

Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet, Podgorica



NIKOLINA MRAKOVIĆ
**OPTIMIZACIJA KORIŠĆENJA NAPONSKO-
REAKTIVNIH REGULACIONIH RESURSA U
PRENOSNOJ MREŽI PRIMJENOM GENETSKOG
ALGORITMA**
-MASTER RAD-

Podgorica, maj 2023. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Nikolina Mraković

Datum i mjesto rođenja: 04.11.1998. godine, Cetinje, Crna Gora

Naziv završenog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2020. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv osnovnih studija: Energetika i automatika, smjer Elektroenergetski sistemi

Naslov master rad: Optimizacija korišćenja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa u prenosnoj mreži primjenom genetskog algoritma

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

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: _____

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:

Komisija za ocjenu teme i podobnosti kandidata:

Prof. dr

Prof. dr

Prof. dr

Mentor: Prof. dr Zoran Miljanić

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr

Prof. dr

Prof. dr

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Saša Mujović
2. Prof. dr Zoran Miljanić
3. Prof. dr Vladan Radulović

Datum odbrane: _____

Datum promocije: _____

Ime i prezime autora: Nikolina Mraković, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

“Optimizacija korišćenja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa u prenosnoj mreži primjenom genetskog algoritma”

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Nikolina Mraković, BSC

Nikolina Mraković

U Podgorici, dana 25.05.2023. godine

Lista korišćenih skraćenica

ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimizacion
ALOA	Ant Lion Optimization Algorithm
AGPSO	Autonomous Groups Particle Swarm Optimization
AVCLk	Average violation of chargeability limits per operative scenario
AVVLk	Average violation of voltage limits per operative scenario
BFOA	Bacterial Foraging Optimization Algorithm
COA	Circular Optimization Algorithm
CPF	Continuation Power Flow
CSA	Cuckoo Search Algorithm
DE	Differential Evolution
DG	Distributed Generator
DSA	Differential Search Algorithm
EBBA	Evolutionary Based Bat Algorithm
FA	Firefly Algorithm
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
GA	Genetic Algorithm
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GSA	Gravitational Search Algorithm
IGA	Improved Genetic Algorithm
IGSA	Improved Gravitational Search Algorithm
IGWO	Improved Grey Wolf Optimizer
IHSA	Improved Harmony Search Algorithm
HBOA	Honey Bee Optimization Algorithm
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MLSA	Modified Lightning Search Algorithm
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
OPF	Optimal Power Flow
OPRF	Optimal Reactive Power Flow
PMU	Phasor Measurment Unit
PSO	Particle Swarm Optimization
PSS	Power system stabilizer
QBAGA	Queen Bee Assisted Genetic Algorithm
SA	Simulated Annealing
SCA	Sine Cosine Algorithm
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAR Compensator
TCSC	Thyristor-Controlled Series Compensator
THD	Total Harmonic Distortion
TS	Tabu Search

UPFC	Unified Power Flow Controller
VCL _L	Violation of chargeability limits per line
VPI	Voltage Performance Index
VSI	Voltage Stability Index
VVL _n	Violation of voltage limits per node
WOA	Whale Optimization Algorithm

Predgovor

Motiv za usmjeravanje istraživačkog rada u pravcu primjene metaheurističkih optimizacionih tehnika proistekao je kao težnja za pronalaskom adekvatnog matematičkog aparata za rješavanje problema iz oblasti naponsko reaktivne regulacije kako bi se prevazišli nedostaci koji se u tom slučaju javljaju kod tradicionalnih metoda. Na sve intenzivnije zahtjeve potrošačkog konzuma, koji posljednjih decenija bilježi rastući trend, pokušava se odgovoriti vodeći se tehnoekonomskom logikom, na način da se na najefikasniji način iskoriste već postojeći resursi, a ukoliko je to potrebno, da ulaganja u nove ne budu investiciono zahtjevna.

Napuštanjem vertikalno integrisane strukture elektroenergetskog sistema, kroz procese deregulacije i uvođenja konkurentnog tržišta električne energije, započet je proces modernizacije cjelokupnog elektroenergetskog sektora. U domenu proizvodnje, ovo je značilo da se pored konvencionalnih elektrana čiji je rad dominantno zasnovan na potrošnji fosilnih goriva, razmatraju i neke alternativne mogućnosti, poput proizvodnje iz neupravljivih izvora energije. Samo priključenje ovakvih izvora, a kasnije i eksploatacija, donijelo je sa sobom brojne izazove koji su zadatak upravljanja i eksploatacije elektroenergetske mreže učinili kompleksnijim. Usljed visoke penetracije OIE, naponske prilike su danas izložene dodatnim fluktuacijama, jer se osim varijacija u potrošnji sada javljaju i varijacije u proizvodnji. Stoga je jasno da regulacija napona ostaje aktuelna oblast na kojoj se intenzivno radi.

Problem optimalne alokacije naponsko reaktivnih regulacionih resursa uveliko je razmatran u domenu planiranja i upravljanja elektroenergetskim sistemom kako bi se naponski profil, kao jedan od najvažnijih aspekata pogona neke mreže, održao u okviru zadatih granica. U tu svrhu primjenjuju se sinhroni generatori, sinhroni kompenzatori, regulacioni transformatori, statički regulisani izvori reaktivne snage (npr. regulisane otočne baterije kondenzatora), distribuirani generatori, a zahvaljujući napretku na polju energetske elektronike, i brojni uređaji za fleksibilni prenos električne energije (FACTS). Prilikom ugradnje ovih uređaja dolazi do izmjene postojeće topologije EES-a. Zbog toga je od suštinskog značaja da se već u fazi planiranja posveti dovoljna pažnja njihovom pravilnom dimenzionisanju sa stanovišta odabira adekvatne snage, te da se za njihovu instalaciju odaberu pogodne lokacije.

Cilj ovog istraživanja je razvoj metode koja se može iskoristiti za rješavanje problema optimalne alokacije naponsko reaktivnih resursa. Očekivani rezultat naučnoistraživačkog rada je određivanje lokacija i snaga minimalno potrebnog broja uređaja za kompenzaciju reaktivne snage s ciljem poboljšanja naponskog profila. Odabirom minimalne snage dodatih uređaja nastoji se pronaći ekonomski najprihvatljivije rješenje koje ispunjava sve tehničke kriterijume. Predloženi metod će biti implementiran u softverskom paketu MATLAB, za potrebe simulacija i komparativne analize u odnosu na raspoložive metode u literaturi.

Izvod rada

Fokus ovog rada je određivanje minimalnog broja naponsko-reaktivnih uređaja koje je potrebno integrisati u sistem, s ciljem rješavanja problema naponsko reaktivne regulacije, kako bi se naponski profil održao u okviru postavljenih granica. Opštost primjene predložene metode ogleda se u činjenici da u radu nije striktno definisano o kom tipu uređaja se radi, a budući da su uređaji modelovani preko injektirane/absorbovane reaktivne snage u čvoru u kom se priključuju, to znači da se predložena metoda može primijeniti pri razmatranju optimalne alokacije bilo kojeg uređaja koji se koristi za otočnu kompenzaciju.

Genetički algoritam je odabran za određivanje lokacija i snaga uređaja, dok je proračun strujno naponskih prilika izveden koristeći *Newton Raphson*-ov iterativni postupak. Iako je binarno kodiranje najčešće zastupljeni tip reprezentacije promjenjivih kod genetičkog algoritma, zbog same prirode varijabli, a takođe radi postizanja preciznosti proračuna, odabrana je kombinacija cjelobrojnog i kodiranja realnim brojevima. Na taj način se uvodi pretpostavka da je reaktivna snaga dodatih uređaja kontinualna promjenjiva. Iako su u praksi ove veličine standardizovanih vrijednosti, takav pristup bi ovdje mogao da dovede do pogrešnog zaključka po pitanju minimalnog broja uređaja.

Kriterijumska funkcija optimizacionog problema minimizuje broj i ukupnu snagu dodatih kompenzacionih uređaja. Za potencijalne lokacije instalacije uređaja u razmatranje su uzeti isključivo PQ čvorovi, pod pretpostavkom da se naponi na sabirnicama generatora održavaju na konstantnoj vrijednosti. Efikasnost predložene metode testirana je za različite tolerancije maksimalno dozvoljenog odstupanja napona u svim čvorovima sistema, dok su modularnost i skalabilnost tehnike pokazani koristeći preporučene IEEE testne sisteme različitih veličina.

Na osnovu izloženih rezultata zaključuje se da se predložena metoda može koristiti za optimalnu alokaciju regulacionih uređaja, čiji broj, lokacije i snaga zavise od početnog stanja sistema, njegove topologije i usvojenih ograničenja. Uspješnost algoritma zavisi i od odabira odgovarajućih tipova operatora genetičkog algoritma. Takođe, ograničenje predstavlja i sama procedura inicijalizacije pretraživačkog prostora koja je određena nasumično odabranom početnom populacijom jedinki. Upravo je stohastika kao neizostavni dio metode, glavni nedostatak genetičkog algoritma, jer se može desiti da algoritam ne pronađe optimalno rješenje svaki put. Dodatno, brzina izvršavanja programa predložene metode uslovljena je procesorkom moći korišćenog računara. Međutim, treba imati u vidu da je predložena metoda predviđena za planerske studije, a ne real-time analize.

Ključne riječi: genetički algoritam, optimalna alokacija, *Newton Raphson*, naponsko reaktivni regulacioni resursi

Abstract

The focus of this paper is the determination of the minimum number of reactive power compensation devices that need to be integrated into the system, with the aim of solving the problem of voltage-reactive regulation, in order to maintain the voltage profile within the set limits. The generality of the proposed method is reflected in the fact that the paper does not strictly define what type of device it is, and since the devices are modeled via the injected/absorbed reactive power in the node where they are connected, this means that the proposed method can be applied when considering optimal allocation of any device used for parallel compensation.

Genetic algorithm was chosen to determine the locations and power of the devices, while the calculation of current and voltage conditions was performed using Newton-Raphson's iterative procedure. Although binary coding is the most common type of representation of variables in genetic algorithm, due to the nature of the variables, as well as to achieve calculation precision, a combination of integer and real number coding was chosen. In this way, the assumption that the reactive power of the added devices is continuously variable is introduced. Although in practice these sizes are standardized values, such approach could lead to a wrong conclusion regarding the minimum number of devices.

The criterion function of the optimization problem minimizes the number and total power of added compensating devices. For potential device installation locations, only PQ nodes were taken into consideration, assuming that the voltages on the generator buses are maintained at a constant value. The effectiveness of the proposed method was tested for different tolerances of the maximum allowed voltage deviation in all nodes of the system, while the modularity and scalability of the technique were demonstrated using recommended IEEE test systems of different sizes.

Based on the presented results, it is concluded that the proposed method can be used for the optimal allocation of regulatory devices, whose number, location and power depend on the initial state of the system, its topology and adopted limitations. The success of the algorithm also depends on the selection of appropriate types of genetic algorithm operators. Also, the initialization procedure of the search space, which is determined by a randomly selected initial population of individuals, also represents a limitation. Stochastic, as an indispensable part of the method, is the main drawback of the genetic algorithm, because it may happen that the algorithm does not find the optimal solution every time. Additionally, the speed of program execution of the proposed method is conditioned by the processing power of the used computer. However, it should be borne in mind that the proposed method is intended for planning studies, not real-time analysis.

Keywords: genetic algorithm, optimal allocation, *Newton-Raphson*, MATLAB, voltage reactive control resources

Posebnu zahvalnost, prije svega, dugujem mentoru, prof. dr Zoranu Miljaniću za izdvojeno vrijeme, strpljenje i nebrojene savjete koji su mi pomogli pri izradi istraživačkog rada.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima za pruženu podršku i što su bili tu uz mene.

Veliku zahvalnost dugujem mom ocu, za nesebičnu ljubav, i što mi je bio ogromna potpora tokom cjelokupnog školovanja.

Na kraju, ovaj rad posvećujem svojim roditeljima, kao simbol najveće zahvalnosti jer su me izveli na pravi put.

Nikolina Mraković

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Regulacija napona i reaktivnih snaga	6
2.1 Osnovni ciljevi regulacije napona i reaktivnih snaga	7
2.2. Organizaciona struktura regulacije napona i reaktivnih snaga	7
2.3. Naponsko-reaktivni regulacioni resursi	8
3. Optimizacija naponskih prilika u EES	11
3.1. Modelovanje optimizacionog problema	11
3.1.1. Kriterijumska funkcija	12
3.1.2. Ograničenja pri rješavanju optimizacionog problema	12
3.2. Pregled optimizacionih metoda	14
3.2.1. Klasične metode	14
3.2.1.1. Njutnova metoda	15
3.2.2. Savremene metode optimizacije	17
3.2.2.1. Tabu pretraga	18
3.2.2.2. Simulirano kaljenje	19
3.2.2.3. Optimizacija kolonijom mrava	19
3.2.2.4. Optimizacija rojem čestica	21
4. Genetički algoritam	23
4.1. Glavne karakteristike metode	24
4.1.1. Fitness funkcija	24
4.1.2. Operatori genetičkog algoritma	25
4.1.3. Operatori ukrštanja i mutacije kod kodiranja realnim brojevima	28
4.2. Kriterijum za zaustavljanje	29
4.3. Izbor parametara genetičkog algoritma	30
5. Implementacija predložene metode	31
5.1. Opis problema i primijenjene metode	31
5.2. <i>Newton-Raphson</i> -ov postupak za proračun tokova snaga	32
5.3. Formulacija genetičkog algoritma	33
6. Rezultati proračuna	35
6.1. IEEE 14	36

6.2. IEEE 30	39
6.3. IEEE 57	43
6.4. IEEE 118	46
6.1.5. Poređenje sa drugim metaheurističkim tehnikama	49
7. Zaključak	53
Literatura	55
Prilog 1	62
P.1. Sistem IEEE 14	62
P.1. Sistem IEEE 30	62
P.3. Sistem IEEE 57	64
P.4. Sistem IEEE 118	66

1. Uvod

Napuštanjem vertikalno integrisane strukture tradicionalnih elektroenergetskih sistema i ukidanjem monopola u elektroprivrednoj djelatnosti, započet je proces modernizacije cjelokupnog elektroenergetskog sektora, koji je donio brojne novine u svim sferama elektroenergetike. Najveće izmjene zadesile su podsistem proizvodnje, jer je zahvaljujući otvaranju tržišta električne energije, koje stimulira konkurentnost među svim svojim učesnicima, došlo do značajnog povećanja broja proizvođača električne energije. Osim toga, izuzetan pomak napravljen je i u samom konceptu proizvodnje.

Naime, u tradicionalnim elektroenergetskim sistemima, proizvodnja se dominantno oslanjala na konvencionalne elektrane kod kojih rezerve i raspoloživost korišćenog goriva determinišu proizvodnu moć jedinice. Međutim, pored kontrolabilnosti i fleksibilnosti proizvodnih jedinica na fosilna goriva nikako se ne smije zanemariti njihovo štetno dejstvo na životnu sredinu. Iako se manjim elektroenergetskim sistemima, kakav je i crnogorski elektroenergetski sistem, najveći dio potreba za električnom energijom još uvijek podmiruje proizvodnjom iz konvencionalnih izvora, trend proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE) je već uveliko zaživio u svijetu. U razvijenijim državama, poput skandinavskih zemalja, se najveći dio energetske potreba obezbjeđuje proizvodnjom iz OIE. Usljed visoke penetracije OIE, naponske prilike su danas izložene dodatnim fluktuacijama, jer se osim varijacija u potrošnji sada javljaju i varijacije u proizvodnji. Diversifikacija proizvodnog miksa u smislu intenzivnije eksploatacije potencijala hidroelektrana, solarnih elektrana i vjetroelektrana označila je početak nove energetske ere.

Iako je evidentno je da je u svim djelovima elektroenergetskog sistema došlo do značajnog tehnološkog napretka, njegova je funkcionalna dekompozicija i primarna uloga u pogledu sigurnog, pouzdanog i ekonomičnog snabdijevanja potrošača dovoljnim količinama električne energije propisanog kvaliteta, ostala nepromijenjena. Povezivanje energetske izvora sa distributivnim sistemom, kao i umrežavanje susjednih EES-a u interkonekciji ne bi bilo moguće bez postojanja prenosnih mreža. Kako bi se istovremeno smanjili pad napona i gubici, a ujedno obezbjedila i ekonomičnost prenosa, prenosne mreže se realizuju kao mreže visokog i veoma visokog napona. Konkretno, u našem EES-u nazivni naponi prenosnih mreža su 110, 220 i 400 kV, dok u većim, razvijenijim sistemima i do 750 kV, 1000 kV do 1500 kV.

Padove napona u savremenim EES-ima naizmjenične struje izazivaju tokovi snaga kroz impedanse osnovnih elemenata mreže. Budući da je karakteristika prenosnih mreža mala vrijednost odnosa R/X , ovaj fenomen se posebno odnosi na prenosne mreže, gdje do izražaja dolaze induktivnosti i kapacitivnosti njihovih osnovnih elemenata (vodovi i transformatori) koje se suprotstavljaju tokovima reaktivnih snaga. Kompenzacija tih padova napona predstavlja osnovni cilj svih rješenja problema regulacije napona i reaktivnih snaga. Navedeni problem je u određenim slučajevima moguće riješiti optimalnim korišćenjem postojećih resursa, odnosno njihovim prepodešavanjem. Sa druge strane, ukoliko postojeća sredstva nisu sposobna da ispune zahtjeve za reaktivnom snagom, tada se javlja potreba za integracijom dodatnih uređaja.

Optimalna alokacija naponsko-reaktivnih resursa podrazumijeva izbor povoljne lokacije i snage dodatnih uređaja. Za rješavanje ovog, ali i ostalih optimizacionih problema iz oblasti

planiranja i upravljanja elektroenergetskim sistemima, autori su predložili različite pristupe koristeći brojne klasične, ali i napredne - metaheurističke metode.

Optimalna alokacija distribuiranih generatora razmatrana je u [1] i [2], koristeći klasični analitički postupak za minimizaciju gubitaka i odstupanja napona u prvom, odnosno kombinaciju analitičkog i genetičkog algoritma (GA) za minimizaciju gubitaka u drugom slučaju. U [1] su gubici izraženi kao funkcija aktivnih injektiranja generatora i potrošača, dok su u [2] predstavljeni kao funkcija snage proizvodnje različitih proizvodnih jedinica, prema modelu koji tretira matrice osjetljivosti gubitaka. Za optimalnu alokaciju distribuiranih generatora od strane autora u [3] je predložen hibridni algoritam, gdje se pogodnim izborom lokacije i dimenzionisanjem uređaja nastoje postići minimalni gubici, devijacija napona i zbirni indeks naponske stabilnosti svih čvorova sistema. Primijenjena procedura se sastoji iz dva dijela, gdje se identifikacija pogodnih lokacija vrši primjenom PLI (*Power Loss Index*) metode, a određivanje snage dodatih uređaja primjenom genetičkog algoritma. Metoda *Ant Colony Optimization* (ACO) je korišćena u [4] za optimalnu alokaciju distribuiranih generatora kako bi se postigli minimalni gubici u sistemu, a takođe i u [5] za rješavanje problema optimalnih tokova snaga (OPF) u mreži kako bi troškovi proizvodnje generatora bili minimalni. Problem optimalne alokacije distribuirane proizvodnje u distributivnoj mreži predstavljen je kao višekriterijumski problem, i rješavan uz pomoć metode *Ant Lion Optimization Algorithm* (ALOA) u [6]. Prvi dio optimizacije odnosi se na redukciju energije preuzete iz distributivne mreže, povećanje pouzdanosti napajanja tokom poremećaja i minimizaciju troškova instalacije DG-a, dok se drugi dio multikriterijumske funkcije odnosi na redukciju gubitaka u prisustvu DG. U [7] su autori takođe koristili ALOA za optimalnu alokaciju *shunt* kondenzatora kako bi se postigao minimum devijacije napona i gubitaka aktivne snage, gdje je zahvaljujući zapisu objektivne funkcije koristeći težinske koeficijente moguće odabrati prioritet optimizacije, pogodnim podešavanjem odnosa koeficijenata. U [8] je za rješavanje problema optimalne alokacije obnovljivih izvora energije (OIE) predložena metoda *Improved Gravitational Search Algorithm* (IGSA), kojom se nastoji postići poboljšanje parametara kvaliteta električne energije posredstvom redukcije gubitaka aktivne snage, devijacije napona i ukupne harmonijske distorzije (THD). Optimalna lokacija sistema solarnih panela može se odrediti na osnovu klasičnog proračuna tokova snaga, primjenom *Newthon-Raphson*-ovog metoda [9], dok se *Tabu Search* (TS) predložena od strane autora u [10] može iskoristiti za određivanje optimalnih parametara solarnog panela. Poboljšanje naponskih prilika i minimizacija gubitaka u distributivnoj mreži posredstvom distribuirane proizvodnje razmatrana je u [11] koristeći BAT algoritam, vodeći pritom računa i o minimalnim troškovima ugradnje instaliranih uređaja. Autori su u [12] primijenili *Whale Optimization Algorithm* (WOA) je primijenjen za optimalnu alokaciju *shunt* kondenzatora u radijalnoj distributivnoj mreži kako bi se optimizovali operativni troškovi i troškovi instalacije pomenutih uređaja. Ovaj metod je testiran na mrežama od 34 i 85 čvorova. U [13] su autori takođe predložili primjenu WOA algoritma za optimalnu alokaciju *Battery Energy Storage System* (BEES) sistema. Optimizaciona metoda je testirana na mreži od 50 čvorova, dok je odabir lokacija i dimenzionisanje uređaja za skladištenje energije urađen za slučajeve sa i bez prisustva distribuirane proizvodnje. Za rješavanje problema optimalne raspodjele reaktivnih snaga (ORPF) autori su u [14] predložili ACO. Kod ovog rada su gubici aktivne snage odabrani kao funkcija cilja, a isti su izraženi preko koeficijenata osjetljivosti promjene gubitaka na promjenu kontrolnih varijabli - napona i reaktivne snage generatora. Metoda *Improved Genetic Algorithm* (IGA) je predložena u [15] za rješavanje problema optimalnog angažovanja agregata, minimizujući osim operativnih troškova proizvodnje jedinica i troškove neophodne za njihovo startovanje. Isti problem može se rješavati u kontekstu minimizacije troškova proizvodnje generatorskih jedinica ili maksimizacije profita proizvodnih kompanija, koristeći metodu *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) koja je predložena od strane autora u [16].

Optimalna rekonfiguracija distributivne mreže sa aspekta minimalnih gubitaka postignuta je primjenom *Simulated Annealing* (SA) u [17] i [18]. Isti algoritam je predložen od strane autora u [19] za rješavanje problema planiranja optimalnog angažovanja agregata minimizujući troškove proizvodnje agregata, a takođe i u [23], gdje su troškovi termo jedinica predstavljeni kao kubna funkcija njihove odate izlazne snage. Simulirano kaljenje je upotrijebljeno i u [20] za određivanje lokacije, tipa i dimenzija izvora reaktivne snage, kao i podešavanja samih uređaja u uslovima različitog opterećenja. Tehnoekonomska analiza planiranja proširenja prenosne mreže uvažavajući ekonomske zahtjeve instalacije novih vodova, poštujući tehnička ograničenja, izvršena je primjenom napredne varijante algoritma simuliranog kaljenja u [21]. Minimizacija gubitaka u prenosnoj mreži može se postići optimalnom raspodjelom reaktivne snage između generatora u pogonu ili izborom optimalnog podešavanja položaja regulacione sklopke kod regulacionih transformatora. Oba navedena problema mogu se riješiti primjenom metode *Evolutionary Programming* (EP) što je pokazano u [22]. Kombinacija GA, SA i tehnika teorije grafova primijenjena je u [23] za višekriterijumsku rekonfiguraciju distributivnog sistema, minimizujući gubitke aktivne snage, nesimetriju opterećenja, odstupanje napona i broj manipulacija rasklopnom opremom. Tabu pretraga je predložena u [24] za naponsko-reaktivnu optimizaciju, kako bi se postigao minimum funkcije cilja koja obuhvata troškove aktivnih gubitaka, odate reaktivne snage generatorskih jedinica, odstupanja položaja regulacione sklopke regulacionog transformatora u odnosu na neutralnu poziciju, kao i penalizacione faktore kojima se uvažavaju kršenja usvojenih limita po pitanju granica za amplitudu napona i dopuštenog regulacionog opsega generatora. Tabu pretraga može da posluži i kao alat za rješavanje rekonfiguracije distributivne mreže [25], dok je u [26] korišćena za određivanje maksimalne prividne snage distribuiranih generatora kako bi se postigla koordinacija upravljivih jedinica distribuirane proizvodnje i uređaja za kontrolu napona. Tabu pretraga je u [27] korišćena za identifikaciju pogodnih lokacija i snaga DG i FACTS uređaja, kojima se nastoje postići minimalni zbirni troškovi, koji su uključuju instalacione troškove, troškove proizvodnje aktivne i reaktivne snage svih uređaja, kao i troškove nastale usljed gubitaka. Za određivanje optimalnih lokacija regulatora napona u distributivnom sistemu u [28] je korišćena metoda koja predstavlja kombinaciju GA i TS. U prvom dijelu ovog rada se koristi genetički algoritam kako bi se pronašli regioni pretraživačkog prostora u kojima su prepoznati lokalni minimumi problema. Potom je tabu pretraga korišćena za napredniju lokalnu pretragu, kako bi se među pronadjenim potencijalnim kandidatima izdvojilo globalno optimalno rješenje. Metoda *Integer Programming* (IP) je izložena u [29] za odabir optimalnih lokacija *Phasor Measurement Unit* (PMU) uređaja u nastojanju da se sa minimalnim brojem uređaja uzimajući u obzir redudansu mjerenja postigne opservabilnost sistema. *Particle Swarm Optimization* (PSO) je iskorišćen u [30] za poboljšanje naponskog profila, razmatrajući isključivo devijaciju napona kao kriterijumsku funkciju. Isti algoritam je odabran i u [18] za rješavanje problema optimalnog dispečinga reaktivnih snaga kod kojeg funkcija cilja osim devijacije napona dodatno uključuje gubitke i indeks naponske stabilnosti.

Zahvaljujući napretku u razvoju tehnologija poluprovodničkih komponenti, u naponsko reaktivnoj regulaciji primjenu su našli i brojni FACTS uređaji: SVC (*Static VAR Compensator*), TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensation*), UPFC (*Unified Power Flow Controller*), STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) i drugi.

Optimalno dimenzionisanje SVC-a sa stanovišta idealne lokacije i veličine susceptanse sa ciljem minimizacije gubitaka reaktivne snage primjenom GA izvršeno je u [31], dok je u [32] isti algoritam primijenjen za optimalnu alokaciju SVC-a u nastojanju da se postignu minimalno odstupanje napona i troškovi instalacije SVC-a. U [33] je primijenjen drugačiji pristup optimalne alokacije SVC-a: analiza osjetljivosti je iskorišćena za određivanje lokacije

uređaja, dok je Firefly Algorithm (FA) korišćen za odabir optimalnog podešavanja uređaja. Autori su u [34] predložili *Improved Harmony Search Algorithm* (IHSA) za optimalnu alokaciju SVC-a kako bi se minimizovala kriterijumska funkcija koja uključuje gubitke aktivne snage, devijaciju napona i investicione troškove kompenzatora reaktivne snage. Funkcija cilja je dopunjena penalizacionom funkcijom kako bi se uvažila tehnička ograničenja po pitanju limita za amplitudu napona i dopušteno opterećenje vodova. U [35] je metoda zasnovana na fazi logici korišćena za određivanje optimalne lokacije SVC, dok je susceptansa određena koristeći PSO optimizaciju. Minimizacija gubitaka je izvršena na sistemima od 14 i 30 čvorova, pri različitim nivoima opterećenja. Redukcija gubitaka je takođe razmatrana u [36], gdje su autori za optimalnu alokaciju distribuirane proizvodnje u distributivnoj mreži uz prisustvo SVC-a predložili adaptivni *Differential Search Algorithm* (DSA) metod. Autori su u [37] koristili kombinaciju simuliranog kaljenja i adaptivnog PSO algoritma za optimalnu alokaciju FACTS uređaja, minimizujući troškove instalacije dodatih uređaja, ukupne gubitke aktivne snage i prekoračenja prenosnih kapaciteta vodova. U [38] je pokazano da je umjesto PSO za optimizaciju višekriterijumske funkcije koja objedinjuje indeks naponske stabilnosti, troškove proizvodnje generatora, gubitke, odstupanje napona i troškove za instalaciju SVC-a pogodnije koristiti GA. Pogodne lokacije za ugradnju SVC-a i TCSC-a moguće je identifikovati birajući najslabije tačke u mreži na osnovu proračunatih indeksa naponske stabilnosti, a za određivanje optimalnih snaga datih uređaja može se primijeniti PSO [39]. Za optimalnu alokaciju serijskih i shunt FACTS uređaja kako bi se postigli minimalni gubici i devijacija napona, autori su u [40] predložili metodu *Sine Cosine Algorithm* (SCA) algoritam. Proračun tokova snaga može da se iskoristi kako bi se odredile potencijalne lokacije za ugradnju SVC-a, TCSC-a i UPFC-a, dok se nakon toga tehnika *Differential Evolution* (DE) može iskoristiti kako bi se odredila optimalna snaga pomenutih uređaja, sa ciljem minimizacije gubitaka i poboljšanja naponskog profila [41]. ACO je korišćen za optimalnu koordinaciju PSS (*Power system stabilizer*) i SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) kontrolera u [42]. Problem alokacije UPFC-a s ciljem minimizacije gubitaka, a pritom uvažavajući njegove troškove instalacije, razmatran je u [43]. Optimalna alokacija različitih FACTS uređaja s ciljem poboljšanja prenosnih kapaciteta razmatrana je primjenom *Evolutionary Algorithm* (EA) u [44]. Podešavanje fuzzy kontrolera STATCOM-a je izvršeno primjenom GA u [45], dok su za njegovu optimalnu alokaciju autori u [46] predložili PSO algoritam. Kombinacija fazi logike i genetičkog algoritma sa realnim promjenjivim je predstavljena u [47] za optimalnu alokaciju STATCOM-a u prenosnoj mreži od 14 čvorova. Predloženi optimizacioni postupak minimizuje odstupanje napona, snagu dodatog uređaja i udaljenost optimalnog rješenja od tačke koja vodi sistem u nestabilnost. Evolutivna verzija BAT algoritma (EBBA) je korišćena u [49] za koordinisanu alokaciju DG i D-STATCOM-a sa ciljem minimizacije gubitaka. Optimalno podešavanje FACTS uređaja kako bi se postiglo poboljšanje naponske stabilnosti izvršeno je u [48] kombinujući adaptivni *Gravitational Search Algorithm* (GSA) i PSO. Problem optimalne raspodjele reaktivnih snaga u mreži s ciljem smanjenja naponske devijacije i gubitaka snage je u [49] riješena primjenom *Cuckoo Search Algorithm* (CSA). Isti algoritam je upotrijebljen od strane autora u [50] za optimalnu alokaciju SVC-a kako bi se uz minimalne gubitke i devijaciju napona postigli i najmanji troškovi instalacije pomenutih uređaja. U [51] je dat pregled i međusobno poređenje koje različiti FACTS uređaji imaju na naponski profil u mreži, dok je u [52] razmatran uticaj koji različiti FACTS uređaji imaju na ukupne gubitke u sistemu.

Na osnovu sažetka dostupne literature može se izvesti nekoliko zaključaka:

- Minimizacija gubitaka i devijacije napona su dva najčešća cilja koji se žele postići optimizacijom
- Metaheurističke tehnike se najčešće koriste samostalno ili u hibridnoj varijanti za optimalnu alokaciju naponsko-reaktivnih regulacionih resursa
- Autori u većini radova predlažu dekompoziciju problema, na način da se pogodne lokacije odrede primjenom nekog kriterijuma (npr. koristeći koeficijente osjetljivosti napona/gubitaka), a snage dodatih uređaja primjenom metaheurističkih metoda

Predmet istraživanja ovog rada je razvoj optimizacione metode koja se može koristiti kao planerski alat za optimalnu alokaciju minimalnog broja naponsko-reaktivnih regulacionih sredstava u prenosnoj mreži. Cilj optimizacije je da se strateškim raspoređivanjem i dimenzionisanjem uređaja postigne željeni naponski profil u mreži, pri različito definisanim tolerancijama odstupanja vrijednosti napona.

Predložena metoda je modelovana koristeći softverski paket MATLAB i testirana na IEEE testnim sistemima koji spadaju u kategoriju prenosnih mreža: IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 i IEEE 118, čime se dokazuje opštost njene primjene. Za potencijalne lokacije uređaja razmatrani su potrošački čvorovi, dok se usvojeni limiti amplitude napona odnose na sve čvorove, bez izuzetaka. Kvalitativna i kvantitativna analiza dobijenih rezultata je sprovedena na osnovu komparacije broja i snage dodatih uređaja dobijenih od strane drugih autora primjenom ostalih heurističkih tehnika, poštujući pritom razlike u odabiru kriterijumske funkcije i tretiranih ograničenja.

Struktura rada organizovana je kroz sedam poglavlja:

- U drugom poglavlju izloženi su osnovni ciljevi regulacije napona i reaktivnih snaga, sa razlikom koja postoji na nivou prenosne, odnosno distributivne elektroenergetske mreže. Izložena je hijerarhijska struktura regulacije napona i reaktivnih snaga u opštem smislu, a nakon toga data je klasifikacija i pregled najčešće korišćenih naponsko-reaktivnih regulacionih resursa.
- U trećem poglavlju opisana je struktura modelovanja optimizacionog problema u opštem smislu. Napravljena je paralela sa kriterijumskim funkcijama i ograničenjima koji se srijeću u optimizacionim problemima koji se tiču elektroenergetskih sistema. Nakon toga dat je pregled klasičnih i modernih metoda, uz detaljniji opis onih koje se najčešće srijeću u literaturi za rješavanje problema optimalne alokacije. Među predstavnicima klasičnih metoda odabrana je gradijentna metoda - Njutnov metod optimizacije. Od modernih metoda, tabu pretraga i simulirano kaljenje su odabrani kao predstavnici algoritama lokalne pretrage, optimizacija kolonijom mrava kao predstavnik konstruktivnih metaheuristike, dok je optimizacija rojem čestica izabrana kao predstavnik metoda zasnovanih na populaciji.
- U četvrtom poglavlju opisane su glavne karakteristike genetičkog algoritma. Posebna pažnja posvećena je opisu implementacije njegovih operatora. Dodatno, izdvojena je posebna razlika koja se javlja kod realizacije operatora ukrštanja i mutacije u slučaju kodiranja realnim brojevima.
- U petom poglavlju izložena je formulacija problema i dat predlog metode koja se može koristiti za rješavanje optimizacionog problema koji se sastoji u određivanju minimalno potrebnog broja i snage uređaja za naponsko reaktivnu regulaciju.
- U šestom poglavlju predstavljeni su rezultati proračuna usvajajući različite tolerancije napona svih čvorova sistema, pritom nastojeći da sve generatorske jedinice rade u okviru svog regulacionog opsega. Predložena metoda je testirana kroz

simulaciju na IEEE sistemima različitih veličina. Nakon toga, dato je poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima metaheurističkih tehnika iz dostupne literature na temu optimalne alokacije regulacionih resursa.

- U sedmom poglavlju dat je zaključak, nakon čega slijedi popis korišćene literature. U Prilogu 1 su navedeni osnovni podaci o mrežama korišćenih testnih sistema: IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57, IEEE 118.

2. Regulacija napona i reaktivnih snaga

Napon i učestanost su dva najznačajnija aspekta pogona elektroenergetske mreže koji zauzimaju važno mjesto u eksploataciji elektroenergetskih sistema (EES). Učestanost je globalni pokazatelj čija je vrijednost stacionarna u svim djelovima sistema čiji su generatori u sinhronizmu. Stoga se njena regulacija može ostvariti uspostavljanjem globalne ravnoteže između proizvedene i utrošene aktivne snage na nivou sistema. Sa druge strane, napon je lokalna karakteristika mreže. U svakom EES postoji više različitih visokonaponskih mreža različite vrijednosti nominalnog napona, povezanih posredstvom energetske transformatora, ali osim toga i u okviru mreža istog naponskog nivoa mogu da postoje izvjesne razlike u

vrijednosti napona. Razlog tome su padovi napona koji se javljaju usljed tokova aktivnih i reaktivnih snaga kroz induktivne i kapacitivne elemente mreže. Diversifikacija i koordinisano djelovanje naponsko reaktivnih regulacionih sredstava omogućava da se kompenzacijom padova napona, naponi u pojedinim tačkama elektroenergetskog sistema održavaju u zadatim granicama.

U poglavlju koje slijedi navedeni su osnovni koncepti i hijerarhijska organizacija regulacije napona i reaktivnih snaga. Nakon toga, dat je pregled najčešće korišćenih regulacionih resursa.

2.1 Osnovni ciljevi regulacije napona i reaktivnih snaga

Padovi napona u EES nastaju usljed postojanja induktivnih i kapacitivnih elemenata mreže koji se suprotstavljaju tokovima aktivnih i reaktivnih snaga. Najizraženije padove napona izazivaju prije svega reaktanse elemenata koje se suprotstavljaju tokovima reaktivnih snaga. Zbog toga je jasna sprega između regulacije napona i reaktivnih snaga.

Primarni cilj regulacije napona i reaktivnih snaga u normalnom radnom režimu je da se putem održanja ravnoteže između proizvedene i apsorbirane reaktivne snage u sistemu omogući održanje napona u čvornim tačkama sistema u okviru propisanih granica. Polazeći od činjenice da je EES složen, dinamički sistem sastavljen od velikog broja međusobno povezanih elemenata, kao i to da su varijacije napona pojave dinamičke prirode, neophodno je obezbijediti tehnička sredstva koja mogu da ispune taj poduhvat, i čije dejstvo pritom ni na koji način neće ugroziti primarnu ulogu sistema. Ciljevi regulacije napona se različito definišu za distributivne, odnosno prenosne elektroenergetske mreže.

Osnovni ciljevi regulacije napona u distributivnim mrežama okrenuti su zahtjevima potrošača, odnosno postizanju pogonske sigurnosti potrošačkih aparata koji se dimenzionišu za konstantan napon. Konstrukcije karakteristike ovih uređaja diktiraju nominalne radne uslove i dozvoljene tolerancije prema naponu. Kontrola napona se u distributivnoj mreži postiže održanjem željene veličine napona u napojnim tačkama i kompenzacijom faktora snage potrošača.

Osnovni ciljevi regulacije napona u prenosnim mrežama okrenuti su zahtjevima sigurnosti i ekonomičnosti samog EES-a, odnosno održanju stabilnosti sistema i ograničenju prenosa prekomjernih iznosa reaktivne snage, čime se utiče na redukciju gubitaka aktivne snage.

Budući da je odnos ekvivalentne otpornosti i reaktanse R/X značajno manji u prenosnim mrežama, jasno je da su padovi napona izraženiji na višim naponskim nivoima. Stoga se u prenosnim mrežama dopušta širi opseg tolerancije odstupanja napona (u odnosu na nominalnu vrijednost) u poređenju sa distributivnim mrežama. Propisima se definišu vrijednosti od 10%, odnosno 5%, respektivno.

2.2. Organizaciona struktura regulacije napona i reaktivnih snaga

Organizaciona struktura naponsko-reaktivne regulacije podijeljena je na tri nivoa:

- primarna regulacija

- sekundarna regulacija
- tercijarna regulacija

Primarna regulacija napona se ostvaruje djelovanjem regulatora pobude sinhronih masina, regulatora položaja regulacionih otcjepa transformatora i regulatora napona kod statičkih kompenzacionih sistema. Ukoliko regulatori učestvuju samo u primarnoj regulaciji, podešavanje njihovih referentnih ulaza moguće je sprovesti ručno, dok ukoliko učestvuju i u primarj i u sekundarnoj regulaciji, podešavanje je moguće ostvariti automatski, posredstvom superponiranih sekundarnih regulatora. Regulacioni transformatori koriste se za kompenzaciju sporih i trajnih promjena napona, dok sinhroni generatori i kompenzatori mogu da kompenzuju i brze i spore promjene [53].

Sekundarna regulacija se sprovodi po manjim regulacionim oblastima pomoću sekundarnog regulatora zone. Podjela mreže na regulacione zone vrši se na osnovu usvojenog tehničko-ekonomskog kriterijuma. Potom se u svakoj oblasti formira centar upravljanja koji ima zadatak mjerenja napona i aktivnih i reaktivnih snaga po granama u sopstvenoj zoni i proračunavanje njihovog odstupanja od referentnih vrijednosti napona u čvorovima i razmjene reaktivnih snaga sa susjednim oblastima. Proračunate vrijednosti odstupanja napona u kontrolabilnim čvorovima se uvode u sekundarni regulator napona i reaktivnih snaga, na čijem izlazu su naredbe za promjenu podešavanja na regulatorima napona primarnih regulacionih resursa.

Tercijarna regulacija realizuje se globalno na nivou sistema, i ima za cilj da omogući koordinisano djelovanje sekundarnih regulatora zona i programiranje angažovanja raspoloživih regulacionih resursa. Tercijarna regulacija je *off-line* proces, kod kojeg se u okviru operativnog planiranja pogona sistema sprovodi proračun optimalnih tokova snaga s ciljem određivanja referentnih vrijednosti podešavanja napona sekundarnih regulatora zona i/ili referentnih ulaza regulatora primarnih regulacionih resursa. Dodatno, zadatak tercijarne regulacije je i odlučivanje o angažovanju uređaja za proizvodnju/apsorpciju reaktivne snage, odnosno otočnih kondenzatora i reaktora, za koje se pravi raspored rada za svaki sat pojedinačno. Ukoliko se proračunate vrijednosti napona i reaktivnih snaga značajno razlikuju od stvarnih, tada se na nivou tercijarne regulacije donose korekcione naredbe za prepodešavanje sekundarnih regulatora zona, kojima se indirektno utiče na promjenu referentnih ulaza regulatora napona primarnih regulacionih resursa.

Uočljivo je se da se prostorna i vremenska dekompozicija regulacije napona i reaktivnih snaga poklapaju:

Tabela 2.1. Vremenska i prostorna dekompozicija regulacije napona i reaktivnih snaga

Regulaciono dejstvo	Primarno	Sekundarno	Tercijarno
Odziv	Brz	Spor	Vrlo spor
Nivo primjene	Jedinica	Dio mreže (zona)	Čitava mreža

2.3. Naponsko-reaktivni regulacioni resursi

Često se termini naponsko-reaktivni resursi i naponsko-reaktivni uređaji poistovjećuju. Stoga je potrebno napraviti distinkciju među njima. Regulacioni resurs je svako sredstvo koje

može učestvovati u regulaciji napona i reaktivnih snaga, dok su regulacioni uređaji regulatori napona i/ili reaktivnih snaga koji su sastavni dio regulacionih resursa.

Frekvencija se jednoznačno definiše za cijeli sistem, dok se sistem može podijeliti na više oblasti koje se međusobno razlikuju spram naponskih nivoa. Nasuprot regulaciji učestanosti i aktivnih snaga koja mora biti centralizovana na nivou sistema, regulacija napona i reaktivnih snaga može se realizovati parcijalno i decentralizovano za djelove sistema. Odatle je posljedica da su sredstva za regulaciju napona brojnija i raznovrsnija od sredstava za regulaciju učestanosti. U literaturi se navodi sljedeća osnovna podjela naponsko-reaktivnih regulacionih resursa:

1. Sredstva za proizvodnju/apsorpciju reaktivnih snaga u mreži:

- sinhroni generatori
- sinhroni kompenzatori
- motori,
- otočni kondenzatori,
- reaktori
- kablovi,
- podopterećeni dugi vodovi

2. Sredstva za preraspodjelu tokova reaktivnih snaga u mreži :

- redni kondenzatori i reaktori
- regulacioni transformatori

Sinhroni generatori su primarni izvor reaktivne snage u EES. U regulaciji napona izdvajaju se turbogeneratori, koji su locirani u blizini centara potrošnje i dimenzionišu se sa smanjenom vrijednošću faktora snage $\cos\phi$. Na taj način svojom proizvodnjom uspijevaju da podmire najveći dio zahtjeva potrošača za reaktivnom snagom. Sinhrona mašina se najčešće projektuje za rad u nadpobuđenom (induktivnom) režimu kada odaje reaktivnu snagu ka mreži. U potpobuđenom (kapacitivnom) režimu rada generator se ponaša kao potrošač, absorbujući reaktivnu snagu iz sistema. Regulacija pobude kod sinhronih mašina ostvaruje se djelovanjem na struju pobude, čime se utiče na vrijednost indukovane elektromotorne sile (ems) statora, a time i na napon, faktor snage i generisanu reaktivnu snagu na krajevima mašine [54].

Sinhroni kompenzator je sinhroni motor koji radi u režimu praznog hoda. Zavisno od odnosa indukovane elektromotorne sile i napona u tački njegovog priključka, mijenja se vrijednost i predznak reaktivne snage na njegovim krajevima. Kao i u slučaju generatora, promjenom pobudne struje moguće je uticati na vrijednost ems. Snaga na njegovim priključcima data je izrazom:

$$Q_{SK} = \frac{E_{SK} - U_{SK}}{jX_d} U_{SK} \quad (2.3.1)$$

gdje je X_d ekvivalentna reaktansa mašine. Povećanjem pobudne struje $E_{sk} > U_{sk}$, tj. $Q_{sk} > 0$, pa kompenzator vraća (daje) sistemu reaktivnu snagu. Ovaj režim je natpobuđen. U suprotnom, $E_{sk} < U_{sk}$, tj. $Q_{sk} < 0$, što odgovara potpobuđenom režimu rada. Karakteristika sinhronih kompenzatora je pozitivni regulacioni efekat koji se manifestuje povećanjem proizvodnje reaktivne snage usljed smanjenja napona. (i obrnuto). Usljed postojanja rotirajućih djelova, sinhroni kompenzator se odlikuje manjom pouzadanošću u pogonu, a dodatni nedostatak su povećani gubici aktivne snage.

Motori zahtijevaju veliku količinu reaktivne energije za uspostavljanje i održanje magnetnog polja u mašini, zbog čega spadaju u najveće potrošače reaktivne energije. Primjenjuju se u industriji, a tipična vrijednost faktora snage je 0,8.

Baterije otočnih kondenzatora se formiraju od standardnih monofaznih kondenzatorskih jedinica, koje se projektuju za snage 50-300kVAr i napone 3-12kV. Željena snaga i napon kondenzatorskih baterija se postižu sprezanje redno-paralelnih kombinacija standardnih kondenzatorskih jedinica. U distributivnim mrežama baterije mogu biti priključene na niski napon, dok se u prenosnim mrežama priključuju direktno na sabirnice sistema ili posredstvom tercijera interkonektivnih transformatora.

Otočni reaktori se koriste za kompenzaciju kapacitivnih struja koje se javljaju u slabo opterećenim mrežama visokog (VN) i vrlo visokog napona (VVN). Projektuju se za fazne napone od $\frac{35}{\sqrt{3}}$ do $\frac{750}{\sqrt{3}}$ kV. Priključivanje reaktora na mrežu koju je potrebno kompenzovati se vrši direktno ili posredstvom tercijera interkonektivnih transformatora.

Kapacitivnost kablova je uglavnom znatno veća u odnosu na njihov induktivitet, zbog čega proizvode reaktivnu snagu. Slabo opterećeni vod proizvodi značajnu količinu reaktivne snage i u suštini se ponaša kao kapacitivni potrošač. Ova pojava u nekim slučajevima može da uslovi nedozvoljeni porast napona [55].

Redni kondenzatori i reaktori koriste se za kompenzaciju induktivne reaktanse vodova. Smanjenjem ili povećanjem ekvivalentne induktivne reaktanse vodova ovi elementi utiču na promjenu tokova reaktivnih snaga kroz vod.

U odnosu na standarne energetske transformatore sa fiksnim odnosom transformacije, regulacioni transformatori su opremljeni izvodima čijim se prespajanjem vrši promjena odnosa transformacije, a kao posljedica toga, dolazi do promjene napona na primaru ili sekundaru, kao i toka reaktivne snage. Regulacija napona u beznaponskom stanju podrazumijeva da se transformator isključi, a potom izvrši komutaciona promjena regulacionog prekidača, dok se kod regulacije napona pod opterećenjem sve neophodne manipulacije vrše pod naponom, odnosno bez prekida pogona.

Zahvaljujući napretku na polju energetske elektronike, i poboljšanju u tehnologijama izrade poluprovodničkih komponenti, u naponsko-reaktivnoj regulaciji se sve više koriste brojni FACTS uređaji:

- SVC,
- TCSC,
- STATCOM,
- UPFC,
- SSSC

Brzina djelovanja FACTS uređaja je reda nekoliko milisekundi, što je njihova glavna odlika zbog čega zauzimaju sve značajnije mjesto u upravljanju EES-ima. Upotreba FACTS uređaja doprinosi stabilnosti i kontroli napona, povećanju stabilnosti prenosa energije, uspostavljanju ravnoteže aktivne i reaktivne snage, smanjenju nesimetrije napona i flikera. Brojne su prednosti primjene FACTS uređaja:

- mogućnost upravljanja tokovima snaga
- mogućnost većeg opterećenja vodova, sve do termičkih i dielektričnih granica
- povećana sigurnost sistema zbog bolje prelazne stabilnosti
- poboljšana kontrola preopterećenja i struje kratkog spoja

- smanjivanje tokova reaktivne snage
- mogućnost nadogradnje mreže

3. Optimizacija naponskih prilika u EES

Optimizacija je matematički postupak nalaženja najboljeg, odnosno najprihvatljivijeg rješenja zadate funkcije koje ispunjava postavljena ograničenja. Začetnicima optimizacije se smatraju matematičari *Newton*, *Lagrange* i *Lajbnic*, a svoj doprinos ovom polju nauke su dali i *Bernuli*, *Ojler* i *Danzig* [56]. Zahvaljujući razvoju računara, razvijen je veliki broj optimizacionih metoda. Zajedničko za sve njih je kriterijumska funkcija, koju je potrebno minimizovati/maksimizovati, skup upravljačkih promjenjivih čijim vrijednostima se može manipulirati u cilju optimizacije, i skup ograničenja, koje promjenjive mogu da zauzmu.

U ovom poglavlju biće navedene univerzalne postavke optimizacionog problema, sa osvrtom na klasične i savremene optimizacione metode uz navođenje glavnih prednosti i nedostataka obje kategorije. Nakon toga dat je opis metoda koje se mogu koristiti za rješavanje problema optimalne alokacije.

3.1. Modelovanje optimizacionog problema

U opštem slučaju, optimizacioni problem modelovan jednom kriterijumskom funkcijom može se matematički formulisati na sljedeći način:

$$\min/\max f(x) \quad (3.1.1)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3.1.2)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.1.3)$$

$$x_{iG} \geq x_i \geq x_{iD} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.1.4)$$

gdje je:

$f(x)$ - kriterijumska funkcija

$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ - vektor upravljačkih promjenjivih

$g_j(x)$ - ograničenja tipa nejednakosti

$h_k(x)$ - ograničenja tipa jednakosti

x_{iD} - donja granica za promjenjivu x_i

x_{iG} - gornja granica za promjenjivu x_i

3.1.1. Kriterijumska funkcija

Prilikom rješavanja nekog optimizacionog problema, može da postoji više prihvatljivih rješenja, tako da je svrha optimizacije pronaći najbolje među njima. Kriterijum prema kojem se vrši optimizacija, a koji je izražen u funkciji upravljačkih promjenjivih naziva se kriterijumska funkcija. U literaturi se još srijeću i termini objektivna funkcija ili funkcija cilja. Izbor adekvatne kriterijumske funkcije najvažnija je odluka u procesu rješavanja svakog optimizacionog problema, bilo da se radi o maksimizaciji ili minimizaciji date funkcije.

Kod rješavanja optimizacionih problema iz oblasti planiranja i upravljanja elektroenergetskim sistemima, koriste se sljedeće kriterijumske funkcije: devijacija napona, gubici aktivne/reaktivne snage, troškovi proizvodnje generatorskih jedinica, troškovi instalacije regulacionih resursa.

3.1.2. Ograničenja pri rješavanju optimizacionog problema

Kako bi rješenja dobijena optimizacionim postupkom imala fizički smisao, prilikom formulacije optimizacionog problema neophodno je zadati ograničenja koje rješenje treba da zadovolji. Kod rješavanja optimizacionih problema koji se tiču elektroenergetskih sistema uobičajena je praksa da se ograničenja tipa jednakosti zadaju preko balansnih jednačina za aktivna i reaktivna injektiranja u čvorovima sistema:

$$P_{Gi} - P_{Di} = |V_i| \sum_{j=1}^{Nb} |V_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.1)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = |V_i| \sum_{j=1}^{Nb} |V_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.2)$$

gdje su:

$P_{Gi} - P_{Di}$ - aktivno injektiranje u čvoru i

$Q_{Gi} - Q_{Di}$ - reaktivno injektiranje u čvoru i

N_b - ukupan broj čvorova sistema

δ_{ij} - razlika faznih stavova napona V_i i V_j

G_{ij}, B_{ij} - konduktansa i susceptansa grane između čvorova i i j

Najčešće razmatrana ograničenja nejednakosti su:

- dopušteno odstupanje amplitude napona:

$$V_{imin} < V_i \leq V_{imax} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

- dozvoljene snage generatora:

$$P_{Gimin} < P_{Gi} \leq P_{Gimax}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (3.4)$$

$$Q_{Gimin} < Q_{Gi} \leq Q_{Gimax}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (3.5)$$

- dozvoljeno opterećenje dalekovoda:

$$S_i \leq S_{imax} \quad i = 1 \dots N_{br} \quad (3.6)$$

- dozvoljen opseg položaja regulacionog otcjepa regulacionog transformatora

$$T_{imin} < T_i < T_{imax} \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (3.7.)$$

U prethodnim relacijama značenja navedenih veličina su sljedeća:

N - ukupan broj čvorova sistema

N_G - ukupan broj generatora u sistemu

N_{br} - ukupan broj grana u sistemu

N_T - ukupan broj regulacionih transformatora u sistemu

V_{imin}, V_{imax} - donja i gornja granica amplitude napona

P_{Gimin}, P_{Gimax} - donja i gornja granica aktivne snage generatora

Q_{Gimin}, Q_{Gimax} - donja i gornja granica reaktivne snage generatora

S_{imax} - maksimalno dozvoljeno opterećenje dalekovoda

T_{imin}, T_{imax} - donja i gornja granica položaja regulacione sklopke transformatora

U literaturi se navodi više načina pomoću kojih je moguće tretirati ograničenja u optimizacionom postupku. Konkretno, kod genetičkog algoritma izdvajaju se sljedeće metode:

- Metode zasnovane na očuvanju dopustivosti rješenja
- Metode bazirane na penalizacionim funkcijama

- Metode zasnovane na uticaju dopustivih na nedopustiva rješenja
- Metode bazirane na dekodiranju
- Hibridne metode

3.2. Pregled optimizacionih metoda

Zahvaljujući razvoju savremenih računara i primjeni naprednijih softvera, danas je razvijen veliki broj optimizacionih metoda. Metode koje se srijeću u elektroenergetici se međusobno razlikuju prema efikasnosti rješavanja određenih optimizacionih problema. Matrično-vektorska notacija je primjenjiva za rješavanje problema manjih dimenzija, tako da se skalarni pristup rješavanju problema može primijeniti na malim sistemima. Međutim, imajući u vidu dimenzionalnost stvarnih elektroenergetskih sistema, takav pristup bi bio gotovo nemoguć za sisteme koji broje stotine, pa i hiljade čvorova, uzimajući dodatno u obzir i nelinearnu zavisnost između pojedinih parametara sistema.

3.2.1. Klasične metode

U literaturi se navodi nekoliko podjela tradicionalnih metoda. Jedna od njih je način pretrage kojim se dolazi do konačnog rješenja optimizacionog problema. U tom kontekstu, konvencionalne metode je moguće podijeliti na [57]:

- metode enumerativne pretrage
- metode slučajne pretrage
- metode zasnovane na proračunu

Algoritmi enumerativne pretrage vrše iscrpnu pretragu zahtijevajući konačan prostor za pretragu ili diskretizovani beskonačni prostor za pretragu mogućih vrijednosti ciljne funkcije. Ovi algoritmi testiraju svaku pojedinačnu vrijednost, jednu po jednu, kako bi pronašli minimum ili maksimum objektivne funkcije. Iako ovaj algoritam jeste jednostavan, najmanje je efikasan od svih algoritama optimizacije. Jasno je da je u praktičnim problemima pretraživački prostor ogroman kako bi se testirala svaka mogućnost. Za ovu klasu algoritma u literaturi se srijeće termin *brute-force* algoritmi.

Algoritmi nasumične pretrage nasumično biraju neko reprezentativno uzorkovanje iz prostora pretrage i pronalaze njegovu optimalnu vrijednost. Kod ove metode se pravac pretrage određuje nasumično u svakoj iteraciji, a dužinu koraka određuje korisnik. Iako ova metoda brža od metode iscrpne pretrage, njena efikasnost se ne razlikuje od prethodne metode.

Metode zasnovane na proračunu dijele se na direktne i indirektno (gradijentne) metode. Metode direktne pretrage u optimizacionom postupku koriste samo kriterijumsku funkciju i ograničenja i uključuju: metodu slučajnog pretraživanja, univarijantni metod, metod pretraživanja po šablonu i druge. Među njima, metoda slučajnog pretraživanja je najpopularnija. Kod nje se pravac pretrage određuje nasumično u svakoj iteraciji, a dužinu koraka određuje korisnik. Pošto nisu potrebne informacije o gradijentu kriterijumske funkcije, direktne metode mogu poslužiti za rješavanje optimizacionih problema kod kojih se javlja diskontinualna funkcija cilja. Međutim, ove metode su spore i zahtijevaju veliki broj iteracija kako bi se pronašlo optimalno rješenje.

Indirektno metode zahtijevaju poznavanje prvog i/ili drugog izvoda kriterijumske funkcije, kao i usvojenih ograničenja. U matematičkom smislu, optimalno rješenje neke

funkcije (bilo minimum ili maksimum) moguće je odrediti korišćenjem koncepta izvoda funkcije. Naime, u tački optimalnog rješenja, izvod objektivne funkcije postaje jednak nuli. Međutim, ovakav pristup koji podrazumijeva izjednačavanje izvoda funkcije sa nulom, a potom rješavanje dobijenog sistema jednačina, nije garancija da će pronađeno rješenje biti optimalno. Razlog tome je što se nekad može pojaviti tačka sjedla (tačka pregiba) u kojoj razmatrana funkcija ne postiže ni minimum ni maksimum. Gradijentne metode odlikuje relativno brza konvergencija jer je brzina promjene funkcije maksimalna duž pravca njenog gradijenta. Sa druge strane, pošto je gradijent lokalno svojstvo funkcije, ove metode mogu lako da 'zaglave' na suboptimalnom rješenju, odnosno u lokalnom minimumu/maksimumu. Takođe, njihova primjena nije moguća u slučaju nediferencijabilnih i nekontinualnih funkcija.

Problemi koji se srijeću kod obje grupe tradicionalnih metoda su [56]:

- od usvojene početne aproksimacije, odnosno inicijalnog rješenja zavisi konvergencija ka optimalnom rješenju
- umjesto pronalaska globalnog minimuma, metode pronalaze lokalni minimum i zaglave na suboptimalnom rješenju
- efikasnost algoritma zavisi od tipa problema
- algoritmi ne moraju nužno biti primjenjivi kod problema kod kojih se javljaju diskretne promjenjive

Tradicionalne metode je prema obliku kriterijumske funkcije moguće podijeliti na:

- Linearno programiranje, koje se primjenjuje kod problema kod kojih su kriterijumska funkcija i ograničenja linearne funkcije upravljačkih varijabli
- Nelinearno programiranje, koje se primjenjuje kod problema kod kojih su kriterijumska funkcija i/ili ograničenja nelinearne funkcije upravljačkih varijabli
- Kvadratno programiranje, koje je moguće koristiti kod problema kod kojih je kriterijumska funkcija kvadratna, dok su ograničenja linearne funkcije upravljačkih varijabli
- Dinamičko programiranje, koje je moguće koristiti kod rješavanja složenih problema koristeći princip razlaganja glavnog problema na potprobleme, i gdje se do konačnog rješenja dolazi sukcesivnim rješavanjem potproblema na nižim nivoima
- Cjeobrojno programiranje, koje se primjenjuje kod problema kod kojih su kriterijumska funkcija i ograničenja linearne funkcije upravljačkih varijabli, dok su neke(ili sve) upravljačke promjenjive cijeli brojevi
- Teorija igre, koja ima primjenu za rješavanje problema u kojima se javljaju konflikti ciljevi

U nastavku je dat opis najčešće korišćene gradijentne metode - Njutnovog algoritma, koji se može koristiti za jednokriterijumsku i višekriterijumsku optimizaciju.

3.2.1.1. Njutnova metoda

Njutnov algoritam optimizacije je iterativni postupak koji se koristi pri rješavanju problema koji se opisuju nelinearnim kontinualnim diferencijabilnim funkcijama. Suština ove metode je određivanje korijena izvoda funkcija koje su dva puta diferencijabilne na posmatranom opsegu. Primjena Njutnovog algoritma za jednokriterijumsku optimizaciju,

odnosno rješavanje problema koji se opisuju funkcijom jedne promjenjive izložena je u nastavku [56].

Potrebno je odrediti korijen funkcije $f(x)$, odnosno riješiti jednačinu:

$$f(x) = 0 \quad (3.8)$$

Kada se funkcija $f(x)$ razvije u Tejlorov red u okolini proizvoljno odabrane tačke $x=x_0$, dobija se njena aproksimacija u okolini te tačke:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + g_{n+1}(x_0 + h) \quad (3.9)$$

U jednačini (3.9) h je mali pomjeraj promjenjive x oko tačke x_0 , dok poslednji sabirak predstavlja članove višeg reda od n koji definišu grešku aproksimacije funkcije $f(x)$. Ukoliko se u razvoju funkcije $f(x)$ u Tejlorov red zanemare svi članovi poslije prvog sabirka, i pri tome usvoji da je greška aproksimacije $\pm \varepsilon$ zanemarljivo mala, pod pretpostavkom da se izabrana tačka x_0 nalazi u okolini tačke x^* koja je rješenje jednačine (3.8), odnosno $f(x^*) = 0$, dobija se jednačina:

$$0 \pm \varepsilon = f(x_0) + f'(x_0)(x^* - x_0) \quad (3.10)$$

Rješavanjem prethodne jednačine i zanemarivanjem greške $\pm \varepsilon$ dobija se rješenje polazne jednačine:

$$x^* = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (3.11)$$

Postupak nalaženja rješenja primjenom Njutnovog algoritma opisan je sljedećim koracima:

1.korak - Pretpostavlja se inicijalno rješenje jednacine (1):

$$x^* = x_0 \quad (3.12)$$

2. korak - Za pretpostavljeno rješenje se proračunava vrijednost funkcije $f(x)$ i provjerava da li je dobijena vrijednost manja od usvojene tačnosti ε :

$$|f(x_i)| \leq \varepsilon \quad (3.13)$$

Ukoliko je prethodni uslov ispunjen tada je x_i konačno rješenje. U suprotnom procedura se nastavlja korakom 3.

3. korak - Koristeći jednačinu (4.1.1.4) proračunava se rješenje u novoj iteraciji, korekcijom rješenja iz prethodne iteracije, odnosno:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (3.14)$$

Nakon toga potrebno je ponovo provjeriti da li je ispunjen uslov iz koraka 2. Procedura se sprovodi iterativno ponavljajući korake 2 i 3, sve dok nije zadovoljen terminacioni kriterijum opisan jednačinom (3.13). Njutnov metod optimizacije moguće je proširiti i na višekriterijumsku optimizaciju.

3.2.2. Savremene metode optimizacije

Savremene metode optimizacije sinonim su za metaheurističke tehnike optimizacije koje se zasnivaju na algoritmima koji uključuju stohastične komponente. Etimološki, metaheuristički pristup označava napredniji pronalazak ili otkrivanje rješenja pokušajem ili greškom. Motivacija koja stoji iza metaheurističkih algoritama je simulacija fenomena koji se javljaju u prirodnom svijetu, poput ponašanja roja čestica (PSO), kolonije mrava (ACO), roja pčela (ABC), biološke reprodukcije (GA, DE), zagrijavanja i topljenja metala (SA) i slično. Kod modernih metoda za rješenje dobijeno u postupku optimizacije ne može se dokazati da je globalno rješenje. Zato se, u cilju dobijanja pouzdanih i tačnijih rezultata, procedura ponavlja više puta. Drugim riječima, metaheurističke tehnike ne garantuju uvijek pronalazak optimalnog rješenja, ali garantuju da će pronaći dovoljno dobro rješenje, odnosno rješenje blizu optimalnog, u razumnom vremenskom roku uz razumno korišćenje računarskih resursa kao što su procesorska moć i memorija računara.

Postupak primjene metaheurističkih tehnika u pronalaženju optimalnog rješenja zasnovan je na principima diversifikacije i intenziviranja, koji omogućavaju tranziciju sa globalne na lokalnu pretragu. Diversifikacija podrazumijeva generisanje raznolikih rješenja kako bi se omogućila pretraga pretraživačkog prostora na globalnom nivou. Intenziviranje znači da se fokus pretrage usmjerava na lokalni region, znajući na osnovu prethodnog iskustva, da se dobro rješenje nalazi u tom regionu. Ove tehnike uključuju i određeni stepen "slučajnosti" kako bi izbjegle zamku (se prevazišao problem) lokalnog minimuma. Moderne metode optimizacije primjenjuju se kod rješavanja složenih optimizacionih problema za koje nije razvijen univerzalni algoritam.

Danas je razvijen veliki broj metaheurističkih tehnika. Hronološki istorijat razvoja metaheurističkih tehnika izložen je od strane autora u [58]. Iako je način njihove realizacije svojstven svakoj metodi pojedinačno, njihova osnovna ideja je suštinski ista. Sve metode vrše procjenu potencijalnih rješenja i nad njima sprovode različite operacije kako bi pronašle kvalitetnija rješenja.

Metaheuristika se, shodno načinu manipulacije nad rješenjima, može razvrstati u tri kategorije [59]:

- Metaheuristika lokalne pretrage
- Konstruktivna metaheuristika
- Metaheuristika zasnovana na populaciji

Metaheuristika lokalne pretrage vrši iterativno poboljšanje unošenjem male izmjene u jednom rješenju. Manipulacija nad trenutnim rješenjem u vidu jedne izmjene naziva se potez, i rezultira čitavim skupom susjednih rješenja koji čine okolinu inicijalnog rješenja i koja su, kao posljedica minorne izmjene, međusobno blizu. U svakoj iteraciji dolazi do zamjene trenutnog rješenja sa rješenjem iz njegovog susjedstva na osnovu pravila koje se naziva strategija kretanja (pretraživanja). Ovoj grupi metoda pripadaju metoda simuliranog kaljenja i metoda tabu pretrage.

Konstruktivna metaheuristika kreira rješenja iz svojih sastavnih djelova. Novo rješenje se konstruiše dodavanjem jednog po jednog elementa na parcijalno rješenje. Algoritmi ove grupe su često adaptacija pohlepnih algoritama, koji u svakoj iteraciji djelimičnom rješenju dodaju najbolji mogući element. Ovoj grupi metoda pripada optimizacija kolonijom mrava (ACO).

Metaheuristika zasnovana na populaciji pronalazi rješenja iterativnim putem, vršeći različite manipulacije nad skupom potencijalnih rješenja koji se naziva populacija. Predstavnici ove grupe su genetički algoritam, diferencijalna evolucija, optimizacija rojem čestica, kao i brojne druge evolutivne metode. Kao posebna kategorija izdvajaju se hibridne metaheurističke metode, koje kombinuju više ideja iz prethodne 3 klase.

U nastavku će biti dat pregled najznačajnijih predstavnika savremenih metoda optimizacije, sa izuzetkom genetičkog algoritma kojem je zbog tematike rada posvećeno posebno poglavlje.

3.2.2.1. Tabu pretraga

Tabu pretraga je tehnika lokalne pretrage, čiji algoritam koristi koncept 'pamćenja' kako bi forsirao pretragu ka novim oblastima [60]. Kod ove metode se dodjeljivanje tabu statusa rješenjima koja su lokalni optimum može smatrati korektivnom akcijom kojom se prevazilazi česti problem optimizacionih metoda - pronalazak lokalnog, umjesto globalnog optimuma [61]. Korišćenjem memorijskih struktura, sadržanih u tabu listi, omogućava se iterativno napredovanje pretrage sa trenutnog na poboljšano rješenje. Uobičajen pristup podrazumijeva determinističku pretragu čitave okoline trenutnog rješenja na osnovu definisane funkcije promjene, mada postoji i stohastična pretraga, kada se uvođenjem male slučajne promjene u okolini trenutnog rješenja inicira nastavak pretrage za kvalitetnijim rješenjem. U tabu listi se pamte informacije o tekućem najboljem rješenju i vrijednosti kriterijumske funkcije, ali takođe i rješenja iz prethodnih iteracija, kako bi se ti podaci kasnije koristili za adaptaciju pretrage, odnosno usmjeravanje na oblast koja ne sadrži zabranjena rješenja.

Tabu metoda inicijalno započinje pretragu od jednog rješenja, a potom koristeći deterministički, ili rjeđe stohastični pristup lokalne pretrage, uspijeva da pronađe lokalni optimum. Takvo rješenje se tokom narednih par iteracija pamti u tabu listi kao nepoželjno, a zatim se započinje novi ciklus pretrage, u izmijenjenoj sredini pretraživačkog prostora koja ne sadrži tabu-rješenje.

Kako su podaci koji se skladište u tabu listi determinišući za uspješnost pretrage, a u cilju unaprijeđenja originalne metode, uvedeni su različiti koncepti memorije: kratkoročna, srednjeročna i dugoročna. Kod kratkoročne memorije, u tabu listi se pamte atributi nedavno posjećenih rješenja. Ovi atributi se označavaju kao 'tabu-aktivni', a rješenja koja ih sadrže se zabranjuju, odnosno dodjeljuje im se tabu status. Tabu rješenja ne mogu biti ponovo posjećena sve dok im je aktivna tabu oznaka. Na ovaj način se sprječava kruženje u okolini nekog rješenja. Srednjeročna memorija obuhvata pravila intenziviranja koja fokus pretrage usmjeravaju ka oblasti potencijalno dobrog rješenja. Jedna od varijanti ovog koncepta podrazumijeva takvu memorijsku strukturu koja podržava ili zabranjuje rješenja koja sadrže određene attribute (npr. određena vrijednost varijable). Druga varijanta pamti ili sprječava određene poteze. Dugoročna memorija ima za cilj diversifikaciju pretrage, odnosno pokretanje pretrage u nove regione koji do sada nisu istraženi. Zajednička odlika srednjeročne i dugoročne memorije je da se kod obje strukture pamte atributi rjesenja. Ono što ih razlikuje je da će srednjeročna memorija kroz intenziviranje pretrage, stimulisati rješenja koja imaju zajedničke attribute sa najboljim rješenjem, dok će dugoročna memorija kroz koncept diversifikacije, favorizovati rješenja čiji se atributi razlikuju od osobina najboljeg rješenja.

3.2.2.2. Simulirano kaljenje

Simulirano kaljenje je probabilistička metoda za aproksimaciju globalnog optimuma date funkcije. Ova metoda oponaša termodinamički fenomen iz metalurgije - kaljenje čelika. Kako bi se postigla željena čvrstoća metala, potrebno je njegovu kristalnu rešetku modifikovati tako da ima minimalnu potencijalnu energiju. Energetski minimum rešetke ostvaruje se zagrijavanjem metala do visoke temperature, a potom postepenim hlađenjem. Opisana procedura omogućava materijalu da dostigne termički ekvibrilijum pri svakoj temperaturi [62]. Energija kristalne rešetke može se posmatrati kao funkcija cilja čiji se globalni optimum traži. Procedura sporog, kontrolisanog hlađenja kojom dolazi do promjene fizičkih svojstava materijala može se posmatrati kao sporo smanjenje vjerovatnoće odabira lošijih rješenja kako napreduje pretraga.

Metoda započinje inicijalizacijom početnog rješenja i usvajanjem visoke vrijednosti temperature. Zatim se vrši stohastična pretraga okoline trenutnog rješenja. Ako pronađeno rješenje ima bolju vrijednost kriterijumske funkcije, tada ono postaje tekuće. S druge strane, ukoliko je pronađeno rješenje lošije, ipak postoji šansa da ono postane tekuće rješenje. Vjerovatnoća prihvatanja takvog rješenja, koja je eksponencijalno zavisna od temperature, je u početku velika što znači da se tokom prvih par iteracija takvo rješenje može prihvatiti, a onda progresivno opada sa porastom vremena izvršavanja programa, tako da je na kraju vrlo malo vjerovatno da će se takvo rješenje prihvatiti. Temperatura opada eksponencijalno brzinom v iz intervala $[0,1]$. Za male vrijednosti parametra v , odnosno visoku temperaturu, hlađenje je isuviše brzo, i može doći do pucanja metala, i da algoritam upadne u lokalni optimum. Kada je parametar v blizak jedinici, hlađenje je sporo, odnosno u početku je velika vjerovatnoća da se bolja rješenja zamjenjuju lošijim, a pretraga se pretvara u nasumičnu pretragu. Odabir adekvatne vrijednosti parametra v je determinišući faktor koji na kraju procesa vodi stabilizaciji rješenja u lokalnom području.

Kod ove metode može da se desi da algoritam više puta posjeti jedno isto rješenje. Ovaj problem se može prevazići uvođenjem mehanizma hibridizacije, koji uključuje memorijske strukture. Pri svakoj temperaturi više puta se vrši evaluacija slučajno odabranog rješenja iz okoline tekućeg rješenja, kako bi se rješenje stabilizovalo na tekućoj temperaturi. Simulirano kaljenje se koristi kod problema gdje je veći prioritet pronaći približni globalni optimum u kratkom vremenskom roku nego pronaći egzaktan lokalni optimum u fiksnom vremenskom roku.

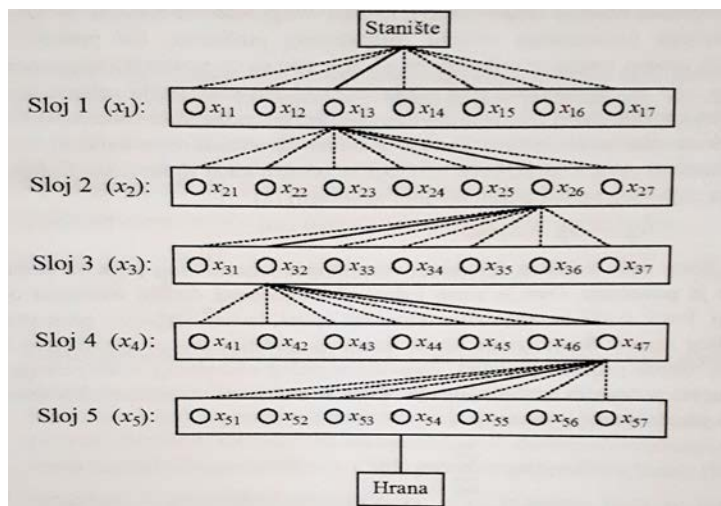
3.2.2.3. Optimizacija kolonijom mrava

Optimizacija kolonijom mrava je algoritam koji pripada klasi konstruktivnih metaheurističkih metoda. Prvobitna zamisao primjene ovog algoritma je bila za rješavanje problema putujućeg trgovca, koji se sastoji u određivanju najkraćeg puta između gradova, uz uslov da svaki grad bude posjećen isključivo jedanput. Upravo je kolektivni pristup rješavanju problema - pronalaska najkraće putanje između mravinjaka i izvora hrane u osnovi ove metode.

Mravi imaju lokalnu percepciju okolnog prostora. Njihova neverbalna komunikacija se ostvaruje ispuštanjem supstance feromona po tlu po kojem se kreću. Vjerovatnoća odabira određene putanje zavisi od koncentracije feromona na njoj. Na taj način se čitava kolonija usmjerava putem na kojem postoji najveća količina feromona, odnosno putanjom kojom je

prošao najveći broj mrava. Može se zaključiti da trag feromon igra ključnu ulogu u usmjeravanju mrava ka najboljem putu.

Sama procedura algoritma najjednostavnije se može objasniti na primjeru višeslojnog grafa koji je prikazan na slici 3.2. Broj slojeva grafa odgovara broju upravljačkih promjenjivih, dok broj čvorova u svakom sloju odgovara dozvoljenom broju diskretnih vrijednosti date promjenjive. U konkretnom slučaju, ovaj problem je opisan sa pet upravljačkih promjenjivih, od kojih svaka može imati sedam dozvoljenih vrijednosti.



Slika 3.2. Višeslojni graf

U svakoj iteraciji svaki pojedinačni mrav polazi iz staništa, kreće se ka izvoru hrane određenom putanjom koja prolazi kroz sve slojeve i vraća se u stanište. Pri tome, putanja mrava može da sadrži samo jedan čvor iz svakog sloja. Izbor pojedinačnog čvora direktno je proporcionalan privlačnosti puta, odnosno vjerovatnoći odabira puta, koja zavisi od količine feromona na posmatranoj putanji između čvorova i i j (τ_{ij}) kojom se kreće mrav k [56]:

$$p_{ij}(k) = \frac{\tau_{ij}^{\alpha}}{\sum_{l \in N_i(k)} \tau_{il}^{\alpha}} \quad (3.15)$$

gdje su:

α - stepen važnosti feromona

$N_i(k)$ - skup susjednih čvorova mrava k , kada je lociran u čvoru i

Pravilo je da skup susjednih čvorova sadrži čvorove na nivoima ispod posmatranog čvorova, kako bi se spriječilo vraćanje mrava na prethodni čvor. Prije povratka u stanište svaki mrav k ostavlja određenu količinu feromona $\Delta\tau(k)$ na svojoj putanji, a potom se određuje novu količinu feromona na tom putu. Pokazano je da se veća efikasnost algoritma postiže ukoliko se feromon dodaje samo na putanju najboljeg mrava. Poslije svake iteracija, nivo feromona na svakoj putanji, izuzev putanje najboljeg mrava, se smanjuje. Isparavanje feromona za posljedicu ima eliminaciju loših rješenja iz pretraživačkog prostora. Nakon što su se svi mravi iz kolonije vratili u stanište, nivo feromona se određuje koristeći sljedeću relaciju:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) + \sum_{k+1}^N \Delta\tau_{ij}(k) \quad (3.16)$$

gdje je:

ρ - nivo isparavanja, koji uzima vrijednosti iz opsega (0,1]

$\Delta\tau_{ij}(k)$ - nivo novog feromona postavljenog na putanju (i,j) od strane mrava k

Nivo novog feromona se može odrediti na sljedeći način:

$$\Delta\tau_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{\delta \cdot f_{najbolje}}{f_{najgore}}, & \text{ako } (i,j) \text{ pripada najboljoj putanji} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (3.17)$$

gdje su:

$f_{najbolje}, f_{najgore}$ - fitness vrijednosti najboljeg, odnosno najgoreg mrava u koloniji

δ - faktor skaliranja uticaja najboljeg rješenja

Povećanje faktora δ podrazumijeva da se veća količina feromona ostavlja na najboljoj putanji i označava da je došlo do napretka eksploatacije pretraživačkog postora.

Postoji više načina za usvajanje terminacionog kriterijuma opisane optimizacione procedure. Jedan od njih podrazumijeva da je dostignut inicijalno zadati maksimalni broj iteracija. Druga varijanta je situacija u kojoj dolazi do zastoja pretrage, odnosno ukoliko tokom određenog broja iteracija algoritam ne uspijeva da pronađe bolje rješenje. Konačno, ukoliko su sva rješenja postala identična, može se smatrati da je zadovoljen kriterijum za zaustavljanje proračuna.

3.2.2.4. Optimizacija rojem čestica

Začetnicima ove metode se smatraju *Kennedy* i *Eberhart* [56]. Autori ove metode su inspiraciju za njen razvoj pronašli u ponašanju roja pčela, jata ptica i sličnih skupina životinja. Sličnost ove metode sa ostalim evolutivnim tehnikama je što je ovo algoritam zasnovan na populaciji, za koju se koristi termin roj (eng. swarm), dok su njene jedinice, odnosno potencijalna rješenja čestice (eng. *swarm*).

Roj se definiše kao skup od N čestica, pri čemu je svaka od njih određena sa D koordinata:

$$S = \{(x_1, x_2, \dots, x_N)\} \quad (3.18)$$

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad (3.19)$$

PSO iterativno vrši pretragu pretraživačkog prostora na osnovu promjene pozicije pojedinih čestica, koja se ostvaruje dodavanjem određenog pomjeraja - brzine na trenutne pozicije čestica. Pomjeraj se može definisati na sljedeći način:

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \in A, i = 1, 2, \dots, N \quad (3.20)$$

Brzina se takođe mijenja iterativno kako bi se omogućilo česticama da posjete sve djelove pretraživačkog prostora. Ako se sa t označi brojač iteracija, onda se tekuća pozicija i -te čestice i njena brzina mogu označiti sa x_i^t i v_i^t . Brzina se ažurira u svakoj iteraciji na osnovu najboljih pozicija čestica koje su one posjetile u toku pretrage prostora. U tu svrhu, algoritam PSO, pored roja S koji sadrži tekuće pozicije svih čestica pamti i skup $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$, koji sadrži najbolje pozicije čestica $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}), i = 1, 2, \dots, N$ koje su pojedine čestice posjetile u toku pretraživanja.

Najbolja pozicija čestice je ona pri kojoj se dobija minimalna vrijednost kriterijumske funkcije:

$$p_i^t = \operatorname{argmin}_t f_i^t \quad (3.21)$$

Sem toga, na osnovu iskustva roja, u svakoj iteraciji se pamti i globalno najbolja pozicija p_g^t , pri kojoj se ima minimalna vrijednost kriterijumske funkcije za sve jedinice iz skupa P . Za svaku pojedinačnu česticu moguće je proračunati novu brzinu i poziciju, koristeći formule:

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 r_1 (p_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (p_{gj}^t - x_{ij}^t) \quad (3.22)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (3.23)$$

gdje su:

i - indeks čestice u roju

N - ukupan broj čestica u roju

j - indeks koordinate čestice i

t - broj iteracije

c_1, c_2 - težinski koeficijenti ubrzanja

r_1, r_2 - slučajni brojevi iz opsega $[0,1]$

p_{ij}^t - najbolja pozicija j i -te čestice u tekućoj iteraciji

U prethodnoj relaciji, kognitivni (lični) parametar c_1 , i socijalni (društveni) parametar c_2 , koriste se da uvažavaju uticaj najboljeg ličnog i najboljeg globalnog rješenja, respektivno. Kako bi se ažurirao skup najboljih pozicija svih čestica P , neophodno je odrediti novu najbolju poziciju za svaku česticu. To se postiže koristeći sljedeću relaciju:

$$p_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^{t+1}, & \text{ako je } f(x_i^{t+1}) \leq f(p_i^t) \\ p_i^t, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (3.24)$$

Tekuća iteracija PSO algoritma se završava određivanjem globalno najbolje pozicije. Postoji više kriterijuma koji se mogu usvojiti kao kriterijum za zaustavljanje opisanog algoritma:

- Kriterijum konvergencije u pretraživačkom prostoru - ukoliko je odstupanje najboljeg rješenja od optimalnog manje od usvojene tačnosti. Mana ovog pristupa je što se za većinu optimizacionih problema optimalno rješenje ne može znati unaprijed.

- Kriterijum konvergencije prema vrijednosti kriterijumske funkcije - ukoliko je odstupanje kriterijumske funkcije od globalnog optimuma manje od unaprijed definisane tačnosti. Ovaj uslov može da se primijeni kod problema koji se opisuju kriterijumskim funkcijama čija je optimalna vrijednost nula, poput traženja minimuma sume kvadrata odstupanja.
- Kriterijum zaustavljanja prema vremenu računanja - ukoliko se dostigne unaprijed predviđeno vrijeme proračuna. Svakako, vrijeme izvršavanja programa je uslovljeno brojnim faktorima, poput procesorske moći računara ili programskog jezika. Stoga ovaj kriterijum nije dobar indikator performansi i testiranje efikasnosti korišćene metode
- Kriterijum zaustavljanja prema stagnaciji pretraživanja - ukoliko tokom određenog broja uzastopnih iteracija nema poboljšanja najboljeg rješenja. Praćenje napredovanja algoritma daje najbolji uvid u efikasnost predložene metode.

4. Genetički algoritam

Naučnici su još 1950-ih godina proučavajući vještačku inteligenciju pokušavali da napišu računarske programe koji bi mogli da simuliraju procese koji se dešavaju u prirodnom svijetu. Za prve početke primjene računarskih softvera u svrhu oponašanja evolutivnih procesa vezuju se naučnici *Baricelli* i *Alexander Fraser* [63]. Doprinos *Baricelli*-jevog rada zasniva se na stvaranju prvog softvera za genetički algoritam. Biolog *Fraser* je prvi među naučnicima koji je koristio programiranje isključivo za proučavanje evolucije, vođen idejom stvaranja kompjuterskog modela evolucije. John Holland, profesora sa Univerziteta u Mičigenu, smatra se začetnikom genetskog algoritma, odnosno njegove verzije koja je danas poznata. Holland je napravio ogromne inovacije postavljajući teorijski okvir i uvodeći genetički algoritam u nauku 60-ih godina prošlog vijeka. U prethodnim pokušajima razvoja genetičkog algoritma mutacija je korišćena jedino kao pokretač evolucije. Hollandova verzija oslanja se na Darwinistički princip "preživljavanja najboljih" i uključuje procese ukrštanja, rekombinacije i mutacije. Ovim je napravljen veliki iskorak u nauci.

U ovom poglavlju biće izložena struktura i osnovni princip rada genetičkog algoritma. Posebna pažnja biće posvećena opisu njegovih operatora, uz osvrt na razlike koje postoje u njihovoj implementaciji u slučaju kodiranja promjenjivih realnim brojevima.

4.1. Glavne karakteristike metode

Genetički algoritam je metaheuristička evolucionarna metoda koja se koristi za traženje optimalnog rješenja kod rješavanja kompleksnih problema. U odnosu na tradicionalne metode optimizacije, genetički algoritam se izdvaja po tome što u svakoj iteraciji radi sa skupom potencijalnih rješenja, a ne sa pojedinačnim rješenjem. Ovakav pristup u velikoj mjeri smanjuje vjerovatnoću pronalaska lokalnog optimuma umjesto globalnog optimuma. Kako ovaj algoritam simulira prirodni proces rekombinacije hromozoma u DNK lancu, postoji preklapanje korišćene terminologije sa pojmovima koji se srijeću u biologiji.

Genetički algoritam započinje pretragu sa nasumično odabranom inicijalnom populacijom jedinki, koje se nazivaju hromozomi. Svaki hromozom zapisuje se kao niz karaktera - gena, i predstavlja jedno potencijalno rješenje postavljenog optimizacionog problema. Dva najčešća pristupa zapisivanja hromozoma su binarno kodiranje i kodiranje realnim brojevima.

Idući korak podrazumijeva da se svakom hromozomu iz populacije pridruži odgovarajuća vrijednost fitness funkcije, a nakon toga se nad odabranim hromozomima primjenjuju operatori genetičkog algoritma, u nastojanju da se njihovom transformacijom dobiju još bolja rješenja.

4.1.1. Fitness funkcija

Fitness funkcija kao glavna karakteristika hromozoma je najvažniji aspekt genetičkog algoritma. Ovaj termin je preuzet iz engleskog jezika. *Fitness* funkcija se koristi da kvantifikuje i testira koliko je svako potencijalno rješenje odgovarajuće (fit), odnosno koliko kvalitetno rješava zadati problem.

U literaturi koja se bavi metaheurističkim metodama optimizacije obično se pravi razlika između *fitness* funkcije i kriterijumske funkcije. Uloga *fitness* funkcije je da kvantifikuje sposobnost konkretne jedinke u populaciji. Drugim riječima, favorizuju se hromozomi koje karakteriše veća sposobnost, odnosno veća vrijednost *fitness* funkcije. Sa druge strane, kod problema minimizacije, kakav je i problem opisan u radu, favorizuju se jedinke koje karakteriše niža vrijednost kriterijumske funkcije. Jasno je da postoji obrnuta proporcionalnost između kriterijumske i *fitness* funkcije, odnosno da problem minimizacije kriterijumske funkcije $f(x)$ podrazumijeva maksimizaciju *fitness* funkcije $F(x)$. Ovo se u praksi najčešće postiže korišćenjem sljedeće korelacione zavisnosti [56]:

$$fitness = \frac{1}{1 + f(x)} \quad (4.1)$$

Kod optimizacionog postupka maksimizacije kriterijumske funkcije, moguće je izjednačiti *fitness* vrijednost hromozoma sa vrijednošću kriterijumske funkcije tog hromozoma.

4.1.2. Operatori genetičkog algoritma

Osnovni operatori koji se koriste kod genetičkog algoritma su operator selekcije, ukrštanja i mutacije.

4.1.2.1. Operator selekcije

Operator selekcije (reprodukcije) ima ulogu odabira određenog broja hromozoma koji će dalje učestvovati u razmnožavanju. Suština njegove primjene je da se iz tekuće populacije izaberu nadprosječni hromozomi, nad kojima će se primjenjivati ostali operatori. Temelj procesa selekcije je *fitness* funkcija jer determiniše koje je jedinke poželjno eliminisati, a koje zadržati u populaciji. Najčešće se koristi proporcionalni operator selekcije, kod kojeg je numerička vrijednost *fitness* funkcije svakog hromozoma proporcionalna vjerovatnoći njegovog odabira. Postoji više načina da se realizuje proporcionalni operator selekcije. U praksi se koriste princip točka ruleta, rangiranje ili turnirski operator. Idući primjer sa populacijom od 5 hromozoma ilustruje primjenu točka ruleta i principa rangiranja.

Vjerovatnoća odabira *i*-tog hromozoma data je relacijom:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (4.2)$$

gdje je:

f_i - vrijednost fitness funkcije *i*-tog hromozoma

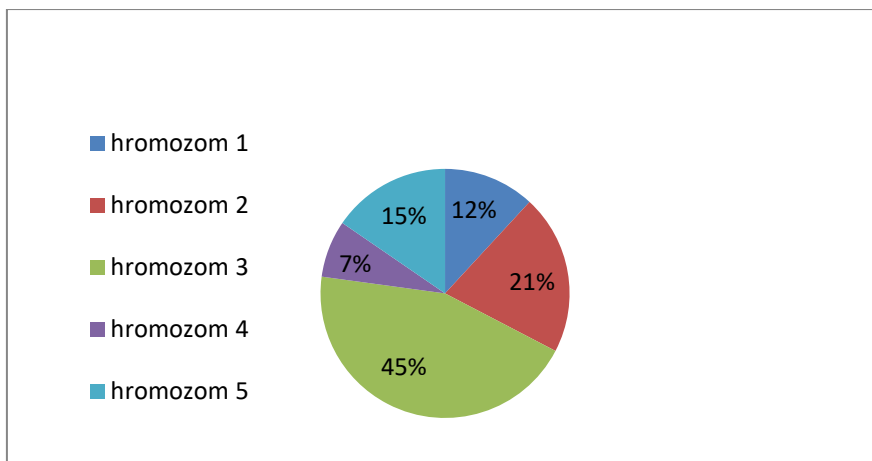
N - veličina populacije

U tabeli 4.1. su dati podaci o vrijednostima fitness funkcije i vjerovatnoće odabira za populaciju od pet hromozoma.

Tabela 4.1. Podaci o populaciji

	<i>fitness</i> (f_i)	vjerovatnoća odabira (p_i)	rang
hromozom 1	$f_1 = 40$	$p_1 = 0.12$	2
hromozom 2	$f_2 = 70$	$p_2 = 0.21$	4
hromozom 3	$f_3 = 150$	$p_3 = 0.45$	5
hromozom 4	$f_4 = 25$	$p_4 = 0.07$	1
hromozom 5	$f_5 = 52$	$p_5 = 0.15$	3
Σukupno	337	1	15

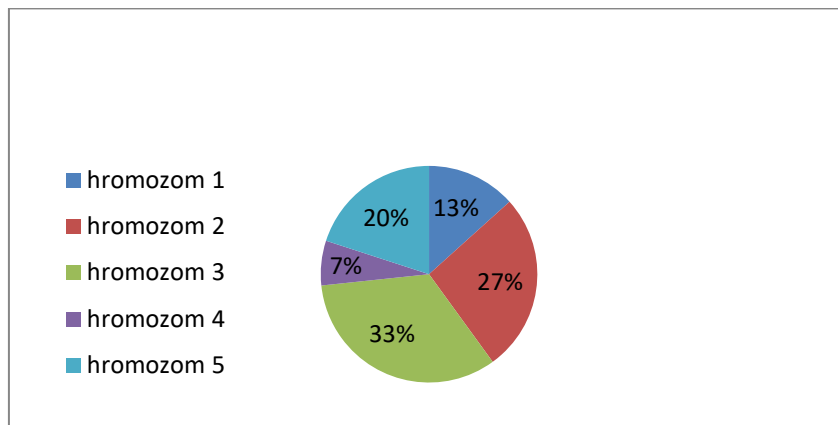
Na osnovu podataka iz tabele 4.1. formira se točak ruleta, prikazan na slici 4.1, koji se izdijeli na *N* segmenata, gdje je *N* veličina populacije. Svakom hromozomu pripada jedan segment, pri čemu je veličina isječka direktno zavisna od vjerovatnoće odabira hromozoma. Proces selekcije podrazumijeva da se pri svakom od *N* okretanja točka ruleta bira po jedan hromozom, čime se formira grupa za razmnožavanje. U engleskoj literaturi se za ovu grupu koristi termin *mating pool*.



Slika 4.1. Točak ruleta

Treba napomenuti da je moguće da pojedini hromozomi budu kopirani više puta. Pretpostavlja se da će i -ti hromozom biti kopiran f_i/f_{sr} puta, gdje f_{sr} označava srednju vrijednost *fitness* funkcije čitave populacije. U navedenom primjeru $f_{sr} = 67.4$, tako da se očekuje da treći hromozom bude kopiran 2.2 puta.

Jasno je da se korišćenjem principa točka ruleta favorizuju dobra rješenja. Naime, ukoliko je neki hromozom na osnovu sopstvene *fitness* vrijednosti dominantniji u odnosu na ostala rješenja, njemu će pripasti najveći segment točka ruleta. Time se zbog inferiornosti dobrih rješenja drastično smanjuju šanse selekcije ostalih rješenja, usljed čega se posljedično može javiti problem sa konvergencijom algoritma. Ovaj nedostatak je moguće prevazići primjenom principa rangiranja. Suština primjene ovog operatora je da se hromozomi sortiraju od najboljeg ka najgorem shodno sopstvenoj vrijednosti *fitness* funkcije. Potom se svakom hromozomu dodjeljuje broj - *rang*, na način da se najgorem hromozomu dodjeljuje rang 1, a najboljem N.



Slika 5.1.2.1.2. Princip rangiranja

Rangiranjem hromozoma se takođe vrši sortiranje populacije, ali je podjela segmenata drugačija u odnosu na princip točka ruleta. Poređenjem slika 4.1. i 4.2. uočava se da najbolji hromozom (hromozom 3) i dalje zauzima najveći dio točka, ali da sada pojedini hromozomi (hromozom 2 i hromozom 5) imaju veće šanse da budu selektovani.

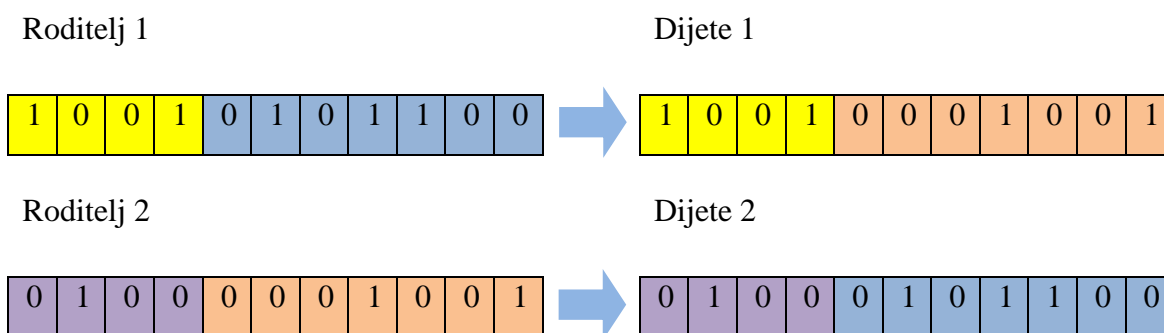
Turnirski operator selekcije je najjednostavniji. Kod ovog tipa selekcije se nasumično vrši selekcija 2 hromozoma, a potom se bira bolji od njih prema tome koji od njih ima bolju *fitness* vrijednost. Intuitivno se može zaključiti da primjena ovog operatora ne zahtijeva

proračunavanje *fitness* vrijednosti hromozoma, već se selekcija može izvršiti jednostavnim poređenjem kriterijumskih funkcija hromozoma.

4.1.2.2. Operator ukrštanja

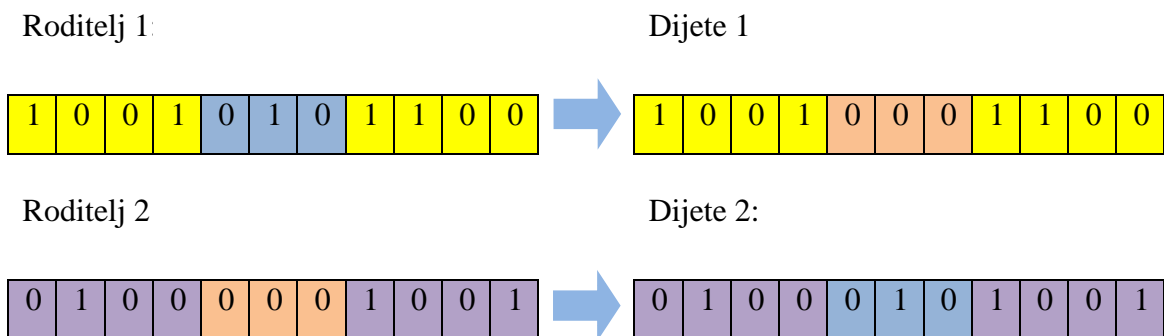
Operator ukrštanja simulira biološki proces ukrštanja i rekombinacije hromozoma u diobi ćelija. Ovaj operator razmjenjuje informacije dva roditeljska hromozoma kako bi generisao nove potomke. U praksi se najčešće koriste ukrštanje u jednoj tački, ukrštanje u više tačaka i uniformno ukrštanje. Idući primjeri ilustruju različite varijante realizacije operatora ukrštanja.

Kod ukrštanja u jednoj tački, nasumično se bira tačka presjeka. Spajanjem genetskog materijala lijevo od tačke presjeka prvog roditelja sa genetskim materijalom desno od tačke presjeka drugog roditelja formira se prvi potomak. Analogno, nastaje drugi potomak.



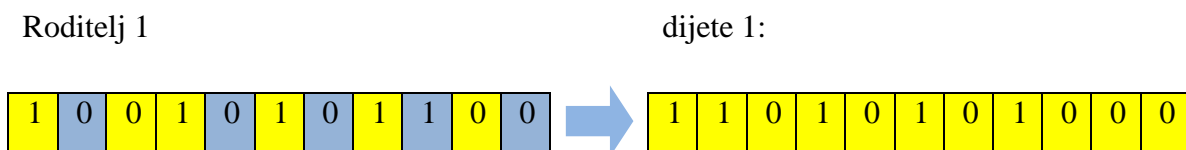
Slika 4.3. Operator ukrštanja u jednoj tački

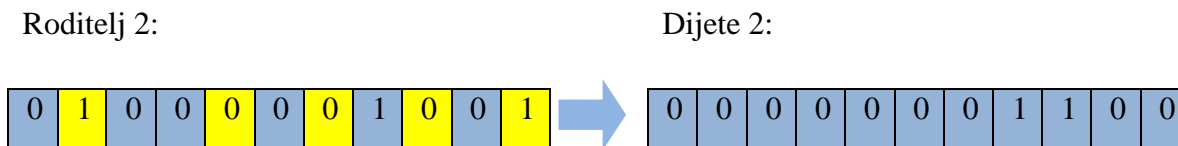
Kod ukrštanja u dvije tačke, nasumično se biraju dvije tačke presjeka, pri čemu roditeljski hromozomi razmjenjuju informacije između ta dva mjesta. Na taj način nastaju dva nova potomka.



Slika 4.4. Operator ukrštanja u dvije tačke

Opisani koncept ukrštanja može da se proširi na operator ukrštanja u više tačaka. Krajnji slučaj predstavlja uniformno ukrštanje, gdje je vjerovatnoća selekcije svakog bita iz roditeljskih hromozoma 0.5:

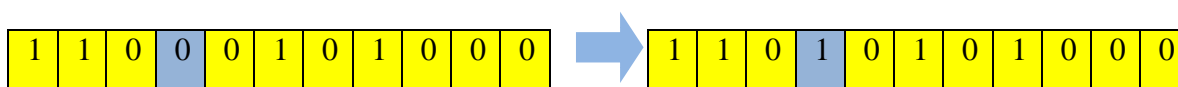




Slika 4.5. Uniformni operator ukrštanja

4.1.2.3 Operator mutacije

Operator mutacije primjenjuje se sa malom vjerovatnoćom mijenjajući samo jedan bit u hromozomu. Naime, može se desiti da usljed rekombinacije dođe do gubitka potencijalno dobrog genetičkog materijala na pogodnoj lokaciji. Operator mutacije unosi diversifikaciju u populaciju, i može da doprinese da se izbjegne problem konvergencije ka lokalnom optimumu.



Slika 4.6. Operator mutacije

4.1.2.4. Operator elitizma

Pokazano je da se bolji rezultati optimizacije postižu ukoliko se osim standardnih operatora genetskog algoritma uvede dodatni operator elitizma. Princip elitizma podrazumijeva da se u svakoj generaciji pamti određeni broj hromozoma sa najboljom vrijednošću *fitness* funkcije. Takvi hromozomi se direktno upisuju u novu populaciju, kako bi se njihove informacije sačuvala od oštećenja koja bi nastala usljed primjene ostalih operatora.

4.1.3. Operatori ukrštanja i mutacije kod kodiranja realnim brojevima

Iako je binarno kodiranje zbog svoje jednostavnosti najčešće korišćeni način reprezentacije hromozoma, nekada je zbog same prirode problema pogodnije koristiti kodiranje realnim brojevima. Razlog tome je problem koji se može javiti kod dekodiranja binarnog stringa u realni broj. Naime, kod optimizacionih problema sa kontinualnim pretraživačkim prostorom zapis hromozoma u binarnoj formi diskretizuje pretraživački prostor, usljed čega može doći do gubitka preciznosti pronađenih rješenja. Kod kodiranja realnim brojevima, svaki hromozom koji predstavlja potencijalno rješenje optimizacionog problema od N promjenjivih sastoji se od N realnih brojeva. Nad takvim hromozima se potom primjenjuju prethodno opisani operatori genetičkog algoritma. Proporcionalni operator selekcije može se primijeniti bez ikakvih izmjena, dok se ostala dva operatora razlikuju. Kod kodiranja realnim brojevima koriste se simulirani binarni operator ukrštanja i polinomni operator mutacije. Jedna od varijanti njihove realizacije je data u nastavku.

4.1.3.1. Simulirani operator ukrštanja

Realizacija simuliranog operatora ukrštanja, čijom primjenom od dva roditeljska hromozoma p_1 i p_2 nastaju dva potomka c_1 i c_2 , može se ostvariti u tri koraka [56]:

Korak 1: Nasumičnim putem se bira veličina u , tako da važi $uv[0,1)$

Korak 2: Proračunava se koeficijent β prema relaciji:

$$\beta_q = \{ (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, \text{ ako je } u \leq 0.5 \quad (4.3)$$

$$\beta_q = \{ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}}, \text{ ako je } u > 0.5 \quad (4.4)$$

gdje je η distribucioni indeks iz opsega $[1,10]$, koji kontrolira rasprostranjenost rješenja.

Korak 3: Određuju se dva nova rješenja koristeći relacije:

$$c_1 = 0.5 [(1 + \beta_q) p_1 + (1 - \beta_q) p_2] \quad (4.5)$$

$$c_2 = 0.5 [(1 - \beta_q) p_1 + (1 + \beta_q) p_2] \quad (4.6)$$

4.1.3.2. Polinomni operator mutacije

Realizacija polinomnog operatora mutacije može se ostvariti u tri koraka:

Korak 1: Nasumičnim putem se bira velicina r , tako da važi $rv[0,1)$

Korak 2: Proračunava se koeficijent δ prema relaciji:

$$\delta = (2r)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1, \text{ ako je } r \leq 0.5 \quad (4.7)$$

$$\delta = 1 - [2(1 - r)]^{\frac{1}{\eta+1}}, \text{ ako je } r > 0.5 \quad (4.8)$$

Korak 3: Određuje se mutirano rješenje c' , primjenom sljedeće relacije na selektovano rješenje c :

$$c' = c + (x^{(u)} - x^{(l)}) \delta \quad (4.9)$$

gdje su $x^{(u)}$ i $x^{(l)}$ gornja i donja granica za promjenjivu x .

U prethodnim relacijama, η označava distribucioni indeks iz opsega $[10,100]$, koji kontrolira odstupanje mutiranog rješenja c' u odnosu na početno rješenje c .

Treba napomenuti da se kod kodiranja realnim brojevima osim prethodno izloženih varijanti realizacije operatora ukrštanja i mutiranja u praksi koriste i drugi operatori. Takođe, operator mutacije može se primjenjivati prije ili nakon primjene operatora selekcije, a odluku o tome donosi krajnji korisnik. Dodatno, zavisno od tipa optimizacionog problema korisnik može i sam da kreira operatore genetičkog algoritma, vodeći računa da se njihovom implementacijom može doći do rješenja. Još je potrebno naglasiti da kod izbora kodiranja promjenjivih, nije isključivo pravilo da čitav hromozom bude predstavljen koristeći isključivo jednu formu. Dio hromozoma može se kodirati binarno, dok preostale promjenjive mogu uzimati vrijednosti iz skupa realnih brojeva.

4.2. Kriterijum za zaustavljanje

Opisana procedura koja uključuje procese selekcije, ukrštanja i mutacije se izvršava sve dok broj članova nove populacije nije identičan broju članova prethodne populacije, tako da je prethodna populacija u potpunosti zamijenjena. Potom se svakom hromozomu u novonastaloj

populaciji dodjeljuje pripadajuća vrijednost *fitness* funkcije, i evolutivni ciklus se nastavlja na prethodno opisan način. Jasno je da se operatori genetičkog algoritma mogu izvršavati beskonačan broj puta, a da pritom sam algoritam ne zna da li je pronašao konačno - optimalno rješenje. Stoga je inicijalno potrebno postaviti određeni uslov koji će se provjeravati na početku svake iteracije. Ispunjenjem terminacionog uslova završava se proračun genetičkog algoritma, i smatra se da je optimizacioni postupak postigao konvergenciju.

Kao kriterijum za zaustavljanje genetičkog algoritma može se odabrati maksimalno dozvoljeni broj generacija (odnosno iteracija), koji se unaprijed definiše. Druga mogućnost podrazumijeva da tokom određenog broja iteracija nema poboljšanja u vrijednosti *fitness* funkcije najboljeg hromozoma. U kontekstu *fitness* vrijednosti najboljeg hromozoma, ukoliko se unaprijed zna kolika je minimalna vrijednost *fitness* funkcije datog problema, takođe se može postaviti sljedeći uslov: ukoliko je *fitness* najboljeg hromozoma manja ili jednaka od usvojenog *fitness* limita, rješenje problema je pronađeno. Treća varijanta podrazumijeva da je odstupanje *fitness* vrijednosti svih hromozoma od srednje *fitness* vrijednosti čitave populacije manje od usvojene tolerancije. Drugim riječima, svi hromozomi imaju gotovo identične vrijednosti *fitness* funkcije. Takođe je moguće uvesti i koncept maksimalno dozvoljenog vremena izvršavanja proračuna, izraženo u sekundama, kao indikator da se program može zaustaviti.

4.3. Izbor parametara genetičkog algoritma

Pravilan odabir parametara genetičkog algoritam determinišući je faktor kojim se postiže efikasnost primjene ove metode. Stoga je neophodno prije same procedure proračuna dovoljno pažnje posvetiti prilikom određivanja sljedećih parametara:

1. **Stopa ukrštanja** - definiše koliko će se puta u tekućoj generaciji odigrati proces ukrštanja hromozoma. Ovaj broj uzima vrijednosti iz opsega [0,1]. Donja granica podrazumijeva da će svi hromozomi bez izmjena, izuzev mutiranih, biti direktno kopirani u novu populaciju. Gornja granica podrazumijeva da će svi hromozomi tekuće populacije učestvovati u rekombinaciji. Usvajanjem vjerovatnoće ukrštanja p_c , operator ukrštanja se primjenjuje na $100 \cdot p_c$ % hromozoma, dok se preostalih $100 \cdot (1 - p_c)$ % hromozoma prepisuje u narednu populaciju. Najčešće je stopa ukrštanja značajno veća od stope mutacije, i iznosi 0,8 - 0,9.
2. **Stopa mutacije** - definiše na koliko će se hromozoma iz tekuće populacije primijeniti operator mutacije. Vjerovatnoća mutacije, koja uzima vrijednost iz opsega [0,1], obično je bliska donjoj granici. Uobičajena je praksa da je stopa mutacije svega par procenata veličine populacije. Odabir visoke vrijednosti za vjerovatnoću mutacije nije poželjan, jer se na taj način genetički algoritam prevodi u potpuno stohastičnu pretragu.
3. **Veličina populacije** - definiše broj hromozoma u populaciji. Veličina populacije se bira na način da omogućiti dovoljnu diversifikaciju inicijalnih rješenja. Ukoliko je ova veličina mala, algoritam neće moći da obuhvati dovoljno veliki dio pretraživačkog prostora. Sa druge strane, povećanje broja jedinki u populaciji daje bolji pregled pretraživačkog prostora, ali je istovremeno razlog smanjenja brzine proračuna. Međutim, navedena poteškoća može se prevazići upotrebom naprednijih računara. Dimenzija populacije može se odabrati iskustveno, posmatrajući ponašanje algoritma za različite veličine populacije.

5. Implementacija predložene metode

U prvom dijelu ovog poglavlja biće izložena postavka optimizacionog problema i dat opis predložene metode. Nakon toga slijedi dio poglavlja u kojem su predstavljeni rezultati istraživanja. Za potrebe implementacije algoritma korišćen je softverski paket MATLAB, dok je za potrebe dokazivanja skalabilnosti i modularnosti izložene tehnike simulacija izvedena na preporučenim testnim sistemima: IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 i IEEE 118 . Podaci o navedenim IEEE sistemima su navedeni u Prilogu.

5.1. Opis problema i primijenjene metode

Cilj metode predložene ovim radom je rješavanje problema koji se sastoji u određivanju lokacija i snaga minimalno potrebnog broja uređaja za naponsko-reaktivnu regulaciju koje je potrebno ugraditi kako bi se naponski profil čitavog sistema održao u okviru postavljenih granica. Dodatno, nastoji se postići i da reaktivna snaga svih generatora bude u okviru njihovog regulacionog opsega. U većini radova iz dostupne literature na temu optimalne alokacije uređaja za kompenzaciju reaktivne snage, autori predlažu dekompoziciju optimizacionog

problema. Ovaj pristup podrazumijeva da se za unaprijed definisan broj dodatih uređaja njihove optimalne lokacije odrede identifikacijom najslabijih čvorova primjenom analize osjetljivosti, a da se potom metaheurističke tehnike iskoriste za dimenzionisanje uređaja sa stanovišta optimalne snage. Budući da odabir najslabijih čvorova nije garancija da se povoljnije rješenje u smislu manje vrijednosti kriterijumske funkcije neće dobiti nekom drugom mogućom kombinacijom čvorova, to su u ovom radu i lokacije za ugradnju uređaja dodatno tretirane kao promjenjive. Ovim je dimenzionalnost problema, u odnosu na slučaj kada je potrebno odrediti samo snagu dodatih uređaja, udvostručena.

Za određivanje strujno-naponskih prilika u mreži korišćen je *Newton Raphson-ov* postupak za proračun tokova snaga, dok je za određivanje broja i snage dodatih uređaja korišćen genetički algoritam. U nastavku je opisan *Newton Raphson-ov* metod.

5.2. *Newton-Raphson-ov* postupak za proračun tokova snaga

Osnovna matematička formulacija *Newton-Raphson-ovog* algoritma opisana je relacijom [64]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(v)} = J^{(v)} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(v)} \quad (5.1)$$

gdje je:

$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$ - vektor odstupanja specificiranih od proračunatih injeckiranja aktivne i reaktivne snage

J - matrica Jakobijana

$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$ - vektor nepoznatih odstupanja faznih stavova i modula napona koje je potrebno odrediti

v -broj iteracije

Inicijalizacija ovog metoda podrazumijeva "*flat start*", odnosno postavljanje svih napona na 1 (p.u.) i faznih stavova na 0. Na početku svake iteracije se određuju injeckiranja aktivne i reaktivne snage u svim čvorovima sistema:

$$P_i(x) = \sum_{k=1}^N V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (5.2)$$

$$Q_i(x) = \sum_{k=1}^N V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (5.3)$$

a potom njihovo odstupanje od specificiranih vrijednosti:

$$\Delta P = P_{spec} - P \quad (5.4)$$

$$\Delta Q = Q_{spec} - Q \quad (5.5)$$

gdje je:

$$P_{spec} = P_{gen} - P_{potr},$$

$$Q_{spec} = Q_{gen} - Q_{potr}$$

Potom se formira matrica Jakobijana J :

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta \theta} & \frac{\Delta P}{\Delta V} \\ \frac{\Delta Q}{\Delta \theta} & \frac{\Delta Q}{\Delta V} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

koja predstavlja osjetljivost promjene aktivnih i reaktivnih injeckiranja na promjenu faznih stavova i modula napona. Njeni elementi predstavljaju parcijalne izvode vektorske funkcije po

vektorskoj promjenljivoj, i proračunavaju se diferenciranjem izraza (5.2) i (5.3) po naznačenim veličinama.

Vektor nepoznatih odstupanja u tekućoj iteraciji se dobija množenjem invertovane matrice Jakobijana i vektora odstupanja injektiranja snage:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(v)} = [J^{(v)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(v)} \quad (5.7)$$

Potom se određuju nepoznati moduli i fazni stavovi napona sabiranjem sa njihovim priraštajima koji su određeni u prethodnoj iteraciji:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(v+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(v)} + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(v)} \quad (5.8)$$

Opisana procedura se iterativno sprovodi sve dok maksimalno odstupanje injektiranja snage (ΔP ili ΔQ) nije manje od usvojene tačnosti ε , čime se podrazumijeva da je postignuta konvergencija postupka. Nakon određivanja nepoznatih promjenjivih stanja, odnosno modula i faznih stavova napona, moguće je odrediti i ostale veličine od interesa za proračun tokova snaga, kao što su aktivno i rekativno injektiranje u balansnom čvoru, reaktivno injektiranje u generatorskim čvorovima, tokovi snaga po granama i gubici aktivne i reaktivne snage.

Karakteristika opisanog metoda je brza konvergencija. Iako je ovaj postupak robusan budući da ne koristi nikakve aproksimacije, računarski je zahjevan. Proračun i invertovanje matrice Jakobijana u svakoj iteraciji su najzahtjevniji dio procedure.

5.3. Formulacija genetičkog algoritma

Imajući u vidu prirodu samog problema, za reprezentaciju potencijalnih rješenja korišćeno je kombinovano cjelobrojno i kodiranje realnim brojevima. Snage uređaja su predstavljene realnim brojevima, dok su njihove potencijalne lokacije cjelobrojne vrijednosti. Takođe, treba napomenuti da bi primjena binarnog kodiranja mogla negativno da se odrazi na preciznost rješenja, što bi posljedično moglo da rezultira pogrešnim zaključkom o broju potrebnih uređaja. Diskretizacija pretraživačkog prostora ograničavanjem broja decimala kojima se predstavlja snaga uređaja prepoznata je kao potencijalni problem konvergencije algoritma. Stoga su za ove promjenjive razmatrane kontinualne vrijednosti. Svaki hromozom koji predstavlja rješenje od N uređaja se zapisuje kao skup od $2N$ članova na sljedeći način:

$$x_i = [Q_1 Q_2, Q_3 \dots, lok_{(1)}, lok_{(2)}, lok_{(3)}, \dots] \quad (5.9)$$

gdje je:

Q_i - snaga dodatog uređaja na lokaciji $lok_{(i)}$

$lok_{(i)}$ - lokacija dodatog uređaja, $lok_{(i)} \in \{N_1, N_2, \dots, N_{PQ}\}$

Lokacije uređaja su slučajno generisani cijeli brojevi iz skupa PQ čvorova $\{N_1, N_2, \dots, N_{PQ}\}$, dok snage izražene u relativnim jedinicama uzimaju vrijednosti iz opsega $[-1, 1]$. Nakon dodavanja uređaja snage Q_d na lokaciji $lok_{(i)}$, specificirano reaktivno injektiranje u tom čvoru postaje:

$$Q_i = Q_i + Q_d \quad (5.10)$$

gdje je:

$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$, reaktivno injektiranje u čvoru i prije dodavanja uređaja

Odabrana kriterijska funkcija minimizuje broj i ukupnu snagu dodatih uređaja, i može se izraziti na sljedeći način:

$$f(N_g, Q_d) = K_1 N_g + K_2 Q_d + K_v \sum_{i=1}^{N_b} V_x + K_g \sum_{i=1}^{N_{PV}} \Delta Q_{gi} \quad (5.11)$$

gdje je:

N_g - broj dodatih uređaja

Q_d - ukupna snaga dodatih uređaja (p.u.)

K_1, K_2 - težinski koeficijenti odabrani tako da je $K_1 \gg K_2$

K_v, K_g - penalizacioni težinski koeficijenti

N_b - ukupan broj čvorova

N_{PV} - ukupan broj generatorskih čvorova

V_x - naponi svih čvorova čije odstupanje od referentne vrijednosti premasuje maksimalno dozvoljeno odstupanje napona

ΔQ_{gi} - apsolutno odstupanje reaktivne snage generatora od usvojenih limita regulacionog opsega, koje se racuna prema sljedećoj relaciji:

$$\Delta Q_{gi} = \left| Q_{gi_{max/min}} - Q_{gi} \right| \quad (5.12)$$

Osnovna kriterijska funkcija uključuje prva dva sabirka, a izbor koeficijenata K_1 i K_2 treba da bude takav da omogući veliki razmak između njih, kako ne bi došlo do preklapanja vrijednosti pojedinačnih kriterijskih funkcija. Takođe, potrebno je sabirku kojom se želi dati veći prioritet pridružiti veću numeričku vrijednost težinskog koeficijenta. Nakon testiranja različitih vrijednosti za K_1 i K_2 , u radu su za iste odabrane vrijednosti od 500 i 100, respektivno. Odabirom težinskih koeficijenata različitog reda algoritam će težiti da pronađe rješenja sa manjim brojem uređaja, a među njima favorizovati ona sa manjom dodatom snagom. Pronalaskom minimalne snage dodatih uređaja nastoji se pronaći ekonomski najprihvatljivije rješenje koje ispunjava sve tehničke kriterijume, čime se uspostavlja balans između naizgled sučeljenih strana tehnike i ekonomije.

Ukrštanje je realizovano kao kombinacija simuliranog binarnog i uniformnog binarnog ukrštanja sa vjerovatnoćom ukrštanja 0.5. Za ukrštanje snaga dva hromozoma odabrano je simulirano binarno ukrštanje. Za ukrštanje lokacija dva hromozoma odabrano je uniformno binarno ukrštanje, kako bi se osiguralo da se i nakon primjene operatora dobije rješenje sa lokacijama iz skupa potrošačkih čvorova.

Pseudokod funkcije kojom je realizovano kombinovano ukrštanje je dat u nastavku:

```
function child = ukrstanje (parent1, parent2)
{
n = numel (parent1);

for i = 1 : n/2
child (i) = parent1 (i) + (parent1 (i) - parent2 (i)) * rand();
end

for i = n/2 + 1 : n
if rand() > 0.5
```

6. Rezultati proračuna

Prilikom implementacije predložene metode uvedene su sljedeće pretpostavke:

- potrošački čvorovi se razmatraju kao potencijalne lokacije ugradnje regulacionih sredstava
- uređaji se modeluju preko injektirane/ absorbovane reaktivne snage u čvoru u kom se priključuju
- snaga dodatih uređaja je kontinualne vrijednosti
- u radu nisu optimizovani ostali regulacioni resursi

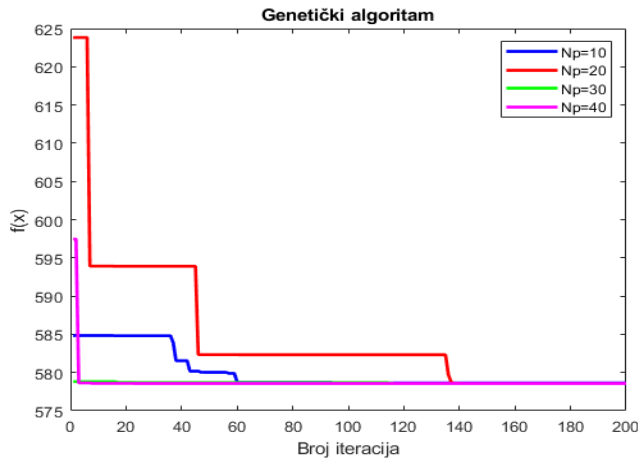
Prva pretpostavka polazi od činjenice da se naponi na generatorskim sabirnicama održavaju na konstantnoj vrijednosti. Uvedena je mogućnost automatske regulacije napona u smislu blagog povisenja/snizenja amplitude napona na generatorskim sabirnicama, ukoliko neki od agregata radi van dozvoljenog regulacionog opsega. Radi opštosti postupka, u radu nije striktno navedeno o kom tipu uređaja za kompenzaciju se radi, a na osnovu druge pretpostavke, predložena metoda se može koristiti za optimalnu alokaciju bilo kojeg od uređaja koji se koriste za otopnu kompenzaciju. Na kraju, razmatranje diskretnih vrijednosti za snagu moglo bi da navede na pogrešan zaključak po pitanju minimalnog broja uređaja. Stoga je uvedena treća pretpostavka. Posljednja pretpostavka podrazumijeva da je kod regulacionih transformatora uzet ravnotezni položaj regulacione sklopke.

Genetički algoritam je pokretan više puta i najbolje rješenje je navedeno u rezultatima. Podaci o snagama generatora, opterećenjima potrošača i parametrima vodova datih elektroenergetskih mreža su navedeni na kraju ovog rada, u Prilogu.

6.1. IEEE 14

U narednom dijelu dat je grafički i analitički prikaz konvergencije algoritma za različite vrijednosti parametara: veličine populacije, stope ukrštanja i mutacije i tipa selekcije.

Na slici 6.1. dat je uticaj veličine populacije na konačno rješenje optimizacionog postupka.

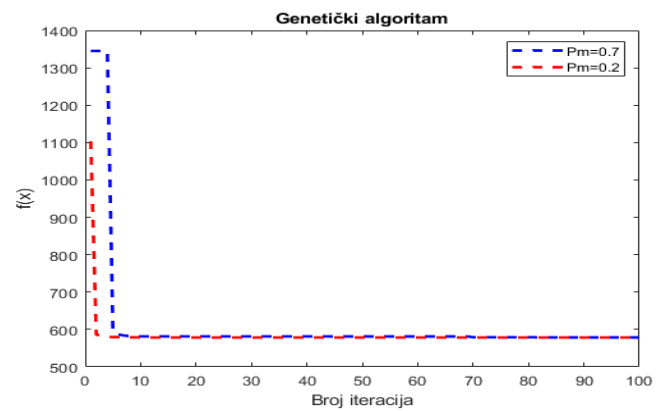
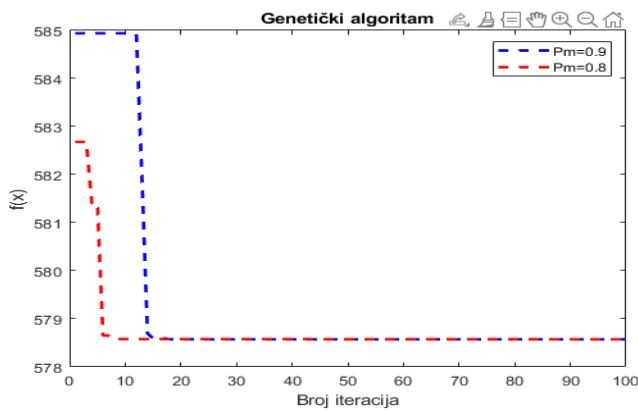


Veličina populacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$N_p=10$	578.631	166
$N_p=20$	578.5793	143
$N_p=30$	578.5733	118
$N_p=40$	578.5732	8

Na slic

Slika 6.1. Konvergencija GA u zavisnosti od veličine populacije.

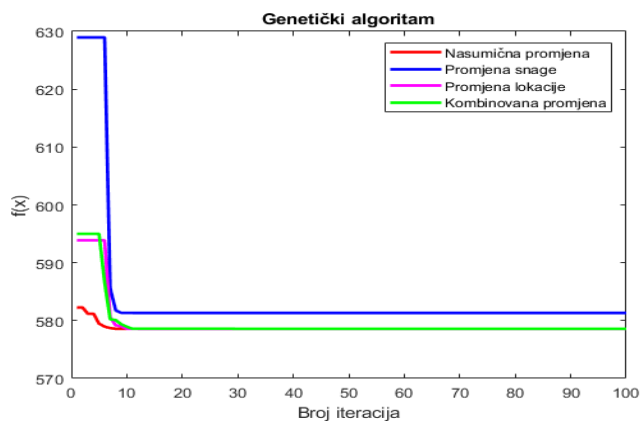
tupka.



Stopa ukrštanja	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$p_u=0.9$	578.5732	85
$p_u=0.8$	578.5732	89
$p_u=0.7$	578.7559	82
$p_u=0.2$	578.5744	45

Slika 6.2. Konvergencija GA u zavisnosti od stope ukrštanja.

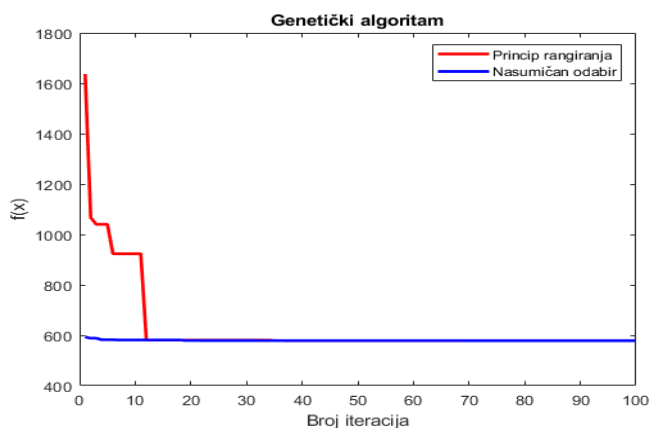
Na slici 6.3. dat je uticaj operatora mutacije na konačno rješenje optimizacionog postupka. Razmatrani su slučajevi nasumične promjene bita u hromozomu, promjena snage, promjena lokacije i kombinovana promjena koja podrazumijeva promjenu snage kod jednog, i promjenu lokacije kod drugog hromozoma.



Tip mutacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Nasumična promjena	578.5732	56
Promjena snage	581.3271	95
Promjena lokacije	578.5731	57
Kombinovana promjena	578.5768	30

Slika 6.3. Konvergencija GA u zavisnosti od operatora mutacije.

Na slici 6.4. dat je uticaj operatora selekcije na konačno rješenje optimizacionog postupka. Razmatrana je selekcija hromozoma poštujući princip rangiranja, kao i nasumičan odabir hromozoma.



Tip selekcije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Rangiranje	578.5771	39
Nasumičan odabir	578.6037	70

Slika 6.4. Konvergencija GA u zavisnosti od operatora operatora selekcije

Na osnovu prethodno navedenog, uočava se da izbor parametara algoritma ne utiče na krajnje rješenje optimizacionog postupka, jer se u svim razmatranim slučajevima dobija približno ista vrijednost *fitness* funkcije, što u pogledu kvaliteta samog rješenja implicira da se u svim razmatranim slučajevima dobija isti broj uređaja, približno iste snage. Međutim, zapaža se da navedeni parametri utiču na brzinu konvergencije, što je posebno izraženo tokom početnih iteracija. Sa slike 6.1. se uočava da algoritam najbrže konvergira pri odabiru najveće populacije. Sa slike 6.2. se uočava da se identična minimalna snaga uređaja dobija u slučaju

stope ukrštanja 0.9 i 0.8, ali da pri odabiru stope ukrštanja od 0.9 algoritmu je potrebno manje iteracija za postizanje konvergencije. Sa slike 6.3. moguće je zapaziti da se minimalna snaga uređaja dobija ukoliko se operator mutacije realizuje po principu promjene snage, ali da se bolja konvergencija uz neznatno veću reaktivnu snagu uređaja postiže kada se odabere kombinovana mutacije. Konačno, sa slike 6.4. uočava se da algoritam brže konvergira u početnim iteracijama ukoliko se selekcija hromozoma vrši nasumičnim putem. Stoga je izbor parametara sljedeći:

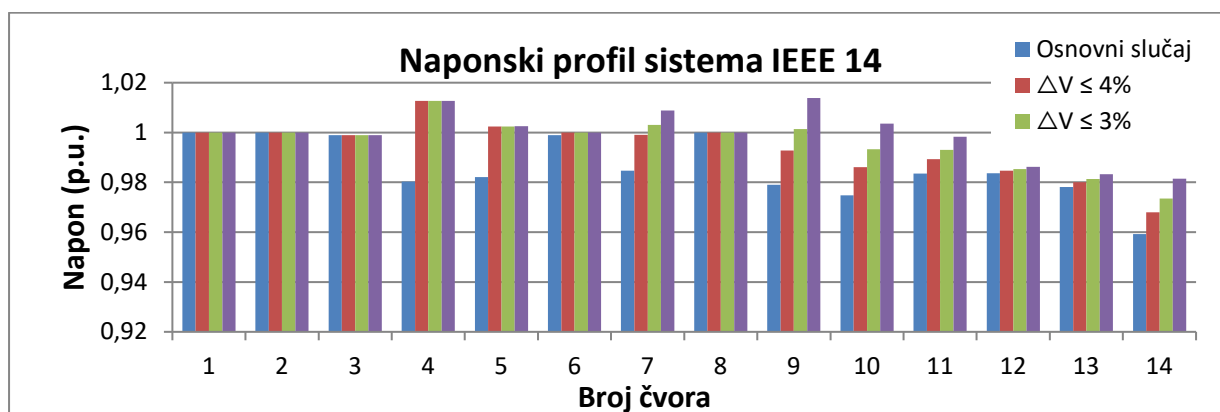
- Broj generacija: 100
- Veličina populacije: 40
- Stopa ukrštanja: 0.9
- Kombinovana mutacija, koja podrazumijeva promjenu snage jednog, i promjenu lokacije drugog hromozoma
- Nasumičan odabir hromozoma za selekciju

U sljedećoj tabeli su prikazani rezultati optimizacionog postupka. Usvojena snaga dodatih uređaja je [-100, 100] MVar.

Tabela 6.1 Rezultati optimizacionog postupka za sistem IEEE 14

	IEEE 14		
	$\pm 4\%$	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$
Maksimalno odstupanje napona	$\pm 4\%$	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$
Minimalan broj uređaja	1	2	2
Ukupna instalisana snaga (MVar)	78.57	83.23	90.43
Lokacije uređaja	4	4,14	4,9

Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da je potrebno ugraditi više uređaja kako bi se postigao uži opseg devijacije napona. Istovremeno, uočava se da postoji potreba za povećanjem instalisane snage uređaja, odnosno da sistem zahtijeva viši nivo kompenzacije reaktivne snage za ispunjenje oštrijih tehničkih zahtjeva. Poboljšanje naponskog profila prikazano je na slici 6.5.



Slika 6.5 Naponski profil sistema IEEE 14 nakon optimizacije

Zanimljivo je istaći da se, na osnovu proračuna tokova snaga za osnovni slučaj bez prisustva naponsko-reaktivnih regulacionih resursa, čvor 14 izdvaja kao najslabiji čvor u mreži. Međutim, odabir najslabijeg čvora ne garantuje da će se na taj način dobiti optimalna vrijednost odabrane kriterijumske funkcije, odnosno minimalna vrijednost reaktivne snage. Rezultati genetičkog algoritma pokazuju da se bolji rezultati optimizacije dobijaju ukoliko se algoritmu dopusti sloboda u izboru i snage i lokacija uređaja.

Drugačiji rezultati se dobijaju ukoliko se usvoji drugačiji regulacioni opseg dodatih naponsko reaktivnih uređaja, kao što je prikazano u tabeli 6.2. Proračuni su sprovedeni za osnovni slučaj odstupanja napona od 4% .

Tabela 6.2 Rezultati optimizacionog postupka u zavisnosti od opsega snage dodatih uređaja

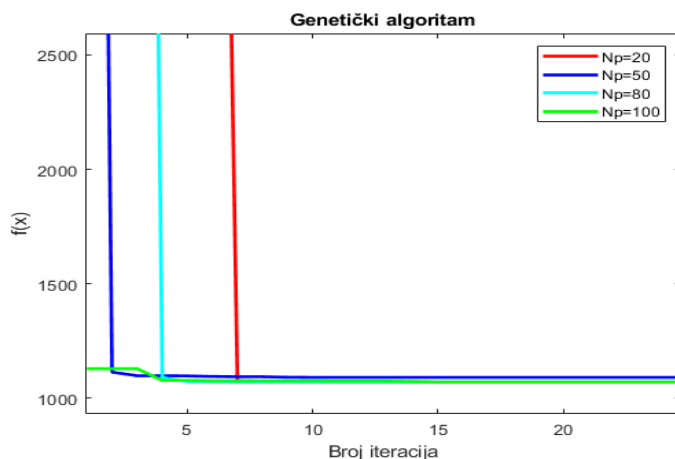
Opseg snage (MVar)	[-70, 70]	[-60, 60]	[-50, 50]	[-40, 40]
Broj uređaja	2	2	2	3
Ukupna instalisana snaga	86,05	93,14	95,31	112,98
Lokacije (MVar)	4, 5	4, 5	4, 5	4, 5, 7

Mogućnosti algoritma određene su i regulacionom sposobnošću uređaja. Za konkretni sistem, dobijaju se iste optimalne lokacije za opsege [-70,70], [-60,60] i [-50,50] MVar. Za slučaj opsega [-40,40] potrebno je dodati tri uređaja što se razlikuje u odnosu na sve prethodno razmatrane slučajeve gdje je bilo dovoljno instalirati dva uređaja. Takođe, u svim slučajevima je dobijena veća potrebna snaga.

6.2. IEEE 30

U narednom dijelu dat je grafički i analitički prikaz konvergencije algoritma za različite vrijednosti parametara: veličine populacije, stope ukrštanja i mutacije i tipa selekcije.

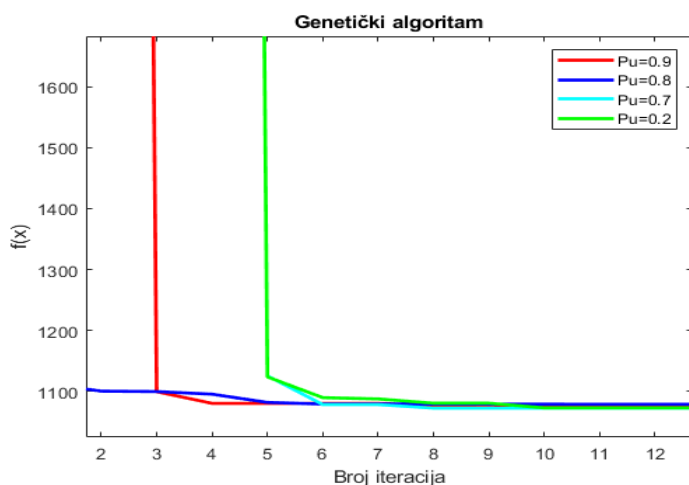
Na slici 6.6 dat je uticaj veličine populacije na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Veličina populacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$N_p=20$	1068.9713	187
$N_p=50$	1068.7122	168
$N_p=80$	1069.8511	79
$N_p=100$	1069.0089	197

Slika 6.6 Konvergencija GA u zavisnosti od veličine populacije

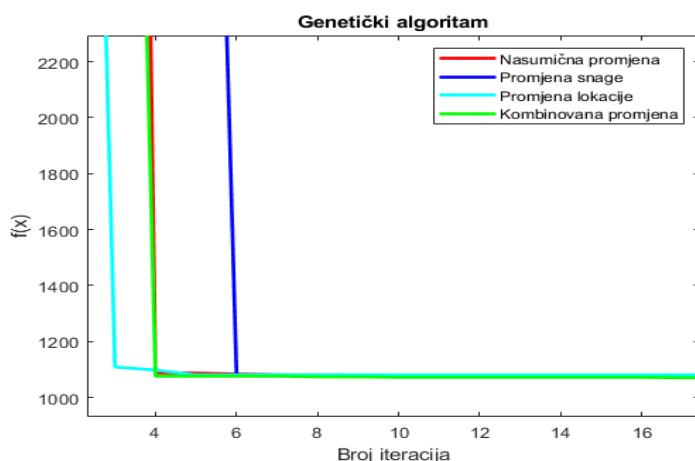
Na slici 6.7 dat je uticaj stope ukrštanja na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Stopa ukrštanja	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$p_u=0.9$	1070.6722	176
$p_u=0.8$	1073.1258	184
$p_u=0.7$	1071.337	178
$p_u=0.2$	1070.5612	147

Slika 6.8. Konvergencija GA u zavisnosti od stope ukrštanja

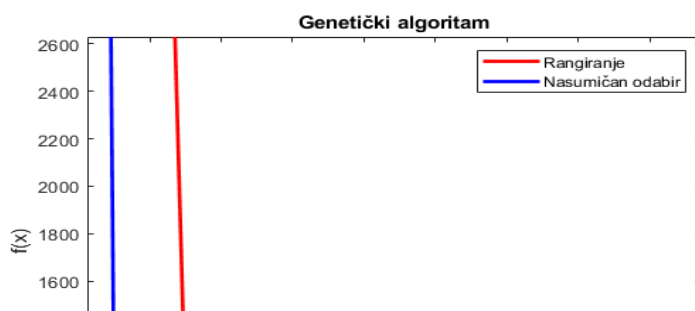
Na slici 6.9. dat je uticaj operatora mutacije na konačno rješenje optimizacionog postupka. Razmatrani su slučajevi nasumične promjene bita u hromozomu, promjena snage, promjena lokacije i kombinovana promjena koja podrazumijeva promjenu snage kod jednog, i promjenu lokacije kod drugog hromozoma.



Tip mutacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Nasumična promjena	1070.5774	182
Promjena snage	1080.3295	92
Promjena lokacije	1074.6481	19
Kombinovana promjena	1071.0282	191

Slika 6.9. Konvergencija GA u zavisnosti od operatora mutacije

Na slici 6.10. dat je uticaj operatora selekcije na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Tip selekcije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Rangiranje	1073.1578	187
Nasumičan odabir	1072.2228	146

Slika 6.10. Konvergencija GA u zavisnosti od tipa selekcije

Na osnovu prethodno navedenog, uočava se da izbor parametara algoritma utiče i na brzinu konvergencije i na kvalitet konačnog rješenja u pogledu zahtijevane snage. Sa slike 6.6. se uočava da se u svim razmatranim slučajevima dobija isti broj uređaja, i približno ista vrijednost njihove snage, ali da algoritam najbrže konvergira pri odabiru najveće populacije. Takođe, sa slike 6.7. se uočava da se pri svim razmatranim vrijednostima stope ukrštanja dobijaju približno isti rezultati po pitanju snage uređaja, ali algoritam najbrže konvergira pri odabiru najveće vjerovatnoće ukrštanja. Sa slike 6.8. se uočava da se u svim razmatranim slučajevima dobija isto rješenje po pitanju potrebnog broja uređaja, kao i to da nasumična promjena bita, promjena lokacije i kombinovana promjena daju približno iste rezultate po pitanju potrebne snage, ali da algoritam najbrže konvergira kada se koristi kombinovana mutacija. Konačno, sa slike 6.9. se uočava da se zahtijevana snaga uređaja neznatno razlikuje bilo da se primijeni selekcija hromozoma po principu rangiranja ili nasumična selekcija, ali da se brža konvergencija postiže u drugom slučaju. Stoga su parametri genetičkog algoritma za ovaj sistem sljedeći:

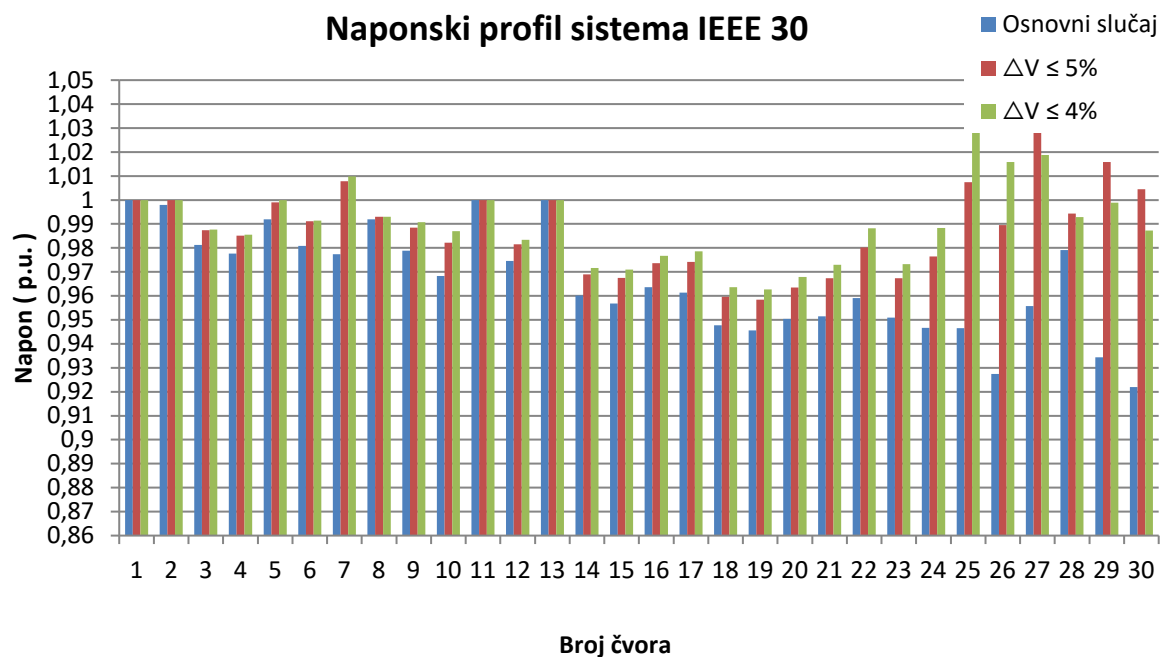
- Veličina populacije: 100
- Stopa ukršanja: 0,9
- Kombinovana mutacija
- Nasumična selekcija hromozoma

U sljedećoj tabeli su prikazani rezultati optimizacionog postupka. Usvojena snaga dodatih uređaja je [-100, 100] MVar, a ukupan broj generacija 200.

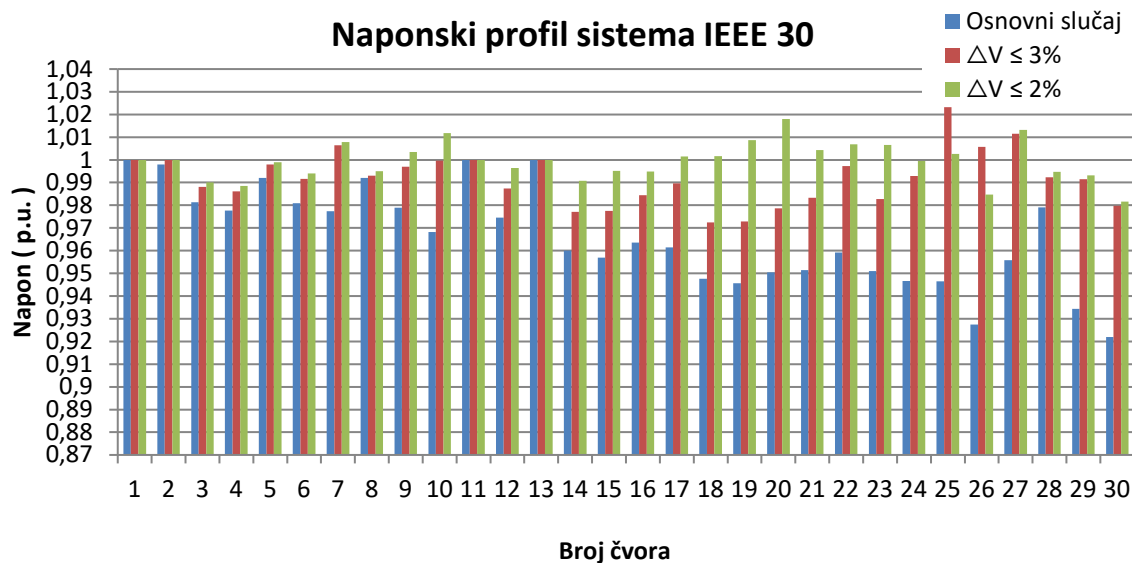
Tabela 6.3. Rezultati optimizacionog postupka za sistem IEEE 30

	IEEE 30			
	± 5%	±4%	±3%	±2%
Maksimalno odstupanje napona	± 5%	±4%	±3%	±2%
Minimalan broj uređaja	2	2	3	4
Ukupna instalisana snaga (MVar)	69,23	73,24	77,06	91,22
Lokacije uređaja	7, 27	7, 25	7, 10, 25	7, 20, 23, 27

Poboljšanje naponskog profila prikazano je na slikama 6.11. i 6.12.



Slika 6.11. Naponski profil sistema IEEE 30 nakon optimizacije za slučaj odstupanja napona od 5 i 4%

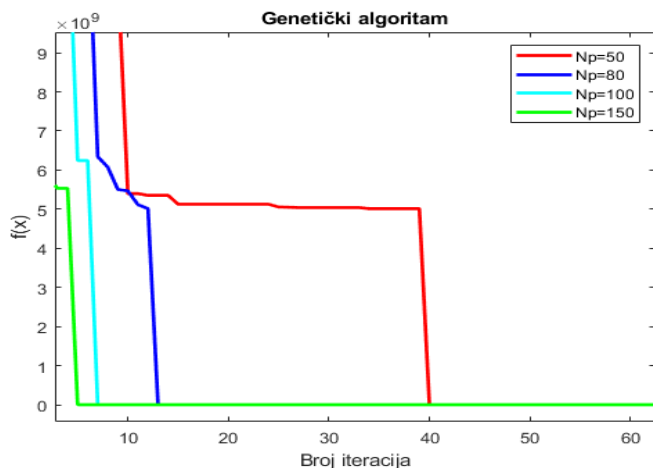


Slika 6.12. Naponski profil sistema IEEE 30 nakon optimizacije za slučaj odstupanja napona od 3 i 2%

Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da je potrebno ugraditi više uređaja kako bi se postigao uži opseg devijacije napona. Može se primijetiti da se maksimalno odstupanje napona od 4% može postići sa istim brojem uređaja koji je potreban za odstupanje napona od 5%, s tim da se zahtijeva veća instalisana snaga uređaja. Istovremeno, uočava se da postoji potreba za povećanjem instalisane snage uređaja, odnosno da sistem zahtijeva viši nivo kompenzacije reaktivne snage za ispunjenje oštrijih tehničkih zahtjeva.

6.3. IEEE 57

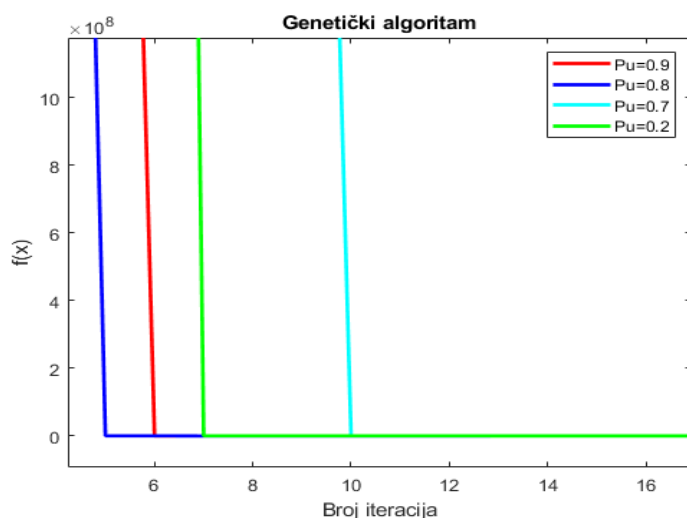
U narednom dijelu dat je grafički i analitički prikaz konvergencije algoritma za različite vrijednosti parametara: veličine populacije, stope ukrštanja i mutacije i tipa selekcije. Na slici 6.13. dat je uticaj veličine populacije na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Veličina populacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$N_p=50$	1651.4199	227
$N_p=80$	1649.9282	298
$N_p=100$	1677.0829	145
$N_p=150$	1648.9144	289

Slika 6.13. Konvergencija GA u zavisnosti od veličine populacije

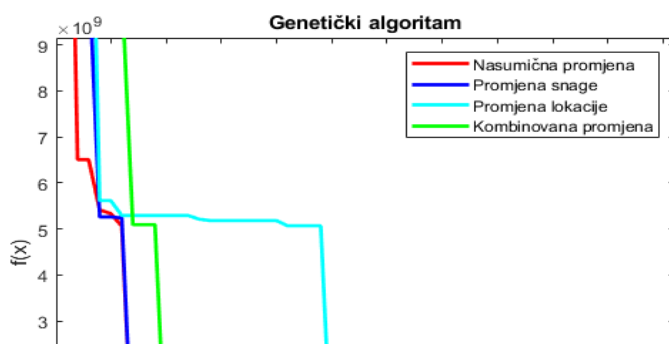
ka.



Stopa ukrštanja	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$p_u=0.9$	1653.4799	41
$p_u=0.8$	1660.5331	124
$p_u=0.7$	1688.2977	133
$p_u=0.2$	1654.4203	159

Slika 6.14. Konvergencija GA u zavisnosti od stope ukrštanja

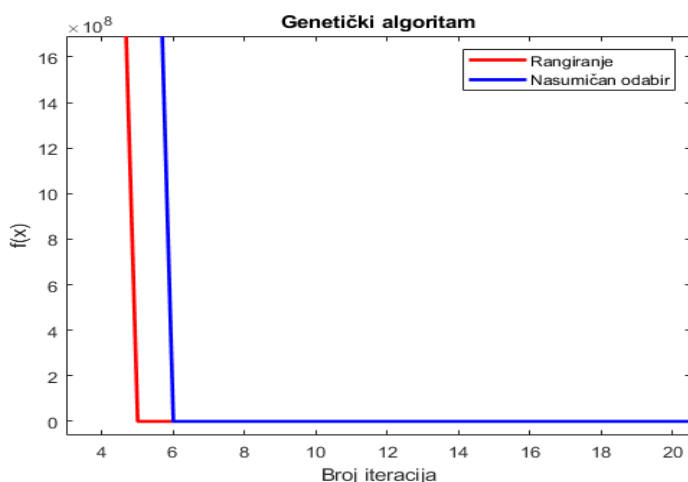
Na slici 6.15. dat je uticaj operatora mutacije na konačno rješenje optimizacionog postupka. Razmatrani su slučajevi nasumične promjene bita, isključivo promjena snage, isključivo promjena lokacije kod 8 hromozoma, kao i kombinovana promjena koja podrazumijeva promjenu snage kod četiri, i promjenu lokacije kod četiri hromozoma.



Tip mutacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Nasumična promjena	1651.8166	278
Promjena snage	379109.8558	42
Promjena lokacije	338773.3489	38

Slika 6.15. Konvergencija GA u zavisnosti od operatora mutacije

Na slici 6.16. dat je uticaj tipa selekcije na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Tip selekcije	Najniža fitnes vrijednost	Iteracija
Rangiranje	1668.3145	300
Nasumičan odabir	1654.6684	191

Slika 6.16. Konvergencija GA u zavisnosti od tipa selekcije

Na osnovu prethodno navedenog, moguće je zaključiti da izbor parametara genetičkog algoritma utiče i na brzinu konvergencije i na kvalitet krajnjeg rješenja sa aspekta potrebne instalisane snage uređaja. Sa slike 6.13. se uočava da veličina populacije ne utiče na konačno rješenje sa aspekta potrebnog broja uređaja, ali da se odabirom populacije od 150 jedinki dobija minimalna snaga uređaja, uz najbolju konvergenciju optimizacionog postupka. Sa slike 6.14. se uočava da se odabir vrijednosti stope ukrštanja utiče na zahtijevanu snagu uređaja, a dodatno i na konvergenciju postupka. U slučaju stope ukrštanja 0,9 i 0,2 dobijaju se najkvalitetnija rješenja, odnosno minimalna potrebna snaga uređaja, ali da se ipak bolja konvergencija postiže ukoliko se odabere stopa ukrštanja od 0,9. Takođe, sa iste slike se može primijetiti da algoritam najbrže konvergira pri odabiru stope ukrštanja od 0,8, ali da se tada dobija veća zahtijevana snaga u odnosu na prethodno pomenute slučajeve. Sa slike 6.15. se uočava da se najbolje rješenje (sa minimalnom instalisanom snagom), kao i najbolja konvergencija postižu ukoliko se primijeni kombinovana mutacija, koja podrazumijeva promjenu snage kod 4 hromozoma, i promjenu lokacije kod 4 hromozoma. Dodatno, može se zapaziti da algoritam pri mutaciji koja uključuje isključivo promjenu snage ili lokacije uređaja ne uspijeva da pronađe rješenje.

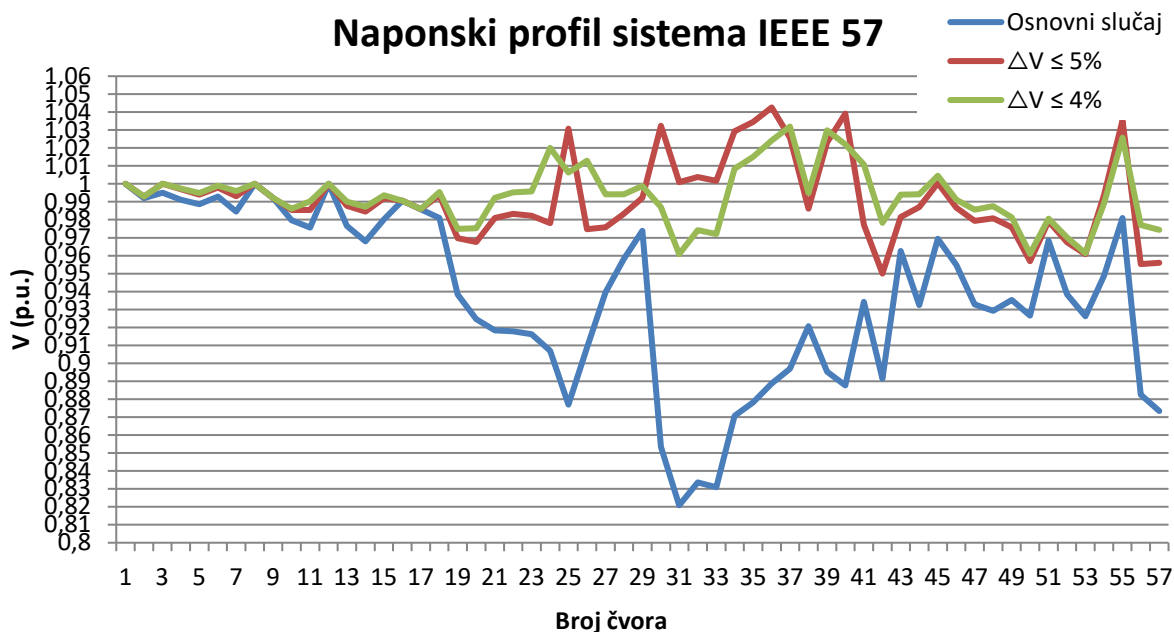
Konačno, sa slike 6.16. se uočava da algoritam brže konvergira ukoliko se selekcija hromozoma vrši po principu rangiranja, ali da se bolje rješenje, odnosno manja potrebna snaga uređaja, dobija ukoliko se odabir hromozoma vrši nasumičnim putem. Stoga su parametri genetičkog algoritma za ovaj sistem sljedeći:

- Veličina populacije: 150
- Stopa ukršanja: 0,9
- Kombinovana mutacija
- Nasumična selekcija hromozoma

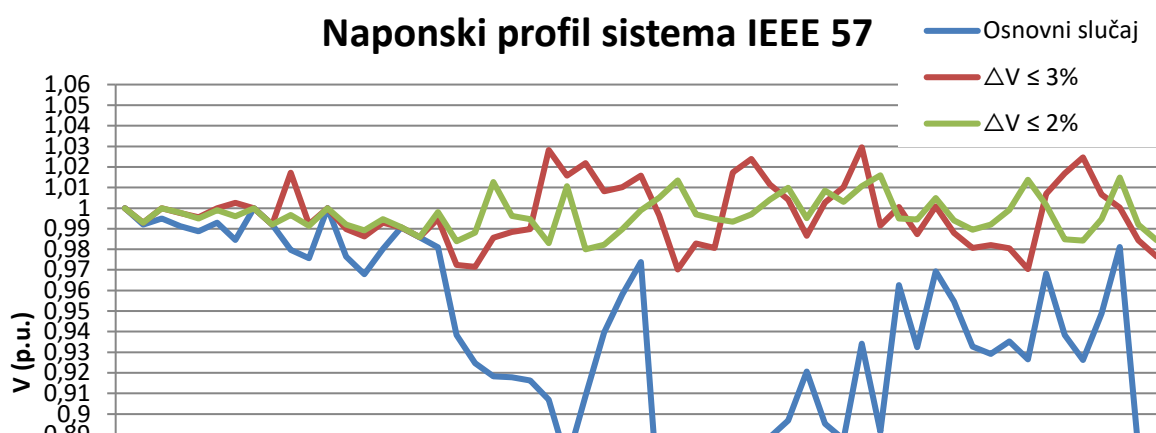
U sljedećoj tabeli su prikazani rezultati optimizacionog postupka. Usvojena snaga dodatih uređaja je [-100, 100] MVar, a ukupan broj generacija 200.

Tabela 6.4. Rezultati optimizacije za sistem IEEE 57

	IEEE 57			
	$\pm 5\%$	$\pm 4\%$	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$
Maksimalno odstupanje napona	$\pm 5\%$	$\pm 4\%$	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$
Minimalan broj uređaja	3	4	5	7
Ukupna instalisana snaga (MVar)	133,19	146,28	182,59	157,96
Lokacije uređaja	30, 36, 55	24, 37, 41, 55	10, 24, 35, 41, 53	21, 31, 37, 42, 50, 53, 55



Slika 6.17. Naponski profil sistema IEEE 57 nakon optimizacije za slučaj odstupanja napona 5% i 4%



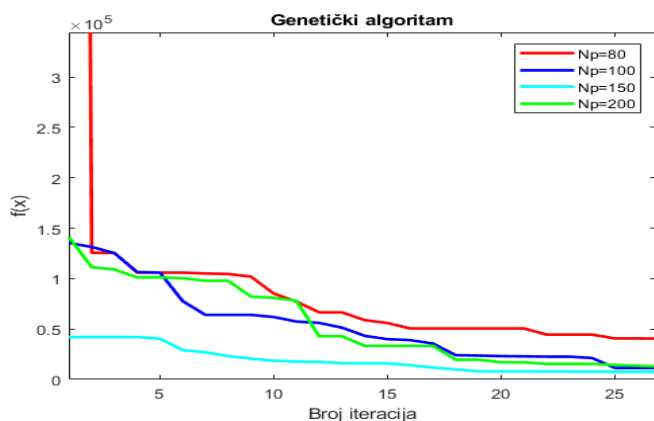
Slika 6.18. Naponski profil sistema IEEE 57 nakon optimizacije za slučaj odstupanja napona 3% i 2%

Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da je oštrije tehničke zahtjeve u pogledu maksimalnog odstupanja napona u svim čvorovima sistema moguće postići sa većim brojem uređaja. Takođe, osim povećanja broja potrebnih uređaja, zahtijeva se i veća ukupna instalisana snaga regulacionih resursa.

6.4. IEEE 118

U narednom dijelu dat je grafički i analitički prikaz konvergencije algoritma za različite vrijednosti parametara: veličine populacije, stope ukrštanja i mutacije i tipa selekcije.

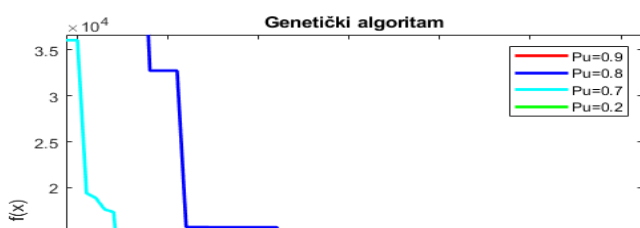
Na slici 6.19. dat je uticaj veličine populacije na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Veličina populacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$N_p=50$	3912.2694	294
$N_p=100$	3853.2199	288
$N_p=150$	3778.7724	269
$N_p=200$	7593.3684	294

Slika 6.19. Konvergencija GA u zavisnosti od veličine populacije

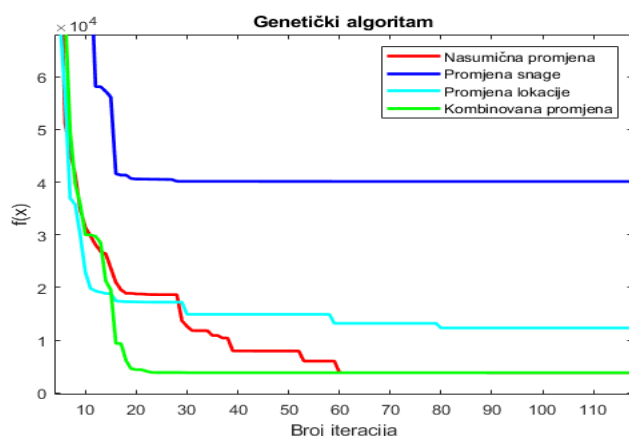
Na slici 6.20. dat je uticaj stope ukrštanja na konačno rješenje optimizacionog postupka



Stopa ukrštanja	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
$p_u=0.9$	3786.2313	296
$p_u=0.8$	3779.3109	293
$p_u=0.7$	3793.1004	280
$p_u=0.2$	5139.847	233

Slika 6.20. Konvergencija GA u zavisnosti od stope ukrštanja

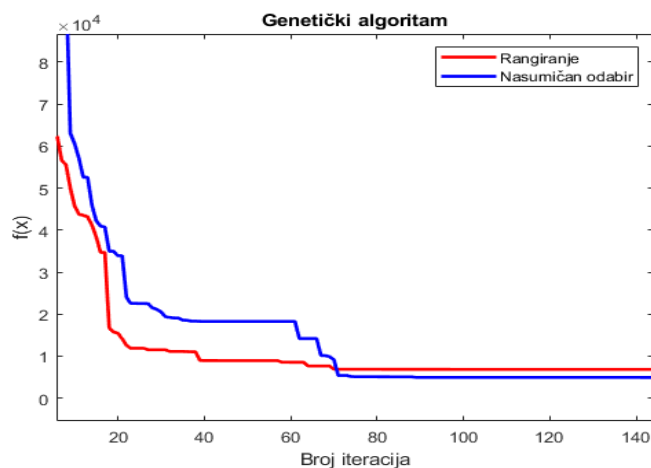
Na slici 6.21. dat je uticaj operatora mutacije na konačno rješenje optimizacionog postupka. Razmatrani su slučajevi nasumične promjene bita, isključivo promjena snage, isključivo promjena lokacije kod 10 hromozoma, kao i kombinovana promjena koja podrazumijeva promjenu snage kod pet, i promjenu lokacije kod pet hromozoma.



Tip mutacije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Nasumična promjena	3796.1906	106
Promjena snage	40029.2046	259
Promjena lokacije	12307.0044	297
Kombinovana promjena	3789.4323	298

Slika 6.21. Konvergencija GA u zavisnosti od operatora mutacije

Na slici 6.22. dat je uticaj tipa selekcije na konačno rješenje optimizacionog postupka.



Tip selekcije	Najniža fitness vrijednost	Iteracija
Rangiranje	3870.4842	296
Nasumičan odabir	3851.3563	274

Slika 6.22. Konvergencija GA u zavisnosti od tipa selekcije

Na osnovu prethodno navedenog, uočava se da izbor parametara algoritma utiče i na brzinu konvergencije i na kvalitet konačnog rješenja. Sa slike 6.19. se uočava da odabir veličine populacije ne utiče na krajnje rješenje u pogledu potrebnog broja uređaja ali da se najbolja konvergencija i najbolje rješenje u pogledu potrebne snage uređaja dobija u slučaju populacije od 150 jedinki. Sa slike 6.20. se uočava da algoritam najbrže konvergira kada je stopa ukrštanja 0,7, ali da se najmanja instalisana snaga uređaja dobija kada je stopa ukrštanja 0,8. Takođe, moguće je primijetiti da pri odabiru stope ukrštanja 0,2 algoritam ne uspijeva da pronađe rješenje.

Sa slike 6.21. se uočava da ukoliko se operator mutacije realizuje kao nasumična promjena bita ili kao kombinovana promjena, algoritam uspijeva da pronađe rješenje sa minimlanim brojem uređaja, dok kod mutacije koja uključuje isključivo promjenu snage ili lokacije optimizaciona procedura ne daje rezultate. Dodatno, moguće je zapaziti da se najbolja konvergencija i najbolje rješenje u pogledu snage postižu kada se primijeni kombinovana mutacija koja podrazumijeva promjenu snage kod 5 hromozoma, a takođe i promjenu lokacije kod 5 hromozoma. Konačno, sa slike 6.22. se uočava da algoritma postiže bolju konvergenciju kada se operator selekcije realizuje po principu rangiranja, ali da se bolje rješenje optimizacionog postupka, odnosno manja zahtijevana snaga dodatih uređaja, dobija ukoliko se selekcija hromozoma vrši nasumičnim putem.

Stoga su parametri genetičkog algoritma za ovaj sistem sljedeći:

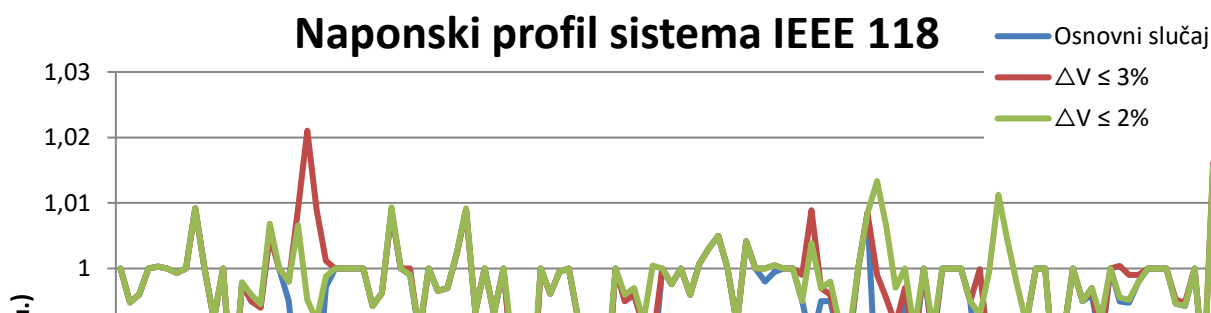
- Veličina populacije: 150
- Stopa ukršanja: 0,8
- Kombinovana mutacija
- Nasumična selekcija hromozoma

U sljedećoj tabeli su prikazani rezultati optimizacionog postupka. Usvojena snaga dodatih uređaja je [-100, 100] MVar, a ukupan broj generacija 300.

Tabela 6.5. Rezultati optimizacije za sistem IEEE 118

	IEEE 118	
	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$
Maksimalno odstupanje napona	$\pm 3\%$	$\pm 2\%$
Minimalan broj uređaja	7	9
Ukupna instalisana snaga (MVar)	275,73	353,3
Lokacije uređaja	21, 58, 75, 82, 93, 108, 118	17, 20, 44, 58, 75, 82, 95, 106, 118

Poboljšanje naponskog profila prikazano je na slici 6.23.



Slika 6.23. Naponski profil sistema IEEE 118 nakon optimizacije

Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da sistem zahtijeva instalaciju većeg broja uređaja kako bi se postigli oštriji tehnički zahtjevi po pitanju maksimalno dopuštenog odstupanja napona u svim čvorovima sistema. Takođe, uočava se potreba za većom instalisanom snagom dodatih uređaja kako bi navedeni kriterijum naponskog profila bio zadovoljen.

6.1.5. Poređenje sa drugim metaheurističkim tehnikama

U naučno-istraživačkom opusu na temu optimalne alokacije naponsko-reaktivnih regulacionih resursa brojni istraživači su koristili različite metaheurističke tehnike s ciljem poboljšanja pogonskih performansi sistema. Kao kriterijum za optimizaciju autori su razmatrali gubitake, devijaciju napona, totalnu harmonijsku distorziju, indeks naponske stabilnosti, opterećenost vodova, operativne troškove, troškova instalacije dodatih uređaja, samostalno ili kombinujući više navedenih parametara. Na taj način je direktno ili indirektno postignuto smanjenje devijacije napona i/ili ukupnih gubitaka posmatrane elektroenergetske mreže, što rezultira poboljšanjem naponskog profila sistema.

U ovom radu je fokus optimizacije stavljen na ukupan broj (N_g) i ukupnu instalisanu snagu dodatih uređaja (Q_d). Kako bi se izvršilo poređenje sa rezultatima iz dostupne literature, proračun je sproveden koristeći identične početne uslove koji podrazumijevaju usvajanje preporučenih vrijednosti za amplitudu generatorskih čvorova, kao i zadate položaje regulacionih otcjepa regulacionih transformatora, koji su navedeni na kraju ovog rada, u Prilogu. Za potencijalne lokacije dodatih uređaja razmatrani su potrošački (PQ) čvorovi. Tretirano je ograničenje snage dodatih pojedinačnih uređaja ($[-100, 100]$ MVar), regulacioni opseg generatora, dok je maksimalno dopušteno odstupanje napona ($\pm 5\%$) primijenjeno samo za potrošačke čvorove. U nastavku su dati rezultati za različite IEEE sisteme.

6.1.5.1. Sistem IEEE 14

U tabeli 6.6. su navedeni rezultati optimizacije predložene metode i sljedećih metoda: SAFA (*Self-Adaptive Firefly Algorithm*), BFOA (*Bacterial Foraging Optimization Algorithm*), HBOA (*Honey Bee Optimization algorithm*), kombinacija fuzzy logike i PSO i ABC (*Artificial Bee Colony*). Proračuni su sprovedeni koristeći IEEE testnu mrežu od 14 čvorova.

Tabela 6.6. Poređenje rezultata za sistem IEEE 14

Rezultati optimizacije za sistem IEEE 14					
Metoda	Kriterijumska funkcija	Broj uređaja	Lokacije	Ukupna instalisana snaga (MVA _r)	Gubici (MW)
Predložena metoda	Ng, Qd	2	5, 10	86,38	14
SAFA [65]	Ploss	3	7, 9, 13	40,065	13,245
BFOA [65]	Ploss	3	7, 10, 13	28,372	13,256
HBOA [65]	Ploss	3	4, 10, 13	32,082	13,261
Fuzzy i PSO [35]	Ploss	2	5, 14	12,509	13,333
ABC [66]	Ploss, TVD, VSI	2	4, 9	41,7252	-

Komparacijom izloženih rezultata uočava se da predložena metoda daje manji broj uređaja u odnosu na metode SAFA, BFOA i HBOA, odnosno identičan broj uređaja kao ABC i kombinacija fuzzy logike i PSO algoritma. Dodatno, predložena metoda daje rezultat sa najvećom instalisanom snagom dodatnih uređaja. Takođe, uočava se da su gubici aktivne snage kod predložene metode veći u poređenju sa rezultatima svih ostalih metoda. Svakako, treba imati na umu da su gubici tretirani kod ostalih radova, dok isti nisu razmatrani u okviru kriterijumske funkcije ovog rada

6.1.5.2. Sistem IEEE 30

U tabeli 6.7. su navedeni rezultati optimizacije predložene metode i sljedećih metoda: Newton-Raphson, COA (*Circular Optimization Algorithm*), kombinacija fuzzy logike i PSO, NGSA II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*), QBAGA (Queen Bee Assisted Genetic Algorithm), MLSA (*Modified Lightning Search Algorithm*), SAFA, HBOA, BFOA, PSO, SA (*Simulated Annealing*), MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) i GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). Proračuni su sprovedeni koristeći IEEE testnu mrežu od 30 čvorova.

Tabela 6.7. Poređenje rezultata za sistem IEEE 30

Rezultati optimizacije za sistem IEEE 30					
Metoda	Kriterijumska funkcija	Broj uređaja	Lokacije	Ukupna instalisana snaga	Gubici (MW)
Predložena metoda	Ng, Qd	1	12	9,84	17,58

Newton Raphson [67]	Ploss, VPI, Investment Cost	1	12	45,09	18,05
COA [68]	Ploss, L-index	3	26, 29, 30	44,19	13,58
Fuzzy-PSO [35]	Ploss	3	7, 26, 30	19,256	17,40
NSGA II [69]	Ploss, TVD	1	30	10,93	19,43
QBAGA [70]	VSI	3	11, 21, 30	-	-
MLSA [71]	VSI	3	9, 13, 26	81,88	-
SAFA [65]	Ploss	6	3, 4, 10, 19, 21, 25	64,10	17,16
HBOA[65]	Ploss	6	3, 4, 10, 19, 21, 27	60,46	17,18
BFOA [65]	Ploss	6	3, 15, 16, 19, 21, 27	70,12	17,19
PSO [72]	Ploss, TVD	1	21	40,83	-
SA [73]	Ploss, TVD	1	9	89,28	-
MILP [74]	Loadability	1	8	34	-
GRASP[75]	VCL _L , AVCL _k , VVL _n , AVVL _k	3	8, 10, 21	28	-

Analizom podataka iz prethodne tabele zaključuje se da predložena metoda daje bolji rezultat optimizacije po pitanju minimalnog broja dodatih uređaja u poređenju sa metodama COA, kombinacija fuzzy logike i PSO, QBAGA, MLSA, SAFA, HBOA, BFOA i GRASP, odnosno identičan rezultat kao metode Newton-Raphson, NSGA II, PSO, SA i MILP. Takođe, uočava se da predložena metoda daje najmanju vrijednost instalisane snage dodatog uređaja. Dodatno, može se uočiti da je dobijena ista optimalna lokacija uređaja (čvor 12) kao i u slučaju primjene metode Newthton-Raphson. U tabeli 6.7. je naveden podatak o gubicima aktivne snage u radovima u kojima je to naznačeno. Komparacijom navedenih rezultata, moguće je zaključiti da predložena metoda daje manje gubitke u poređenju sa metodama Newton-Rapshon i NGSA II, ali lošije u odnosu na ostale metode. Svakako, treba imati na umu da gubici aktivne snage nisu fokus istraživanja ovog rada.

6.1.5.3. Sistem IEEE 57

U tabeli 6.8. su navedeni rezultati optimizije predložene metode i sljedećih metoda: SAFA, HBOA, BFOA, GRASP, WOA-CPF (*Whale Optimization Algorithm-Continuous Power Flow*) i PSO. Proračuni su sprovedeni koristeći IEEE testnu mrežu od 57 čvorova.

Tabela 6.8. Poređenje rezultata za sistem IEEE 57

Rezultati optimizacije za sistem IEEE 57

Metoda	Kriterijumska funkcija	Broj uređaja	Lokacije	Ukupna instalisana snaga (MVA _r)	Gubici (MW)
Predložena metoda	Ng, Qd	3	23, 36, 55	156,07	30,74
SAFA [65]	Ploss	7	4, 7, 11, 24, 29, 36, 39	47,40	26,809
HBOA [65]	Ploss	7	10, 15, 21, 24, 28, 32, 52	38,52	26,956
BFOA [65]	Ploss	7	4, 21, 30, 37, 38, 44, 49	9,32	26,970
GRASP [75]	VCL _L , AVCL _k , VVL _n , AVVL _k	11	13, 25, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 52, 53, 57	126	-
WOA - CPF [76]	Ploss, VSI, Loadability, Qd	5	3, 8, 26, 31, 36	131,52	25,801
PSO [34]	Ploss, TVD, Instalation cost	5	26, 31, 32, 33, 46	17,04	27,66
IHSA [34]	Ploss, TVD, Instalation cost	5	11, 26, 30, 31, 32, 33	16,97	27,48

Na osnovu izloženih rezultata može se zaključiti da predložena metoda daje najbolje rezultate u pogledu minimalnog broja uređaja za kompenzaciju reaktivne snage koje je potrebno instalirati. Međutim, dobijeno rješenje karakteriše maksimalna instalisana snaga dodatih uređaja, ali i najveći gubici aktivne snage u poređenju sa ostalim metodama. Dodatno, u radu u kojem je primijenjena metoda WOA-CPF uočava se da su dva generatora čvora (čvor 3 i 8) dobijeni kao optimalne lokacije uređaja, dok su u svim ostalim radovima razmatrani isključivo potrošački čvorovi. Kod metoda WOA-CPF, PSO, IHSA, kao i kod predložene metode, kriterijumska funkcija uvažava ekonomski aspekt predloženog rješenja preko instalisane snage uređaja ili kroz proračun njihovih instalacionih troškova, dok to nije slučaj kod ostalih metoda

6.1.5.4. Sistem IEEE 118

U tabeli 6.9. su navedeni rezultati optimizacije predložene metode i sljedećih metoda: AGPSO (*Autonomous Groups Particle Swarm Optimization*), IGWO (*Improved Grey Wolf Optimizer*), AGPSO-GWO (AGPSO - *Grey Wolf Optimizer*), GWO i PSO. Proračuni su sprovedeni koristeći IEEE testnu mrežu od 118 čvorova.

Tabela 6.9. Poređenje rezultata za sistem IEEE 118

Metoda	Kriterijumska funkcija	Broj uređaja	Lokacije	Ukupna instalisana snaga (MVA _r)	Gubici (MW)
Predložena metoda	Ng, Qd	2	53, 118	5,5202	132,3690
AGPSO [77]	Ploss, TVD, Operational costs	1	52	13.375	132.7948
IGWO [77]	Ploss, TVD, Operational costs	1	52	13.375	132.7948

AGPSO - GWO [77]	Ploss, TVD, Operational costs	1	52	13.309	132.7948
PSO [77]	Ploss, TVD, Operational costs	1	51	14.166	132.7948

Komparacijom izloženih rezultata uočava se da predložena metoda daje rješenje sa najvećim brojem potrebnih uređaja u odnosu na metode iz dostupne literature. Međutim, moguće je zapaziti da se dobijaju bolji rezultati optimizacije sa aspekta ukupne instalisane snage dodatih uređaja za kompenzaciju reaktivne snage. Takođe, predloženo rješenje osim poboljšanja naponskog profila utiče i na redukciju gubitaka aktivne snage. S tim u vezi, uočava se da su gubici minimalni u slučaju predložene metode.

7. Zaključak

Fokus ovog rada je nova formulacija problema optimalne alokacije naponsko-reaktivnih regulacionih resursa. Kriterijumska funkcija optimizacionog problema akcentat stavlja na ekonomsku stranu predloženog rješenja, dok istovremeno postavlja zahtjev za ispunjenje tehničkih kriterijuma u pogledu dozvoljenih naponskih limita i regulacionog opsega generatorskih jedinica. Za određivanje lokacija i snaga dodatih uređaja predložen je genetički algoritam, dok je određivanje strujno-naponskih prilika, reaktivne snage generatora i gubitaka u sistemu sprovedeno koristeći *Newton-Raphson*-ov postupak za proračun tokova snaga.

Efikasnost predloženog algoritma je upotrebom softverskog paketa MATLAB testirana na preporučenim IEEE testnim sistemima od 14, 30, 57 i 118 čvorova koji pripadaju kategoriji prenosnih elektroenergetskih mreža, pritom usvajajući različite tolerancije za maksimalno odstupanje napona u svim čvorovima sistema. Prilikom sprovođenja optimizacionog postupka, kao potencijalne lokacije za instalaciju uređaja u razmatranje su uzeti isključivo potrošački čvorovi, dok je njihova snaga kontinualne vrijednosti.

Poseban dio rada posvećen je komparaciji rezultata dobijenih predloženom metodom sa rezultatima metaheurističkih tehnika iz dostupne literature, koristeći broj i ukupnu instalisanu snagu dodatih uređaja kao kriterijum za ocjenu performansi. Za sistem od 14 čvorova dobijen je manji ili jednak broj potrebnih uređaja, ali veća instalisana snaga istih, u odnosu na ostale metode. U slučaju sistema od 30 čvorova dobija se istovremeno minimalan broj i minimalna snaga uređaja u poređenju sa ostalim metodama. Kod sistema od 57 čvorova dobijen je minimalan broj, ali maksimalna potrebna snaga uređaja u odnosu na ostale metode, dok je kod sistema od 118 čvorova obrnuta situacija - veći broj uređaja, ali manja instalisana

snaga. Ovakvi rezultati navode na zaključak da ne postoji generalno pravilo o potrebnom broju i snazi uređaja za kompenzaciju reaktivne snage, već da rješenje optimalne alokacije u velikoj mjeri zavisi od uslova, stanja i topologije sistema prije optimizacije. Dodatno, napravljen je osvrt i na gubitke aktivne snage u mreži koji se dobijaju u slučaju dobijenih rješenja.

Analizom dobijenih rezultata, moguće je izvesti nekoliko zaključaka:

- Moguće je optimizovati naponski profil za statičko pozicioniranje uređaja za naponsko-reaktivnu regulaciju
- Iako je jednostavnije za implementaciju ukoliko se lokacija ili snaga uređaja fiksira na zadatu vrijednost, bolji rezultati optimizacije se postižu ukoliko se algoritmu dopusti sloboda u izboru oba parametra
- Predložena metoda se može efikasno koristiti za različiti broj dodatnih uređaja, kao i za različite usvojene limite naponskog profila
- Metoda se može koristiti i kod većih sistema
- Konačno rješenje optimizacionog problema u najvećoj mjeri zavisi od usvojene kriterijumske funkcije

Na kraju, potrebno je istaći da postoje određeni izazovi u primjeni predložene metode koji potencijalno mogu ugroziti kvalitet rješenja. Prvo, validnost rezultata implementiranog alata zavisi od preciznosti i kvaliteta dostupnih podataka koji se tiču parametara vodova, kao i opterećenja generatora i potrošača predmetnih sistema. Drugo, varijacije napona i promjene opterećenja su dinamičke pojave, a u ovom radu je izvršena statička analiza. Treće, iako u radu nije izvršena analiza stanja sistema kada dolazi do porasta/smanjenja opterećenja, predložena metoda se može jednostavno modifikovati tako da razmatra i pomenutu situaciju. Konačno, nedostatak svih metaheurističkih tehnika je stohastičnost, zbog čega se javlja potreba za više uzastopnih pokretanja programa pri čemu se najbolje rješenje uzima kao statistički podatak.

Dalji razvoj istraživačkog rada mogao bi ići u pravcu nadogradnje tehnike na način da se osim otočnih resursa razmatra i optimalna alokacija serijskih uređaja za kompenzaciju reaktivne snage (samostalno ili koordinisano). Osim toga, predlaže se proširivanje kriterijumske funkcije tako da uključuje troškove proizvodnje generatorskih jedinica, gubitke aktivne snage kao i tehnička ograničenja dodatnih regulacionih resursa. Na taj način bi se dobio kvalitetniji proračun optimalnih tokova snaga i realnija situacija u sistemu. Takođe, predlaže se hibridna metoda u kombinaciji sa nekom drugom metaheurističkom tehnikom.

Literatura

- [1] R. S. Zulpo, R. C. Leborgne and A. S. Bretas, „Optimal location and sizing of distributed generation based on power losses and voltage deviation“, *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA)*, pp. 1-5, 2014.
- [2] Vatani, M. R., Davood Solati Alkaran, Mohammad Javad Sanjari, Gevork Babamalek Gharehpetian, „Multiple distributed generation units allocation in distribution network for loss reduction based on a combination of analytical and genetic algorithm methods“, *Iet Generation Transmission & Distribution* 10, pp. 66-72, 2016.
- [3] R. Rakesh, P. Venkata Pavana, S. Keerthi, „A hybrid algorithm for optimal allocation of DG in radial distribution system“, *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, Cochin, India, pp. 1-5, 2017.
- [4] Farhat, I., „Ant Colony Optimization for Optimal Distributed Generation in Distribution Systems“, *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 80, International Journal of Computer and Information Engineering* , pp. 1094 - 1098, 2013.
- [5] Slimani, Linda & Bouktir, Tarek, „An Ant colony optimization for solving the Optimal Power Flow Problem in medium-scale electrical network“, *First International Conference on Electrical Systems PCSE'05*, Oum El Bouaghi University, Algeria, 2005.
- [6] Hadidian-Moghaddam, Mohammad Jafar, Saber Arabi-Nowdeh, Mehdi Bigdeli and Davood Azizian, „A multi-objective optimal sizing and siting of distributed generation using ant lion optimization technique“ *Ain Shams Engineering Journal*: n. pag., 2017.
- [7] C. G. Bektor, A. Youssef, A. H. Ali, S. Kamel, „Optimal distribution power flow including shunt capacitor allocation based on voltage deviation and power loss minimization“, *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 909-914, 2017.

- [8] Abdul Kadir, Aida Fazliana, Mohamed, Azah, Shareef, Hussain and Ibrahim, Ahmad Asrul, „An Improved Gravitational Search Algorithm For Optimal Placement And Sizing Of Renewable Distributed Generation Units In A Distribution System For Power Quality Enhancement“, *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*, pp. 1-17, 2014.
- [9] M. D. E. Hakim, „Optimum Location for PV Implementation Based on Load-flow Analysis Using Newton-Raphson Method for Lombok Electrical Network“, *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, Jakarta, Indonesia, pp. 1-5, 2019.
- [10] Repalle, Naveena Bhargavi, Pullacheri Sarala, Lucian Mihet-Popa, Shashidhar Reddy Kotha, Nagalingam Rajeswaran, „Implementation of a Novel Tabu Search Optimization Algorithm to Extract Parasitic Parameters of Solar Panel“, *Energies*, Basel, vol. 15, no. 13: 45, 2022.
- [11] Radmanesh, Hamid & Sharifi, Reza & Fathi, Seyed, „A BAT Optimization Algorithm for Sizing and Siting of Optimal Distributed Generation in Distribution Networks“, *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, pp. 11-15, 2020.
- [12] D.B. Prakash, C. Lakshminarayana, „Optimal siting of capacitors in radial distribution network using Whale Optimization Algorithm“, *Alexandria Engineering Journal*, pp. 499-509, 2017.
- [13] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, „Optimal Allocation of Battery Energy Storage System Using Whale Optimization Algorithm“, *2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Mauritius, pp. 1-5, 2021.
- [14] Abou El-Ela, A.A., Kinawy, A.M., El-Sehiemy, R.A., „Optimal reactive power dispatch using ant colony optimization algorithm“, *Electrical Engineering*, pp. 103–116, 2011.
- [15] S. Jalilzadeh, Y. Pirhayati, „An Improved Genetic Algorithm for unit commitment problem with lowest cost“, *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, China, pp. 571-575, 2009.
- [16] G. W. Chang, Y. D. Tsai, C. Y. Lai, J. S. Chung, „A practical mixed integer linear programming based approach for unit commitment“, *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, Denver, CO, USA, pp. 221-225, 2004.
- [17] L. G. Santander, F. A. Chacra, H. Opazo, E. Lopez, „Minimal loss reconfiguration based on simulated annealing meta-heuristic“, *15th International Conference on Electronics, Communications and Computers*, Puebla, Mexico, pp. 95-99, 2005.
- [18] Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim, Jin-O Kim, Joong-Rin Shin, K. Y. Lee, „An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1070-1078, 2002.
- [19] Mantawy, A.H. & Abdel-Magid, Youssef & Selim, Shokri, „A Simulated Annealing Algorithm for unit commitment“, *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 197 - 204, 1998.
- [20] Y. -T. Hsiao, C. -C. Liu, H. -D. Chiang, Y. -L. Chen, „A new approach for optimal VAR sources planning in large scale electric power systems“, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 988-996, 1993.

- [21] Liu, X., Liu, H., Zhang, X., Zhao, X., „Transmission network expansion planning by improved simulated annealing approach“, *SOP Transactions on Power Transmission and Smart Grid*, pp. 1-8, 2014.
- [22] Musirin, Ismail, Rahman, Khawa, „Evolutionary Programming Optimization Technique for Solving Reactive Power Planning in Power System“, *WSEAS Transactions on Information Science and Applications 2*, pp. 495-500, 2005.
- [23] Bagheri Tolabi, Hajar & Moradi, Mohammad, „A New Combination of Simulated Annealing, Genetic Algorithm, and Graph Theory Techniques for Multi-Objective Reconfiguration of Distribution System“, *J. Basic. Appl. Sci. Res.* 3, pp. 505-514, 2013.
- [24] Y. Nakachi, A. Kato and H. Ukai, „Voltage / Reactive Power Control Optimization with Economy and Security using Tabu Search“, *2007 IEEE 22nd International Symposium on Intelligent Control*, Singapore, pp. 634-639, 2007.
- [25] Guimar, Marco A. and Carlos A. Castro. „Reconfiguration of Distribution Systems for Loss Reduction using Tabu Search“, 2005.
- [26] Ausavanop and S. Chaitusaney, „Coordination of dispatchable distributed generation and voltage control devices for improving voltage profile by Tabu Search“, *The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011*, Khon Kaen, Thailand, pp. 869-872, 2011.
- [27] Coronado de Koster & José Antonio Domínguez-Navarro, „Multi-Objective Tabu Search for the Location and Sizing of Multiple Types of FACTS and DG in Electrical Networks“, *Energies, MDPI*, vol. 13, pp. 1-18, 2020.
- [28] Pimentel Filho, Max Chianca & Medeiros Júnior, Manoel, „Localization of Voltage Regulators in Distribution Systems by a Mixed Genetic–Tabu Search Algorithm“, *Energy and Power Engineering*, pp. 751-755, 2013.
- [29] Singh, Satyendra & Singh, Shiv, „Optimal PMU Placement in Power System Considering the Measurement Redundancy“, *Advance in Electronic and Electric Engineering*. 4, pp. 593-598, 2014.
- [30] P. L. Reddy, G. Yesuratnam, „PSO based optimal reactive power dispatch for voltage profile improvement“, *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*, Bhubaneswar, India, pp. 361-366, 2015.
- [31] M. Bhandari and S. S. Gurav, „Genetic algorithm based optimal allocation of SVC for reactive power minimization in power systems“, *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, pp. 1651-1656, 2015.
- [32] Singh, Ankita & Dixit, Shishir, „GA Based Optimal Placement Of SVC For Minimizing Installation Cost And Voltage Deviations“, *International Journal of Hybrid Information Technology*. 8, pp. 281-288, 2015.
- [33] Rao, B. Venkateswara, G. V. Nagesh Kumar. „Sensitivity Analysis Based Optimal Location and Tuning of Static Var Compensator Using Firefly Algorithm“, *Indian journal of science and technology* 7, pp. 1201-1210 , 2014.
- [34] R. Sirjani, A. Mohamed, „Improved Harmony Search Algorithm for Optimal Placement and Sizing of Static Var Compensators in Power Systems“, *2011 First International*

- Conference on Informatics and Computational Intelligence*, Bandung, Indonesia, pp. 295-300, 2011.
- [35] K. Dhananjaya Babu, M. Damodar Reddy, „Optimal Placement Of Svc Using Fuzzy And Pso Algorithm“, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol. 3, Issue 1, pp. 485-490, 2013.
- [36] Mahdad, Belkacem, Srairi, Kamel, „Adaptive differential search algorithm for optimal location of distributed generation in the presence of SVC for power loss reduction in distribution system“, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, pp. 1266-1282, 2016.
- [37] Ajami, A., Aghajani, Gh, Pourmahmood, M, „Optimal Location of FACTS Devices Using Adaptive Particle Swarm Optimization Hybrid with Simulated Annealing“, *Journal of Electrical Engineering and Technology, The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 179-190, 2010.
- [38] Kalaivani, R., V. Kamaraj, „Enhancement of Voltage Stability by Optimal Location of Static Var Compensator Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization“, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 5, pp. 70-77, 2012.
- [39] M. Nadeem, M. Z. Zeb, K. Imran, A. K. Janjua, „Optimal Sizing and Allocation of SVC and TCSC in Transmission Network by combined Sensitivity index and PSO“, *2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM)*, pp. 111-116, 2019.
- [40] Ravisekar, R., Srinivasan, K., „Optimal Reactive Power Dispatch With Series and Shunt Facts Evices Using Sine Cosine Algorithm“, *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, pp. 90-109, 2020.
- [41] Daealhaq, Haitham, Tukkee, A & Hassan, Yasser, „Power Loss Reduction and Voltage Profile Improvement Using Optimal Placement of FACTS Devices“, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, Kerbala, Iraq, 2021.
- [42] Mehrdad Ahmadi Kamarposhti, Ilhami Colak, Celestine Iwendi, Shahab S. Band, Ebuka Ibeke, „Optimal Coordination of PSS and SSSC Controllers in Power System Using Ant Colony Optimization Algorithm“, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2021.
- [43] Abdullah, Nor RulHasma, „Transmission Loss Minimization Using Evolutionary Programming Considering UPFC Installation Cost“, *International Review of Electrical Engineering* 5, pp. 1189-1203, 2010.
- [44] Idris, R. Mohamad; A. Khairuddin, M. W. Mustafa, A. Kalam, „Optimal allocation of multi-type FACTS devices using bees algorithm for ATC enhancement in deregulated power system“, *International Review of Electrical Engineering-IREE*, Vol. 5 Issue 2, p. 644, 2010.
- [45] E. Saeidpour, V. S. Parizy, M. Abedi, H. Rastegar, „Complete, integrated and simultaneously design for STATCOM fuzzy controller with variable length genetic algorithm for voltage profile improvement“, *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 1-7, 2008.

- [46] M O Okelola , „Particle Swarm Optimization for Optimal Allocation of STATCOM on Transmission Network“, *Journal of Physics:Conference Series, 5th International Conference on Machine Vidion and Information Technology*, 2021.
- [47] A. Phadke, M. Fozdar, K. Niazi, „A new multi-objective fuzzy-GA formulation for optimal placement and sizing of shunt FACTS controller“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 40, pp. 46-53, 2012.
- [48] Inkollu, Sai Ram, Venkata Reddy Kota. „Optimal setting of FACTS devices for voltage stability improvement using PSO adaptive GSA hybrid algorithm“, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19 , pp. 1166-1176, 2016.
- [49] Le, Dung & Vo, Dieu, „Cuckoo Search Algorithm for Minimization of Power Loss and Voltage Deviation“, *International Journal of Energy Optimization and Engineering* 5, pp. 23-34, 2016.
- [50] K. P. Nguyen, G. Fujita, V. N. Dieu, „Optimal placement and sizing of Static Var Compensator using Cuckoo search algorithm“, *2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Sendai, Japan, pp. 267-274, 2015.
- [51] M.Arun Bhaskar, C.Subramani, M. Jagdeeshkumar, S. S. Dash, „Voltage profile improvement using FACTS devices: A comparison between SVC, TCSC and TCPST“, *International conference on advances in recent technologies in communication and computing*, pp. 890-892, 2009.
- [52] G. Fandi, Z. Muller, L. Straka, J. Svec, „FACTS devices influence on power losses in transmission systems“, *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Brno-Bystrc, Czech Republic, pp. 29-33, 2014.
- [53] Milan S. Čalović, „Regulacija elektroenergetskih sistema: Regulacija napona i reaktivnih snaga“, Tom 2, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997.
- [54] Ilija Vujošević, „Analiza elektroenergetskih sistema I“, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, 2006.
- [55] Martin Čalasan, „Kompenzacija reaktivne energije u elektroenergetskim sistemima, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, 2021. (skripta)
- [56] Darko Šošić, Aleksandar Savić, Goran Dobrbić, Mileta Žarković, „Metode optimizacije: Primena u elektroenergetici, Akademska misao, Beograd, 2018.
- [57] Goldberg, D.E., „Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning“, Addison-Wesley, 1989.
- [58] Sörensen, Glover, „Metaheuristics“, *Encyclopedia of operations research and management science*, Springer, New York, pp. 960–970, 2013.
- [59] Sörensen, Kenneth, Marc Sevaux, Fred Glover, „A history of metaheuristics“, *Handbook of heuristics*, Springer, pp. 791-808, 2018.
- [60] D. A. Perez Ruiz, „Modern Optimization with R“, *J. Stat. Soft.*, vol. 70, no. 3, pp. 1–2, Apr. 2016. (tabu pretraga)
- [61] Dušan Džamić, „Rješavanje problema raspoređivanja poslova u višefaznoj proizvodnji sa paralelnim mašinama primenom metaheurističkih metoda“, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, master rad, 2014.

- [62] R. A. Rutenbar, "Simulated annealing algorithms: an overview," in *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 19-26, Jan. 1989.
- [63] Carr, J A. "An Introduction to Genetic Algorithms.", 2014.
- [64] Nikola Rajaković, „Analiza elektroenergetskih sistema 2”, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2007.
- [65] R. Salvarasu, M. S. Kalayathi, C. Ch. A. Rajan, „SVC placement for voltage constrained loss minimization using self-adaptive Firefly algorithm“, *Archives of Electrical Engineering*, vol. 62, pp. 649-661, 2013.
- [66] P. Balachennaiah, P. Harshavardhan Reddy, U. N. Kumar Raju, „A novel algorithm for voltage stability augmentation through optimal placement and sizing of SVC“, *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, Kozhikode, India, pp. 1-5, 2015.
- [67] A. A. Abdulrazzaq, M. Eremia, L. Toma, C. A. Mandis, "Optimal location and size of SVC for power losses minimization and voltage security improvement," *2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, pp. 858-863, 2015.
- [68] S. Ratra, A. Agarwal, R. Tiwari, N. K. Meena, "Optimal Allocation of Distributed Generator to Ameliorate the Voltage Stability Employing Circular Optimization Algorithm," *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, Tiruchirappalli, India, pp. 1-5, 2018.
- [69] S. Dixit, L. Srivastava, G. Agnihotri, "Optimal Location and Sizing of SVC for Minimization of Power Loss and Voltage Deviation Using NSGA II," *2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, Bhopal, India, pp. 975-980, 2014.
- [70] K. Sundareswaran, P. Bharathram, M. Siddharth, G. Vaishnavi, N. A. Shrivastava, H. Sarma, "Voltage profile enhancement through optimal placement of FACTS devices using Queen-Bee-Assisted GA," *2009 International Conference on Power Systems*, Kharagpur, India, pp. 1-5, 2009.
- [71] S. S. Nasir, R. Ayop, J. Jamian, "VSI improvement using SVC with aid of a modified lightning search algorithm," *2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*, Malaysia, pp. 56-61, 2021.
- [72] S.Sakthivel, D.Mary, R.Vetrivel,V.Senthamarai Kannan. Article: Optimal Location of SVC for Voltage Stability Enhancement under Contingency Condition through PSO Algorithm. *International Journal of Computer Applications* 20(1), pp. 30-36, 2011.
- [73] Kanaan, H.A.M., Mehanna, M.A.A., Application of simulates annealing algorithm for optimal location and sizing of FACTS devices considering system losses and voltage division, *Int. J. Adv. Sci. Technol*, pp. 5279–5289, 2020.
- [74] R. W. Chang, T. K. Saha, "Maximizing power system loadability by optimal allocation of svc using mixed integer linear programming," *IEEE PES General Meeting*, Minneapolis, MN, USA, pp. 1-7, 2010.
- [75] Martín M. Sánchez Mora, Carlos A. Tamayo, Jesús M. López-Lezama, Optimal Allocation of Distributed Generation for Improving Chargeability and Voltage Profile

- under Different Operative Scenarios, *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 11, no. 51, pp. 2503 - 2511, 2018.
- [76] M. A. Taher, S. Kamel, F. Jurado, A. Ahmed, "Optimal Allocation of STATCOM for Voltage Stability and System Loadability," *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, pp. 632-637, 2018.
- [77] Ahmed A. Shehata, Mohamed A. Tolba, Ali M. El-Rifaie, Nikolay V. Korovkin, Power system operation enhancement using a new hybrid methodology for optimal allocation of FACTS devices, *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 217-238, 2022.

Prilog 1

P.1. Sistem IEEE 14

U tabelama P.1.1 i P.1.2. su navedeni osnovni podaci o čvorovima i granama IEEE sistema od 14 čvorova.

Tabela P.1.1. Podaci o čvorovima sistema IEEE 14

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pl (MW)	Ql (MVar)	Qmax (MVar)	Qmin (MVar)	Bsh (p.u.)
1	3	1.06	232,4	0	0	0	0	0	0
2	2	1.045	40	0	21,7	12,7	50	-40	0
3	2	1.01	0	0	94,2	19	40	0	0
4	0	1	0	0	47,8	-3,9	0	0	0
5	0	1	0	0	7,6	1,6	0	0	0
6	2	1.07	0	0	11,2	7,5	24	-6	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.09	0	0	0	0	24	-6	0
9	0	1	0	0	29,5	16,6	0	0	0,19
10	0	1	0	0	9	5,8	0	0	0
11	0	1	0	0	3,5	1,8	0	0	0
12	0	1	0	0	6,1	1,6	0	0	0
13	0	1	0	0	13,5	5,8	0	0	0
14	0	1	0	0	14,9	5	0	0	0

Tabela P.1.2. Podaci o granama sistema IEEE 14

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	a (p.u.)
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	0
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	0
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	0
2	4	0.05811	0.17632	0.034	0
2	5	0.05695	0.17388	0.0346	0
3	4	0.06701	0.17103	0.0128	0
4	5	0.01335	0.04211	0	0
4	7	0	0.20912	0	0.978
4	9	0	0.55618	0	0.969
5	6	0	0.25202	0	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0	0
6	12	0.12291	0.25581	0	0
6	13	0.06615	0.13027	0	0
7	8	0	0.17615	0	0
7	9	0	0.11001	0	0
9	10	0.03181	0.0845	0	0
9	14	0.12711	0.27038	0	0
10	11	0.08205	0.19207	0	0
12	13	0.22092	0.19988	0	0
13	14	0.17093	0.34802	0	0

P.1. Sistem IEEE 30

U tabelama P.1.3 i P.1.4. su navedeni osnovni podaci o čvorovima i granama IEEE sistema od 30 čvorova.

Tabela P.1.3. Podaci o čvorovima sistema IEEE 30

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pl (MW)	Ql (MVar)	Qmax (MVar)	Qmin (MVar)	Bsh (p.u.)
1	3	1.06	260.2	0	0	0	0	0	0
2	2	1.043	40	0	21.7	12.7	50	-40	0
3	0	1	0	0	2.4	1.2	0	0	0
4	0	1	0	0	7.6	1.6	0	0	0
5	2	1.01	0	0	94.2	19	40	-40	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	22.8	10.9	0	0	0
8	2	1.01	0	0	30	30	40	-10	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0.19
10	0	1	0	0	5.8	2	0	0	0
11	2	1.082	0	0	0	0	24	-6	0
12	0	1	0	0	11.2	7.5	0	0	0
13	2	1.071	0	0	0	0	24	-6	0
14	0	1	0	0	6.2	1.6	0	0	0
15	0	1	0	0	8.2	2.5	0	0	0
16	0	1	0	0	3.5	1.8	0	0	0
17	0	1	0	0	9	5.8	0	0	0
18	0	1	0	0	3.2	0.9	0	0	0
19	0	1	0	0	9.5	3.4	0	0	0
20	0	1	0	0	2.2	0.7	0	0	0
21	0	1	0	0	17.5	11.2	0	0	0
22	0	1	0	0	0	0	0	0	0
23	0	1	0	0	3.2	1.6	0	0	0.043
24	0	1	0	0	8.7	6.7	0	0	0
25	0	1	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	0	3.5	2.3	0	0	0
27	0	1	0	0	0	0	0	0	0
28	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	0	1	0	0	2.4	0.9	0	0	0
30	0	1	0	0	10.6	1.9	0	0	0

Tabela P.1.4. Podaci o granama sistema IEEE 30

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	a (p.u.)
1	2	0.0192	0.0575	0.0528	0
1	3	0.0452	0.1652	0.0408	0
2	4	0.057	0.1737	0.0368	0
3	4	0.0132	0.0379	0.0084	0
2	5	0.0472	0.1983	0.0418	0
2	6	0.0581	0.1763	0.0374	0
4	6	0.0119	0.0414	0.009	0
5	7	0.046	0.116	0.0204	0
6	7	0.0267	0.082	0.017	0
6	8	0.012	0.042	0.009	0
6	9	0	0.208	0	0.978
6	10	0	0.556	0	0.969
9	11	0	0.208	0	0
9	10	0	0.11	0	0
4	12	0	0.256	0	0.932
12	13	0	0.14	0	0
12	14	0.1231	0.2559	0	0
12	15	0.0662	0.1304	0	0
12	16	0.0945	0.1987	0	0
14	15	0.221	0.1997	0	0

Tabela P.1.4. Nastavak tabele

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	A (p.u.)
16	17	0.0524	0.1923	0	0
15	18	0.1073	0.2185	0	0
18	19	0.0639	0.1292	0	0
19	20	0.034	0.068	0	0
10	20	0.0936	0.209	0	0
10	17	0.0324	0.0845	0	0
10	21	0.0348	0.0749	0	0
10	22	0.0727	0.1499	0	0
21	22	0.0116	0.0236	0	0
15	23	0.1	0.202	0	0
22	24	0.115	0.179	0	0
23	24	0.132	0.27	0	0
24	25	0.1885	0.3292	0	0
25	26	0.2544	0.38	0	0
25	27	0.1093	0.2087	0	0
28	27	0	0.396	0	0.968
27	29	0.2198	0.4153	0	0
27	30	0.3202	0.6027	0	0
29	30	0.2399	0.4533	0	0
8	28	0.0636	0.2	0.0428	0
6	28	0.0169	0.0599	0.013	0

P.3. Sistem IEEE 57

U tabelama P.1.5 i P.1.6. su navedeni osnovni podaci o čvorovima i granama IEEE sistema od 57 čvorova.

Tabela P.1.5. Podaci o čvorovima sistema IEEE 57

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pl (MW)	Ql (MVAr)	Qmax (MVAr)	Qmin (MVAr)	Bsh (p.u.)
1	3	1.04	128.9	0	55	17	0	0	0
2	2	1.01	0	0	3	88	50	-17	0
3	2	0.985	40	0	41	21	60	-10	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	13	4	0	0	0
6	2	0.98	0	0	75	2	25	-8	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.005	450	0	150	22	200	-140	0
9	2	0.98	0	0	121	26	9	-3	0
10	0	1	0	0	5	2	0	0	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	2	1.015	310	0	377	24	155	-150	0
13	0	1	0	0	18	2.3	0	0	0
14	0	1	0	0	10.5	5.3	0	0	0
15	0	1	0	0	22	5	0	0	0
16	0	1	0	0	43	3	0	0	0
17	0	1	0	0	42	8	0	0	0
18	0	1	0	0	27.2	9.8	0	0	0.1
19	0	1	0	0	3.3	0.6	0	0	0
20	0	1	0	0	2.3	1	0	0	0
21	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22	0	1	0	0	0	0	0	0	0
23	0	1	0	0	6.3	2.1	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0	0
25	0	1	0	0	6.3	3.2	0	0	0.059
26	0	1	0	0	0	0	0	0	0
27	0	1	0	0	9.3	0.5	0	0	0
28	0	1	0	0	4.6	2.3	0	0	0
29	0	1	0	0	17	2.6	0	0	0

Tabela P.1.5. Nastavak tabele

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pl (MW)	Ql (MVAr)	Qmax (MVAr)	Qmin (MVAr)	Bsh (p.u.)
30	0	1	0	0	3.6	1.8	0	0	0
31	0	1	0	0	5.8	2.9	0	0	0
32	0	1	0	0	1.6	0.8	0	0	0
33	0	1	0	0	3.8	1.9	0	0	0
34	0	1	0	0	0	0	0	0	0
35	0	1	0	0	6	3	0	0	0
36	0	1	0	0	0	0	0	0	0
37	0	1	0	0	0	0	0	0	0
38	0	1	0	0	14	7	0	0	0
39	0	1	0	0	0	0	0	0	0
40	0	1	0	0	0	0	0	0	0
41	0	1	0	0	6.3	3	0	0	0
42	0	1	0	0	7.1	4.4	0	0	0
43	0	1	0	0	2	1	0	0	0
44	0	1	0	0	12	1.8	0	0	0
45	0	1	0	0	0	0	0	0	0
46	0	1	0	0	0	0	0	0	0
47	0	1	0	0	29.7	11.6	0	0	0
48	0	1	0	0	0	0	0	0	0
49	0	1	0	0	18	8.5	0	0	0
50	0	1	0	0	21	10.5	0	0	0
51	0	1	0	0	18	5.3	0	0	0
52	0	1	0	0	4.9	2.2	0	0	0
53	0	1	0	0	20	10	0	0	0.063
54	0	1	0	0	4.1	1.4	0	0	0
55	0	1	0	0	6.8	3.4	0	0	0
56	1	1	0	0	7.6	2.2	0	0	0
57	1	1	0	0	6.7	2	0	0	0

Tabela P.1.6. Podaci o granama sistema IEEE 57

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	a (p.u.)
1	2	0.0083	0.028	0.129	0
2	3	0.0298	0.085	0.0818	0
3	4	0.0112	0.0366	0.038	0
4	5	0.0625	0.132	0.0258	0
4	6	0.043	0.148	0.0348	0
6	7	0.02	0.102	0.0276	0
6	8	0.0339	0.173	0.047	0
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	0
9	10	0.0369	0.1679	0.044	0
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	0
9	12	0.0648	0.295	0.0772	0
9	13	0.0481	0.158	0.0406	0
13	14	0.0132	0.0434	0.011	0
13	15	0.0269	0.0869	0.023	0
1	15	0.0178	0.091	0.0988	0
1	16	0.0454	0.206	0.0546	0
1	17	0.0238	0.108	0.0286	0
3	15	0.0162	0.053	0.0544	0
4	18	0	0.555	0	0.97
4	18	0	0.43	0	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	0
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	0
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	0
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	0
12	13	0.0178	0.058	0.0604	0
12	16	0.018	0.0813	0.0216	0
12	17	0.0397	0.179	0.0476	0

Tabela P.1.6. Nastavak tabele

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	a (p.u.)
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	0
18	19	0.461	0.685	0	0
19	20	0.283	0.434	0	0
21	20	0	0.7767	0	1.043
21	22	0.0736	0.117	0	0
22	23	0.0099	0.0152	0	0
23	24	0.166	0.256	0.0084	0
24	25	0	1.182	0	1
24	25	0	1.23	0	1
24	26	0	0.0473	0	1.043
26	27	0.165	0.254	0	0
27	28	0.0618	0.0954	0	0
28	29	0.0418	0.0587	0	0
7	29	0	0.0648	0	0.967
25	30	0.135	0.202	0	0
30	31	0.326	0.497	0	0
31	32	0.507	0.755	0	0
32	33	0.0392	0.036	0	0
34	32	0	0.953	0	0.975
34	35	0.052	0.078	0.0032	0
35	36	0.043	0.0537	0.0016	0
36	37	0.029	0.0366	0	0
37	38	0.0651	0.1009	0.002	0
37	39	0.0239	0.0379	0	0
36	40	0.03	0.0466	0	0
22	38	0.0192	0.0295	0	0
11	41	0	0.749	0	0.955
41	42	0.207	0.352	0	0
41	43	0	0.412	0	0
38	44	0.0289	0.0585	0.002	0
15	45	0	0.1042	0	0.955
14	46	0	0.0735	0	0.9
46	47	0.023	0.068	0.0032	0
47	48	0.0182	0.0233	0	0
48	49	0.0834	0.129	0.0048	0
49	50	0.0801	0.128	0	0
50	51	0.1386	0.22	0	0
10	51	0	0.0712	0	0.93
13	49	0	0.191	0	0.895
29	52	0.1442	0.187	0	0
52	53	0.0762	0.0984	0	0
53	54	0.1878	0.232	0	0
54	55	0.1732	0.2265	0	0
11	43	0	0.153	0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.004	0
40	56	0	1.195	0	0.958
56	41	0.553	0.549	0	0
56	42	0.2125	0.354	0	0
39	57	0	1.355	0	0.98
57	56	0.174	0.26	0	0
38	49	0.115	0.177	0.003	0
38	48	0.0312	0.0482	0	0
9	55	0	0.1205	0	0.94

P.1. Sistem IEEE 118

U tabelama P.1.7. i P.1.8. su navedeni osnovni podaci o čvorovima i granama IEEE sistema od 30 čvorova.

Tabela P.1.7. Podaci o čvorovima sistema IEEE 118

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pl (MW)	Ql (MVar)	Qmax (MVar)	Qmin (MVar)	Bsh (p.u.)
1	2	0.955	0	0	51	27	15	-5	0
2	0	1	0	0	20	9	0	0	0
3	0	1	0	0	39	10	0	0	0
4	2	0.998	-9	0	30	12	300	-300	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.4
6	2	0.99	0	0	52	22	50	-13	0
7	0	1	0	0	19	2	0	0	0
8	2	1.015	-28	0	0	0	300	-300	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	2	1.05	450	0	0	0	200	-147	0
11	0	1	0	0	70	23	0	0	0
12	2	0.99	85	0	47	10	120	-35	0
13	0	1	0	0	34	16	0	0	0
14	0	1	0	0	14	1	0	0	0
15	2	0.97	0	0	90	30	30	-10	0
16	0	1	0	0	25	10	0	0	0
17	0	1	0	0	11	3	0	0	0
18	2	0.973	0	0	60	34	50	-16	0
19	2	0.963	0	0	45	25	24	-8	0
20	0	1	0	0	18	3	0	0	0
21	0	1	0	0	14	8	0	0	0
22	0	1	0	0	10	5	0	0	0
23	0	1	0	0	7	3	0	0	0
24	2	0.992	-13	0	0	0	300	-300	0
25	2	1.05	220	0	0	0	140	-47	0
26	2	1.015	314	0	0	0	1000	-1000	0
27	2	0.968	-9	0	62	13	300	-300	0
28	0	1	0	0	17	7	0	0	0
29	0	1	0	0	24	4	0	0	0
30	0	1	0	0	0	0	0	0	0
31	2	0.967	7	0	43	27	300	-300	0
32	2	0.964	0	0	59	23	42	-14	0
33	0	1	0	0	23	9	0	0	0
34	2	0.986	0	0	59	26	24	-8	0.14
35	0	1	0	0	33	9	0	0	0
36	2	0.98	0	0	31	17	24	-8	0
37	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.25
38	0	1	0	0	0	0	0	0	0
39	0	1	0	0	27	11	0	0	0
40	2	0.97	-46	0	20	23	300	-300	0
41	0	1	0	0	37	10	0	0	0
42	2	0.985	-59	0	37	23	300	-300	0
43	0	1	0	0	18	7	0	0	0
44	0	1	0	0	16	8	0	0	0.1
45	0	1	0	0	53	22	0	0	0.1
46	2	1.005	19	0	28	10	100	-100	0.1
47	0	1	0	0	34	0	0	0	0
48	0	1	0	0	20	11	0	0	0.15
49	2	1.025	204	0	87	30	210	-85	0
50	0	1	0	0	17	4	0	0	0
51	0	1	0	0	17	8	0	0	0
52	0	1	0	0	18	5	0	0	0
53	0	1	0	0	23	11	0	0	0
54	2	0.955	48	0	113	32	300	-300	0
55	2	0.952	0	0	63	22	23	-8	0
56	2	0.954	0	0	84	18	15	-8	0
57	0	1	0	0	12	3	0	0	0
58	0	1	0	0	12	3	0	0	0
59	2	0.985	155	0	277	113	180	-60	0
60	0	1	0	0	78	3	0	0	0
61	2	0.995	160	0	0	0	300	-100	0
62	2	0.998	0	0	77	14	20	-20	0

Tabela P.1.7. Nastavak tabele

Broj čvora	Tip čvora	V (p.u.)	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pl (MW)	Ql (MVar)	Qmax (MVar)	Qmin (MVar)	Bsh (p.u.)
63	0	1	0	0	0	0	0	0	0
64	0	1	0	0	0	0	0	0	0
65	2	1.005	391	0	0	0	200	-67	0
66	2	1.05	392	0	39	18	200	-67	0
67	0	1	0	0	28	7	0	0	0
68	0	1	0	0	0	0	0	0	0
69	3	1.035	516.4	0	0	0	300	-300	0
70	2	0.984	0	0	66	20	32	-10	0
71	0	1	0	0	0	0	0	0	0
72	2	0.98	-12	0	0	0	100	-100	0
73	2	0.991	-6	0	0	0	100	-100	0
74	2	0.958	0	0	68	27	9	-6	0.12
75	0	1	0	0	47	11	0	0	0
76	2	0.943	0	0	68	36	23	-8	0
77	2	1.006	0	0	61	28	70	-20	0
78	0	1	0	0	71	26	0	0	0
79	0	1	0	0	39	32	0	0	0.2
80	2	1.04	477	0	130	26	280	-165	0
81	0	1	0	0	0	0	0	0	0
82	0	1	0	0	54	27	0	0	0.2
83	0	1	0	0	20	10	0	0	0.1
84	0	1	0	0	11	7	0	0	0
85	2	0.985	0	0	24	15	23	-8	0
86	0	1	0	0	21	10	0	0	0
87	2	1.015	4	0	0	0	1000	-100	0
88	0	1	0	0	48	10	0	0	0
89	2	1.005	607	0	0	0	300	-210	0
90	2	0.985	-85	0	78	42	300	-300	0
91	2	0.98	-10	0	0	0	100	-100	0
92	2	0.993	0	0	65	10	9	-3	0
93	0	1	0	0	12	7	0	0	0
94	0	1	0	0	30	16	0	0	0
95	0	1	0	0	42	31	0	0	0
96	0	1	0	0	38	15	0	0	0
97	0	1	0	0	15	9	0	0	0
98	0	1	0	0	34	8	0	0	0
99	2	1.01	-42	0	0	0	100	-100	0
100	2	1.017	252	0	37	18	155	-50	0
101	0	1	0	0	22	15	0	0	0
102	0	1	0	0	5	3	0	0	0
103	2	1.001	40	0	23	16	40	-15	0
104	2	0.971	0	0	38	25	23	-8	0
105	2	0.965	0	0	31	26	23	-8	0.2
106	0	1	0	0	43	16	0	0	0
107	2	0.952	-22	0	28	12	200	-200	0.06
108	0	1	0	0	2	1	0	0	0
109	0	1	0	0	8	3	0	0	0
110	2	0.973	0	0	39	30	23	-8	0.06
111	2	0.98	36	0	0	0	1000	-100	0
112	2	0.975	-43	0	25	13	1000	-100	0
113	2	0.993	-6	0	0	0	200	-100	0
114	0	1	0	0	8	3	0	0	0
115	0	1	0	0	22	7	0	0	0
116	2	1.005	-184	0	0	0	1000	-1000	0
117	0	1	0	0	20	8	0	0	0
118	0	1	0	0	33	15	0	0	0

Tabela P.1.8. Podaci o granama sistema IEEE 118

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	a (p.u.)
1	2	0.0303	0.0999	0.0254	0
1	3	0.0129	0.0424	0.01082	0
4	5	0.00176	0.00798	0.0021	0
3	5	0.0241	0.108	0.0284	0
5	6	0.0119	0.054	0.01426	0
6	7	0.00459	0.0208	0.0055	0
8	9	0.00244	0.0305	1.162	0
8	5	0	0.0267	0	0.985
9	10	0.00258	0.0322	1.23	0
4	11	0.0209	0.0688	0.01748	0
5	11	0.0203	0.0682	0.01738	0
11	12	0.00595	0.0196	0.00502	0
2	12	0.0187	0.0616	0.01572	0
3	12	0.0484	0.16	0.0406	0
7	12	0.00862	0.034	0.00874	0
11	13	0.02225	0.0731	0.01876	0
12	14	0.0215	0.0707	0.01816	0
13	15	0.0744	0.2444	0.06268	0
14	15	0.0595	0.195	0.0502	0
12	16	0.0212	0.0834	0.0214	0
15	17	0.0132	0.0437	0.0444	0
16	17	0.0454	0.1801	0.0466	0
17	18	0.0123	0.0505	0.01298	0
18	19	0.01119	0.0493	0.01142	0
19	20	0.0252	0.117	0.0298	0
15	19	0.012	0.0394	0.0101	0
20	21	0.0183	0.0849	0.0216	0
21	22	0.0209	0.097	0.0246	0
22	23	0.0342	0.159	0.0404	0
23	24	0.0135	0.0492	0.0498	0
23	25	0.0156	0.08	0.0864	0
26	25	0	0.0382	0	0.96
25	27	0.0318	0.163	0.1764	0
27	28	0.01913	0.0855	0.0216	0
28	29	0.0237	0.0943	0.0238	0
30	17	0	0.0388	0	0.96
8	30	0.00431	0.0504	0.514	0
26	30	0.00799	0.086	0.908	0
17	31	0.0474	0.1563	0.0399	0
29	31	0.0108	0.0331	0.0083	0
23	32	0.0317	0.1153	0.1173	0
31	32	0.0298	0.0985	0.0251	0
27	32	0.0229	0.0755	0.01926	0
15	33	0.038	0.1244	0.03194	0
19	34	0.0752	0.247	0.0632	0
35	36	0.00224	0.0102	0.00268	0
35	37	0.011	0.0497	0.01318	0
33	37	0.0415	0.142	0.0366	0
34	36	0.00871	0.0268	0.00568	0
34	37	0.00256	0.0094	0.00984	0
38	37	0	0.0375	0	0.935
37	39	0.0321	0.106	0.027	0
37	40	0.0593	0.168	0.042	0
30	38	0.00464	0.054	0.422	0
39	40	0.0184	0.0605	0.01552	0
40	41	0.0145	0.0487	0.01222	0
40	42	0.0555	0.183	0.0466	0
41	42	0.041	0.135	0.0344	0
43	44	0.0608	0.2454	0.06068	0
34	43	0.0413	0.1681	0.04226	0

44	45	0.0224	0.0901	0.0224	0
45	46	0.04	0.1356	0.0332	0

Tabela P.1.8. Nastavak tabele

Početni čvor	Krajnji čvor	r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)	a (p.u.)
46	47	0.038	0.127	0.0316	0
46	48	0.0601	0.189	0.0472	0
47	49	0.0191	0.0625	0.01604	0
42	49	0.0715	0.323	0.086	0
42	49	0.0715	0.323	0.086	0
45	49	0.0684	0.186	0.0444	0
48	49	0.0179	0.0505	0.01258	0
49	50	0.0267	0.0752	0.01874	0
49	51	0.0486	0.137	0.0342	0
51	52	0.0203	0.0588	0.01396	0
52	53	0.0405	0.1635	0.04058	0
53	54	0.0263	0.122	0.031	0
49	54	0.073	0.289	0.0738	0
49	54	0.0869	0.291	0.073	0
54	55	0.0169	0.0707	0.0202	0
54	56	0.00275	0.00955	0.00732	0
55	56	0.00488	0.0151	0.00374	0
56	57	0.0343	0.0966	0.0242	0
50	57	0.0474	0.134	0.0332	0
56	58	0.0343	0.0966	0.0242	0
51	58	0.0255	0.0719	0.01788	0
54	59	0.0503	0.2293	0.0598	0
56	59	0.0825	0.251	0.0569	0
56	59	0.0803	0.239	0.0536	0
55	59	0.04739	0.2158	0.05646	0
59	60	0.0317	0.145	0.0376	0
59	61	0.0328	0.15	0.0388	0
60	61	0.00264	0.0135	0.01456	0
60	62	0.0123	0.0561	0.01468	0
61	62	0.00824	0.0376	0.0098	0
63	59	0	0.0386	0	0.96
63	64	0.00172	0.02	0.216	0
64	61	0	0.0268	0	0.985
38	65	0.00901	0.0986	1.046	0
64	65	0.00269	0.0302	0.38	0
49	66	0.018	0.0919	0.0248	0
49	66	0.018	0.0919	0.0248	0
62	66	0.0482	0.218	0.0578	0
62	67	0.0258	0.117	0.031	0
65	66	0	0.037	0	0.935
66	67	0.0224	0.1015	0.02682	0
65	68	0.00138	0.016	0.638	0
47	69	0.0844	0.2778	0.07092	0
49	69	0.0985	0.324	0.0828	0
68	69	0	0.037	0	0.935
69	70	0.03	0.127	0.122	0
24	70	0.00221	0.4115	0.10198	0
70	71	0.00882	0.0355	0.00878	0
24	72	0.0488	0.196	0.0488	0
71	72	0.0446	0.18	0.04444	0
71	73	0.00866	0.0454	0.01178	0
70	74	0.0401	0.1323	0.03368	0
70	75	0.0428	0.141	0.036	0
69	75	0.0405	0.122	0.124	0
74	75	0.0123	0.0406	0.01034	0
76	77	0.0444	0.148	0.0368	0
69	77	0.0309	0.101	0.1038	0
75	77	0.0601	0.1999	0.04978	0
77	78	0.00376	0.0124	0.01264	0
78	79	0.00546	0.0244	0.00648	0
77	80	0.017	0.0485	0.0472	0
77	80	0.0294	0.105	0.0228	0
79	80	0.0156	0.0704	0.0187	0

Tabela P.1.8. Nastavak tabele

68	81	0.00175	0.0202	0.808	0
81	80	0	0.037	0	0.935
77	82	0.0298	0.0853	0.08174	0
82	83	0.0112	0.03665	0.03796	0
83	84	0.0625	0.132	0.0258	0
83	85	0.043	0.148	0.0348	0
84	85	0.0302	0.0641	0.01234	0
85	86	0.035	0.123	0.0276	0
86	87	0.02828	0.2074	0.0445	0
85	88	0.02	0.102	0.0276	0
85	89	0.0239	0.173	0.047	0
88	89	0.0139	0.0712	0.01934	0
89	90	0.0518	0.188	0.0528	0
89	90	0.0238	0.0997	0.106	0
90	91	0.0254	0.0836	0.0214	0
89	92	0.0099	0.0505	0.0548	0
89	92	0.0393	0.1581	0.0414	0
91	92	0.0387	0.1272	0.03268	0
92	93	0.0258	0.0848	0.0218	0
92	94	0.0481	0.158	0.0406	0
93	94	0.0223	0.0732	0.01876	0
94	95	0.0132	0.0434	0.0111	0
80	96	0.0356	0.182	0.0494	0
82	96	0.0162	0.053	0.0544	0
94	96	0.0269	0.0869	0.023	0
80	97	0.0183	0.0934	0.0254	0
80	98	0.0238	0.108	0.0286	0
80	99	0.0454	0.206	0.0546	0
92	100	0.0648	0.295	0.0472	0
94	100	0.0178	0.058	0.0604	0
95	96	0.0171	0.0547	0.01474	0
96	97	0.0173	0.0885	0.024	0
98	100	0.0397	0.179	0.0476	0
99	100	0.018	0.0813	0.0216	0
100	101	0.0277	0.1262	0.0328	0
92	102	0.0123	0.0559	0.01464	0
101	102	0.0246	0.112	0.0294	0
100	103	0.016	0.0525	0.0536	0
100	104	0.0451	0.204	0.0541	0
103	104	0.0466	0.1584	0.0407	0
103	105	0.0535	0.1625	0.0408	0
100	106	0.0605	0.229	0.062	0
104	105	0.00994	0.0378	0.00986	0
105	106	0.014	0.0547	0.01434	0
105	107	0.053	0.183	0.0472	0
105	108	0.0261	0.0703	0.01844	0
106	107	0.053	0.183	0.0472	0
108	109	0.0105	0.0288	0.0076	0
103	110	0.03906	0.1813	0.0461	0
109	110	0.0278	0.0762	0.0202	0
110	111	0.022	0.0755	0.02	0
110	112	0.0247	0.064	0.062	0
17	113	0.00913	0.0301	0.00768	0
32	113	0.0615	0.203	0.0518	0
32	114	0.0135	0.0612	0.01628	0
27	115	0.0164	0.0741	0.01972	0
114	115	0.0023	0.0104	0.00276	0
68	116	0.00034	0.00405	0.164	0
12	117	0.0329	0.14	0.0358	0
75	118	0.0145	0.0481	0.01198	0
76	118	0.0164	0.0544	0.01356	0