Jednoliko* (eng. *uniform*). Slučajni izbor jedinki na osnovu jednolične raspodjele vjerovatnoće,
- *Rulet* (eng. *roulette*). Simulacija kola ruleta i izbor jedinki (roditelja) zavisno od jačine.
- *Turnirski odabir* (eng. *tournament*). Jedinke se biraju na osnovu slučajnih brojeva, unutar te populacije (određene veličine: eng. *tournament size*) izvrši se ocjenjivanje i izbor najboljih za sljedeći korak,
- *Korisničke postavke* (eng. *custom*). Programiranjem samostalno izraditi funkciju odabiranja jedinki.

Ukrštanje

Operator *ukrštanje* vrši rekombinaciju gena jedinki pri čemu se dobijaju novi hromozomi (međugeneracija i nova generacija) i time doprinosi raznovrsnosti genetičkog materijala. U prirodi, ukrštanjem, potomak dobija dio osobina i jednog i drugog roditelja. Rezultat ukrštanja je strukturalna, iako nedeterministička, razmjena genetičkog materijala između jedinki, sa mogućnošću da dobro prilagođene jedinke generišu još bolje jedinke. Ovim mehanizmom, i relativno slabije prilagođene jedinke, sa nekim dobro prilagođenim genima, dobijaju svoju šansu da, ukrštanjem dobrih gena, proizvedu dobro prilagođene jedinke. Postoji više načina ukrštanja:

- *Nepovezano* (eng. *scattered*). Izrađuje se slučajni binarni vektor (ili broj), odnosno niz nula i jedinica slučajno odabranih. Taj vektor služi za izbor gena odabranih jedinki (roditelja) za oblikovanje gena sljedeće jedinke (djeteta). Pozicija bita slučajnog binarnog vektora i njena vrijednost (0 ili 1) određuje koji geni od dva roditelja se biraju za dijete. Ako na i -toj poziciji slučajnog binarnog vektora stoji 1 bira se i -ti gen iz prvog roditelja, a ako stoji 0 bira se i -ti gen drugog roditelja.
- *Ukrštanje u jednoj tački* (eng. *single point*) je najprostiji način ukrštanja. Posmatraju se dva stringa dužine L . Slučajno se bira cijeli broj i , koji je iz intervala $[1, L - 1]$, a zatim se razmijene genetičke informacije između dva stringa od i -te tačke do kraja stringova. Na primjer, neka su data dva stringa roditelja:

$$P_1 = 10010110$$

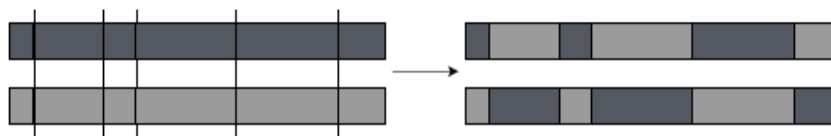
$$P_2 = 10111000$$

Dakle, L je 8. Uzima se da je $i = 5$. Dobijaju se potomci:

$$O_1 = 10010000$$

$$O_2 = 10111110$$

- *Ukrštanje u više tačaka*, bira se m tačaka u kojima se vrši ukrštanje. Ove tačke uzimaju vrijednosti iz skupa $\{1, 2, \dots, L - 1\}$, gdje je L dužina hromozoma. Svaka od m tačaka mora uzeti jedinstvenu vrijednost. Obično se tačke biraju slučajno (Slika 3.12).

Slika 3.12: Ukrštanje u više tačaka ($m=5$)

Povod za uvođenje višestrukog ukrštanja, a i ostalih varijanti operatora ukrštanja je ta da djelovi hromozoma koji najviše utiču na performanse genetičkog algoritma ne moraju biti smješteni u susjednim podstringovima.

- *Ujednačeno ukrštanje* generalizuje broj mjesta na kojima će se izvršiti ukrštanje, tako da svako razdjelno mjesto postaje potencijalna tačka ukrštanja. Ovo se najbolje objašnjava uvođenjem pojma maske ukrštanja u sljedećem primjeru:

$$P_1 = 1011000111$$

$$P_2 = \underline{0001111000}$$

$$mask = 0011001100$$

$$O_1 = \underline{00}11\underline{11}01\underline{00}$$

$$O_2 = 100\underline{100}1\underline{01}1$$

Maska (*eng. mask*) je iste dužine kao i roditeljski hromozomi (u primjeru P_1 i P_2), a sastoji se iz slučajno generisanih jedinica i nula. Potomak O_1 se dobija uzimanjem bita od roditelja P_1 na pozicijama gdje je bit maske jedinica, i uzimanjem bita od P_2 ako je odgovarajući bit maske 0. Potomak O_2 se dobija na suprotan način.

- *Srednje (eng. Intermediate)*. Djeca se izrađuju pomoću srednje vrijednosti roditelja pomnožene sa slučajnim brojem. Ukrštanje je kontrolisano odnosom (Ratio) u obliku sljedećeg izraza: $dijete1 = roditelj1 + rand * Ratio * (roditelj2 - roditelj1)$. Odnos (Ratio) može biti u okviru granica $[0,1]$, ili izvan njih.
- *Heuristično (eng. Heuristic)*. Određuje se dijete koje leži na spojnoj crti dva roditelja. Dijete je bliže roditelju sa boljim osobinama. Parametrom odnos (Ratio) može se odrediti koliko je dijete udaljeno od boljeg roditelja. Ako roditelj1 ima bolje osobine, dijete se određuje sljedećom formulom: $dijete1 = roditelj2 + Ratio * (roditelj1 - roditelj2)$.
- *Aritmetičko (eng. arithmetic)*. Nastaju djeca koja su težinska aritmetička sredina roditelja.

Mutacija

Višestrukom primjenom selekcije i ukrštanja moguće je gubljenje genetičkog materijala, odnosno postaju nedostupni neki regioni pretraživačkog prostora. Mutacija vrši slučajnu promjenu određenog gena, sa datom malom vjerovatnoćom, čime je moguće vraćanje izgubljenog genetičkog materijala u populaciju. Dovoljno je da samo jedna jedinka, posredstvom mutacije, izađe van prostora lokalnog optimuma i algoritmom će se izraditi nova populacija oko nje. Tada se algoritam usmjerava u drugom pravcu. Moguće je odabrati sljedeća podešavanja funkcije mutacije:

- *Automatsko podešavanje u zavisnosti od ograničenja (eng. use constraint dependent default)*. Za ovakvo podešavanje automatski se bira način mutiranja gena u zavisnosti od ograničenja, i to:

1. normalnom raspodjelom, ako ograničenja nijesu definisana,
2. moguće i prilagodljivo, ako ograničenja jesu definisana.

Termin *moguće* (prihvatljivo, ono koje funkcioniše) znači da jedinka nakon mutacije mora biti u području mogućih rješenja koje je određeno ograničenjima.

- *Normalna raspodjela (Gaussian)*. Pridružuje se po jedan slučajni broj svakoj jedinki u cijeloj populaciji. Slučajni broj je generisan prema zakonu normalne raspodjele koja ima aritmetičku sredinu vrijednosti 1 u nuli (gausova funkcija - zvono). Količina mutacije je proporcionalna dakle sa standardnom devijacijom raspodjele i smanjuje se sa svakom sljedećom generacijom. Količina mutacije (mutiranih gena) može se kontrolisati parametrima *Scale* i *Shrink*:
 1. *Scale* određuje standardnu devijaciju mutacije u prvoj generaciji tako da se taj parametar pomnoži sa rasponom početne populacije (*eng. initial range*) definisanom u podešavanjima populacije,
 2. *Shrink* kontroliše stepen prema kojem se smanjuje prosječna količina mutacije. Standardna devijacija se smanjuje linearno, stoga će u konačnom koraku biti smanjena za *Shrink* puta svoje početne vrijednosti u prvoj generaciji.
- *Jednolika raspodjela (eng. uniform)*. Proces se odvija na osnovu jednolične raspodjele u dva koraka. U prvom koraku algoritmom se odabere dio (frakcija) cifara (ili ulaza vektora) jedinke za mutaciju svaka cifra (ili ulaz vektora) jedinke, odnosno svaki gen, ima jednaku vjerovatnoću mutacije prema zadanom parametru. U drugom koraku odabrani geni mutiraju u zavisnosti od pridruženog slučajnog broja u druge gene koji određuju jedinke.
- *Moguće i prilagodljivo (eng. adaptive feasible)*. Slučajno se generišu smjerovi koji su prilagodljivi u zavisnosti od prethodne uspješne ili neuspješne generacije. Dužina koraka se određuje između svih mogućih smjerova kako bi se zadovoljila linearna ograničenja i granice.

Operatore mutacije korisnik bira, kao i operatore ukrštanja, izborom odgovarajućeg podskupa operatora i zadavanjem težina, kao i vjerovatnoća primjene.

Migracija

Migracija je kretanje jedinki između pod-populacija koje algoritam izrađuje ako se veličina populacije (*eng. population size*) unutar postavki populacije postavi kao vektor dimenzije veće od jedan. Kada dođe do migracije, najbolje jedinke iz jedne pod-populacije zamjenjuju najlošije jedinke u drugoj pod-populaciji. Jedinke koje migriraju iz jedne pod-populacije u drugu samo su kopirane u drugu pod-populaciju i nisu uklonjene iz prethodne pod-populacije. Moguće je odrediti sljedeća podešavanja:

- *Smjer (eng. direction)*. Ovim podešavanjem određuje se smjer u kojem se migracija odvija. Može se odabrati dva načina migriranja:
 1. *Naprijed (eng. forward)*. Migriranje se odvija prema posljednjoj pod-populaciji i to tako da jedinke iz n -te pod-populacije (n -ti element Population size vektora) migriraju prema $(n+1)$ -toj pod-populaciji ($(n+1)$ -ti element Population size vektora),
 2. *Dvostruko (eng. both)*. Jedinke iz n -te pod-populacije migriraju u dva smjera i to prema $(n-1)$ -toj i $(n+1)$ -toj pod-populaciji.
- *Odjeljak (eng. fraction)*. Ovim podešavanjem određuje se koliko jedinki će se kretati između pod-populacija. Vrijednost odjeljka se postavlja kao decimalni broj unutar raspona $[0, 1]$. Veličina najmanje pod-populacije unutar definisanog vektora (*eng. population size*) uzima se kao mjerodavna za određivanje broja jedinki koje migriraju.

Na primjer, za vektor populacije [50 0 30 100] i uz podešavanje Fraction kao 0.1 broj jedinki koje migriraju je $30 \times 0.1 = 3$, dakle tri jedinke.

- **Raspon** (*eng. interval*). Ovim podešavanjem određuje se broj generacija između odvijanja migracija. Ako se raspon postavi kao broj 20, tada se u algoritmu migracija odvija svakih 20 generacija.

Kriterijumi zaustavljanja iterativnog postupka

Pošto je genetički algoritam stohastički metod pretraživanja, teško je formalno precizirati kriterijume konvergencije. Kako vrijednost funkcije prilagođenosti cjelokupne populacije može ostati nepromijenjena kroz niz generacija, sve dok se ne naiđe na superiornog pojedinca, prekid (*eng. termination*) algoritma na klasičan način (zadovoljenjem uslova) postaje problematičan. Najčešće se u praksi genetički algoritam prekida nakon određenog broja generacija, a zatim se provjerava kvalitet najboljih jedinki. Ako rezultat nije prihvatljiv, može se opet pokrenuti pretraživanje ispočetka. Takav ciklus selekcije, ukrštanja i mutacije genetičkog materijala jedinki ponavlja se sve dok nije zadovoljen uslov zaustavljanja evolucijskog procesa.

Uzroci zaustavljanja algoritma mogu se definisati od strane korisnika:

- *Broj generacija* (*eng. generations*). Ovim podešavanjem određuje se najveći broj generacija (iteracija) u izvođenju genetičkog algoritma.
- *Vremensko ograničenje* (*eng. time limit*). Ovim podešavanjem određuje se ukupno vrijeme izvođenja algoritma u sekundama, nezavisno od toga da li se pronašao optimum ili ne.
- *Granica jačine* (*eng. fitness limit*). Ako je poznata jačina jedinke, odnosno vrijednost funkcije cilja koja predstavlja optimum, onda se ta vrijednost može zadati kao granica na kojoj se algoritam zaustavlja.
- *Broj generacija u zaustavljanju algoritma* (*eng. stall generations*). Prilikom izračunavanja jačine najbolje jedinke u generaciji genetički algoritam vrši poređenje sa najboljim jedinkama iz prethodnih generacija. Ako je promjena vrijednosti jačine najboljih jedinki u uzastopnim generacijama unutar zadane tolerancije tada algoritam započinje proces zaustavljanja. Proces zaustavljanja traje onoliko generacija koliko je zadano ovim podešavanjem.
- *Vrijeme trajanja zaustavljanja* (*eng. stall time limit*). Ako prilikom izvođenja algoritma nema naznaka poboljšanja vrijednosti jačine najboljih jedinki u generacijama tada se algoritam zaustavlja za određeno vrijeme. Vrijeme zaustavljanja algoritma u sekundama određuje se ovim podešavanjem.
- *Tolerancija funkcije* (*eng. function tolerance*). Ako se kumulativna promjena vrijednosti funkcije cilja ne mijenja u okviru vrijednosti zadate tolerancije funkcije, i ako se ta promjena ne dogodi u generacijama u procesu zaustavljanja algoritma, algoritam prekida s izvođenjem.
- *Tolerancija nelinearnih ograničenja* (*eng. nonlinear constraint tolerance*). Ovim podešavanjem određuje se tolerancija prekidanja algoritma za koju je moguće izaći van područja nelinearnih ograničenja [32].

3.3.2. Optimizacija rojem čestica

Jedan od načina za rješavanje problema izbora agregata je pomoću stohastičkog algoritma optimizacija rojem čestica (*eng. particle swarm optimization*). Optimizacija rojem čestica pripada grupi algoritama inteligencije roja (*eng. swarm intelligence*) koji se temelje na

sociološko-psihološkim principima i pružaju uvid u sociološka ponašanja i pomoću njih doprinose inženjerskim aplikacijama. Algoritam je inspirisan sociološkim interakcijama između pojedinaca u populaciji, gdje svaki pojedinac pamti svoje, do tada pronađeno, najbolje rješenje problema i ima uvid u najbolje pronađeno rješenje svojih susjeda i pretraživanje usmjerava uzimajući u obzir obje komponente. Kao primjer može da se navede društveno ponašanje raznih tipova organizama, poput jata ptica ili ribljih plova. Posmatra se jato ptica koje će svoj položaj mijenjati vođeno instinktom za hranjenjem. Sve ptice u jatu traže hranu na nekom prostoru. Vrlo je vjerovatno da će jato pratiti onu pticu koja je osjetila ili pronašla dobar izvor hrane. Ali, svaka ptica pojedinačno u sebi ima instinkt kojim želi za sebe pronaći još bolje hranilište, a kako bi to postigla ona se nakratko odvaja od jata. Samim pronalaskom boljeg hranilišta, pomogla je jatu u cjelini jer će se ostale ptice preseliti na bolje hranilište.

Dakle, algoritam roja čestica je populacijski algoritam. Populacija se sastoji od niza jedinki (čestica) koje lete kroz višedimenzionalni prostor koji pretražuju i pri tome svoj položaj mijenjaju na osnovu vlastitog iskustva i iskustva bliskih susjeda (čime se modeluju socijalne interakcije između jedinki). Detaljnije, svaka čestica u sistemu pamti koordinate unutar prostora problema koje predstavljaju najbolje dosad postignuto rješenje te čestice (*eng. personal best*). Ako se u roju odrede međusobni susjedi svake čestice, čestica mora pamtit i najbolje rješenje do kojeg je došla bilo koja susjedna čestica naše posmatrane čestice (*eng. local best*). Ukoliko su sve čestice međusobni topološki susjedi, najbolje rješenje takvog roja je globalni optimum (*eng. global optimum*). Da bi se algoritam pokrenuo, neophodno je odrediti vrijednost svih parametara. Algoritam započinje inicijalizacijom populacije. Veličina populacije tipično se kreće od 20 do 50, broj može biti veći ukoliko bi se tim brojem dobilo zadovoljavajuće rješenje. Svaka se čestica smješta na neku slučajno odabranu poziciju i dodjeljuje joj se neka slučajno odabrana brzina. Brzina čestice ograničena je svojom minimalnom i maksimalnom vrijednosti i to se čuva u poljima v_{min} i v_{max} . Stavi li se preveliko ograničenje brzine, čestica može preletjeti preko područja dobrih rješenja, a ako se stavi ograničenje brzine na premalu vrijednost može se dogoditi situacija da čestica ostane zarobljena u lokalnim optimumima. Čestice su stohastične prirode i koriste vektor brzine kako bi ažurirale trenutnu poziciju u roju. Vektor brzine se ažurira na temelju pamćenja svake čestice, što konceptijski odgovara autobiografskoj memoriji, kao i na temelju znanja koje je stekao roj kao cjelina.

Numerički, pozicija x čestice i u iteraciji $k+1$ je ažurirana na sljedeći način:

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \quad (3.36)$$

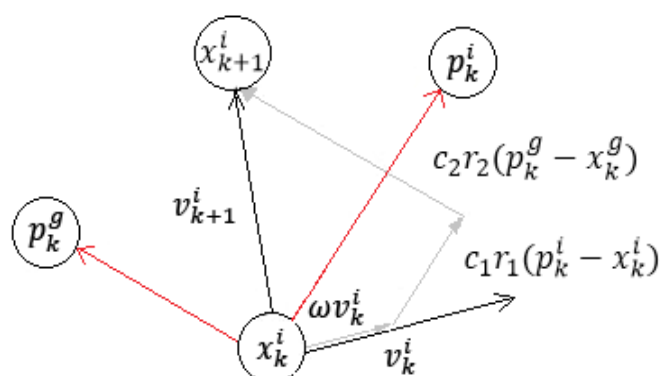
pri čemu je v_{k+1}^i pripadajući ažurirani vektor brzine, a Δt je vrijednost vremenske step funkcije. Vektor brzine svake čestice se računa kao:

$$v_{k+1}^i = \omega v_k^i + c_1 r_1 \frac{(p_k^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(p_k^g - x_k^g)}{\Delta t} \quad (3.37)$$

Pri čemu je v_k^i vektor brzine čestice i u iteraciji k , p_k^i i p_k^g su najbolja ikad pozicija čestice i globalna najbolja pozicija čitavog roja sve do trenutne iteracije k , dok r_1 i r_2 predstavljaju nasumični broj iz intervala $[0,1]$. Preostali članovi su konfiguracijski parametri koji igraju važnu ulogu u konvergencijskom ponašanju optimizacije roja. Član c_1 (kognitivni, samospoznajni parametar) predstavlja stepen povjerenja u najbolje rješenje do kojeg je došla pojedina čestica, dok član c_2 (socijalni, društveni parametar) predstavlja stepen povjerenja u globalno najbolje rješenje (najbolje pronađeno rješenje od jata kao cjeline). Ova dva člana utiču na ponašanje same jedinke:

- radi li istraživanje prostora stanja (ukoliko je dominantan c_1),
- fino podešavanje pronađenog rješenja (ukoliko je dominantan c_2).

Na ovaj način sam algoritam kombinuje globalno pretraživanje prostora stanja i lokalnu pretragu kojom se obavlja fino podešavanje rješenja. Članovi c_1 i c_2 modeluju jačinu privlačne sile između najboljih rješenja i čestice - što veći broj, to veća privlačna sila pa će čestica manje istraživati. Posljednji član ω je inercijska varijabla koja je iskorištena za kontrolisanje istraživačkih sposobnosti roja tako da skalira vrijednost trenutne brzine te na taj način utiče na iznos ažuriranog vektora brzine. Većim vrijednostima inercijske varijable vrši se globalno pretraživanje zbog toga što se ažurirani vektor brzine brže povećava, dok zadavanjem manje vrijednosti inercijske varijable vrijednost ažuriranog vektora brzine postaje manja, pa se tako novi položaj čestice ograničava na manje područje prostora istraživanja, tj. omogućuje se lokalno pretraživanje. Na Slici 3.13 vidi se pozicija čestice i ažuriranje vektora brzine na prethodno opisan način u dvodimenzionalnom prostoru. Isto tako je vidljivo da će ažurirani položaj čestice zavisiti ne samo od najboljih pozicija roja i čestice, već i od veličine konfiguracijskih parametara [33].



Slika 3.13: Promjena položaja čestice

Primjena ovog algoritma ima određene prednosti i nedostatke. Prednosti su da:

- može biti primijenjen i u naučnom istraživanju i u praktičnoj upotrebi,
- brzina izvršavanja je velika,
- izračunavanja su veoma jednostavna.

A nedostaci:

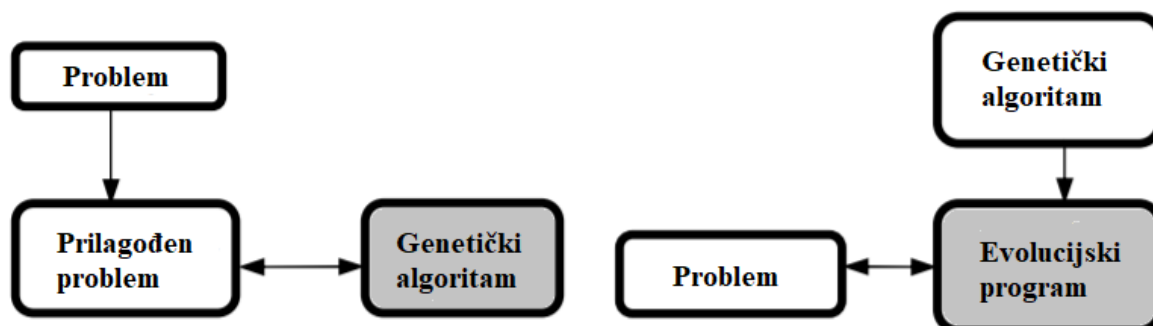
- lako može doći do parcijalne optimizacije,
- ne može riješiti probleme raspoređivanja i optimizacije,
- ne može riješiti probleme kao što su rješenja na polju energije.

Pored gore pomenutih stalno se razvijaju nove heuristike od kojih većina vrlo brzo nalazi široku primjenu. Pri rješavanju problema optimizacije takođe treba imati u vidu i činjenicu da ne postoji metoda za njihovo rješavanje koja je univerzalna i koja daje najbolje rezultate na svim problemima.

4. OPTIMIZACIJA POGONA EES SA VJETROELEKTRANAMA UPOTREBOM GENETIČKOG ALGORITMA

4.1 Genetički algoritam kao optimizacioni alat

Prije rješavanja problema optimizacije genetičkim algoritmom, najprije treba definisati pristup problemu. Moguće je identifikovati dva pristupa rješavanja određenog problema: prilagoditi problem genetičkom algoritmu ili genetički algoritam prilagoditi specifičnostima problema (Slika 4.1). U prvom slučaju, moguće rješenje se najčešće prikazuje kao niz bitova (binarni prikaz). Međutim, postoji čitav niz problema za koje je teško ili nemoguće primijeniti binarni prikaz (kao što je problem rasporeda). Zatim, uobičajeni genetički operatori mogu generisati značajan postotak nemogućih rješenja (na primjer, za problem najkraćeg puta) koji ne donose nikakva poboljšanja, već samo usporavaju algoritam. Pa se osim uobičajenog binarnog prikaza koriste razni drugi prikazi (matrice, nizovi realnih brojeva, itd.) i definišu se usko specijalizovani genetički operatori primjenjivi samo za određeni problem kako bi se izbjegla nemoguća rješenja. Ukoliko se odabere prilagođavanje algoritma problemu, potrebno je modifikovati njegov rad tako da rukuje sa veličinama svojstvenim određenom zadatku. Najčešće se tu radi o upotrebi ili definisanju drugačijih struktura podataka i operatora. Za veliki broj takvih slučajeva razvijeni su naročiti specijalizovani genetički algoritmi, koji se tada obično nazivaju evolucijskim programima i daju bolja rješenja i imaju veliku korisnost u području svoga djelovanja [34].



Slika 4.1: Dva pristupa rješavanju problema pomoću genetičkog algoritma

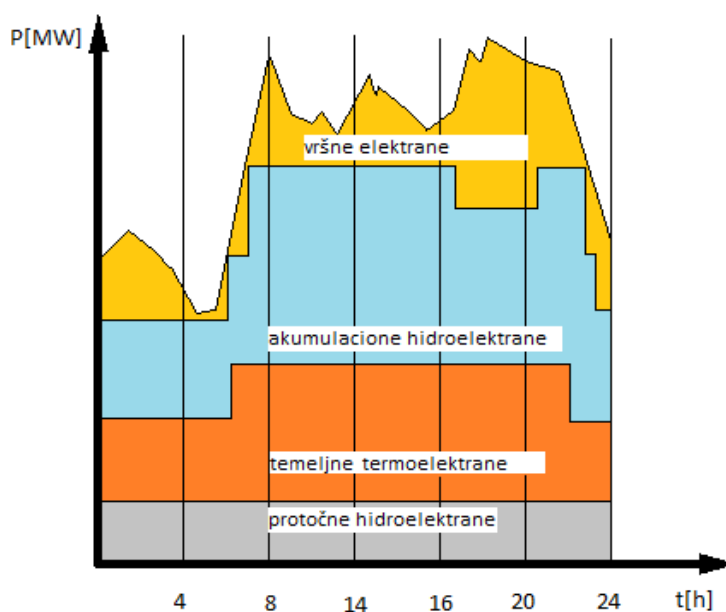
4.1.1 Klasična formulacija problema optimalnog angažovanja agregata

Optimalno angažovanje agregata podrazumijeva izbor najpovoljnijeg rješenja pri angažovanju proizvodnih kapaciteta, kako bi se zadovoljile potrebe potrošača za sigurnim i kvalitetnim snabdijevanjem električnom energijom. Osnovne vrste izvora (konvencionalni izvori) električne energije su: hidroelektrane i termoelektrane. Može se reći da su hidroelektrane imale dominantnu ulogu u početnom stadijumu razvoja elektrifikacije u mnogim zemljama. Ovaj izvor energije obezbjeđuje oko šestinu svjetskih potreba u električnoj energiji (16,4%) i čine preko 71% električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora. Učešće termoelektrana (ugalj) u pokrivanju ukupnih svjetskih potreba za električnom energijom je oko 40% [35].

Potrošnja električne energije u toku dana je vrlo promjenljiva i kako bi se zadovoljio uslov optimizacije, elektrane iz elektroenergetskog sistema moraju da pokriju potrošnju uz minimalne proizvodne troškove. S obzirom na ulogu u elektroenergetskom sistemu, elektrane se mogu podijeliti na:

- temeljne ili bazne, koje su svojim pogonskim svojstvima prilagođene konstantnom opterećenju,
- vršne ili varijabilne, koje, s obzirom na pogonska svojstva mogu elastično pratiti promjene opterećenja, i brzo, bez velikih troškova, ulaziti u pogon i izlaziti iz pogona.

Polazni osnovi svakog elektroenergetskog bilansa su hronološki dijagrami opterećenja i njihove krive trajanja, zahtijevana pouzdanost, odnosno neophodna rezerva koja će obezbijediti željeni kvalitet rada sistema, kao i ostale tehničko - ekonomske pokazatelje proizvodnog podsistema. Poslije toga, na osnovu podataka o raspoloživosti proizvodnih agregata i mogućnosti proizvodnje raspoloživih izvora električne energije, pristupa se popunjavanju površine ispod predmetnog dijagrama opterećenja (ili krive trajanja). Kada u EES-u stoji na raspolaganju više različitih tipova izvora, popunjavanje površine ispod krive trajanja, podliježe nekim pravilima koja se odnose na redosljed angažovanja moguće proizvodnje pojedinih izvora [36]. Ukoliko se posmatra sistem koji raspolaže sa gore pomenutim osnovnim izvorima električne energije, uslov optimizacije pogona se može zadovoljiti ukoliko se najprije iskoristi sva raspoloživa energija protočnih hidroelektrana koja je na dnevnom dijagramu opterećenja približno konstantna. Protočne hidroelektrane se moraju koristiti prema režimu vode u vodotoku, jer bi u protivnom dolazilo do gubitka moguće proizvodnje prelivanjem vode preko brane, pa se uvijek nastoji iskoristiti sva raspoloživa energija protočnih hidroelektrana. Nakon toga, dijagram proizvodnje se popunjava baznom energijom termoelektrana, i to najprije sa energijom elektrana koje imaju nižu proizvodnu cijenu, a zatim ako je potrebno i sa energijom skupljih elektrana. Varijabilni dio opterećenja, koji je karakterističan po čestim promjenama potrošnje, popunjava se sa elektranama koje mogu da rade sa promjenljivim opterećenjem. Takav režim rada uglavnom prate akumulacione hidroelektrane (shodno raspoloživim ili predviđenim količinama vode koje se mogu angažovati iz akumulacija, prema generalnoj politici punjenja i pražnjenja akumulacionih bazena) sa velikom raspoloživom snagom i pogodnim regulatorima frekvencije, koje bez štetnih posljedica mogu po potrebi raditi časa sa maksimalnim čas sa minimalnim opterećenjem, u zavisnosti od zahtjeva potrošača. Takve elektrane se nazivaju vršnim elektranama, i kao takve preuzimaju ulogu u regulaciji frekvencije (Slika 4.2).



Slika 4.2: Popunjavanje dnevnog dijagrama opterećenja

U slučaju priključenja drugih izvora na sistem, kao što su male hidroelektrane, vjetroelektrane, solarne elektrane i drugi nekonvencionalni izvori, preporučuje se da isti popunjavaju bazni dio dnevnog dijagrama potrošnje, kako bi se spriječio gubitak potencijalne električne energije. Pri tome, preostali dio dijagrama pokrivaju termoelektrane i akumulacione hidroelektrane. Graničnu liniju između termoelektrana i akumulacionih hidroelektrana treba izabrati tako da se iskoristi sva raspoloživa voda. Krajnji rezultat ovog postupka je dnevni plan angažovanja i proizvodnje generatorskih agregata, uvoza/izvoza i redukcija potrošnje. Međutim, osim domaćih izvora, ključnu ulogu u formiranju dnevnog dijagrama, ima i prisustvo tržišta električne energije, gdje je cijena električne energije iz uvoza konkurentna cijeni proizvodnje iz domaćih resursa. Tržište je mehanizam koji omogućava kupcima i prodavcima da se u međusobnoj interakciji dogovore o određenoj transakciji. Kada se govori o tržištu električne energije u Crnoj Gori, ono formalno postoji, ali je, zbog nedostatka konkurencije i niske potrošnje električne energije, trenutno neoperativno. Za sada trgovinom (uvoz/izvoz) upravlja Elektroprivreda Crne Gore prisustvom na mađarskoj berzi HUPX.

4.1.2 Postavka genetičkog algoritma

Osnovni cilj ovog rada jeste da se riješi problem minimizacije troškova angažovanja agregata u elektroenergetskom sistemu gdje poseban izazov predstavlja varirajuća priroda proizvodnje vjetroelektrana. Potrebno je obezbijediti izlaznu snagu svake elektrane u satnoj rezoluciji pri čemu će troškovi proizvodnje biti najmanji mogući uz zadovoljenje sigurnog snabdijevanja konzuma. U proračun treba uzeti u obzir i mogućnost uvoza električne energije ukoliko bi ono uticalo na smanjenje troškova napajanja.

Za rješavanje definisanog problema, predložen je alat genetički algoritam. U odnosu na ostale metode za rješavanje složenih problema, genetički algoritam ima određene prednosti, a to su:

- može rješavati proizvoljne optimizacione probleme, kako jednostavne tako i složene probleme nezavisno od vrste informacije;
- mogućnost podešavanja veličine populacije, broj iteracija i koeficijente ukrštanja i mutacije;
- procesom selekcije vrši se eliminacija slabije prilagođenih jedinki, pri čemu se reguliše veličina populacije (reprodukcija);
- postupak rješavanja se može proizvoljno ponavljati pri čemu se povećava pouzdanost rezultata;
- ima sposobnost određivanja globalnog optimuma u prostoru sa više lokalnih ekstremuma, ukoliko ne nađe globalni optimum, daje vrlo dobro približno rješenje – moguć uvid u skup rješenja;
- ima mogućnost nadogradnje i povećanje efikasnosti;
- jednostavna implementacija.

Osnovna konstrukcija genetičkog algoritma je populacija jedinki, koja se zadaje na samom početku i svaka od tih jedinki predstavlja potencijalno rješenje. Genetički algoritam će selekcijom jedinki regulisati veličinu populacije. U genetičkom algoritmu ključ selekcije je funkcija cilja koja, na odgovarajući način, predstavlja problem koji se rješava. Selekcijom se odaberu dobre jedinke (dok loš genetički materijal odumire), a ukrštanjem dobrog genetičkog materijala stvaraju se nove jedinke (nova populacija). Takav ciklus selekcije i reprodukcije genetičkog materijala jedinki, ponavlja se kroz generacije sve dok nije zadovoljen uslov zaustavljanja procesa.

Za implementaciju genetičkog algoritma u ovom radu poslužiće Genetic Algorithm-Optimization Tool iz Matlab-a. Primjena genetičkog algoritma za rješavanje problema optimizacije u Matlab-u objašnjeno je kroz sljedeće korake:

Korak 1: *Funkcija cilja:* Genetički algoritmi zahtijevaju neku mjeru kvaliteta, tj. ispravnosti predloženog rješenja. Ovu mjeru daje funkcija cilja, odnosno funkcija prilagođenosti (funkcija ocjene kvaliteta). Prilikom pokretanja genetičkog algoritma u Matlab-u neophodno je prvo definisati vrijednost funkcije i sačuvati je u m.fajlu pod nazivom po želji. Vrijednost funkcije cilja predstavlja osnovnu komponentu genetičkog algoritma jer se na osnovu nje vrši evaluacija kvaliteta jedinke za sljedeću generaciju ili se stvaraju nove jedinke sa boljim ocjenama.

Korak 2: *Izbor početne populacije i generacije:* Prvi korak u izvođenju genetičkog algoritma je inicijalizacija populacije jedinki (*eng. initial population*) koja predstavlja prvu generaciju. Populacija, koja predstavlja prostor pretraživanja, sastoji se od slučajno izabranih hromozoma. Jedan od glavnih parametara je i veličina populacije, koja može da bude *default*-na ili da se unese konstantan cijeli broj (N). Ukoliko se koristi binarno kodiranje svaki bit postavlja se na nulu (0) ili jedinicu (1) sa vjerovatnoćom od 50%. Svaka varijanta hromozoma se može desiti sa vjerovatnoćom $1/(2^L)$ gdje je L dužina hromozoma.

Korak 3: *Evolucija:* Genetički algoritam je heuristička metoda optimizacije koja imitira prirodni evolucijski proces. Evolucija je robustan proces pretraživanja prostora rješenja i ono se može poistovjetiti sa prilagođavanjem živih bića u životnoj sredini. Pa se za evoluciju u genetičkom algoritmu može reći da je to prilagođavanje postojeće populacije na nove uslove. Populacija evoluira kroz generacije tako da se nad jedinkama primjenjuju genetički operatori sve dok se ne zadovolji postavljeni uslov završetka evolucijskog procesa. Tri osnovna genetička operatora su: selekcija, rekombinacija (ukrštanje) i mutacija.

Korak 4: *Skaliranje:* Skaliranje funkcije podrazumijeva način računanja funkcije cilja. Načini računanja vrijednosti funkcije cilja koji se najčešće koriste su: direktno preuzimanje, linearno skaliranje, skaliranje u jedinični interval i sigma odsijecanje. Kod direktnog preuzimanja se za vrijednost funkcije prilagođenosti neke jedinke uzima njena vrijednost funkcije cilja:

$$P(i) = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{\mu} f_j} \quad (4.1)$$

gdje je:

- $P(i)$ - vjerovatnoća izbora jedinke,
- μ - ukupan broj jedinki,
- f_i - prilagođenost posmatrane jedinke.

Kod linearnog skaliranja prilagođenost neke jedinke se računa kao linearna funkcija vrijednosti funkcije cilja te jedinke.

$$P_{lin}(i) = \frac{(2-s)}{\mu} + \frac{2i(s-1)}{\mu(\mu-1)} \quad (4.2)$$

Funkcija prilagođenosti uzima vrijednosti iz intervala $[0, 1]$ kada je u pitanju skaliranje u jedinični interval, dok se za sigma odsijecanje određuje pomoću srednje vrijednosti funkcije prilagođenosti \bar{f} i standardne devijacije σ :

$$f'(\bar{x}) = \max(f(x) - (\bar{f} - c \cdot \sigma_f), 0) \quad (4.3)$$

Ovim pristupom može da se riješi pojava preuranjene konvergencije. Izbor načina računanja funkcije prilagođenosti zavisi od konkretnog problema, a često se dešava da se kombinuju različiti načini. Vrijednost funkcije određuje reproduktivnu šansu pojedine jedinke. Prilikom selekcije ova vrijednost daje putokaz algoritmu od kojih hromozoma da vrši izbor iz populacije. Vjerovatnoća selekcije jedinki zavisi od njihove funkcije prilagođenosti.

Korak 5: *Genetička operacija – Selekcija:* Zadatak operatora selekcije je da izvrši odabir jedinki koje će učestvovati u postupku stvaranja nove generacije. Selekcija se najčešće vrši na osnovu prilagođenosti hromozoma. Na ovaj način se biraju hromozomi čijim će kombinovanjem nastati najbolji potomci.

Korak 6: *Genetička operacija – Reprodukcija:* Osnov za novu generaciju daje populacija potomaka. Nova populacija se stvara sa korakom reprodukcije na osnovu novih jedinki i stare generacije pri čemu će svi roditelji biti izgubljeni i ostaće samo potomci.

Korak 7: *Genetička operacija – Ukrštanje:* Ukrštanje (rekombinacija) se primjenjuje nad jedinkama koje se nazivaju roditelji pri čemu nastaje jedna ili dvije nove jedinke koje se nazivaju potomci. Najbitnija osobina ukrštanja je da potomci nasljeđuju osobine svojih roditelja.

Korak 8: *Genetička operacija – Mutacija:* Operacija mutacije radi tako što se jedan postojeći hromozom promijeni u maloj mjeri. Uloga mutacije je u obnavljanju izgubljenog genetskog materijala. U zavisnosti od odabranog tipa mutacije, podešava se nivo mutacije p_m koji predstavlja vjerovatnoću kojom se svaki bit mutira.

Korak 9: *Zaustavljanje:* Završetkom rada algoritma upravlja izlazna funkcija, koja o završetku odlučuje na osnovu različitih kriterijuma. Kriterijumi zaustavljanja koji se najčešće primjenjuju su:

- dostignuti maksimalni broj generacija,
- sličnost jedinki u populaciji,
- ponavljanje najbolje jedinke određeni (maksimalni) broj puta,
- dostignuto optimalno rješenje ako je ono unaprijed poznato,
- dokazana optimalnost najbolje jedinke (ukoliko je to moguće),
- ograničavanje vremena izvršavanja genetičkog algoritma,
- prekid od strane korisnika.

Kada se ispuni neki od gore pomenutih uslova zaustavljanja, algoritam se završava. U praksi se najbolje pokazalo kombinovanje ovih kriterijuma zaustavljanja jer svaki od njih ima dobre i loše strane. Na taj način se smanjuje mogućnost loše procjene prekida genetičkog algoritma.

4.1.3 Postavka optimizacionog problema za primjer crnogorskog EES

Za rješavanje problema optimizacije pogona, najprije je potrebno analizirati instalisane proizvodne kapacitete u sistemu za koji se radi proračun. Algoritam mora obuhvatiti tehničke karakteristike i mogućnosti elektrana kako bi se zadovoljio uslov sigurnog snabdijevanja potrošača.

Proizvodnja električne energije u elektroenergetskom sistemu Crne Gore obavlja se iz termoelektrane Pljevlja sa instalisanom snagom od 218,5 MW, hidroelektrane Perućica sa instalisanom snagom od 307 MW (5×40 MVA, 2×65 MVA), hidroelektrane Piva sa instalisanom snagom od 342 MW (3×114 MW) i vjetroelektrane Krnovo 72 MW ($26 \times 2,75$ MW). Dio konzuma pokriva se uvozom električne energije iz susjednih regulacionih oblasti, dok se manji dio proizvodnje obezbjeđuje se iz malih hidroelektrana, koje su u ovom slučaju zanemarljive. Takođe, od početka 2019. godine u pogon prizvodnje učestvuje i vjetroelektrana Možura sa instalisanom snagom od 46 MW, koja u značajnoj mjeri utiče na stabilnost sistema. Uslov za sigurno i pouzdano snabdijevanje električnom energijom je i obezbjeđivanje jednog dijela instalisanih kapaciteta za potrebe primarne, sekundarne i tercijarne rezerve. Sve hidrogeneratorske (čiji je instalisani kapacitet ≥ 10 MW) i turbogeneratorske (čiji je instalisani kapacitet ≥ 30 MW) jedinice moraju biti osposobljene za učešće u primarnoj regulaciji, odnosno moraju biti opremljene turbinskim regulatorima koji imaju mogućnost automatske regulacije brzine obrtanja. Ovo je preduslov za priključenje na prenosni sistem. Ostale hidrogeneratorske i turbogeneratorske jedinice su obavezne da aktiviraju automatski regulator brzine obrtanja samo u slučaju zahtjeva operatora prenosnog sistema. Proizvodne jedinice mogu biti opremljene turbinskim regulatorima kojima se omogućuje pružanje usluge automatske sekundarne regulacije frekvencije i snage razmjene - sekundarna regulacija. Hidrogeneratorske jedinice opremljene za pružanje usluge sekundarne regulacije moraju obezbjediti regulacioni opseg od minimalno 30% P_{nom} . Turbogeneratorske jedinice opremljene za pružanje usluge sekundarne regulacije moraju obezbjediti:

- proizvodne jedinice koje kao primarno gorivo koriste ugalj: minimalni regulacioni opseg 15% P_{nom} ,
- proizvodne jedinice koje kao primarno gorivo koriste gas ili mazut: minimalni regulacioni opseg 25% P_{nom} .

Pri radu u interkonekciji operator prenosnog sistema primjenjuje odredbe pravila ENTSO-e u pogledu sekundarne regulacije. U skladu sa pravilima ENTSO-e, kada elektroenergetski sistem Crne Gore radi u interkonekciji, minimalni preporučeni iznos sekundarne rezerve koja se zahtijeva od EES-a Crne Gore, kako bi se regulisale promjene opterećenja, iznosi:

$$R = \sqrt{a \cdot L_{max} + b^2} - b \quad (4.4)$$

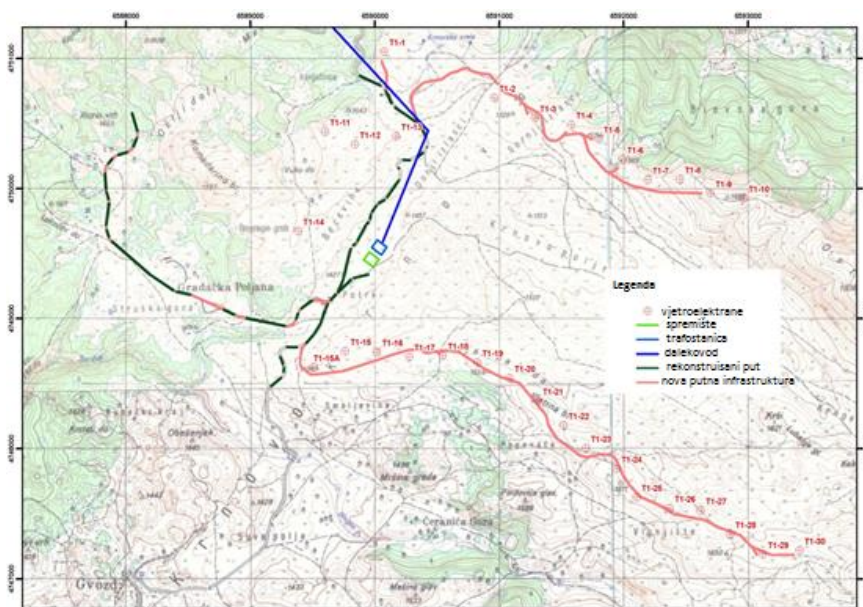
gdje su:

- R – preporučeni minimalni iznos rezerve,
- L_{max} – maksimalno opterećenje u jednom satu,
- a i b – empirijske konstante ($a=10$; $b=150$).

Prema formuli (4.4) preporučeni minimalni iznos sekundarne rezerve R , u elektroenergetskom sistemu Crne Gore iznosi ± 20 MW. Sve proizvodne jedinice koje imaju tehničke mogućnosti za brzo startovanje (maksimalno 15 minuta) moraju staviti na raspolaganje tercijarnu regulacijsku snagu u slučaju zahtjeva operatora prenosnog sistema. Tercijarna regulacija koristi tercijarnu rezervu koju obično ručno aktivira po nalogu operatora prenosnog sistema u slučaju

da neprekidno djeluje sekundarna regulacija ili ako se očekuje njeno neprekidno dejstvo. Ona se prvenstveno koristi radi oslobađanja rezervi sekundarne rezerve tokom uravnoteženog rada sistema, ali se aktivira i kao dodatak rezervi sekundarne regulacije nakon većih poremećaja kako bi se ponovo uspostavila sistemska frekvencija, i time oslobodila primarna rezerva aktivirana širom sistema [37]. Iz tog razloga potrebno je odraditi analizu kako će novi proizvodni objekti, tj. vjetroelektrane, uticati na elektroenergetski sistem u ekonomskom i tehničkom smislu. Jedan od načina za procjenu optimalnog pogona elektroenergetskog sistema, uključujući vjetroelektrane, je prethodno opisani genetički algoritam.

Energija vjetra je danas dokazani izvor električne energije, koja u određenim vjetrovitim mjestima može biti ekonomski konkurentna konvencionalnim izvorima električne energije. Najatraktivnije lokacije za iskorišćavanje energetske potencijala u Crnoj Gori su priobalni pojas i brda oko Nikšića sa izgrađenom putnom i mrežnom infrastrukturom, gdje prosječna brzina vjetra u toku godine iznosi preko 5 m/s. Trenutno su na području Krnova instalisana 26 vjetroegregata sa ukupnom instalisanom snagom od 72 MW i prosječnom godišnjom proizvodnjom od 200 – 230 GWh. Osim vjetrogeneratora, mreža elektroenergetskog sistema pojačana je sa trafostanicama TS Krnovo (110/33 kV) i TS Brezna (110/35 kV). Trafostanice su međusobno povezane dalekovodom 2×110 kV dužine od 19,9 km, kao i dalekovodom između TS Brezna i TS Kličevo 1×110 kV dužine 31,4 km. Trafostanica Brezna je izgrađena sa mogućnošću naknadnog povećanja do 400 kV sa ciljem uklapanja u predloženi koridor dalekovoda od 400 kV koji će povezati Crnu Goru sa drugim evropskim državama (Slika 4.3).



Slika 4.3: Lokacija vjetroparka sa priključenim energetske objektima

Kao jedna od potencijalno atraktivnih lokacija za iskorišćavanje energetske potencijala vjetra u Crnoj Gori, ističe se priobalni pojas u okolini grada Ulcinja. Ovu oblast karakteriše prosječna vrijednost brzine vjetra od oko 6 m/s, sa energetske potencijalom vjetra koja dostiže vrijednosti od preko 400 W/m^2 i uz relativno dobru razvijenost, prije svega prenosne i putne mreže [6]. Lokacija Možura nalazi se u južnom, primorskom dijelu Crne Gore. Udaljena je oko 5 km sjeverozapadno od Ulcinja, čijoj opštini i pripada. Visina terena varira od 400 do 600 m nadmorske visine (Slika 4.4).



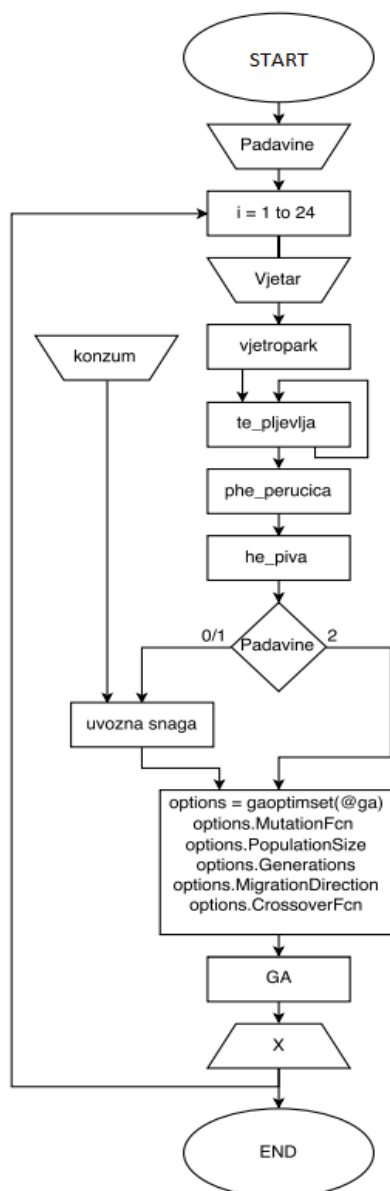
Slika 4.4: Prikaz geografske lokacije vjetroparka Možura i okoline

Geografski položaj VE Možura je takav da trasa postojećeg 110 kV dalekovoda Bar – Ulcinj prolazi neposredno pored lokacije priključne transformatorske stanice Možura. Trenutno, u neposrednoj blizini same lokacije vjetroelektrane nalaze se postojeći 110 kV dalekovod TS Bar – TS Ulcinj, kao i TS 110/35 kV Ulcinj. Vjetroelektrana Možura se sastoji od 23 vjetrogeneratorskih jedinica opremljenih asinhronim dvostruko napajanim generatorima sa kliznokolutnim rotorom pojedinačne nominalne snage 2000 kW / 2100 kVA ($\cos\phi=0.95$), što ukupno iznosi 46 MW instalisane aktivne snage. Vjetrogeneratori VE Možura su na 110 kV sabirnice priključno-razvodnog postrojenja priključene preko transformatora 110/30 kV instalisane snage 50 MVA [38].

Ukoliko se ispune uslovi optimizacije, osim opisanih instalisanih proizvodnih kapaciteta, u algoritamski proračun će se uvrstiti i uvezena energija iz susjednih kontrolnih oblasti po tržišnoj cijeni. Rezultati ovog proračuna prikazani su u sljedećim poglavljima.

4.2 Opis optimizacionog algoritma predloženog radom

Tehnika predstavljena radom radiće na optimizaciji pogona elektroenergetskog sistema Crne Gore sa realnim podacima pomoću programskog alata Matlab. Algoritam daje rezultate optimalnog angažovanja agregata za jedan dan (24 časa) u rezoluciji od jednog sata. Rješenju se pristupa pomoću algoritma kojeg čine 9 m-fajlova, 3 excel fajla i jedan podatak kao indikator koji se unosi ručno pri pokretanju programa. Struktura algoritma predstavljena je na Slici 4.5.



Slika 4.5: Blok šema

Sa Slike 4.5 se može vidjeti da su ulazni podaci:

1. padavine (*Padavine*) - indikator, unosi se ručno;
2. brzina vjetra (*Vjetar*) - excel tabela;
3. konzum (*konz*) - excel tabela;
4. snaga termoelektrane u prethodnom satu (*te_pljevlja*) - prethodni sat se unosi ručno;
5. cijena uvoza električne energije (*uvozna snaga*) - excel tabela.

Ideja optimizacije realizuje se kroz tri scenarija, stoga *padavine* odražavaju stanje vremenskih uslova generalno i predstavljaju ulazni podatak u obliku indikatora: 0- izrazito sušni period, 1- umjereno sušni period i 2- period velikih padavina, koji se unose ručno pri pokretanju programa. U cilju unaprijeđenja algoritma, postoji mogućnost direktnog povezivanja ulaznih indikatora sa *real time* podacima o prognozi vremenskih uslova i na taj način omogućiti osvježavanje voznog reda tako da obezbjeđuje optimalno angažovanje agregata na nivou dana sa minimalnim uticajem pogrešne procjene vremenskih prilika.

Informacija o brzini vjetra je prognoza brzine vjetra za dan unaprijed i nalazi se u tabelarnoj formi u excel fajlu koji je sačuvan u folderu pod nazivom *vjetar*. Po potrebi ovi podaci se mogu ažurirati ručno.

Podaci o planiranoj potrošnji električne energije – konzum, su stvarni podaci planirani za dan unaprijed, koji su preuzeti iz Nacionalnog dispečerkog centra (NDC – CGES). Takođe, ovi podaci su sačuvani u tabelarnoj formi kao excel fajl pod nazivom *konz* i mogu se ažurirati ručno, po potrebi.

Snaga termoelektrane u prethodnom satu je plan proizvodnje termoelektrane u prethodnom satu, podatak koji se unosi ručno pri pokretanju programa i dovoljno je unijeti samo jednom, jer za svaki naredni sat program pamti vrijednost iz prethodnog sata (koju je sam proračunao). Zbog energije kojom Elektroprivreda Crne Gore se pojavljuje na referentnoj HUPX (Hungarian Power Exchange) berzi, cijena uvoza električne energije je preuzeta sa zvanične internet stranice mađarske berze električne energije - HUPX. Ovo je takođe podatak koji je u folderu sačuvan u tabelarnoj formi u excel fajlu pod imenom *MC_results05-12-2017*, može se dinamički osvježavati u slučaju potrebe i kao takav se poziva u glavnom kodu.

Prethodno opisani parametri predstavljaju sve ulazne podatke koji utiču na optimalno upravljanje, odnosno angažovanje generatorskih jedinica za snabdijevanje konzuma i oni se najčešće nalaze u tabelarnoj formi u formi excel fajla, a neki se unose ručno.

Funkcionisanje programa realizovano je kroz 9 m-fajlova, a to su:

1. *phe_perucica*,
2. *he_piva*,
3. *te_pljevlja*,
4. *vjetropark*,
5. *uvozna_snaga*,
6. *constraintfile*,
7. *fitness_function*,
8. *grafici*,
9. *GA*.

Proizvodnje jedinice sa svojim karakteristikama su definisane u m-fajlovima: *phe_perucica*, *he_piva*, *te_pljevlja* i *vjetropark*.

phe_perucica

Hidroelektrana Perućica je većim djelom protočna hidroelektrana (75% godišnje proizvodnje), a manjim dijelom akumulaciona elektrana i praksa je pokazala da prilikom velikih padavina ova hidroelektrana radi u punom kapacitetu (307 MW), isto važi i u slučajevima kada su dotoci veliki [39]. U ovom m-fajlu definisan je opseg rada hidroelektrane, dakle minimalna (15 MW) i maksimalna snaga (307 MW) i algoritam je angažuje u zavisnosti od ulaznog indikatora (0,1 ili 2). Dakle, u samom m-fajlu definisano je, ukoliko se odabere indikator *0- izrazito sušni period*, algoritam je ne uzima u proračun i dodjeljuje joj vrijednost 0.

he_piva

Hidroelektrana Piva je akumulaciona hidroelektrana koja posjeduje 3 generatora (3×114 MW) i u cilju ekonomičnijeg upravljanja ova hidroelektrana se angažuje u slučaju velikih suša (početni ulazni indikator 0), što je definisano i u samom m-fajlu, a u slučaju velikih dotoka ona

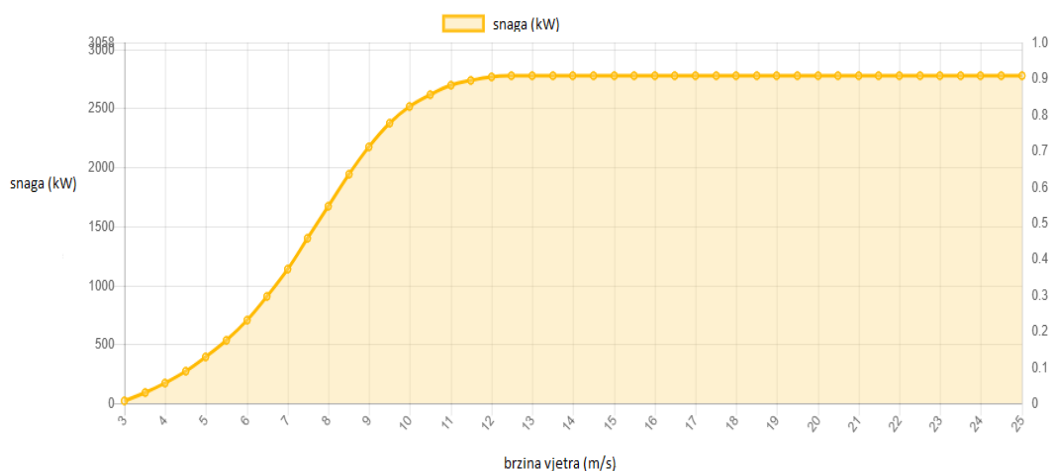
se isključuje sa mreže (početni ulazni indikator je 2). Međutim, kako je minimalna snaga jednog generatora 70 MW, a sa druge strane, praksa je pokazala, da je za potrebe podmirivanja konzuma potrebno manje od donje granice proizvodnje jednog generatora i tada se pribjegava uvozu. Nekada je ekonomski isplativije uvoziti električnu energiju iz susjednih sistema od angažovanja mašina iz domaćih izvora. Ova ideja je implementirana u glavnom kodu (GA m-fajl). Za potrebe rezultata u glavnom kodu, ovdje su dodijeljene vrijednosti maksimalne i minimalne snage proizvodnje po generatorima.

te_pljevlja

Termoelektrana Pljevlja je jedina termoelektrana u sistemu Crne Gore i posjeduje jedan generator (210 MW). U cilju optimalnog vođenja sistema termoelektrana se planira sa konstantnom snagom osim u slučajevima remonta i neplaniranih ispada elektrane sa mreže. Iz tog razloga algoritam uzima u obzir plan rada termoelektrane u prethodnom satu, a to je ulazni podatak koji se unosi ručno pri pokretanju algoritma. Ovaj podatak unosi se samo jednom, algoritam ga pamti, i na osnovu njega se proračunava plan rada termoelektrane za naredna 24 sata. Svaku proračunatu vrijednost u određenom satu, algoritam pamti i na osnovu nje proračunava vrijednost u svakom narednom satu. U ovom m-fajlu definisana je dozvoljena minimalna i maksimalna snaga generatora i mogućnost variranja plana proizvodnje termoelektrane iz sata u sat u opsegu od $\pm 10\%$ od instalisane snage termoelektrane.

vjetropark

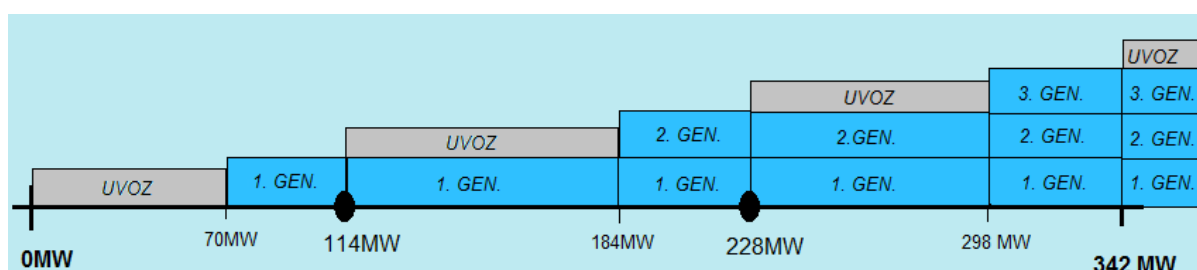
Za proračun plana proizvodnje vjetroelektrane koristi se prognoza brzine vjetra kao ulazni podatak (excel fajl - *vjetar*). To je zvanični podatak koji je preuzet iz Nacionalnog dispečerskog centra (NDC - CGES). Proračun se vrši na osnovu predefinisane krive snage generatora, potom se množi sa 26 (broj generatorskih jedinica u vjetroparku). U m-fajlu *vjetropark*, prvenstveno se podaci za brzinu vjetra zaokružuju na cjelobrojnu vrijednost, i onda se postavlja uslov, ukoliko je brzina vjetra ispod 3m/s, a veća od 12m/s proizvodnja vjetrogeneratora je konstantna, međutim za brzine vjetra između 3-12m/s izdvojeno je 10 slučajeva (brzina vjetra od 3m/s do 11m/s), snaga krive je podijeljena na 10 djelova i za svaki od njih definisana izlazna snaga vjetrogeneratora koja se množi sa 26 i dobije se ukupna izlazna snaga za vjetroelektranu koja predstavlja optimalan plan proizvodnje (Slika 4.6).



Slika 4.6: Kriva vjetroelektrane

uvozna_snaga

Komponenta koja utiče na optimalno angažovanje agregata je i energija iz uvoza. U praksi se pokazalo da je ponekad finansijski isplativije kupiti energiju iz uvoza nego stavljati u pogon mašine iz domaćih izvora. Iz tog razloga i ova energija mora ući u proračun optimalnog angažovanja. Ideja koja je predstavljena u algoritmu je da se uvozu pribjegava u slučajevima velikih suša kada hidroelektrana Perućica ima slabe dotoke i nivo akumulacije u hidroelektrani Piva je jako nizak. Kako se ne bi dodatno trošile rezerve iz jezera, nabavlja se energija iz uvoza po tržišnim cijenama. Dakle, početni uslovi u ovom m-fajlu su da nema uvoza (energija iz uvoza jednaka je nuli) i da hidroelektrana Piva radi sa jednim generatorom u opsegu od 70 do 114 MW (70 MW je tehnički minimum generatora u hidroelektrani Piva). Dalje, postavlja se uslov, ukoliko je potrebna energija za pokrivanje konzuma u rasponu od 0 do 70 MW, energija se uvozi i mašine se ne angažuju, u slučaju da je potrebna energija u rasponu od 70 do 114 MW, uvozu se dodjeljuje vrijednost nula i angažuje se prvi generator iz hidroelektrane. Ako je potrebna energija u rasponu od 114 MW do 184 MW neće se angažovati drugi generator, već će se ove potrebe podmiriti pomoću prvog generatora (koji je već na mreži) i električnom energijom iz uvoza (razlika između ukupne potrebne i maksimalne snage generatora). Za opseg od 184 do 228 MW optimalno je da se angažuju oba generatora, dok se za opseg od 228 MW do 298 MW već angažovana dva generatora ostaju na mreži i razlika se dopunjuje iz uvoza. Po ovom principu sva tri generatora se angažuju tek za potrebe snage od 298 MW do 342 MW, koliko iznosi maksimalna snaga cijele elektrane, a za veće potrebe pored ovih generatora dodaje se još energija iz uvoza što je grafički objašnjeno na Slici 4.7. Cijene koje su primjenjene u kodu su zvanične cijene sa mađarske berze za električnu energiju (HUPX) po kojima Elektroprivreda Crne Gore nabavlja električnu energiju iz uvoza.



Slika 4.7: Kombinacija angažovanja generatora HE Piva sa energijom iz uvoza u cilju optimalnog rada sistema

constraintfile

U ovom m-fajlu definisan je uslov da vrijednost ulaznog parametra *konzum* mora biti u potpunosti zadovoljen proizvodnjom iz elektrana ili uvoza. Dakle, u ovom slučaju ne može se desiti da elektrane (zajedno sa električnom energijom iz uvoza) u ukupnoj sumi proizvode više ili manje od postavljene vrijednosti konzuma. Ovdje je definisana globalna funkcija *potraznja* koja će se pozvati i u glavnom algoritmu.

fitness_function

Ovaj fajl predstavlja osnovu algoritma, odnosno u njemu se definišu prioriteti angažovanja elektrana, i na osnovu toga kako je definisana ciljna funkcija tako će algoritam davati rezultate. Kada se govori o prioritetima angažovanja elektrana u elektroenergetskom sistemu Crne Gore, vjetroelektrane i termoelektrane uvijek imaju prioritete, bez obzira na cijenu proizvodnje, dok rad hidroelektrana zavisi od vremenskih prilika i to se uzima u obzir u ovom fajlu. Najprije su

definisane globalne funkcije *termosat*, *padavine*, *cijena_const*, koje se pozivaju u glavnom algoritmu i u algoritmu za ispisivanje grafika. Ovdje su postavljena dva slučaja, odnosno načina po kojima se angažuju elektrane, a sama ideja postavljanja prioriteta zasnovana je više na iskustvu i pravilima funkcionisanja operatora sistema nego na čistim troškovima angažovanja. Koji od ova dva slučaja će se primijeniti u algoritmu zavisi od postavljenog ulaznog indikatora *padavine*. Dakle, postoje dvije mogućnosti u zavisnosti od odabranog indikatora, ako se na početku odabere indikator za padavine 0 (velike suše) prioritet ima hidroelektrana sa akumulacijom u kombinaciji sa energijom iz uvoza, dok u slučaju indikatora 1 ili 2 (umjerene ili obilne kiše) prioritet svakako ima protočna hidroelektrana. Za dobijanje optimalnog rješenja koristi se princip težinskih faktora. Težinski faktori (koeficijenti) su varijable kojima se opterećuje ulazna vrijednost, pri čemu se vrši postupak prioritizacije problema. Postoji veliki broj kriterijumskih metoda pomoću koji se vrši izbor težinskih koeficijenata, međutim složenost problema u ovom radu ne zahtijeva primjenu neke od ovih vrsta metoda, stoga se izbor vrijednosti težinskih koeficijenata izvršio proizvoljno. Funkcija prilagođenosti predstavlja tekući kriterijum za izbor težinskih koeficijenata, a u samom kodu genetičkog algoritma definisano je odstupanje težinskih koeficijenata od zadatih vrijednosti. Dakle, svakom definisanom "izvoru" električne energije pridružuje se vrijednost koja predstavlja težinski faktor. Genetički algoritam radi po principu da nalazi minimalnu vrijednost tako da što je težinski faktor manji to taj "izvor" ima veću prednost u proizvodnji. S obzirom da je opseg u okviru kojih se traži rješenje definisan za algoritam rada termoelektrane Pljevlja, hidroelektrane Piva i hidroelektrane Perućica, te će težinski koeficijenti imati uticaj na ova tri člana dok za vjetroelektrane i električnu energiju iz uvoza težinski koeficijenti ne utiču na prioritetnost jer u tom slučaju uzima se cjelokupna vrijednost. Vrijednosti odabranih težinskih koeficijenata oslanjaju se na okvirne cijene električne energije iz različitih izvora u skladu sa definisanim prioritetima.

GA

Najprije se definišu promjenljive *potraznja_dan* i *vjetar_dan* koje predstavljaju plan potrošnje (u MW) i planiranu brzinu vjetra (u m/s) respektivno, za dan unaprijed u satnoj rezoluciji. Ovi podaci se čitaju iz prethodno sačuvanih excel fajlova *konz* i *vjetar*. U sljedećim koracima definišu se ulazni parametri kao globalne promjenljive (indikator – 0,1,2 i snaga termoelektrane u prethodnom satu). U ovom fajlu se prvi put pominje matrica *p* dimenzija 5×24 , kojoj su ovdje dodijeljene vrijednosti 0, a ista matrica će se koristiti u m-fajlu *grafici*. Sada se pomoću prethodno definisane funkcije ograničenja – *constraintfile* vrši izjednačavanje između plana konzuma i proizvodnje iz svih elektrana/uvoza (ili sa vrlo malom greškom) jer to je jedan od uslova zadatka. Osnovna funkcija algoritma je funkcija cilja pomoću koje se traži optimalno rješenje. U okviru svog algoritma, funkcija cilja, sadrži težinske faktore koji su predstavljeni kao okvirne cijene električne energije po elektrani na osnovu kojih se određuje prioritet angažovanja elektrane i uvoza u zavisnosti od unesenog ulaznog indikatora *padavine*. U narednim koracima otvara se *for* petlja od 1 do dužine matrice (24) za svaki sat. Postavlja se standardna Matlab funkcija po kojoj se poziva genetički algoritam – *gaoptimset(@ga)*.

U ovom dijelu potrebno je definisati standardne parametre koje se tiču genetičkog algoritma u cilju dobijanja što boljih rezultata. Prije svega, početni broj populacije je podešavanje koje podržava unos proizvoljnog broja, međutim u cilju dobijanja kvalitetnijeg rješenja poželjno je odraditi ispitivanja sa više različitih podešavanja. Tako se u slučaju ove problematike pokazalo da postavljanje početnog broja populacije na 100 i broja generacija takođe na 100, daje najprihvatljivije rješenje, što je za ovaj zadatak sasvim dovoljno jer će rješenje konvergirati i prije 100. generacije.

Operatori selekcije i reprodukcije podešeni su na defaultnu vrijednost (*eng. Stochastic uniform*) pri čemu se prva jedinka odabere na osnovu slučajnog broja, a ostale u pravilnim jednakim razmacima. Jedna od najvažnijih funkcija, ukrštanje, odvija se nakon odabira jedinki pri čemu dolazi do razmjene genetičkog materijala po određenom pravilu i stvaranju novih jedinki. Postoji više različitih tipova ukrštanja od čega u ovom slučaju *heuristic* daje najbolje rješenje. Kod mutacije, ispostavilo se da najbolje rezultate daje opcija *Adaptfeasible* koja je definisana kao prilagodljiva mutacija i obično se primjenjuje ako su ograničenja definisana, što jeste slučaj u ovom zadatku. Kretanja jedinki ili migracija između pod-populacija, ima dva načina migriranja, naprijed i dvosmjerno. U ovom slučaju odabrana je opcija dvosmjerno (*eng. both*) pri čemu jedinke iz n -te pod-populacije migriraju u dva smjera i to prema $(n-1)$ -toj i $(n+1)$ -toj pod-populaciji. U ovom slučaju, to bi značilo da se svaka elektrana posmatra u oba smjera tj. broj MW koje daje elektrana može biti i veći i manji nego što je to u početnoj generaciji. Ispostavilo se da ova opcija daje bolje rješenje.

Promjenljivoj *potražnja* dodaje se vrijednost iz excel tabele *konz*, a navedene funkcije vraćaju vrijednosti koje određena elektrana može da daje, tj. opseg vrijednosti u kom će se tražiti rezultat za svaku elektranu ponaosob. Tako se prvo određuje proizvodnja vjetroelektrane, najprije se čita brzina vjetra iz excel fajla *vjetar*, zatim se ta vrijednost uvrštava u funkciju za određivanje proizvodnje iz vjetroelektrane. Dalje, slijede funkcije za određivanje proizvodnje iz termoelektrane i hidroelektrana koje rade na istom principu samo zavise od različitih ulaznih indikatora, dakle za termoelektranu treba primijeniti vrijednost *termosat* definisane na početku koda, a predstavlja plan proizvodnje u prethodnom satu, a za hidroelektrane potrebno je unijeti indikator o intenzitetu padavina. U nastavku koda, uzima se i opcija uvoza električne energije, za tu opciju postoji jasno definisan indikator i u tom slučaju čitaju se cijene uvoza električne energije iz sačuvanog excel fajla *MC_results05-12-2017*, preuzete sa zvanične internet stranice mađarske berze električne energije. Sve ovo radi se za isti sat i ($i= 1, 2, \dots, 24$). Ograničenja, odnosno opsezi u okviru kojih se traže rješenja, definisana su u prethodno pomenutim funkcijama. Kod ispisuje matricu dimenzija 1×24 za svaku elektranu/uvoz pojedinačno koja predstavlja traženi rezultat. Na kraju koda provjerava se suma proizvodnje/uvoza sa zadatim konzumom.

Pri pokretanju algoritma GA postavlja se upit trenutnog stanja kroz tri ponuđena indikatora (0,1,2). Primjer za indikator 0 – sušni period. Nakon pritiska tastera ENTER, postavlja se upit kolika je bila proizvodnja termoelektrane u prethodnom satu. Primjer za prethodni sat 210MW. Pozivajući se na prethodno definisanu funkciju cilja, otvara se *for* petlja koja optimizuje plan proizvodnje za svaki sat pojedinačno. U okviru genetičkog algoritma podešeni su parametri koji daju najbolja moguća rješenja. Iz sačuvane tabele *konz* genetički algoritam čita zadatu potrošnju za konkretan sat koja mora biti jednaka sumi proizvodnje/uvoza. U sljedećem koraku, definisano je kako optimalno angažovati elektrane. Za svaku elektranu definisane su minimalne i maksimalne vrijednosti u zavisnosti od ulaznih parametara. Minimalne i maksimalne vrijednosti za svaku elektranu predstavljaju donju i gornju granicu u okviru kojih se vrši odabir optimalnog rješenja (osim za vjetroelektrane i energiju iz uvoza gdje uzimamo punu vrijednost u zavisnosti od ulaznih parametara). Proračunata rješenja upisuju se u matricu i prelazi se na sljedeći sat.

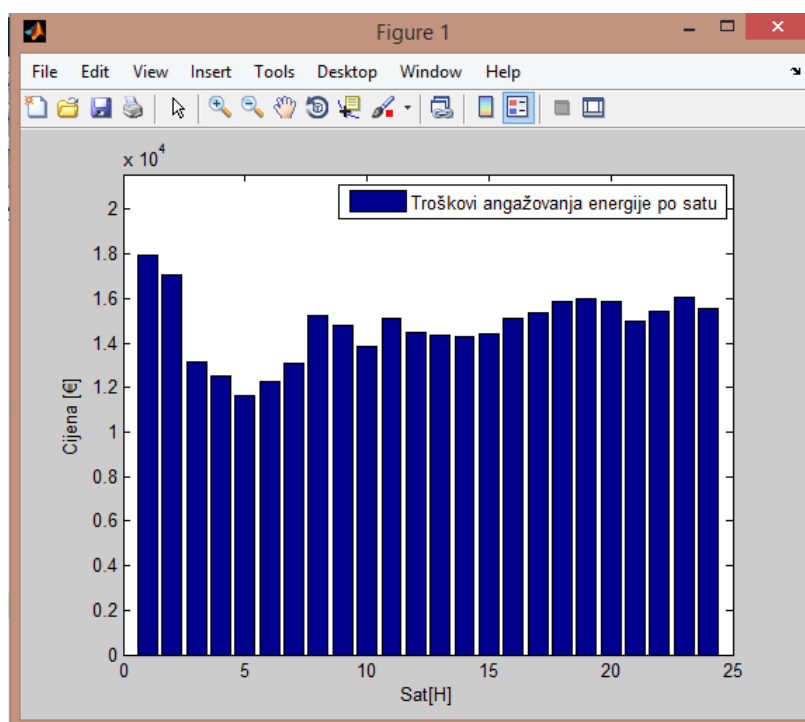
grafici

Kao krajni rezultat, algoritam prikazuje tri grafika:

1. troškovi angažovanja elektrana i uvoza,
2. optimalna proizvodnja elektrana i uvoza u MW u skladu sa rezultatima algoritma, po satu,

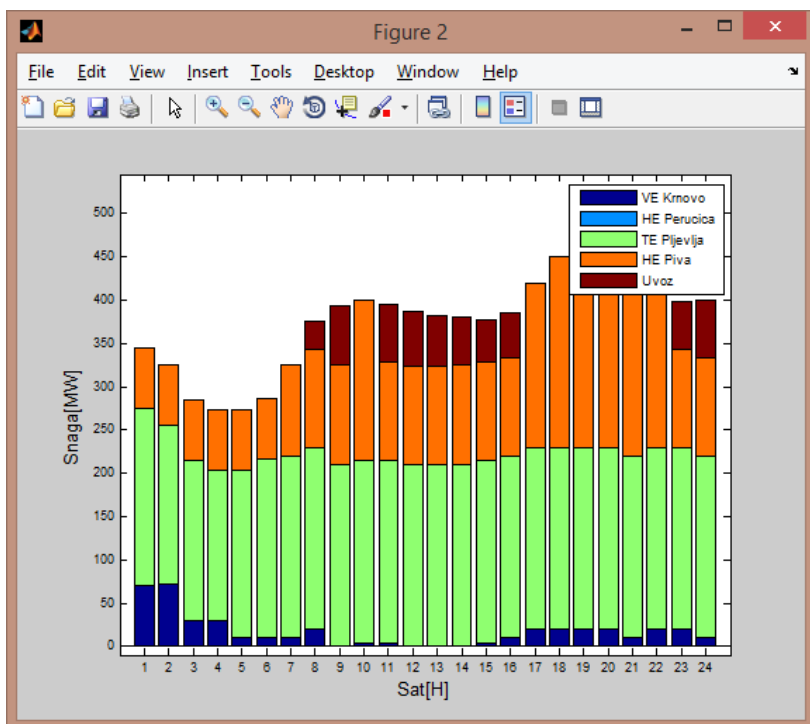
3. dijagram proizvodnje svake elektrane pojedinačno i uvoza za period od 24 sata, u satnoj rezoluciji.

Grafici predstavljaju grafički prikaz rezultata koji su dobijeni pokretanjem algoritma. Rješenja koja su dobijena pokretanjem algoritma čuvaju se kao promjenljiva *variable.mat* i ista se pozivaju u m-fajlu *grafici*. Najprije se vrši provjera da li je u svakom satu obezbijedena vrijednost zadata konzumom, tako što se učitava excel fajl *konz* koji predstavlja plan potrošnje za dan unaprijed. Nakon toga se na samom početku promjenljivoj *cijena* dodjeljuju vrijednosti 0, i otvara se for petlja od 1 do 24 (dužina *p*) kako bi se računala cijena za svaki sat (*p* je već definisano u fajlu *GA*). U okviru *for* petlje smještena je formula za izračunavanje cijene troškova pri čemu svaki član (ima ih 5) predstavlja troškove proizvodnje – vjetroelektrana, protočna hidroelektrana, termoelektrana, akumulaciona hidroelektrana i troškove uvoza električne energije respektivno. Cijene za proizvodnju definisane u formulaciji su zvanični podaci obezbijedeni iz EPCG, dok se cijene uvoza učitavaju iz sačuvanog excel fajla *MC_results05-12-2017*. Nakon završetka *for* petlje (od 1 h do 24 h) crta se prvi grafik koji predstavlja grafički prikaz troškova angažovanja elektrana i uvoza električne energije u satnoj rezoluciji (Slika 4.8). Troškovi predstavljaju sumu troškova proizvodnje svih elektrana zajedno (sa uvozom), a troškovi proizvodnje jedne elektrane, u ovom slučaju, dobiju se kada se plan proizvodnje (MW) pomnoži sa cijenom električne energije definisane za svaku elektranu posebno.



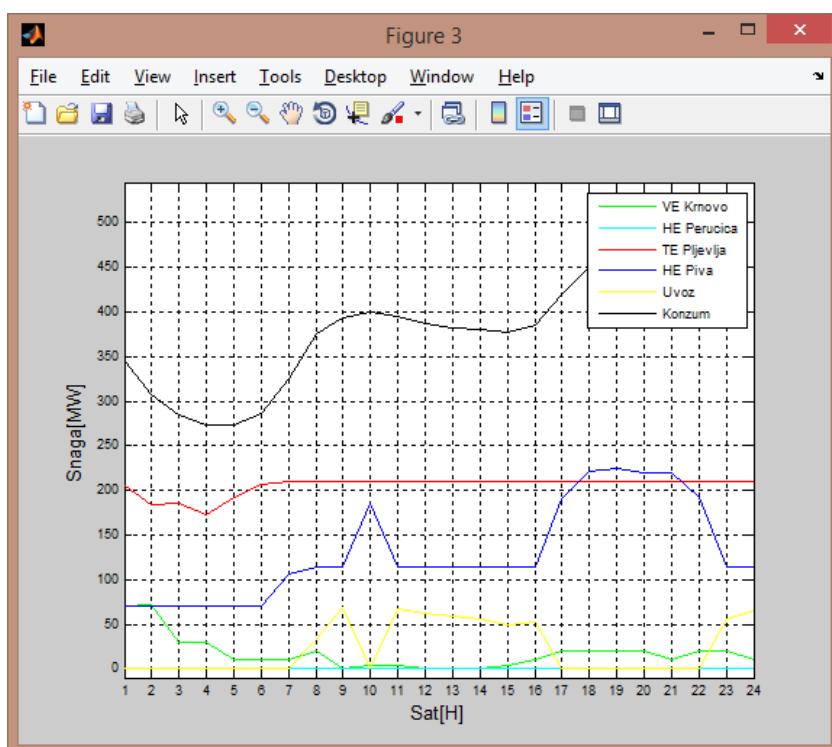
Slika 4.8: Troškovi angažovanja elektrana i uvoza električne energije

Zatim, m-fajl prikazuje drugi grafik na kojem se mogu uočiti količine proizvodnje električne energije po elektranama, odnosno uvoz, u MW i u satnoj rezoluciji (Slika 4.9).



Slika 4.9: Količina proizvodnje/uvoza

I na kraju, treći grafik, koji predstavlja dijagram proizvodnje/uvoza u satnoj rezoluciji (Slika 4.10).

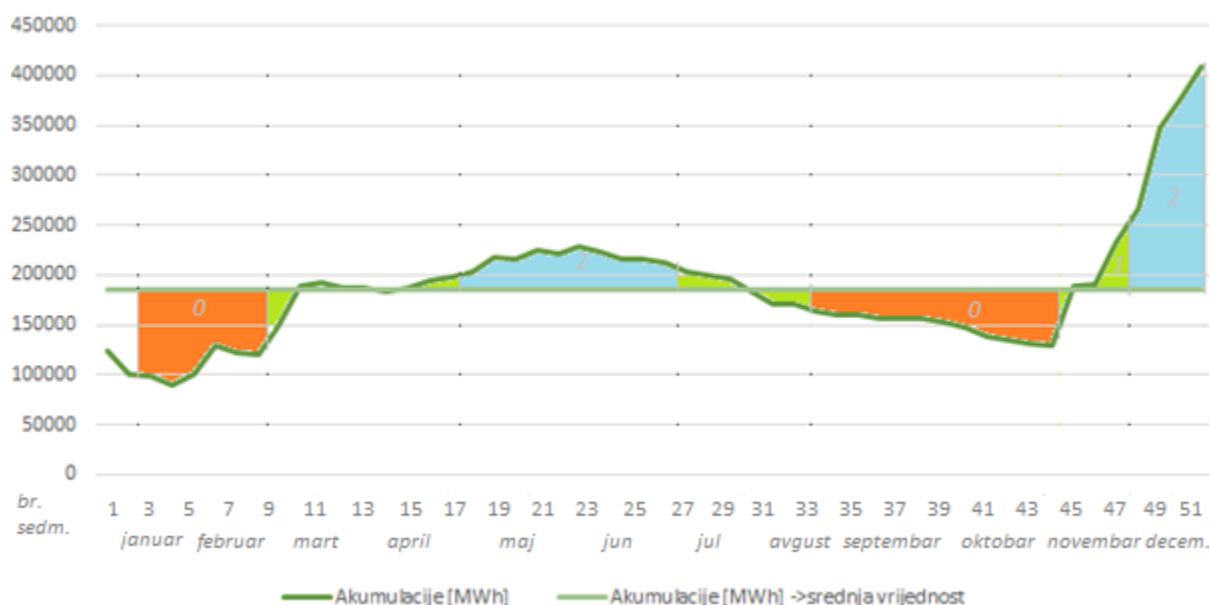


Slika 4.10: Dijagram proizvodnje/uvoza

Na kraju ovog m-fajla, definisan je i procentualni udio koji se prikazuje u komandnom prozoru. Rezultati algoritma upisuju se u excel fajl *Potrošnja*.

4.3 Opis interfejsa i primjena razvijene aplikacije sa primjerima

Korišćenje genetičkog algoritma u svrhu optimalnog plana proizvodnje odnosno nabavke električne energije za dan unaprijed, pokazalo se vrlo efikasno i primjenjivo u praksi. Ova konstatacija može se potvrditi detaljnim prikazom rezultata koje daje genetički algoritam polazeći od ulaznih parametara. Praksa je pokazala da vremenski uslovi u velikoj mjeri utiču na ekonomično planiranje proizvodnje električne energije. U cilju demonstracije rezultata u daljem tekstu predstavice se tri scenarija gdje će se koristiti realni podaci iz sistema, a koji su u direktnoj relaciji sa ulaznim indikatorima: 0- izrazito sušni period, 1- umjereno sušni period i 2- period velikih padavina. Kada se govori o vremenskom trajanju svakog scenarija pojedinačno, ono se ne može primijeniti za svaku godinu jednako, stoga će se primjeri koji budu predstavljeni ovim radom bazirati samo na 2017. godinu (Slika 4.11). Način odabira ulaznog indikatora može se dovesti u relaciju sa nivoom vode u akumulacionim jezerima, pa je na Slici 4.11 prikazano stanje akumulacija za 2017. godinu. Vrijednosti koje su znatno iznad prosječnog nivoa označena su kao periodi velikih padavina, dok za vrijednosti koje su daleko ispod prosjeka, označene su kao sušni period.



Slika 4.11: Stanje akumulacija (Vrtac, Slano, Pivsko) u 2017. godini (MWh)

U okviru tri spomenuta scenarija pokazaće se fleksibilnost algoritma kroz promjenljive ulazne vrijednosti: planirani konzum, prognozirana brzina vjetra, planirana proizvodnja termoelektrane i cijene električne energije sa referentne HUPX berze. Prilikom pokretanja m-fajla GA na komandnom prozoru pojavljuje se upit za unos indikatora o okvirnim vremenskim prilikama i planirane snage termoelektrane u prethodnom satu. Planirana proizvodnja termoelektrane unosi se samo za prvi sat jer svaki naredni sat algoritam planira u okvirima prethodnog, sa odstupanjem u opsegu $\pm 10\%$. Probleme optimizacije pomoću genetičkih algoritama u Matlab programskom paketu mogu se riješiti pomoću Matlab-ovog GA optimizacijskog alata. Rezultati i grafički prikazi dobijaju se pokretanjem m-fajla *grafici*. Rezultati prikazani u komandnom prozoru dobijeni pokretanjem algoritma predstavljaju procentualni udio proizvodnje pojedinih elektrana (i uvoza) u odnosu na zadati konzum za period od 24 časa, dok trostruki grafički prikazi predstavljaju cijene, prioritet angažovanja

elektrana i optimalno planiranu snagu za svaku elektranu (uvoz) pojedinačno u odnosu na planirani konzum, respektivno.

0-izrazito sušni period

Pod izrazito sušnim periodom podrazumijeva se ljetnji dio godine kada dotoka gotovo i da nema, a stanje akumulacija dostiže minimalni nivo vode u jezeru. Ako se uzme u obzir 2017. godina to bi konkretno značilo mjeseci januar, februar i od avgusta do novembra (slika 4.11). Zbog oslabljenih prirodnih dotoka u tom periodu godine radi se i remont hidroelektrane Perućica, pa je van pogona u trajanju do jednog mjeseca (avgust). Algoritam mora da uzme u obzir prethodno navedene okolnosti i da u takvim slučajevima izabere i opciju uvoza električne energije kao dopunu za podmirivanje konzuma. Kako bi se obuhvatio veliki broj različitih okolnosti u okviru scenarija *izrazito sušni period*, prikazaće se dva primjera. Ono što je specifično za 2017. godinu je da se period bez padavina javlja u toku zimskih mjeseci, pa će se i taj primjer prikazati u nastavku kao specifičan slučaj.

Primjer 3.1-31.01.2017.

Za prvi primjer uzima se prognoza ulaznih parametara za dan iz zimskog perioda jer se sa Slike 4.11 može primjetiti da taj dan pripada periodu bez velikih padavina. Prognozirani ulazni parametri prikazani su u Tabeli 4.1

Tabela 4.1: Ulazni parametri

h	Planirani konzum [MW]	Cijenja sa HUPX- a[€/MWh]	Prognoza brzine vjetra [m/s]
1	433,62	83,64	0
2	388,62	79,03	0
3	359,62	62,12	0
4	343,62	54,59	0
5	338,62	60,33	0
6	349,62	88,74	0
7	392,62	133,11	0
8	450,62	144,20	0
9	489,62	144,20	0
10	502,62	145,01	0
11	504,62	144,20	0
12	496,62	137,54	0
13	489,62	136,05	0
14	483,62	135,32	0
15	475,62	135,32	0
16	475,62	135,32	0
17	490,62	135,37	0
18	530,62	135,32	0
19	543,62	135,32	0
20	544,62	133,11	0
21	533,62	130,04	0
22	517,62	84,48	0
23	501,62	69,01	0
24	482,62	59,08	0

Prikazani ulazni parametri iz Tabele 4.1 sačuvani su u formi excel tabele (svaka kolona sačuvana je kao poseban excel fajl) i pozivaju se u okviru algoritma, dok se ulazni indikator i podatak plana termoelektrane iz prethodnog sata unose ručno na komandnom prozoru koji je prikazan na Slici 4.12. Iz Tabele 4.1 može se primjetiti da je planirani potrošnja dosta visoka, što je i karakteristično za period jako niskih temperatura, kao i da je cijena uvoza ekonomski

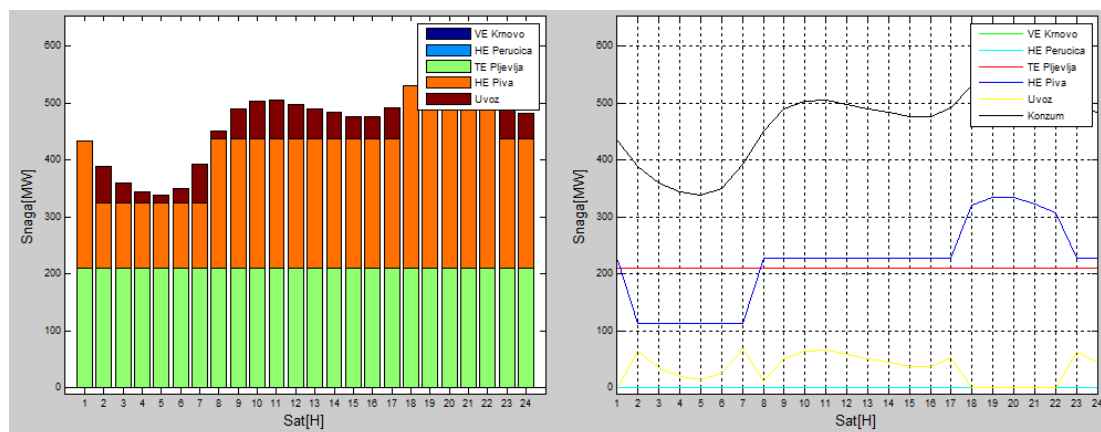
neisplativa. Ovdje ne postoje podaci o prognoziranoj brzini vjetra jer su vjetroelektrane počele sa testnim radom tek od maja 2017.godine.

Command Window:

```
Padavine [susa - 0, umjerena - 1, jaka - 2]: 0
Snaga termoelektrane u prethodnom satu [140-210MW]: 210
Udio u električnoj energiji :
VE Krnovo : 0 %
HE Perucica : 0 %
TE Pljevlja :45.3242%
HE Piva : 47.3361%
Uvoz : 7.3396%
```

Slika 4.12: Komandni prozor Matlab-a

Nakon pokretanja algoritma, rezultati se dobijaju za 316 sekundi i na komandnom prozoru Matlab-a prikazuje se broj obrađenih sati, nakon čega se prikazuje procentualni udio u proizvodnji svake elektrane pojedinačno (Slika 4.12). Pokretanjem m-fajla *grafici* rezultati se prikazuju grafički kao na Slici 4.13 i tabelarno (Tabela 4.2).

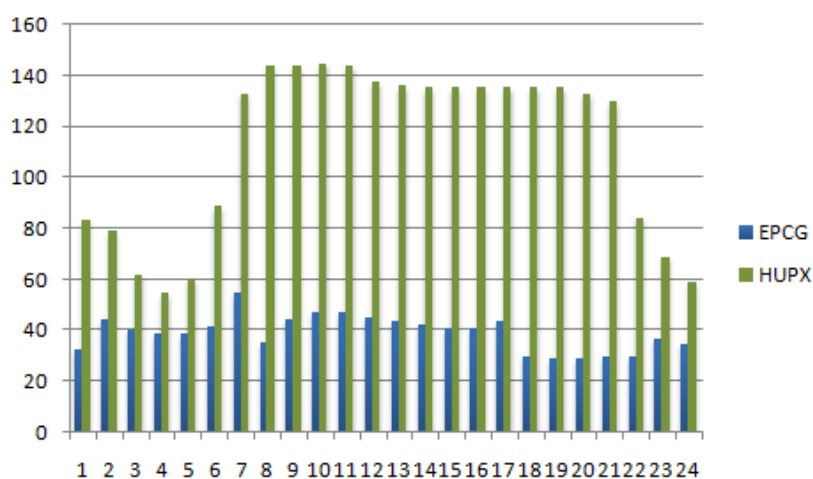


Slika 4.13: Rezultati genetičkog algoritma za 31.01.2017.

Tabela 4.2: Rezultati algoritma

h	Krnovo	Perućica	Pljevlja	Piva	Uvoz
1	0	0	210	224	0
2	0	0	210	114	65
3	0	0	210	114	36
4	0	0	210	114	20
5	0	0	210	114	15
6	0	0	210	114	26
7	0	0	210	114	69
8	0	0	210	228	13
9	0	0	210	228	52
10	0	0	210	228	65
11	0	0	210	228	67
12	0	0	210	228	59
13	0	0	210	228	52
14	0	0	210	228	46
15	0	0	210	228	38
16	0	0	210	228	38
17	0	0	210	228	53
18	0	0	210	321	0
19	0	0	210	334	0
20	0	0	210	335	0
21	0	0	210	324	0
22	0	0	210	308	0
23	0	0	210	228	64
24	0	0	210	228	45

Rezultati genetičkog algoritma za dan 31.01.2017. pokazuju da termoelektrana radi na maksimumu 24 sata (210 MW). U časovima kada se potrošnja kreće od minimuma do srednje vrijednosti, genetički algoritam odlučuje se za uvoz uz to da kako konzum raste povećava se i proizvodnja iz hidroelektrane Piva. S obzirom na tehnički minimum jedne mašine u hidroelektrani Piva, koji iznosi 70 MW, u periodu nižeg do srednjeg konzuma, radi jedan generator u kombinaciji sa uvozom električne energije. Kada potrošnja dostigne svoj maksimum (18 h-22 h, Slika 4.13) stvaraju se uslovi da hidroelektrana Piva radi sa dvije mašine (2×70 MW) i u tom periodu se obustavlja uvoz električne energije, jer je iz Tabele 4.1 očigledno da su cijene uvoza jako visoke i ekonomski neisplative. Ono što je karakteristično za ovaj zimski datum, s obzirom da se radi o specifičnom slučaju, je da hidroelektrana Piva sa grafika, u ovom slučaju, može predstavljati sumu proizvodnje hidroelektrane Pive i Perućice jer će u praksi hidroelektrana Perućica vrlo vjerovatno imati dotoke i proizvodnju u jednom dijelu dana. Da je genetički algoritam, dobro optimizaciono sredstvo za upravljanje proizvodnjom, prikazano je i na Slici 4.14 gdje je prikazana uporedna analiza cijena električne energije sa HUPX berze i prosječna cijena optimizovane proizvodnje, dobijena kao razlika ukupnih troškova i planirane proizvodnje (i uvoza), odakle se može zaključiti da genetički algoritam pronalazi ekonomski prihvatljivo rješenje za upravljanje proizvodnjom. Cijene su izražene u €/MWh.



Slika 4.14: Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 31.01.2017. u €/MWh

Nakon specifičnog primjera, potrebno je prikazati i situaciju koja se najčešće javlja u sušnom periodu godine. Takav slučaj prikazan je u Primjeru 3.2. Simulacija je odrađena za dan 19.07.2017. godine i tom prilikom uvršteni su realni podaci iz sistema (planirani konzum, cijene sa berze, prognozirana brzina vjetra) u posmatranom trenutku.

Primjer 3.2 – 19.07.2017:

Tabela 4.3: Ulazni parametri

h	Planirani konzum [MW]	Cijenja sa HUPX-a [€/MWh]	Prognoza brzine vjetra [m/s]
1	362,886	45,07	1,9
2	320,874	39,90	1,8
3	293,831	29,49	1,4
4	281,786	28,78	1,5
5	281,63	29,05	1,8
6	282,63	32,78	1,9
7	301,751	39,96	1,4
8	349,726	58,96	0,7
9	393,708	71,15	1,6
10	417,708	74,09	2,1
11	426,72	70,15	2,6
12	440,741	76,50	2,5
13	448,732	75,00	2,7
14	452,816	74,99	3,3
15	448,981	71,94	3,4
16	445,066	74,53	3,7
17	437,122	75,52	3,9
18	432,148	75,43	3,8
19	441,122	70,31	4,3
20	451,079	72,12	2,8
21	461,994	70,54	2,1
22	464,829	69,99	1,2
23	441,744	60,01	1,6
24	415,689	51,07	1

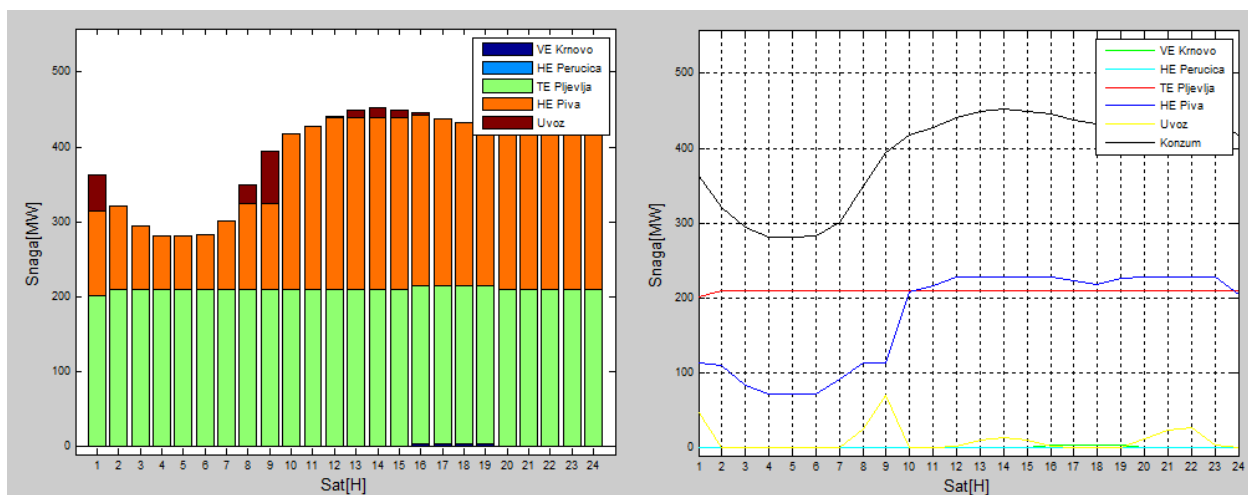
U Tabeli 4.3 prikazani su odgovarajući ulazni podaci, neophodni za kvalitetnu realizaciju algoritma, preostali dio ulaznih podataka unosi se ručno, direktno na komandnom prozoru (Slika 4.15). Ovdje planirani konzum nije na maksimalnom nivou ali je dosta visok, isti slučaj je i sa cijenama uvoza električne energije, što odgovara temperaturnim uslovima u tom dijelu godine. Očekuje se da vjetroelektrane imaju nisku proizvodnju s obzirom na prognoziranu brzinu vjetra iz Tabele 4.3.

Command Window:

```
Padavine [susa - 0, umjerena - 1, jaka - 2]: 0
Snaga termoelektrane u prethodnom satu [140-210MW]: 180
Udio u elektricnojenergiji :
VE Krново : 0.22837%
HE Perucica : 0 %
TE Pljevlja :52.984%
HE Piva : 44.1589%
Uvoz : 2.6287%
```

Slika 4.15: Komandni prozor Matlab-a

Nakon pokretanja algoritma, rezultati se prikazuju nakon 237 sekundi i na komandnom prozoru Matlab-a može se uočiti broj obrađenih sati. Pokretanjem m-fajla *grafici* rezultati se prikazuju i grafički kao na Slici 4.16 i tabelarno (Tabela 4.4), kao i procentualni udio u proizvodnji svake elektrane pojedinačno (Slika 4.15).



Slika 4.16: Rezultati genetičkog algoritma za 19.07.2017.

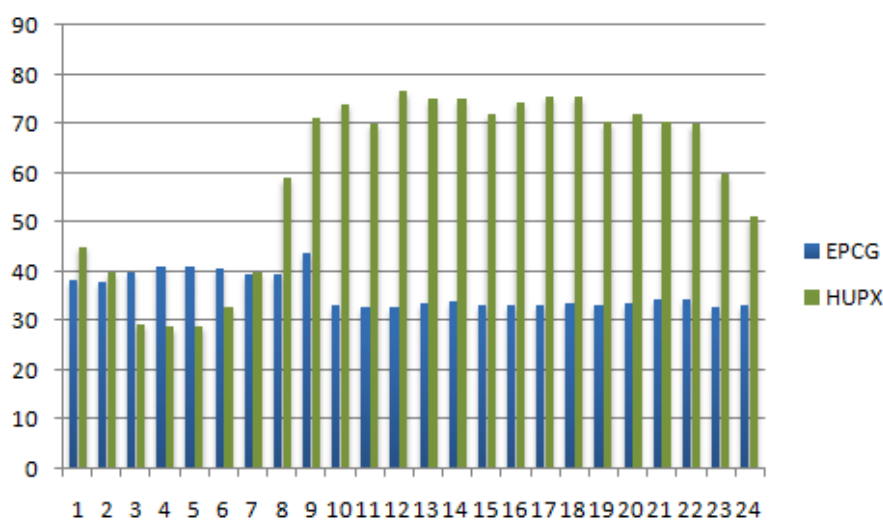
Tabela 4.4: Rezultati algoritma

h[MWh]	Krnovo	Perućica	Pljevlja	Piva	Uvoz
1	0	0	201	114	47,886
2	0	0	209,9999	110,8741	0
3	0	0	210	83,83104	0
4	0	0	210	71,786	0
5	0	0	210	71,62982	0
6	0	0	210	72,63	0
7	0	0	210	91,75101	0
8	0	0	210	114	25,726
9	0	0	210	114	69,708
10	0	0	210	207,708	0
11	0,65	0	210	216,0701	0
12	0,65	0	210	228	2,091
13	0,65	0	210	228	10,082
14	0,65	0	210	228	14,166
15	0,65	0	210	228	10,331
16	4,446	0	210	228	2,62
17	4,446	0	210	222,676	0
18	4,446	0	210	217,702	0
19	4,446	0	210	226,676	0
20	0,65	0	210	228	12,429
21	0	0	210	228	23,994
22	0	0	210	228	26,829
23	0	0	210	228	3,744
24	0	0	210	205,689	0

Sa komandnog prozora i sa Slike 4.15, demonstrirani rezultati predloženog pristupa potvrđuju prethodno opisane tvrdnje, dakle, ukoliko se odabere ulazni indikator 0, algoritam prije svega uzima u proračun električnu energiju iz vjetroelektrana, potom termoelektrana nastavlja da radi na maksimumu, a s obzirom da ni to ne bi bilo dovoljno da se podmiri planirani konzum, angažuju se mašine iz hidroelektrane Piva, pri čemu se prazne akumulacije, dok u krajnjem slučaju se pribjegava uvozu. S obzirom da se radi o realnim vrijednostima, brzina vjetra u posmatranom trenutku je bila nedovoljna za proizvodnju vjetroelektrana. Upoređujući dva

grafika sa Slike 4.16 može se uočiti da se vršno opterećenje podmiruje kombinacijom rada hidroelektrane Piva i uvozom električne energije iz susjednih sistema.

Još jedan pokazatelj optimizacionog rada algoritma je komparacija cijena uvoza električne energije (referentna berza HUPX) i prosječna cijena pri angažovanju proizvodnih resursa u vlasništvu EPCG u kombinaciji sa uvozom, sa Slike 4.17, odakle se može zaključiti da, u većem broju sati, genetički algoritam pronalazi ekonomičnije rješenje za upravljanje proizvodnjom. U jutarnjim satima, u periodu nižeg konzuma od prosjeka (3 h- 6 h), cijena sa berze je niža od one koja se dobije genetičkim algoritmom, međutim algoritam je postavljen tako da termoelektrana radi sa konstantnom snagom ($\pm 10\%$), što je i praksa u upravljanju sistemom i to je faktor koji najviše utiče na povećanje cijene. Pored termoelektrane, jedna mašina iz hidroelektrane Piva je na tehničkom minimum pri čemu su potrebe konzuma u potpunosti zadovoljene. Cijene su izražene u €/MWh.



Slika 4.17: Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 19.07.2017. u €/MWh

1- umjereno sušni period

Umjereno sušni period je period kada je stanje akumulacija na prosječnom nivou, u tom slučaju protočna hidroelektrana se koristi u najvećoj mogućoj mjeri dok se preostali dio nadoknađuje iz akumulacije ili eventualnog uvoza ukoliko se ocijeni da je ekonomski neisplativo angažovati mašine. U nastavku je demonstriran primjer za umjereno sušni period uvrštavajući vremenske okolnosti kroz realno ostvarene podatke za 27.03.2017. i 19.11.2017. godine jer su sa Slike 4.11 ocijenjeni kao datumi iz umjereno sušnog perioda.

Primjer 4.1 – 27.03.2017.

Tabela 4.5: Ulazni parametri

h	Planirani konzum [MW]	Cijenja sa HUPX-a [€/MWh]	Prognoza brzine vjetra [m/s]
1	313,23	29,70	0
2	279,23	28,16	0
3	261,23	27,57	0
4	248,23	27,11	0
5	246,23	28,02	0
6	253,23	30,30	0
7	296,23	41,09	0
8	342,23	47,50	0
9	367,23	45,42	0
10	374,23	42,50	0
11	376,23	37,00	0
12	373,23	33,90	0
13	368,23	30,80	0
14	361,23	30,00	0
15	355,23	28,66	0
16	351,23	28,90	0
17	353,23	29,88	0
18	362,23	36,14	0
19	389,23	42,97	0
20	410,23	51,38	0
21	407,23	50,28	0
22	390,23	43,21	0
23	371,23	41,01	0
24	377,23	34,31	0

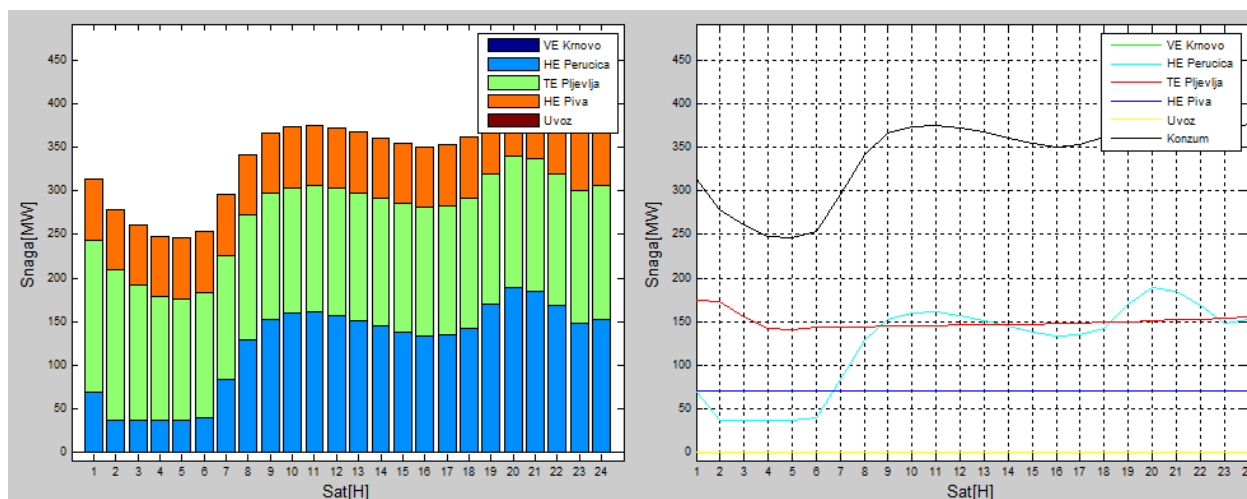
U Tabeli 4.5 prikazani su ulazni podaci za planirani konzum, cijene uvoza električne energije i za prognoziranu brzinu vjetra za odgovarajući datum iz primjera. Vrijednosti parametara se mogu označiti kao prosječne osim prognoze brzine vjetra, jer kao i u jednom od prethodnih primjera, u ovom periodu godine vjetroelektrane još uvijek nijesu počele sa radom.

Command Window:

```
Padavine [susa - 0, umjerena - 1, jaka - 2]: 1
Snaga termoelektrane u prethodnom satu [140-210MW]: 210
Udio u elektricnojenergiji :
VE Krnovo : 0 %
HE Perucica :35.8436%
TE Pljevlja :43.7369%
HE Piva : 20.4193%
Uvoz : 0.00020125%
```

Slika 4.18: Komandni prozor Matlab-a

Po pokretanju algoritma, rezultati se dobijaju nakon 535 sekundi i na komandnom prozoru Matlab-a postepeno se prikazuje broj obrađenih sati. Nakon obrađena 24 sata, pokretanjem m-fajla *grafici* rezultati se prikazuju i grafički kao na Slici 4.19 i tabelarno (Tabela 4.6), kao i procentualni udio u proizvodnji svake elektrane pojedinačno (Slika 4.18).



Slika 4.19: Rezultati genetičkog algoritma za 27.03.2017.

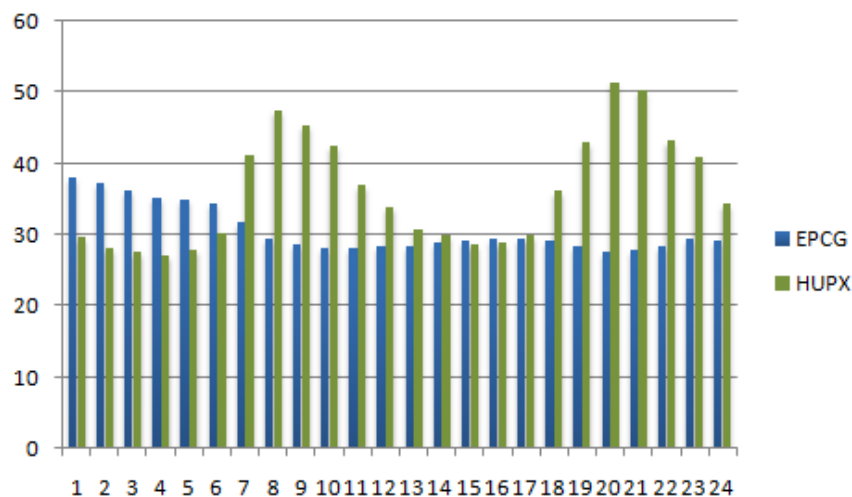
Tabela 4.6: Rezultati algoritma

h[MWh]	Krnovo	Perućica	Pjevlja	Piva	Uvoz
1	0	68,18238	175,0475	70,0001	0
2	0	36,00033	173,2297	70	0
3	0	36,00007	155,2299	70	0
4	0	36	142,23	70	0
5	0	36	140,23	70	0
6	0	39,77875	143,4513	70	0
7	0	82,77297	143,4569	70	0
8	0	128,3677	143,8621	70,00013	0
9	0	152,5199	144,7081	70,00198	0
10	0	159,1618	145,0681	70	0
11	0	161,1009	145,1291	70	0
12	0	156,5627	146,6656	70	0
13	0	151,4252	146,8048	70	0
14	0	144,3609	146,8691	70	0
15	0	138,2929	146,9308	70	0
16	0	133,45	147,78	70,00001	0
17	0	135,2821	147,9479	70	0
18	0	142,528	149,7019	70	0
19	0	169,5055	149,7229	70,00008	0
20	0	188,6923	151,5359	70	0
21	0	185,2745	151,9542	70,00121	0
22	0	168,1116	152,1183	70,00009	0
23	0	148,0429	153,1863	70,0002	0
24	0	151,6243	155,6013	70	0

Rezultati sa Slike 4.19 i iz Tabele 4.6 pokazuju da je plan proizvodnje termoelektrane u skladu sa maksimalnom mogućom proizvodnjom hidroelektrane Perućica, dok se preostali dio energije za pokrivanje konzuma nadoknađuje proizvodnjom iz hidroelektrane Piva. Sa Slike 4.19 se može primjetiti da je u prvim satima snaga termoelektrane oko 175 MW, međutim zbog uvećanih prirodnih dotoka algoritam planira povećanje proizvodnje protočne hidroelektrane, a termoelektranu smanjuje na ispod 150 MW.

U ovom slučaju nema potrebe za uvozom jer se koriste prirodni dotoci koji su, za trenutno posmatrane uslove, povećani u odnosu na prethodne primjere (Primjer 3.1. i Primjer 3.2). Takođe, s obzirom da je prognozirana brzina vjetra 0 m/s za cijeli dan, nije predviđen rad vjetroelektrana. Na osnovu ukupno dobijenih troškova iz genetičkog algoritma, proračunate su cijene i upoređene sa cijenama na HUPX berzi (Slika 4.22), odakle se može zaključiti da je

eliminacija uvoza u ovom slučaju ipak ekonomski isplativije rješenje, iako su cijene relativno niske u oba slučaja. Kako se sa Slike 4.20 može uočiti da je u prvim satima (1 h-6 h) cijena uvozne električne energije nešto niža od troškova proizvodnje iz domaćih izvora, treba uzeti u obzir tabelu 4.6 odakle se vidi da su sve angažovane mašine na tehničkom minimumu, pa zbog cjelokupne minimizacije troškova za posmatrani datum, isplativije je za par sati angažovati nešto skuplju energiju kako bi ukupni troškovi na nivou dana ostali manji nego kada bi se energija kupovala na tržištu (Tabela 4.13).



Slika 4.20: Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 27.03.2017. u €/MWh

Primjer 4.2 – 19.11.2017.

U sljedećem primjeru će se, pored ostalih parametara iz prethodnog primjera, uvrstiti i rad vjetroelektrane, kao što je prikazano u Tabeli 4.7.

Tabela 4.7: Ulazni parametri

h	Planirani konzum [MW]	Cijenja sa HUPX-a [€/MWh]	Prognoza brzine vjetra [m/s]
1	360,008	26,02	1,4
2	323,271	25,09	1,1
3	296,239	20,27	0,8
4	283,045	15,08	1,2
5	277,7	12,98	0,9
6	285,289	15,08	1
7	303,039	20,00	0,9
8	361,223	27,73	1,1
9	401,331	33,90	1,1
10	439,03	48,63	1,2
11	446,523	51,99	1,9
12	450,408	56,93	2,6
13	438,633	57,07	2,4
14	432,83	49,21	1,6
15	437,277	48,64	2,6
16	436,634	49,35	2,2
17	469,426	60,04	2
18	494,338	69,06	1,8
19	499,967	71,03	2,8
20	499,31	68,75	1
21	487,785	60,06	1,1
22	464,022	50,46	0,8
23	430,42	36,96	4,9
24	394,763	36,92	5,9

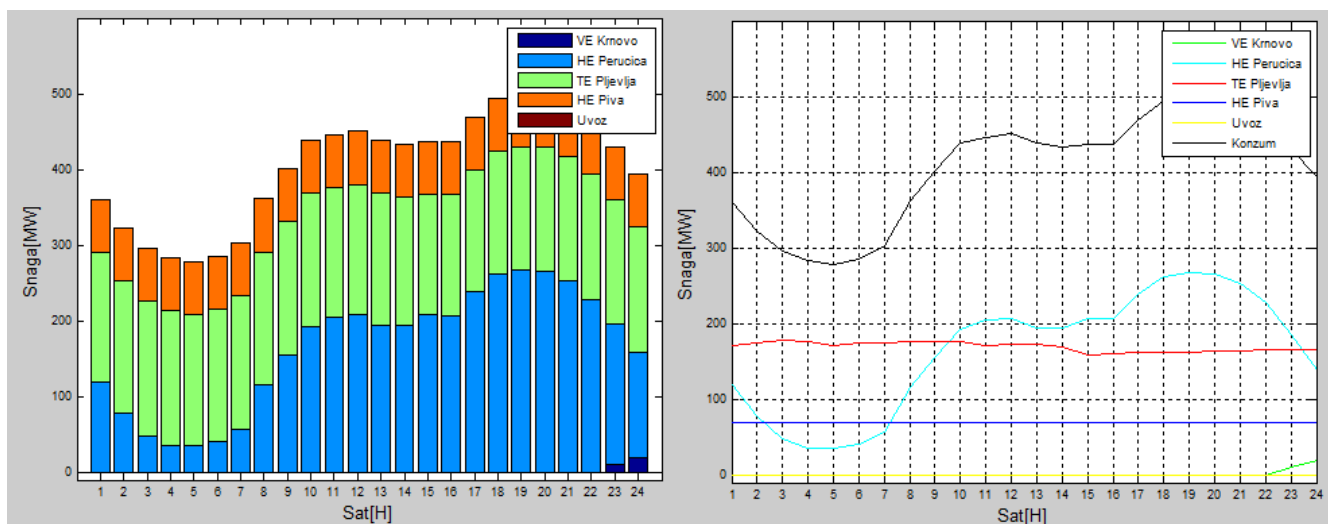
Planirani konzum i cijena uvoza su i u ovom slučaju na prosječnom nivou, dok je zabilježena prognoza brzine vjetra dovoljna za minimalnu proizvodnju vjetroelektrane. Ulazni indikator i podatak plana termoelektrane iz prethodnog sata unose se na komandnom prozoru koji je prikazan na slici ispod.

Command Window:

```
Padavine [susa - 0, umjerena - 1, jaka - 2]: 1
Snaga termoelektrane u prethodnom satu [140-210MW]: 210
Udio u elektricnoj energiji :
VE Krnovo : 0.32231%
HE Perucica :40.5107%
TE Pljevlja :41.8687%
HE Piva : 17.2978%
Uvoz : 0.00051345%
```

Slika 4.21: Komandni prozor Matlab-a

Nakon pokretanja algoritma, rezultati se dobijaju nakon 466 sekundi i na komandnom prozoru Matlab-a prikazuje se broj obrađenih sati. Pokretanjem m-fajla *grafici* rezultati se prikazuju i grafički kao na Slici 4.22 i tabelarno (Tabela 4.8), kao i procentualni udio u proizvodnji svake elektrane pojedinačno (Slika 4.21).

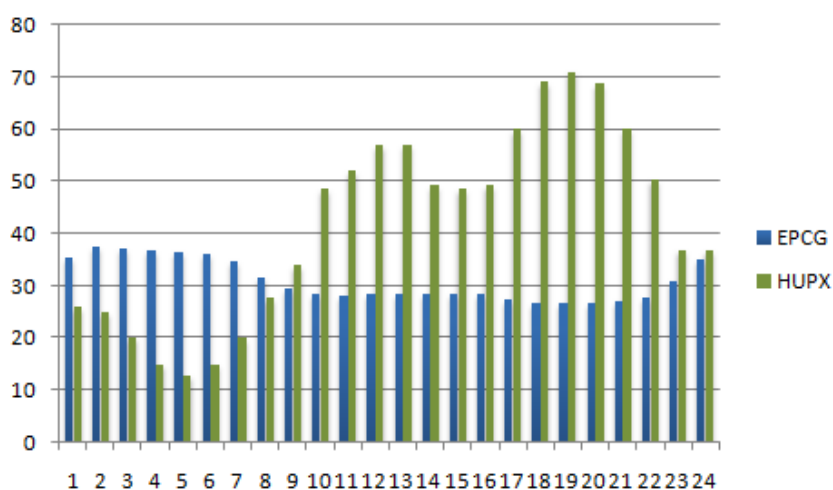


Slika 4.22: Rezultati genetičkog algoritma za 19.11.2017.

Tabela 4.8: Rezultati algoritma

h\MWh	Krnovo	Perućica	Pljevlja	Piva	Uvoz
1	0	119,6772	170,3307	70	0,000114
2	0	78,79075	174,4802	70,00004	0
3	0	48,59291	177,646	70	0
4	0	36	177,0441	70,00008	0,000821
5	0	36,00024	171,6998	70	0
6	0	39,95677	175,3322	70	0
7	0	57,62077	175,4182	70	0
8	0	115,2668	175,9524	70	0,003827
9	0	155,3658	175,9582	70,00703	0
10	0	192,6313	176,3985	70	0,000244
11	0	205,1441	171,376	70,00164	0,001268
12	0,65	207,157	172,6009	70	0
13	0	194,9956	173,6374	70,00007	0
14	0	193,8624	168,9325	70,03497	0,000145
15	0,65	207,3619	159,2177	70,00558	0,041843
16	0	206,5072	160,1268	70	0
17	0	237,9889	161,4371	70,00001	0
18	0	262,1987	162,139	70,00024	0
19	0,65	267,1403	162,1767	70	0
20	0	265,0683	164,2417	70	0
21	0	253,4911	164,2926	70	0,001343
22	0	228,948	165,074	70	0
23	10,114	185,1863	165,1184	70,00133	0
24	19,24	139,6511	165,8719	70	0

U ovom primjeru primjetna je blaga proizvodnja vjetroelektrane, prirodni dotoci su povećani u jednom dijelu dana (11 h – 22 h) kada se smanjuje plan proizvodnje termoelektrane. To utiče na smanjenje prosječne cijene proizvodnje iz domaćih izvora u odnosu na prvi dio dana od 1 h do 8 h kada su troškovi proizvodnje iz domaćih izvora nešto veći od cijene na tržištu. (Slika 4.23).



Slika 4.23: Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 19.11.2017. u €/MWh

2- period velikih padavina

Period velikih padavina ili period obilnih kiša podrazumijeva da se u najvećoj mogućoj mjeri angažuje protočna hidroelektrana kada dostiže svoj maksimum u proizvodnji, u tom slučaju, algoritamsko rješenje opciju uvoza svodi na minimum. U svrhu demonstracije i ovakve, jako prisutne, situacije predložen je Primjer 5.1 i Primjer 5.2 koji su sa Slike 4.11 ocijenjeni kao adekvatni primjeri za ovaj period.

Primjer 5.1– 6.06.2017.

U Tabeli 4.9 prikazani su ulazni parametri koji se pozivaju u okviru algoritma, odakle se može vidjeti da velike padavine su praćene umjerenim temperaturama samim tim i malom potrošnjom, a zbog velikih dotoka i u regionu, obezbjeđuju nisku cijenu uvoza. Ulazni indikator i podatak plana termoelektrane iz prethodnog sata unose na komandnom prozoru koji je prikazan na Slici 4.24. Prikazani primjer pripada periodu kada je termoelektrana bila u remontu, stoga se vrijednost za istu unosi 0.

Tabela 4.9: Ulazni parametri

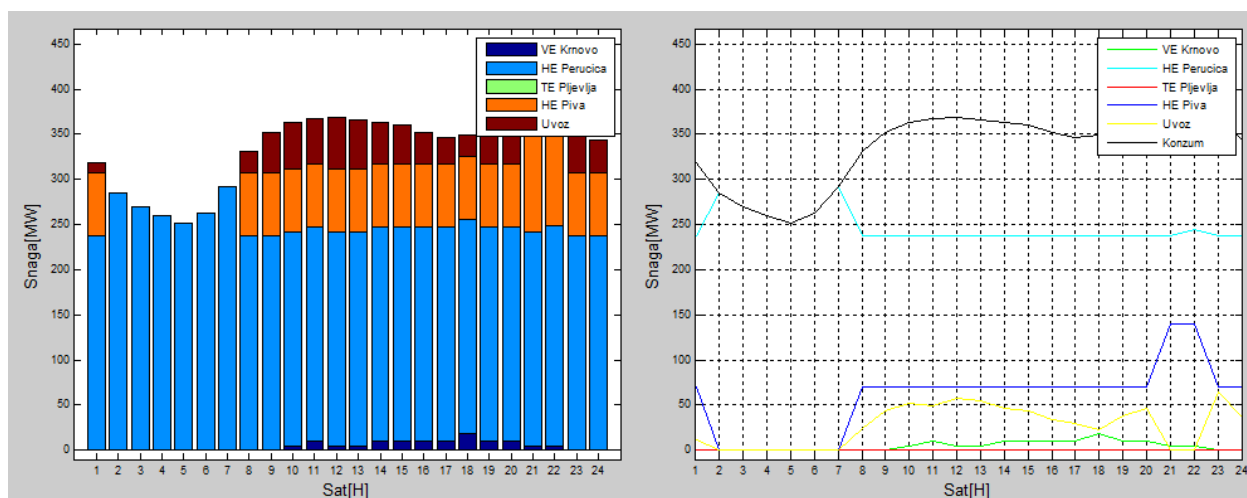
h	Planirani konzum [MW]	Cijenja sa HUPX-a [€/MWh]	Prognoza brzine vjetra [m/s]
1	318,365	33,00	1,4
2	285,285	34,00	1,6
3	269,236	29,25	2
4	260,236	26,60	1,7
5	252,281	26,60	1,7
6	263,367	33,03	2
7	292,681	45,42	2,3
8	331,328	60,42	2,3
9	351,362	59,95	3,4
10	362,845	57,55	4,2
11	366,92	58,70	4,7
12	368,549	56,51	4,2
13	366,148	60,01	4,2
14	363,368	60,89	4,7
15	360,223	58,70	4,8
16	351,441	57,65	5,3
17	346,954	59,04	5,3
18	349,483	54,79	5,5
19	354,7	53,24	5,1
20	363,313	50,93	4,7
21	381,801	52,98	3,8
22	389,303	50,99	3,8
23	372,052	48,16	3,2
24	344,055	45,12	1,6

Command Window:

```
Padavine [susa - 0, umjerena - 1, jaka - 2]: 2
Snaga termoelektrane u prethodnom satu [140-210MW]: 0
Udio u elektricnoj energiji :
VE Krново : 1.4081%
HE Perucica : 73.1194%
TE Pljevlja : 0 %
HE Piva : 17.3583 %
Uvoz : 8.1141%
```

Slika 4.24: Komandni prozor Matlab-a

Nakon pokretanja algoritma, rezultati se dobijaju nakon 737 sekundi i na komandnom prozoru Matlab-a prikazuje se broj obrađenih sati. Pokretanjem m-fajla *grafici* rezultati se prikazuju i grafički kao na Slici 4.25 i tabelarno (Tabela 4.10), kao i procentualni udio u proizvodnji svake elektrane pojedinačno (Slika 4.24).



Slika 4.25: Rezultati genetičkog algoritma za 6.06.2017.

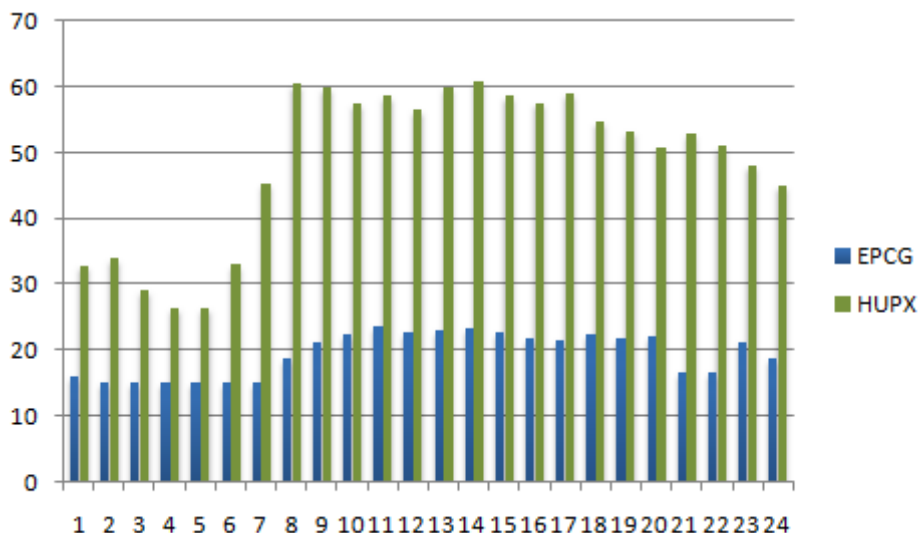
Tabela 4.10: Rezultati algoritma

h[MWh]	Krnovo	Perućica	Pljevlja	Piva	Uvoz
1	0	237	0	70	11,365
2	0	285,285	0	0	0
3	0	269,236	0	0	0
4	0	260,236	0	0	0
5	0	252,281	0	0	0
6	0	263,367	0	0	0
7	0	292,681	0	0	0
8	0	237	0	70	24,328
9	0,65	236,9986	0	70,00139	43,712
10	4,446	237	0	70	51,399
11	10,114	237	0	70	49,806
12	4,446	237	0	70	57,103
13	4,446	237	0	70	54,702
14	10,114	237	0	70	46,254
15	10,114	237	0	70	43,109
16	10,114	237	0	70	34,327
17	10,114	237	0	70	29,84
18	19,24	236,9997	0	70,00032	23,243
19	10,114	237	0	70	37,586
20	10,114	237	0	70	46,199
21	4,446	237,355	0	140	0
22	4,446	244,857	0	140	0
23	0,65	237	0	70	64,402
24	0	237	0	70	37,055

U periodu remonta termoelektrane, algoritam je demonstrirao svoju fleksibilnost tako što daje optimalne rezultate za podmirivanje potrošnje i u tako specifičnim situacijama. Iz predloženog primjera vidi se da čak ni u takvim situacijama problem snabdijevanja nije upitan kada su

povećani dotoci, pri čemu primarnu ulogu u proizvodnji preuzima hidroelektrana Perućica sa minimalnim udjelom uvoza.

Remont termoelektrane odražava se i na ukupne troškove proizvodnje što se može vidjeti sa Slike 4.26 gdje je prosječna cijena proizvodnje iz domaćih izvora relativno niska, pa čak i u odnosu na cijenu sa HUPX berze.



Slika 4.26: Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 6.06.2017. u €/MWh

Primjer 5.2 – 27.11.2017.

U ovom primjeru prikazaće se dan kada je proizvodnja vjetroelektrane u 2017. godini bila na najvećem nivou. Prikazani ulazni parametri iz Tabele 4.11 pozivaju se u okviru algoritma, dok se ulazni indikator i podatak plana termoelektrane iz prethodnog sata unose na komandnom prozoru koji je prikazan na Slici 4.27:

Tabela 4.11: Ulazni parametri

h	Planirani konzum [MW]	Cijenja sa HUPX-a [€/MWh]	Prognoza brzine vjetra [m/s]
1	391,327	18,91	4
2	350,475	17,55	5,6
3	324,753	13,70	5,4
4	306,163	12,03	5,4
5	312,495	21,69	5,3
6	317,982	44,13	5,9
7	368,115	53,25	5,4
8	421,1	77,97	5,8
9	449,225	79,96	6,1
10	465,008	75,21	6,4
11	466,524	77,91	6,8
12	462,807	75,40	6,9
13	455,878	78,68	7,1
14	452,736	75,13	6,8
15	449,472	74,08	6,2
16	455,195	75,95	6
17	484,895	85,95	5,9
18	516,553	97,77	6,1
19	524,186	88,33	6,3
20	521,831	79,99	6,9
21	509,334	64,60	6,7
22	494,616	65,00	6,5
23	468,641	41,12	6,6
24	468,335	38,48	6,4

Command Window:

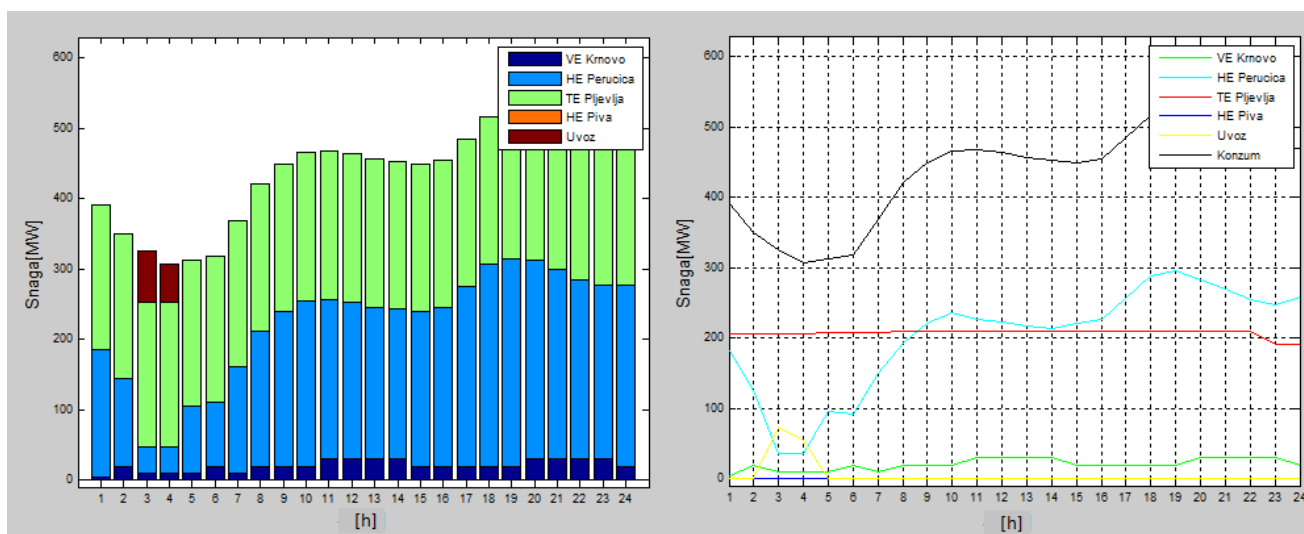
```

Padavine [susa - 0, umjerena - 1, jaka - 2]: 2
Snaga termoelektrane u prethodnom satu [140-210MW]: 205
Udio u elektricnoj energiji :
VE Krnovo : 4.7217%
HE Perucica : 46.3687%
TE Pljevlja : 47.6963%
HE Piva : 0 %
Uvoz : 1.2134%

```

Slika 4.27: Komandni prozor Matlab-a

Nakon pokretanja algoritma, rezultati se dobijaju nakon 601 sekundi i na komandnom prozoru Matlab-a prikazuje se broj obrađenih sati. Pokretanjem m-fajla *grafici* rezultati se prikazuju i grafički kao na Slici 4.28 i tabelarno (Tabela 4.12), kao i procentualni udio u proizvodnji svake elektrane pojedinačno (Slika 4.27). Ovaj primjer se izdvaja od ostalih po većoj proizvodnji vjetroelektrane (najveća proizvodnja u 2017. godini).

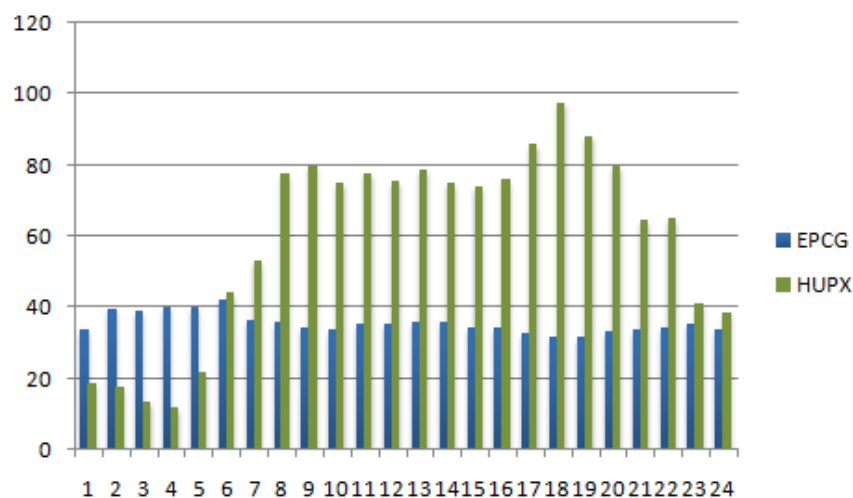


Slika 4.28: Rezultati genetičkog algoritma za 27.11.2017.

Tabela 4.12: Rezultati algoritma

h\MWh	Krnovo	Perućica	Pljevlja	Piva	Uvoz
1	4,446	181,6199	205,2611	0	0
2	19,24	125,2091	206,0259	0	0
3	10,114	36,00008	206,0261	0	72,61286
4	10,114	36,00107	206,0261	0	54,02187
5	10,114	94,67337	207,7076	0	0
6	19,24	90,94969	207,7901	0	0,002258
7	10,114	150,1543	207,8467	0	0
8	19,24	192,8916	208,9683	0	0
9	19,24	220,4192	209,5658	0	0
10	19,24	235,9829	209,7851	0	0
11	29,536	227,0134	209,9745	0	0
12	29,536	223,2849	209,9856	0	0,000522
13	29,536	216,3477	209,9943	0	0
14	29,536	213,1996	209,993	0	0,007398
15	19,24	220,237	209,995	0	0
16	19,24	225,9576	209,9974	0	0
17	19,24	255,6565	209,998	0	0,000462
18	19,24	287,3141	209,9989	0	0
19	19,24	294,9467	209,9993	0	0
20	29,536	282,3212	209,974	0	0,000109
21	29,536	269,8043	209,9936	0	0
22	29,536	255,0855	209,9945	0	0
23	29,536	247,3945	191,7028	0	0,007954
24	19,24	257,3324	191,7626	0	0

Dakle, u uslovima obilnih padavina algoritam je dao rješenje maksimalne proizvodnje termoelektrane (jer je prvi sat bio na maksimumu) i maksimalnog iskorišćenja prirodnih dotoka, dok se hidroelektrana Piva angažuje tek na par sati, jer se trenutne okolnosti koriste za povećanje akumulacije (Slika 4.27). Uvoz je takođe na minimumu, jer se ovakvi uslovi koriste za izvoz električne energije ka susjednim sistemima. U poređenju sa prethodnim primjerom, kada je termoelektrana bila u remontu, može se primjetiti da je u ovom slučaju prosječna cijena proizvodnje nešto veća jer termoelektrana radi u punom kapacitetu (Slika 4.29). Kako iz sata u sat nema prevelikih oscilacija u proizvodnji tako ni u pogledu cijena proizvodnje nema velikih promjena u okviru posmatranog primjera.



Slika 4.29: Cijene uvoza i proizvodnje električne energije za 27.11.2017. u €/MWh

Iz prikazanih primjera može se primjetiti da kriva konzuma prati ukupnu proizvodnju elektrana. Ukupni troškovi dobijeni koristeći genetički algoritam i troškovi uvoza električne energije, za svaki primjer pojedinačno na nivou 24 sata, prikazani su u Tabeli 4.13, odakle se može zaključiti da genetički algoritam kombinuje domaće izvore i uvoz električne energije kako bi troškovi bili što manji.

Tabela 4.13: Uporedni troškovi podmirivanja potrošnje iz genetičkog algoritma i uvoza električne energije

Primjer	GA [€]	HUPX [€]
3.1	431.752,25	1.267.946,51
3.2	336.141,26	593.833,34
4.1	253.628,93	303.214,58
4.2	293.879,27	439.993,96
5.1	159.507,27	404.079,96
5.2	366.754,18	657.414,86

Izuzetne situacije

U prethodnim primjerima prikazana su tri najzastupljenija scenarija u toku pripreme plana proizvodnje električne energije i u svakom od njih cilj je optimalno upravljanje elektroenergetskim sistemom, ispunjavajući prvenstveno sve uslove sigurnog, pouzdanog i kvalitetnog snabdijevanja potrošača. Međutim, u realnom rukovođenju sistemom postoje specifične situacije koje odstupaju od svakodnevnih koje algoritam obuhvata u svom proračunu. Jedna od takvih situacija je remont termoelektrane. Ukoliko se u početnim uslovima unese da je snaga termoelektrane u prethodnom satu 0 MW, algoritam proračunava plan kao u već navedenim primjerima izuzimajući plan proizvodnje termoelektrane (Primjer 3.1) i na komandnom prozoru obavještava korisnika da je termoelektrana u fazi remonta.

Dakle, prethodno opisani primjeri predstavljaju osnovu bilo da se radi o uobičajenim slučajevima ili o specifičnim situacijama. Mogućnost izbora ulaznih parametara u skladu sa uslovima koji u najvećoj mjeri utiču na optimalnu proizvodnju čini ovaj algoritam izuzetno fleksibilnim alatom.

Algoritam se dalje može nadograđivati i prilagođavati u skladu sa uslovima okruženja, a ono što je prikazano u prethodnim primjerima je funkcionalnost genetičkog algoritma u cilju optimalnog rada elektroenergetskog sistema Crne Gore. Genetički algoritam je u trenutnim uslovima elektroenergetskog sistema Crne Gore dao očekivana rješenja gotovo identična onima kojima EPCG pribjegava u praksi planiranja elektroenergetskim sistemom, a koja se oslanjaju na cijene električne energije na tržištu.

4.4 Uporedna analiza savremenih optimizacionih metoda za planiranje pogona dan unaprijed

Osim što su primjenjivi na veliki broj problema, velika prednost genetičkog algoritma je ta što su oni unutrašnje paralelni. Većina drugih algoritama je serijska pa mogu istražiti problemski prostor samo u jednom smjeru i ako je pronađeno rješenje ispod optimalnog, napuštaju sav prethodno obavljene posao i kreću ispočetka. Genetički algoritmi, međutim, imaju više potomaka koji pretražuju problemski prostor u više smjerova odjednom. Ako se jedan put pokaže kao slijepa ulica, „potomci“ taj put eliminišu i nastavljaju sa radom, a eliminacija im daje veću vjerovatnoću da će sljedećim pretraživanjem pronaći optimalno rješenje. Takođe, u slučaju da genetički algoritam ne nađe globalni optimum i dalje daje dobro rješenje koje može zadovoljiti. Osim toga, genetički algoritam kao rezultat ne daje samo jedno rješenje, već skup rješenja [40].

Rezultati linearnog programiranja

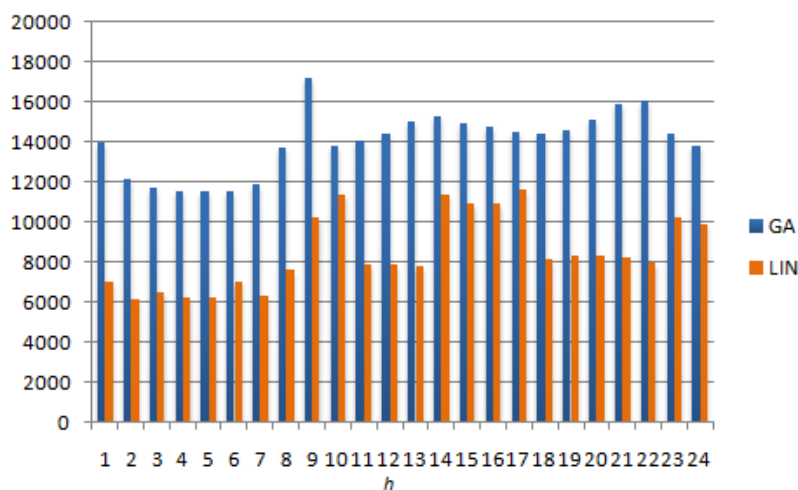
U cilju dokazivanja rezultata genetičkog algoritma i poređenja istih sa rezultatima drugih metoda, u narednom dijelu biće predstavljena komparacija sa rezultatima dobijenih primjenjenom metode linearnog programiranja pod istim okolnostima. Linearno programiranje je matematička metoda za optimizaciju sistema u okviru zadatih ograničenja, gdje su uslovi predstavljeni linearnim relacijama. Ukoliko se na predmetni zadatak primjeni metoda linearnog programiranja, zbog jednostavnosti problematike, dobiće se rezultati približni rezultatima genetičkog algoritma. Iako genetički algoritmi imaju mnogo prednosti, postoje i mnoga ograničenja, odnosno nedostaci. U poređenju sa metodom linearnog programiranja, nedostatak genetičkog algoritma je vrijeme izvršenja zadatka. Naime, za predmetni zadatak, pod navedenim okolnostima pokazalo se da se primjenom metode linearnog programiranja dobijaju približno isti rezultati za nešto kraće vrijeme izvršenja. Međutim, ono što genetički algoritam čini naprednijim u odnosu na predloženu metodu za komparaciju, je prilagođenost okolini, odnosno mogućnost nadograđivanja i usložnjavanja sa velikim brojem varijabli.

Neupitna prednost genetičkog algoritma u odnosu na druge numeričke i aproksimativne metode optimizacije ogleda se u tome što kod genetičkih algoritama funkcija cilja ne samo da ne mora biti neprekidna, nego može biti i veoma složena i sa velikim brojem varijabli, kao i uslovima ograničenja.

U nastavku izvršiće se poređenje osnovnih pokazatelja kvaliteta rada algoritma, a to su proračunati ukupni troškovi proizvodnje (i uvoza) i brzina izvršenja zadatka.

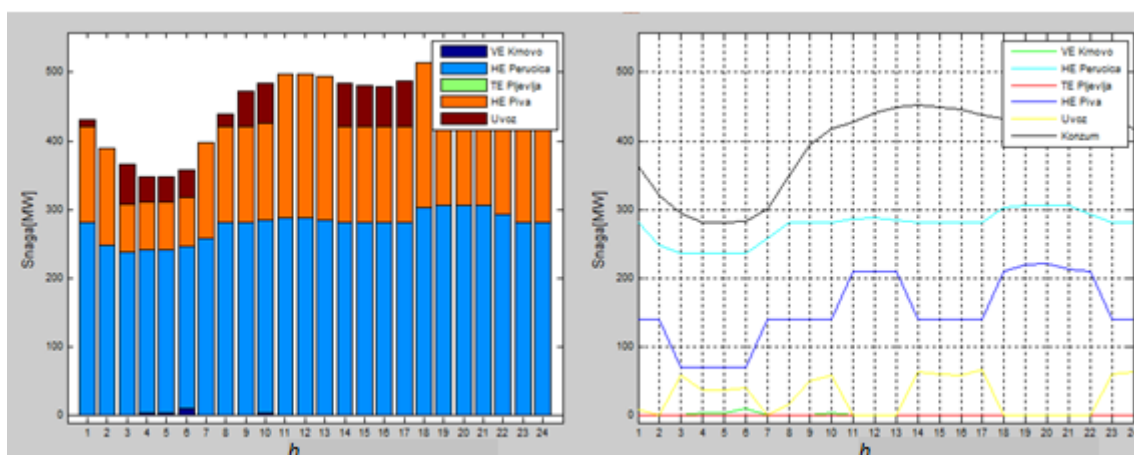
Ukupni troškovi

Kada se govori o ukupnim troškovima, to se odnosi na minimalne predviđene troškove proizvodnje i/ili uvoza električne energije za sigurno i kvalitetno snabdijevanje potrošača. Ukoliko se za Primjer 3.2 uporede dvije metode, genetički algoritam, kao polazni algoritam i linearno programiranje, kao komparativni metod, dobijaju se rezultati kao na Slici 4.30.



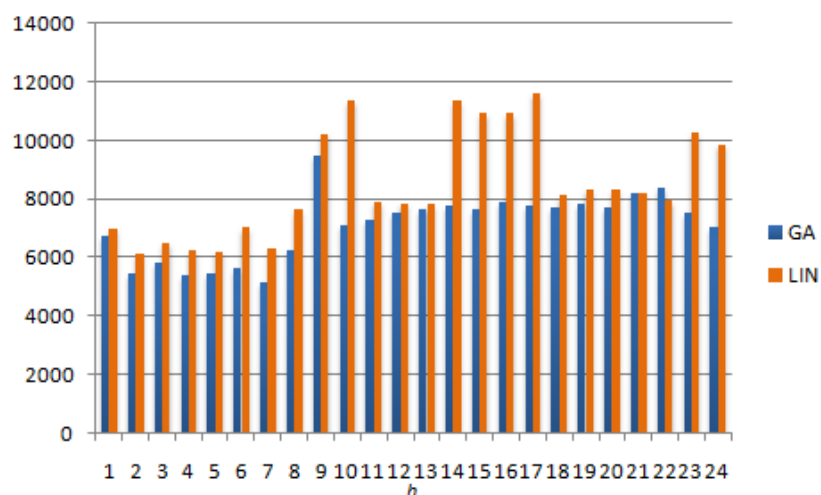
Slika 4.30: Ostvareni troškovi proizvodnje električne energije kao rezultati genetičkog algoritma i linearnog programiranja za izrazito sušni period

Sa Slike 4.30 može se primjetiti da je prosječna cijena električne energije dobijena linearnim programiranjem znatno manja od cijene koja se dobila kroz genetički algoritam. Međutim, ako se izvrši analiza rezultata linearnog programiranja sa Slike 4.31, može se uočiti da ova metoda ne uzima u proračun proizvodnju termoelektrane, kako zbog visine cijene tako i zbog tehničkog minimum rada termoelektrane.



Slika 4.31: Rezultati linearnog programiranja za izrazito sušni period

Ukoliko bi se jednaki uslovi uvrstili u oba algoritma, odnosno eliminisao rad termoelektrane u oba slučaja, dobijaju se troškovi kao na Slici 4.32, gdje su ukupni troškovi za genetički algoritam 170.596,70 €, dok troškovi po linearnom programiranju bi iznosila 204.500,90 €, za period od 24 sata. Dakle, u ovom slučaju genetički algoritam pronalazi ekonomski prihvatljivije rješenje nego što bi se to dobilo primjenom metode linearnog programiranja.



Slika 4.32: Troškovi genetičkog algoritma i linearnog programiranja bez rada termoelektrane

Cilj postavljenog zadatka jesu minimalni troškovi ali uz uvažavanje realnih uslova iz okruženja koja nijesu u skladu sa rezultatima linearnog programiranja, stoga je ova komparacija eliminirajući faktor za metod linearnog programiranja.

Konvergencija optimizacionog postupka

Prilikom proučavanja algoritama uvijek je bitno vidjeti i koje je vrijeme izvršenja tog algoritma. Na taj način može se vidjeti koliko je algoritam efikasan i uporediti njegovu brzinu i efikasnost sa drugim algoritmima koji rješavaju isti problem i na taj način odlučiti koji je algoritam bolje koristiti. Brzina i tačnost konvergencije genetičkog algoritma prema traženom rješenju uveliko zavisi od parametara algoritma, kao što su veličina populacije, vjerovatnoća ukrštanja i mutacije i veličine populacije za eliminaciju. Početni uslovi takođe utiču na brzinu konvergencije što se i pokazalo iz prethodnih primjera, gdje je najmanje vrijeme izvršenja potrebno za primjere kada se u većini slučajeva, zbog prirodnih uslova, eliminiše jedan od izvora, dok je najviše vremena potrebno pri većem broju potencijalnih rješenja.

Ukoliko se zanemare djelimične razlike u rezultatima iz prethodnog primjera (Primjer 1.2) i isti se iskoristi za upoređivanje vremena izvršenja genetičkog algoritma i linearnog programiranja, dobiće se rezultati koji pokazuju da je vrijeme izvršenja za genetički algoritam 237 sekundi dok metod linearnog programiranja daje rezultate za 358 sekundi (Slika 4.33).

Profile Summary				GA	Profile Summary				Linearno programiranje
Generated 19-May-2018 20:31:47 using cpu time.					Generated 19-May-2018 20:25:07 using cpu time.				
Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Function Name	Calls	Total Time	Self Time*		
@RandStream\private\getset_mex (MEX-file)	24	0 s	0.000 s	@RandStream\private\getset_mex (MEX-file)	24	0 s	0.000 s		
@RandStream\private\inLegacyMode (MEX-file)	24	0 s	0.000 s	@RandStream\private\inLegacyMode (MEX-file)	24	0 s	0.000 s		
GA	1	236.951 s	3.525 s	GA	1	357.533 s	6.598 s		
...RandStream>RandStream_getGlobalStream	24	0.007 s	0.001 s	...RandStream>RandStream_getGlobalStream	24	0.098 s	0.001 s		
RandStream.RandStream>RandStream_subsref	48	0.002 s	0.002 s	RandStream.RandStream>RandStream_subsref	48	0.052 s	0.052 s		
...am.RandStream>localGetSetGlobalStream	24	0.006 s	0.006 s	...am.RandStream>localGetSetGlobalStream	24	0.097 s	0.097 s		
actxserver	3	0.603 s	0.603 s	actxserver	3	0.952 s	0.952 s		
augLagFun	632421	50.300 s	15.107 s	augLagFun	899172	72.098 s	21.797 s		
augLagFun>augLagScalarFun	632421	117.268 s	35.193 s	augLagFun>augLagScalarFun	899172	167.094 s	50.301 s		
cell_strmatch	48	0.020 s	0.010 s	cell_strmatch	48	0.023 s	0.004 s		
close	1	0.008 s	0.005 s	close	1	0.266 s	0.000 s		
close>checkfigs	1	0.001 s	0.001 s	...ddenHandles'.oldUDDShowHiddenHandles]	3	0 s	0.000 s		
close>getEmptyHandleList	1	0 s	0.000 s	close>checkfigs	4	0 s	0.000 s		

Slika 4.33: Vrijeme izvršenja genetičkog algoritma i linearnog programiranja

Dakle, u ovom primjeru genetički algoritam ima prednost u pogledu brzine konvergencije optimizacionog postupka, međutim, jedan od mogućih problema prilikom izračunavanja brzine je to što brzina nalaženja rješenja dosta varira budući da se radi o stohastičkom algoritmu, pa rezultati mjerenja nijesu toliko pouzdani, odnosno ovo mjerenje često daje nešto drugačije rezultate.

5. ZAKLJUČAK

Prepoznati izazovi u oblasti kratkoročnog planiranja proizvodnje i rada EES Crne Gore, bili su motivacija da se ispitaju mogućnosti za korišćenje već postojećih alata u Matlab-u za postizanje optimalnog rada elektroenergetskog sistema. Optimalno angažovanje agregata podrazumijeva izbor najpovoljnijeg rješenja pri angažovanju proizvodnih kapaciteta, kako bi se zadovoljile potrebe potrošača za sigurnim i kvalitetnim snabdijevanjem potrošača električnom energijom. Iz tog razloga, ideja predmetnog zadatka je bila da se pronade model angažovanja raspoloživih elektrana u kombinaciji sa električnom energijom iz uvoza kako bi troškovi proizvodnje bili što niži, uvažavajući pritom sigurnost sistema. Tokom planiranja, poseban izazov predstavlja sve veća integracija vjetroelektrana, pri čemu se ukupan plan proizvodnje sve manje oslanja na konvencionalne izvore. To za upravljanje u realnom vremenu znači veća i učestalija odstupanja sistema, samim tim i angažovanje pomoćnih usluga za balansiranje sistema u vidu sekundarne i tercijarne regulacije, a aktivacija balansne energije za pokrivanje debalansa prouzrokovanog, velikim djelom, intermitirajućom proizvodnjom vjetroelektrana, predstavlja dodatan finansijski trošak.

Pored stabilnosti, efikasno upravljanje sistemom podrazumijeva i ekonomsku isplativost. S obzirom da je stabilnost sistema primaran cilj, često se drugi segment zapostavlja. U ovom radu predložen je algoritam koji vodi računa da se zadovolje oba uslova, stabilnost i ekonomičnost, a da snabdijevanje električnom energijom ostane sigurno i kvalitetno.

Postoji veliki broj metoda (metoda grananja i ograničavanja, metod prioritete liste, dinamičko programiranje, Lagrangeov relaksacion metod, tabu pretraživanje, simulirano kaljenje, linearno programiranje, optimizacija rojem čestica) koje se bave problemom optimizacije i njihovim izučavanjem. U radu je prikazano nekoliko heurističkih metoda (metoda grananja i ograničavanja, metod prioritete liste, dinamičko programiranje, Lagrangeov relaksacion metod, tabu pretraživanje, simulirano kaljenje, linearno programiranje, optimizacija rojem čestica), međutim, došlo se do zaključka da se u radu simulira pristup, tj. algoritam za rješavanje problema izbora agregata koji je baziran na genetičkom algoritmu. Genetički algoritmi su robusne i adaptivne metode koje se mogu koristiti za rješavanje problema kombinatorne optimizacije.

U ovom radu, genetički algoritam se iskoristio kao pristup za rješavanje problema optimizacije pogona, a kao primjer poslužili su realni podaci iz elektroenergetskog sistema Crne Gore. Posmatrani sistem raspolaže sa 5 elektrana: jedna termoelektrana, dvije hidroelektrane i dvije vjetroelektrane; koje su, u zavisnosti od pravila upravljanja, implementirani u kodu genetičkog algoritma. Osnovna konstrukcija genetičkog algoritma je populacija jedinki, kojih je najčešće između 10 i 200, međutim nakon niza ispitivanja, pokazalo se da je za potrebe ovog rada sasvim dovoljno da početna vrijednost populacije bude postavljena na vrijednost 100. Genetički algoritam mora da obezbjedi način da stalno, iz generacije u generaciju, poboljšava apsolutnu prilagođenost svake jedinke u populaciji, kao i srednju prilagođenost cijele populacije. To se postiže uzastopnom primjenom genetičkih operatora selekcije, ukrštanja i mutacije, čime se dobijaju sve bolja rješenja datog problema. Ovaj rad poslužio je za primjenu heurističkog tipa operatora ukrštanja, koje se pokazalo kao dobra osnova za izlazni rezultat. Pomoću ove funkcije dobija se potomak koji je bliži roditelju sa boljim svojstvima. Drugi operator kod kojeg je promijenjeno defaultno stanje je operator mutacije. Funkcija mutacije mijenja samo mali broj gena pojedine jedinke. Dovoljno je da samo jedna jedinka, posredstvom mutacije, izađe van prostora lokalnog optimuma i algoritmom će se izraditi nova populacija oko nje. Tada se

algoritam usmjerava u drugom pravcu. Tokom ispitivanja pokazalo se da najbolje rezultate daje opcija *Adaptfeasible* koja je definisana kao prilagodljiva mutacija i obično se primjenjuje ako ograničenja jesu definisana što jeste slučaj u ovom zadatku.

Primjena genetičkog algoritma u svrhu optimalnog plana proizvodnje odnosno nabavke električne energije za dan unaprijed, pokazalo se vrlo efikasno i primjenjivo u praksi. Prilagođenost genetičkog algoritma problemu optimizacije pogona definisana je kroz tri različita scenarija koji predstavljaju polaznu osnovu za odabir agregata. Svaki od tri navedena scenarija predstavlja karakteristične vremenske uslove koji su u direktnoj vezi sa izborom i načinom rada elektrane. Broj scenarija je proizvoljan i ono može zavisi od složenosti sistema za koji se traži rješenje ili od preciznosti rezultata koji se žele dobiti. U radu su prikazani rezultati algoritma kroz 6 primjera koji pokrivaju različite situacije i najčešća stanja mreže. Kompletan algoritam čine 9 m-fajlova, 4 excel fajla i dva podatka koja se unose ručno pri pokretanju algoritma. Kao rezultat, algoritam daje plan proizvodnje svake elektrane pojedinačno za dan unaprijed u rezoluciji od jednog sata u grafičkoj formi, numeričkim prikazom procentualnog udjela na komandnom prozoru Matlab-a kao i ispisivanjem rezultata u tabelarnoj formi (excel), takođe u satnoj rezoluciji.

Primjenom genetičkog algoritma dobili su se rezultati koji su ocijenjeni kao zadovoljavajući i koji se mogu primijeniti u praksi. Kao ocjena efikasnosti rezultata izvršila se komparacija rezultata dobijenih genetičkim algoritmom sa rezultatima metode linearnog programiranja, pri čemu su se koristili isti ulazni podaci. Iz pomenute komparacije zaključilo se da genetički algoritam, osim što daje daleko kvalitetnije rezultate, ima veću fleksibilnost na promjene okruženja. Takođe, da genetički algoritam daje ekonomski isplativije rezultate, pokazalo se prilikom poređenja cijena sa referentne HUPX berze i procijenjenim troškovima nastalim pri korišćenju genetičkog algoritma.

Doprinos ovog rada ogleda se u činjenici da se pomoću performansa genetičkog algoritma, osim sistemske stabilnosti, mogu iskontrolisati i troškovi proizvodnje, odnosno uvoza električne energije, u vremenu kada se sve više suočavamo sa izazovima proizvodnje iz obnovljivih izvora. S obzirom na izuzetnu fleksibilnost genetičkog algoritma, dalja istraživanja i unaprijeđenja rada moguća su poboljšanjem genetičkog algoritma kroz dinamičko uvezivanje programa sa sistemima za mjerenje, prognozu i cijenama sa berze, pri čemu bi se optimalan vozni red ažurirao na par sati prije posmatranog sata.

6. Literatura

- [1] V. Matošević, "Regulacija vjetrogeneratora u kritičnom području", 2018, str. 9.
- [2] Annual combined onshore and offshore wind energy statistics, Wind power 2017, Wind Europe.
- [3] S. Škuletić, "Elektrane", Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, str. 309.
- [4] B. Radičević, D. Mikičić, "Savremena rešenja za dobijanje električne energije u vetroelektranama male i velike snage", Poljoprivredni fakultet, Beograd, 2006, str. 5.
- [5] N. Dizdarević, "Pogon asinhronog generator s dvostranim napajanjem (DFIG izvedba) u prijelaznim stanjima vjetroelektrane", Energetski institute Hrvoje Požar, Zagreb, Hrvatska, str. 1.
- [6] "Procjena potencijala obnovljivih izvora energije u Republici Crnoj Gori", CETMA, str. 3-8, 2007.
- [7] M. Klarić i H. Salkić, "Regulacija napona i jalove snage vjetroelektrana", CIGRE, str. 3, 2012.
- [8] "Pravila za funkcionisanje prenosnog sistema Crne Gore", CGES, član 60, 2011.
- [9] "Tehnička preporuka za priključenje distribuiranih izvora u Crnoj Gori", Ministarstvo ekonomije, Crna Gora, str. 15, 2012.
- [10] "Zaštita prirode i razvoj vjetroelektrana u Srbiji", UNDP, str.33-38, 2013.
- [11] M. Klarić, "Predviđanje djelatne izlazne snage vjetroelektrane uporabom kaskadno-korelacijskih neuronskih mreža", Dalekovod d.d. Zagreb, str. 1-2.
- [12] P. Dragan, "Primena fuzzy logike i veštačkih neuronskih mreža u procesu donošenja odluke organa saobraćajne podrške", Vojna akademija, Beograd, str. 128.
- [13] H. Madsen, H.A. Nielsen i T.S. Nielsen, "A tool for predicting the wind power production of off-shore wind plants", Informatics and Mathematical Modelling Technical University of Denmark.
- [14] M. Petrović, "Osnovi veštačkih neuronskih mreža i značaj njihove primene", str. 8, 2011.
- [15] D. Vukčević, "Primena fazi odlučivanja u procesu kreditnog scoringa", Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, 2018.
- [16] P. Dragan, "Primena fuzzy logike i veštačkih neuronskih mreža u procesu donošenja odluke organa saobraćajne podrške", Vojna akademija, Beograd, str. 134.

- [17] S. M. Seyedian i H. Rouhani, "Assessing ANFIS accuracy in estimation of suspended sediments", str. 2, 2015.
- [18] I. Vujošević: "Analiza elektroenergetskih sistema I", Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, str. 157.
- [19] M. Vištica, "Problem trgovačkog putnika, Sveučilište u Splitu", Prirodoslovno-matematički fakultet, str.12, 2012
- [20] V.S. Pappala, I. Erlich, K. Rohrig, J. Dobschinski, "A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system", IEEE, Vol 24, str. 943-944, 2009
- [21] M. Vujošević, "Uvod u optimizaciju", str. 3
- [22] D. Petković, M. Radovanović: "Primena genetskog algoritma za optimizaciju obradnih procesa na primjeru struganja", naučni rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, str 11-12.
- [23] J. Rajačić, "Rešavanje jednodimenzionog problema pakovanja kombinovanje optimizacionih metoda", Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu, str. 19, 2013
- [24] J. Kratica, "Paralelizacija genetskih algoritama za rešavanje nekih NP-kompletnih problema", Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Beograd, str.13, 2000
- [25] P. Stanojević, "Egzaktne i metaheurističke metode za rešavanje NP-teških lokacijskih problema", Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu, str. 13.
- [26] J. Zhu, "Optimization of Power System Operation", IEEE, str. 253-259, 2009
- [27] A. Ilić i A. Ilić "Uvod u dinamičko programiranje", Prirodno matematički fakultet u Nišu, str. 1.
- [28] M. Stanković, "Rešavanje nekih problema kombinatorne optimizacije algoritmom tabu pretraživanja", Univerzitet u Beogradu, str. 13, 2013
- [29] D. Džamić, "Rešavanje problema raspoređivanja poslova u višefaznoj proizvodnji sa paralelnim mašinama primenom hibridnih metaheurističkih metoda", Univerzitet u Beogradu, str. 4, 2014.
- [30] D. Tadić, G. Radojević, "Operaciona istraživanja", Fakultet za industrijski menadžment, Kruševac, str 15.
- [31] E. Salković, , "Genetički algoritmi i njihova praktična primjena", Univerzitet Crne Gore, str. 3, 2005
- [32] M. Šprljan, "Optimiranje nelinearnih funkcija cilja primjenom genetskih algoritama", Fakultet strojarstva i brodogradnje, str. 30-34, 2010
- [33] D. Domović: "Optimizacija rojem čestica", Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, str. 4, Zagreb 2008.

- [34] M.Golub, "Genetski algoritam", Prvi dio, str. 8, 2010
- [35] World energy council, "2010 Survey of energy resources", str. 14, 2010.
- [36] I. Vujošević, "Eksploatacija i planiranje EES", Elektrotehnički fakultet, Podgorica, str. 111, 2005.
- [37] "Pravila za funkcionisanje prenosnog sistema, CGES, član 179, 2011.
- [38] "Elaborat o priključenju VE Možura na prenosni sistem Crne Gore", Elektroenergetski koordinacioni centar, d.o.o, str. 11, 2016.
- [39] R. Mirković, Z. Miljanić, N. Daković, "Optimizacija rada proizvodnih objekata Elektroprivrede Crne Gore na day – ahead tržištu", CIGRE, str. 2, 2017.
- [40] I.M.Dumančić, "Genetski algoritmi" Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, str. 16, 2014.