

UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Mr sci. Armend Ymeri

IZBOR OPTIMALNE LOKACIJE I  
KAPACITETA FOTONAPONSKIH SISTEMA  
U CILJU SMANJENJA GUBITAKA SNAGE I  
PADOVA NAPONA U DISTRIBUTIVNOJ  
MREŽI

- DOKTORSKA DISERTACIJA –

Podgorica, 2019. god.

UNIVERSITY OF MONTENEGRO  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Armend Ymeri, Mr Sci

OPTIMAL LOCATION AND SIZING OF  
PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AIMED AT  
REDUCTION OF POWER LOSSES AND  
VOLTAGE DROPS IN THE DISTRIBUTION GRID

- PhD THESIS -

Podgorica, 2019.

## **PODACI O DOKTORANDU, MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

### **DOKTORAND:**

Ime i prezime: **Armend Ymeri**  
Datum i mjesto rođenja: **01. 01. 1971. godine, Gnjilane, Kosovo**  
Naziv završenog post diplomskog  
studijskog programa: **Energetika, smjer Elektroenergetski  
sistemi,, magistarske studije**  
Godina završetka: **2008. godina**

### **MENTOR:**

**Dr Saša Mujović**, vanredni profesor,  
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički  
fakultet

### **KOMISIJA ZA ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE:**

**Dr Vladan Vujičić**, redovni profesor,  
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički  
Fakultet

**Dr Saša Mujović**, vanredni profesor,  
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički  
fakultet

**Dr. Vladan Radulović**, vanredni profesor,  
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički  
fakultet

**Dr Vesna Popović - Bugarin**, vanredni  
profesor, Univerzitet Crne Gore,  
Elektrotehnički fakultet

**Dr. Samir Avdaković**, docent, Univerzitet  
u Sarajevu, Elektrotehnički fakultet

### **Datum odbrane:**

**18.11.2019, godine**

## **ZAHVALNICA**

Ova doktorska disertacija je rađena pod mentorstvom dr Saša Mujovića, vanrednog profesora Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici, kojem se posebno zahvaljujem na usmjeravanju tokom studija i izrade disertacije, podršci i pomoći prilikom tokom dugogodišnje saradnje.

Ogromnu zahvalnost dugujem porodici na konstantnoj podršci, razumijevanju i ulaganju u moje obrazovanje.

Doktorsku disertaciju posvećujem majci Đevahiri i mojoj porodici.

## PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija:	<b>Doktorske studije elektrotehnike</b>
Naslov doktorske disertacije:	<b>Izbor optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema u cilju smanjenja gubitaka snage i padova napona u distributivnoj mreži</b>
Datum prijave disertacije:	<b>06. 10. 2014. godine</b>
Datum sjednice Senata UCG na kojoj je prihvaćena teza:	<b>01. 09. 2015. godine</b>
Ključne riječi:	Distribuirani generatori, fotonaponski sistemi, Genetski algoritam, gubici električnih snaga, padovi napona, distributivna mreža, elektroenergetski sistem
Naučna oblast:	<b>Energetika</b>
Uža naučna oblast:	<b>Elektroenergetski sistemi</b>
UDK:	

## REZIME

Fotonaponski sistemi spadaju u najzastupljenije distribuirane generatore. Optimalnim izborom lokacije fotonaponskih sistema i njihovog kapaciteta može se u značajnoj mjeri uticati na redukciju gubitaka snage i padova napona u distributivnoj mreži i upravo je ova problematika u fokusu doktorske disertacije.

Primjenom optimizacionog *Decision Tree* algoritma, koji je jednostavan za upotrebu i ne zahtijeva složeni matematički aparat, definisana je optimalna lokacija fotonaponskog generatora poznatog kapaciteta, tako da budu zadovoljeni kriterijumi minimalnih gubitaka snage voda i minimalnih padova napona.

Takođe, primjenom istog algoritma, za definisanu lokaciju utvrđen je optimalni kapacitet fotonaponskog generatora, a uz uvažavanje prethodno pomenutih kriterijuma. U cilju provjere dobijenih rezultata korišten je dodatni optimizacioni metod na bazi genetskog algoritma, kao i simulacije sprovedene u *DIGSILENT/Power factory* softveru.

Disertacijom je pokazano da optimalna lokacija dodatog fotonaponskog generatora utiče na redukciju nivo gubitaka snage (oko 10%) i padova napona u mreži (oko 6%), kao i to da kapacitet dodatog fotonaponskog generatora treba da bude do nivoa maksimalnog opterećenja voda na koji se priključuje, kako bi njegovo priključenje imalo pozitivan efekat po gubitke snage i padove napona.

## INFORMATION ON DOCTORAL DISSERTATION

Doctoral studies:	<b>Doctoral study of electrical engineering</b>
Dissertation title:	<b>Optimal Location and Sizing of Photovoltaic Systems Aimed at Reduction of Power Losses and Voltage Drops in the Distribution Grid</b>
Date of dissertation registration:	<b>October 06, 2014</b>
Thesis acceptance date (UoM Senate Session):	<b>November 01, 2015</b>
Keywords:	Distributed generation, photovoltaic systems, Genetic algorithm, power losses, voltage drops, distribution network, power systems
Scientific area:	<b>Energetics</b>
Specific scientific area:	<b>Power systems</b>
UDK:	

## ABSTRACT

Photovoltaic systems are among the most distributed generators. Optimal selection of the location of photovoltaic systems and their capacity can significantly influence the reduction of power losses and voltage drops in the distribution network and precisely, this is the problem in the focus of the doctoral dissertation.

Using an optimized Decision Tree algorithm, which is easy for use and does not require a complex mathematical apparatus, the optimal location of the photovoltaic generator of the known capacity is defined, in order to be met the criteria for minimum power losses and minimum voltage drops.

In addition, using the same algorithm for the defined location, the optimal capacity of the photovoltaic generator is determined taking into the consideration the previously mentioned criteria. In order to verify the obtained results, an additional optimization method based on the genetic algorithm is used as well as simulations performed in the DlgSILENT/Power factory software.

The dissertation showed that the optimal location of the added photovoltaic generator affects the reduction of the power loss level (for about 10%) and voltage drops in the network (for about 6%), and that the capacity of the added photovoltaic generator should be up to the level of the maximum load on the line to which it connects, so that its connection has a positive effect on the power losses and voltage drops.



## PREDGOVOR

Ova doktorska disertacija je rezultat višegodišnjeg naučno-istraživačkog rada. Problematika optimizacije lokacija i kapaciteta distribuiranih generatora iziskuje primjenu neke od optimizacionih metoda, a zbog svoje važnosti predmet je istraživanja u brojnim publikacijama. Ipak, ono što izdvaja predložena optimalna rješenja u ovoj doktorskoj disertaciji je to da se ona odlikuju visokom tačnošću i da su dobijena na brz i jednostavan način, bez upotrebe skupe i visokosofisticirane računarske opreme.

Savremene distributivne mreže su aktivne mreže, sa dvosmjernim tokovima snaga, pa je planiranje i upravljanje ovakvim mrežama veoma zahtjevno. Uvođenjem distribuiranih generatora u distributivni sistem mijenja se struktura sistema, ali i tokovi snaga.

Proizvodnja električne energije iz tih sistema je subvencionirana i generalno, sva proizvedena energija se otkupljuje po podsticajnim cijenama. Stoga je nužno za razvoj distributivne mreže što tačnije predvidjeti uticaj budućih distribuiranih generatora kako bi se potrošačima mogla isporučiti električna energija zadovoljavajućeg kvaliteta, težeći da se gubici u mreži svedu na minimum. S tim u vezi, optimizacija lokacija budućih distribuiranih generatora, ali i njihova veličina je od naglašenog značaja.

Doktorskom disertacijom je potvrđena postavljena hipoteza i dokazano je da optimalna lokacija dodatog fotonaponskog generatora utiče na redukciju nivo gubitaka snage (oko 10%) i padova napona u mreži (oko 6%), kao i to da kapacitet dodatog fotonaponskog generatora treba da bude do nivoa maksimalnog opterećenja voda na koji se priključuje, kako bi njegovo priključenje imalo pozitivan efekat na gubitke snage i padove napona.

Padovi napona opadaju sa priključenjem PV generatora u tački koja je bliža priključenom opterećenju.

U cilju dokazivanja da je moguće sa optimalnim izborom lokacija i kapaciteta fotonaponskih sistema umanjiti gubitke snage i padove napona u distributivnoj mreži, analizirane su različite optimizacione metode (algoritmi):

Prvo su sprovedene simulacije u programskom paketu *DIgSILENT/Power factory*, gdje je analizom realne distributivne mreže pokazan uticaj priključenja fotonaponskih generatora na vrijednost gubitaka snage i padova napona u mreži, a bez potrebe za uključivanjem složenih matematičkih proračuna i uključivanja numeričkih metoda;

*Decision Tree* algoritam omogućava jednostavnu i tačnu optimizacionu proceduru, koja rezultira izborom najpovoljnije lokacije fotonaponskih sistema za zadate kriterijume. Također, moguće je dobiti i vrijednost optimalnog kapaciteta fotonaponskih generatora za definisanu lokaciju priključenja;

*Genetic Algorithm Optimisation Toolbox (GAOT)* je naprednija i složenija optimizaciona metoda od prethodno analizirane, koja omogućava veću brzinu rada i tačnije rezultate optimizacije u odnosu na *Decision Tree* algoritam.

Dodatno ističemo da je dio ostvarenih rezultata koji predstavljaju originalni naučni doprinos doktorske disertacije objavljen u međunarodnom časopisu sa SCIE liste, kao i kroz prezentovanje rezultata drugog rada također objavljenog u međunarodnom časopisu (*indexed in Scopus*) kao i na ostalim sa relevantnih međunarodnih konferencija.

Autor izražava nadu da će prezentovani rezultati podstaći nova istraživanja u ovoj oblasti i da će biti od koristi, kako naučnoj zajednici, tako i za primjenu u inženjerskoj praksi.

## IZVOD IZ TEZE

U disertaciji se analizira optimalni izbor lokacija fotonaponskih sistema i njihovih kapaciteta u cilju smanjenja gubitaka snage i padova napona u distributivnoj mreži sa različitim metodama optimizacije. U nastavku slijedi tačan pregled sadržaja teze, uz posebno isticanje originalnih doprinosa.

U uvodu disertacije je uveden pojam da su fotonaponski generatori najčešće locirani u centrima potrošnje, gdje su njihove izlazne snage i energija nekontrolisane. Pozicioniranjem distribuirane proizvodnje u blizini potrošnje, znatno se utiče na smanjenje tehničkih gubitaka u mreži kao i na promjenu tokova snaga. Zato je vrlo važno imati strategiju potrebnog nivoa fotonaponskih sistema i njihovog optimalnog rasporeda u elektroenergetskom sistemu. Problematika definisanja optimalnog rasporeda i kapaciteta fotonaponskih sistema (generatora) u cilju smanjenja gubitke snage i padova napona u distributivnoj mreži su faktori koji stoje iza istraživanja predloženih u tezi. Napravljen je pregled doprinosa i strukture disertacije.

U prvom poglavlju teze predstavljene su osnovne informacije o distribuiranim generatorima i fotonaponskim sistemima kao i njihovo priključenje na distributivnu mrežu. Definisana je uloga distribuiranih generatora u deregulisanim elektroenergetskim sistemima kao i izbor tehnologije distribuiranih generatora. Predstavljene su i uticaji priključenja fotonaponskih sistema na učinke elektroenergetskog sistema, koji su od posebnog značaja za daljnja izlaganja u tezi. Također, predstavljen je i elektroenergetski sistem Kosova i mogućnosti priključenja distribuiranih generatora baziranih na obnovljivim izvorima energije.

Drugo poglavlje sadrži sedam odjeljaka kroz koje su prezentovani glavni doprinosi u obradi optimizacije lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema. Nakon formalnog uvođenja planiranja distributivne mreže, razmatra se i planiranje proširenja distributivne mreže sa distribuiranim generatorima. Takođe data je i analiza optimalne lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora. Važan dio drugog poglavlja čini pregled analiza optimizacionih metoda. Analitičke metode su jednostavne i neiterativne, ali nedovoljno tačne i njima se dobijaju samo približna rješenja (metoda linearnog programiranja, *Mixed*

*Integer Non-linear Programming, Nonlinear Programming* i metoda dinamičkog programiranja). Konvencionalne metode daju fleksibilna i jednostavna rješenja sa kompromisom između kvaliteta dobijenog rješenja i vremena potrebnog za proračun. Dobijena rješenja nisu dokazano i najbolja, već samo bolja od rješenja koja bi dobili primjenom analitičkih metoda (*Monte Carlo* i *DIgSILENT/Power factory softver*). Potom su analizirane i metode vještačke inteligencije-Heurističke metode koje su posebno primjenjive kod rješavanja problema koji se ne mogu dobro matematički opisati ili koji se ne mogu riješiti egzaktnim metodama (Evolucijski algoritam, Genetski algoritam, *Particle Swarm Optimization, Fuzzy* metode, *Artificial Neural Network, itd*). Nedostaci metoda vještačke inteligencije se ogledaju u dobijanju približnih rješenja problema i neophodnosti korištenja snažnih računarskih konfiguracija. Ove metode se češće upotrebljavaju od prethodno pomenutih. Ipak, i kod njih postoji problem vezan za pouzdanost dobijenih rezultata. Važan dio ovog poglavlja su i Metaheurističke metode, koje su specijalizovane metode za tačno modeliranje i analizu uticaja fotonaponskih sistema na gubitke snaga i padova napona s obzirom na lokaciju i njihovih kapaciteta. Ove metode izbjegavaju visoke računarske napore i koriste zajedno nekoliko heurističkih algoritama ne odvojeno ali dopunski–komplementarni (*Artificial Bee Colony, Tabu search*). Često se koriste GA u kombinacijama sa drugim metodama, stvarajući nove hibridne metode boljeg učinka (GA-OPF, GA-PSO, *Fuzzy-GA*). Metoda rekonfiguracije radijalne distributivne mreže sa DG se ostvaruje uključivanjem i isključivanjem rastavljača u cilju smanjenja gubitaka aktivne snage i postizanja većeg nivoa simetričnosti opterećenja. Algoritmi koji se primjenjuju za rekonfiguraciju mreže su: ACO, GA, *Honey Bee* i *DIgSILENT/Power factory softver*.

Osnovne informacije o gubicima snage u distributivnim mrežama i mjere za njihovo smanjenje analizirana je u trećem poglavlju disertacije. Gubici snage mogu se podijeliti u dvije kategorije: gubitke aktivne i reaktivne snage. Prema uzroku i mjestu nastanka, gubitke u elektroenergetskim mrežama možemo klasifikovati u tri grupe: termogeni gubici, gubici zbog magnetiziranja i gubici zbog nesavršenosti izolacije provodnika pod naponom (zbog odvodnosti). Prema načinu nastanka, gubitke snage možemo klasifikovati u dvije grupe: komercijalni gubici (netehnički gubici) i tehnički gubici. Dok se tehnički gubici sa stanovišta uzroka nastanka mogu podijeliti na: gubitke snage nezavisne od opterećenja (gubici praznog hoda) i gubitke snage zavisne od

opterećenja (promjenljivi gubici). Takođe, u ovom poglavlju predstavljene su metode proračuna gubitaka snage u elektroenergetskom sistemu. Na kraju ovog poglavlja date su i mjere za smanjenje nivoa gubitaka u distributivnim mrežama, koje se mogu svrstati u dvije grupe: mjere za smanjenje gubitaka koje zahtijevaju posebne investicije i mjere koje ne zahtijevaju investicije.

Četvrto poglavlje se bavi analizom gubitke snage i padova napona u vodovima distributivne mreže prije i nakon priključenja distribuiranih generatora.

Peto poglavlje disertacije se primarno bavi izborom optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora na primjeru realne distributivne mreže. U ovom poglavlju je prezentovana primjena *DIGSILENT/Power factory* softvera za analizu gubitaka snage i padova napona u slučaj prije i nakon priključenja fotonaponskog generatora u realnom 10 kVvodu srednjonaponske mreže elektroenergetskog sistema Kosova. Poglavlje sadrži i predlog *Decision Tree* algoritma za optimizaciju u realnoj distributivnoj mreži za utvrđivanje optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora. U ovom djelu analizirana je procjena gubitaka snage bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za slučaj poznatog kapaciteta fotonaponskih generatora, potom procjena gubitaka snage bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za datu lokaciju fotonaponskih generatora i na kraju ovog dijela i procjena padova napona bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za dati kapacitet fotonaponskih generatora. U drugom dijelu je prezentovana provjera dobijenih rezultata kroz primjenu genetskog algoritma *GAOT*-a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja gubitka snage i padova napona u realnoj distributivnoj mreži. U cilju verifikacije dobijenih zaključaka, cijela procedura je ponovljena na primjeru još jednog srednjonaponskog voda.

U zaključnom poglavlju su navedeni osnovni doprinosi disertacije i identifikovane su teme budućih istraživanja u ovoj oblasti.

## THESIS OVERVIEW

The dissertation analyzes the optimal location and sizing of photovoltaic systems aimed at reduction of power losses and voltage drops in the distribution grid with different optimization methods. The following is an accurate overview of the content of the thesis, with particular emphasis on original contributions.

The introduction of the dissertation introduced the notion that photovoltaic generators are most often located in the consumption centers, where their output power and energy are uncontrolled. By positioning distributed generation close to consumption, it significantly affects the reduction of technical losses in the network and changes in power flows. That is why it is very important to have a strategy of the required level of photovoltaic systems and their optimal allocation in the power system. The problem of defining the optimal allocation and capacity of photovoltaic systems (generators) in order to reduce the power losses and voltage drops in the distribution grid are the factors behind the research presented in the thesis.

An overview of the contribution and structure of the dissertation was made:

The first chapter of the thesis presents basic information about distributed generators and photovoltaic systems as well as their connection to the distribution grid. The role of distributed generators in the deregulated power systems is defined, as is the choice of technology for distributed generators. The impacts of connection of photovoltaic systems on the effects of the power system, which are of particular importance for further presentation in the thesis, are also presented. Also, Kosovo's power system and possibilities for connecting the distributed generators based on renewable energy sources were presented.

The second chapter contains seven sections through which the major contributions in processing the optimization of the location and capacity of photovoltaic systems are presented. After the formal introduction of the distribution network planning, the planning of the distribution network with connection of distributed generators is also considered. An analysis of the optimal location and capacity of distributed generators is also given. An important part of chapter two is the overview of optimization method

analyzes. The analytical methods are simple and non-iterative, but not sufficiently accurate and only provide approximate solutions (linear programming method, Mixed Integer Non-linear Programming, Nonlinear Programming and dynamic programming method). Conventional methods provide flexible and simple solutions with a compromise between the quality of the solution obtained and the time required for the calculation. The solutions obtained are not proven to be the best, but only better than the solutions obtained by analytical methods (Monte Carlo and DIgSILENT/Power factory software). Then, artificial intelligence methods-Heuristic methods that are especially applicable for solving the problems that cannot be mathematically well described or that cannot be solved by exact methods (Evolutionary algorithm, Genetic algorithm, Particle Swarm Optimization, Fuzzy methods, Artificial Neural Network, etc). The drawbacks of the artificial intelligence methods are reflected in obtaining approximate solutions to the problem and necessity to use powerful computer configurations. These methods are more commonly used than previously mentioned. However, they also have a problem with the reliability of the results obtained. An important part of this chapter are the Metaheuristic Methods, which are specialized methods for accurately modeling and analyzing the impact of photovoltaic systems on power losses and voltage drops with respect to location and their capacities. These methods avoid high computational effort and use altogether several heuristic algorithms and separately but complementary (Artificial Bee Colony, Tabu search). GAs are often used in combination with other methods, creating new hybrid better performing methods (GA-OPF, GA-PSO, Fuzzy-GA). The method of reconfiguration of the radial distribution network with the DG is achieved by connection and disconnection the disconnecter in order to reduce active power losses and to achieve a higher level of load symmetry. The algorithms used for network reconfiguration are: ACO, GA, Honey Bee, and DIgSILENT/Power factory software.

Basic information on power losses in the distribution networks and measures for their reduction are analyzed in the third chapter of the dissertation. Power losses can be divided into two categories: active and reactive power losses. According to the cause and place of occurrence, losses in the power grids can be classified into three groups: thermogenic losses, magnetization losses, and losses due to imperfections insulation in the under voltage conductor. According to the method of occurrence, power losses can be classified into two groups: commercial losses (non-technical losses) and technical losses. While

technical losses from the point of view of the cause can be divided into: load-independent power losses (unloaded losses) and load-dependent power losses (variable losses). Also, this chapter presents methods for calculating power losses in the power system. At the end of this chapter, measures are also given to reduce the level of losses in the distribution networks, which can be classified into two groups: loss reduction measures requiring special investments and measures requiring no investment.

Chapter four deals with the analysis of power loss and voltage drops in the distribution grid lines before and after the connection of the distributed generators.

The fifth chapter of the dissertation deals primarily with the choice of the optimal location and capacity of a photovoltaic generators on the example of a real distribution grid. This chapter presents the application of DIgSILENT/Power factory software for the analysis of power losses and voltage drops in the case before and after the connection of a photovoltaic generators in a real 10 kV line of the medium voltage grid of the Kosovo power system. The chapter also includes a proposal for a Decision Tree optimization algorithm in a real distribution grid to determine the optimal location and capacity of a photovoltaic generators. This section analyzes the power losses estimation based on the Decision Tree algorithm application for the case of known capacity of the photovoltaic generators, then the power losses estimation based on the application of the Decision Tree algorithm for a given location of the photovoltaic generators and at the end of this section, and the voltage drop estimation based on the Decision Tree application algorithm for the given capacity of the photovoltaic generators. The second part presents the verification of the obtained results through the application of the genetic algorithm (GAOT) for the optimization of the location and capacity of the photovoltaic generators aimed at reduction of power losses and voltage drops in the real distribution grid. In order to verify the conclusions obtained, the whole procedure was repeated with the example of another medium voltage 10 kV line.

The final chapter outlines the main contributions of the dissertation and identifies the topics for the future research in this area.



# SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. UOPŠTENO O DISTRIBUIRANOJ PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE I FOTONAPONSKIM SISTEMIMA .....	4
1.1. Priključenje distribuiranih generatora na distributivnu mrežu .....	7
1.2. Uloga distribuiranih generatora u deregulisanim elektroenergetskim sistemima .....	8
1.2.1. Tehnički uticaji priključenja distribuiranih generatora .....	9
1.2.2. Ekonomski uticaji priključenja distribuiranih generatora .....	12
1.2.3. Tehno-ekonomski uticaji priključenja distribuiranih generatora.....	13
1.2.4. Tehno-ekološki uticaji priključenja distribuiranih generatora.....	13
1.2.5. Ekonomsko-ekološki uticaji priključenja distribuiranih generatora.....	13
1.3. Izbor tehnologije distribuiranih generatora .....	13
1.3.1. Mikroturbine.....	15
1.3.2. Vjetroelektrana .....	16
1.3.3. Fotonaponski (PV) sistemi .....	16
1.3.4. Uticaj fotonaponskih sistema na naponske uslove (prilike) .....	17
1.3.5. Uticaj fotonaponskih sistema na gubitke snage u mreži .....	18
1.3.6. Uticaj fotonaponskih sistema na kvalitet električne energije .....	18
1.3.7. Uticaj fotonaponskog sistema na uslove kratkog spoja i zaštitu mreže .....	20
1.4. Uopšteno o elektroenergetskom sistemu Kosova.....	20
1.4.1. Termoelektrana “Kosova A” .....	21
1.4.2. Termoelektrana “Kosova B” .....	21
1.4.3. Obnovljivi izvori energije u elektroenergetskom sistemu Kosova.....	23
2. OPTIMIZACIJA LOKACIJE I KAPACITETA FOTO-NAPONSKIH SISTEMA.....	27
2.1. Planiranje distributivne mreže .....	27
2.2. Planiranje proširenja distributivne mreže sa distribuiranim generatorima .....	27
2.3. Priključenje distribuiranih generatora i kondenzatora.....	28
2.4. Optimalna lokacija distribuiranih generatora .....	29
2.5. Optimalna lokacija i kapacitet distribuiranih generatora.....	29

2.6. Pregled korištenih optimizacionih metoda za optimizaciju lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora.....	30
2.6.1. Analitički pristup - Matematički i numerički modeli .....	31
2.6.2. Konvencionalne metode .....	34
2.6.3. Metode vještačke inteligencije – heurističke metode .....	35
2.6.4. Metaheurističke metode.....	46
2.6.5. Hibridna tehnologija .....	49
2.7. Rekonfiguracija distributivne mreže za izbor optimalne lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora.....	50
 3. GUBICI SNAGA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA I MJERE ZA NJIHOVO SMANJENJE.....	51
3.1. Uzroci gubitaka u mrežama.....	52
3.1.1. Termogeni gubici.....	52
3.1.2. Gubici zbog magnetizacije .....	53
3.1.3. Gubici zbog odvodnosti.....	53
3.2. Osnovne vrste gubitaka električne snage .....	54
3.2.1. Komercijalni gubici .....	54
3.2.2. Tehnički gubici .....	54
3.3. Gubici snage nezavisni od opterećenja (gubici praznog hoda).....	54
3.3.1. Gubici praznog hoda u transformatorima.....	55
3.3.2. Gubici praznog hoda u vazдушnim distributivnim vodovima.....	57
3.3.3. Gubici praznog hoda u kablovima.....	58
3.3.4. Gubici praznog hoda u kondenzatorima.....	59
3.3.5. Gubici praznog hoda u naponskim i strujnim transformatorima.....	59
3.3.6. Gubici praznog hoda u brojilima električne energije .....	59
3.4. Gubici snage zavisni od opterećenja (promenljivi gubici) .....	60
3.4.1. Gubici snage u transformatorima zavisni od opterećenja.....	60
3.4.2. Gubici snage u vodovima zavisni od opterećenja .....	61
3.4.3. Ostali gubici zavisni od opterećenja.....	64
3.5. Metode izračunavanja gubitaka snage u elektroenergetskim mrežama.....	65
3.6. Mjere za smanjenje gubitaka .....	66
3.6.1. Mjere za smanjenje gubitaka koje zahtijevaju posebne investicije .....	66

3.6.2. Mjere za smanjenje gubitaka koje ne zahtijevaju investicije .....	69
4. ANALIZA GUBITKA SNAGE I PADOVA NAPONA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI PRIJE I NAKON PRIKLJUČENJA DISTRIBUIRANIH GENERATORA .....	72
4.1. Analiza gubitka snage u vodovima distributivne mreže prije priključenja distribuiranog generatora .....	72
4.2. Analiza gubitka snage u vodovima distributivne mreže nakon priključenja distribuiranog generatora .....	73
4.3. Promjena gubitaka snage u distributivnoj mreži .....	75
4.4. Analiza padova napona u distributivnim mrežama .....	77
5. IZBOR OPTIMALNE LOKACIJE I KAPACITETA FOTONAPONSKOG GENERATORA NA PRIMJERU REALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE .....	78
5.1. Primjena <i>DIGSILENT/Power factory</i> softvera za analizu priključenja fotonaponskog generatora u realnoj distributivnoj mreži .....	78
5.1.1. Gubici snage u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora .....	80
5.1.2. Gubici snage voda nakon priključenja fotonaponskog generatora .....	80
5.1.3. Analiza uticaja priključenja fotonaponskog generatora na padove napona u realnoj distributivnoj mreži .....	82
5.2. Implementacija <i>Decision Tree</i> algoritma za utvrđivanje optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora .....	84
5.2.1. Primjena <i>Decision Tree Algoritma</i> za optimizaciju u realnoj distributivnoj mreži...	85
5.2.2. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni <i>Decision Tree</i> algoritma za slučaj poznatog kapaciteta PV generatora .....	85
5.2.3. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni <i>Decision Tree</i> algoritma za datu lokaciju PV generatora .....	89
5.2.4. Procjena padova napona bazirana na primjeni <i>Decision Tree</i> algoritma za datu lokaciju PV generatora .....	92
5.3. Provjera dobijenih rezultata kroz primjenu genetskog algoritma .....	94
5.3.1. Primjena <i>GAOT</i> -a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja gubitka snage u realnoj distributivnoj mreži .....	97
5.3.2. Primjena <i>GAOT</i> -a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja padova napona u realnoj distributivnoj mreži .....	99

5.4. Gubici snage u slučaj prije priključenja fotonaponskog generatora u 10 kV vod “Koretine” .....	101
5.4.1. Gubici snage voda nakon priključenja fotonaponskog generatora u 10 kv vodu “Koretine” .....	102
5.4.2. Primjena <i>GAOT</i> -a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja gubitka snage u 10 kv vodu “Koretine” .....	103
5.4.3. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni <i>Decision Tree</i> algoritma za slučaj poznatog kapaciteta PV generatora na 10 kV “Koretine” .....	104
5.4.4. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni <i>Decision Tree</i> algoritma za datu lokaciju PV generatora u 10 kV vodu “Koretine” .....	108
ZAKLJUČAK.....	112
PRAVCI BUDUĆEG ISTRAŽIVAČKOG RADA .....	115
LITERATURA .....	116

## LISTA SLIKA

Slika 1.1 Tradicionalni – vertikalno integrisani elektroenergetski sistem .....	4
Slika 1.2 Jednopolni prikaz distributivne mreže sa priključenim distribuiranim generatorom .....	5
Slika 1.3 Tehnologije distribuiranih generatora .....	14
Slika 1.4 Priključenje fotonaponskog generatora i sistema za skladištenje električne energije u elektroenergetski sistem .....	17
Slika 1.5 Šema Kosovskog elektroenergetskog sistema .....	26
Slika 2.1 Klasifikacija metoda optimizacije .....	31
Slika 2.2 Blok dijagram izvršenja genetskog algoritma .....	38
Slika 2.3 Struktura ANN mreže .....	45
Slika 3.1 Vektorski prikaz ukupne struje u kablovima .....	59
Slika. 3.2 Vod sa opterećenjem koncentrisanim na kraju voda .....	63
Slika. 3.3 Potrošači raspoređeni duž voda .....	64
Slika. 3.4 Ravnomjerno raspoređeno opterećenje duž voda .....	64
Slika. 4.1 Jednostavni radijalni distributivni vod prije priključenja distribuiranog generatora .....	73

Slika. 4.2 Jednostavni radijalni distributivni vod nakon priključenja distribuiranog generatora .....	75
Slika. 4.3 Kriva gubitaka sa porastom snage priključenog distribuiranog generator ....	77
Slika.5.1 Jednopolna šema 10 KV voda “Mučiverce” sa priključenim fotonaponskim generatorom na sabirnicama 1 .....	81
Slika. 5.2 Grafički prikaz vrijednosti gubitaka snage za različite kapacitete priključenih fotonaponskih generatora i različita mjesta priključka duž voda .....	83
Slika 5.3 Dijagram Decision-Making algoritma .....	85
Slika 5.4 Atributi ID 3 – J 48 algoritma .....	87
Slika 5.5 Vizualizovani Decision Tree algoritam za gubitke snage – $P_{LOSS}$ i kapacitete PV generatora.....	88
Slika 5. 6 Vizualizovani Decision Tree algoritam za gubitke snage - $P_{LOSS}$ i priključne sabirnice PV generatora .....	91
Slika 5.7 Vizualizovani Decision Tree algoritam za padove napona .....	95
Slika. 5.8 Blok dijagram GAOT-a .....	96
Slika. 5.9 Iznažanje optimalnog rješenja za lokaciju i kapacitet PV generatora primjenom GAOT-a .....	99
Slika. 5.10 Surface dijagram generisan pomoću GAOT rezultata .....	100
Slika.5.11 Optimalni pad napona u krajnoj tački voda dobijen primjenom GAOT-a ...	101

Slika.5.12 Bar dijagram za padove napona u krajnoj tački voda dobijenih primjenom GAOT-a .....	101
Slika 5.13 Jednopolna šema 10 kV voda “Koretine” sa priključenim fotonaponskim generatorom na sabirnicama 1 .....	103
Slika 5.14 Iznalaženje optimalnog rješenja za lokaciju i kapacitet PV generatora primjenom GAOT-a u 10 kV vodu ‘Koretine’ .....	105
Slika 5.15 Vizualizovani Decision Tree algoritam za gubitke snage - $P_{LOSS}$ i kapacitete PV generatora za 10 kV voda “Koretine” .....	107
Slika 5.16 Vizualizovani Decision Tree algoritam za gubitke snage - $P_{LOSS}$ i priključne sabirnice PV generator u 10 kV vod ‘Koretine’ .....	111

## LISTA TABELA

Tabela 1.1 Energetski blokovi TE “Kosova A“ .....	21
Tabela 1.2 Energetski blokovi TE “Kosova B“ .....	21
Tabela 1.3. Pregled mjesečne potrošnje električne energije u Kosovu tokom 2018. godine .....	22
Tabela 5.1 Tehničke karakteristike 10 kV voda ‘Mučiverce’ .....	80
Tabela 5.2 Raspored opterećenja po sabirnicama 10 KV voda “Mučiverce” .....	80
Tabela 5.3 Gubici snage u 10 kV vod “Mučiverce“ u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora .....	81
Tabela 5.4. Ukupni gubici snage na 10 kV vodu “Mučiverce” za različite vrijednosti kapaciteta priključenih fotonaponskih generatora .....	82
Tabela 5.5. Padovi napona u 10 kV vod “Mučiverce“ u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora .....	84
Tabela 5.6. Vrijednosti padova napona za slučaj nakon priključenja fotonaponskog generatora različitog kapaciteta .....	84
Tabela 5.7. Globalna diskretizacija za date kapacitete PV generatora .....	87
Tabela 5.8. Globalna diskretizacija za gubitke snage $P_{LOSS}$ .....	87
Tabela 5.9. Podaci Decision Tree algoritama konvertovani iz DIgSILENT/Power factory softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV kapaciteta .....	88



Tabela 5.10. Upoređivanje rezultata za $P_{Loss}$ za datih PV kapaciteta dobijenih primjenom Decision Tree algoritma sa rezultatima dobijenih DIgSILENT/Power factory softverom .....	89
Tabela 5.11 Globalna diskretizacija za lokaciju fotonaponskog sistema .....	90
Tabela 5.12 Podaci Decision Tree algoritama konvertovani iz DIgSILENT/Power factory softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV lokacije .....	91
Tabela 5.13 Upoređivanje rezultata $P_{LOSS}$ za datih PV lokacija dobijenih primjenom Decision Tree algoritma sa rezultatima dobijenih DIgSILENT/Power factory softverom .....	92
Tabela 5.14 Globalna diskretizacija za pad napona .....	93
Tabela 5.15 Podaci Decision Tree algoritama konvertovani iz DIgSILENT/Power factory softvera za pad napona .....	94
Tabela 5.16 Definisanje optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta priključenog PV generatora primjenom GAOT-a .....	98
Tabela 5.17 Raspored opterećenja po sabirnicama 10 kV voda “Koretine” .....	102
Tabela 5.18 Gubici snage na 10 kV vodu “Koretine“ u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora .....	102
Tabela 5.19 Ukupni gubici snage na 10 kV vodu “Koretine” za različite vrijednosti kapaciteta priključenih fotonaponskih generatora .....	103
Tabela 5.20 Definisanje optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta priključenog PV generatora primjenom GAOT-a u 10kV vodu „Koretine“ .....	104

Tabela 5.21 Globalna diskretizacija za date kapacitete PV generatora za 10 kV voda “Koretine” .....	105
Tabela 5.22 Globalna diskretizacija za gubitke snage $P_{LOSS}$ za 10 kV voda “Koretine” .....	106
Tabela 5.23 Podaci Decision Tree algoritama konvertovani iz DIgSILENT/Power factory softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV kapacitete za 10 kV voda “Koretine” .....	106
Tabela 5.24 Upoređivanje rezultata dobijenih primjenom Decision Tree algoritma sa simulacionim rezultatima dobijenih DIgSILENT/Power factory softverom za 10 kV vod “Koretine” .....	108
Tabela 5.25 Globalna diskretizacija za lokaciju fotonaponskog Sistema za 10 kV vod “Koretine” .....	109
Tabela 5.26 Podaci Decision Tree algoritama konvertovani iz DIgSILENT/Power factory softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV lokacije za 10 kV vod “Koretine” .....	110
Tabela 5.27 Upoređivanje rezultata $P_{LOSS}$ za datih PV lokacija dobijenih primjenom Decision Tree algoritma sa rezultatima dobijenih DIgSILENT/Power factory softverom za 10 kV vod “Koretine” .....	112

## LISTA SKRAĆENICA

ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
AC	Izmjenična struja
ACA	<i>Ant Colony Algorithm</i>
ACS	<i>Ant Colony Search</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
CIGRE	<i>International Conference on Large High Voltage Electric Systems</i>
DC	Istosmjerna struja
DG	Distribuirani generatori
DE	<i>Differential Evolution</i>
DNO	<i>Distribution Network Operator</i>
DNR	<i>Distribution Network Reconfiguration</i>
DP	<i>Dynamic Programming</i>
EA	<i>Evolutionary Algorithms</i>
EES	Elektroenergetski sistem
EHV	<i>Extra High Voltage</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ERO	<i>Energy Regulatory Office</i>
FC	<i>Fuel Cells</i>
FL	<i>Fuzzy Loggic</i>
GA	Genetski algoritam
GAOT	<i>Genetic Algorithm Optimization Toolbox</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
KEDS	<i>Kosovo Electricity Distribution and Supply</i>
KEK	Kosovska elektroenergetska korporacija
KFW	Njemačka razvojna banka
KOSTT	Kosovski operator sistema prenosa i tržišta
LP	<i>Linear Programming</i>

MC	<i>Monte Carlo</i>
MINLP	<i>Mixed Integer Non-linear Programming</i>
NN	Nisko naponske
NLP	<i>Nonlinear Programming</i>
OIE	Obnovljivi izvori energije
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
RBF	<i>Radial Base Fuction</i>
RNN	<i>Regeneration Neural Network</i>
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SN	Srednjo naponski
TE	Termoelektrana
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TS	<i>Tabu Search</i>
UHV	<i>Ultra High Voltage</i>

## UVOD

Težnja za smanjenjem emisije CO<sub>2</sub> i boljim iskorištenjem obnovljivih izvora energije, kao i pojava liberalizovanog tržišta električne energije doveli su do značajnih promjena u elektroenergetskom sektoru posljednjih decenija.

Umjesto konvencionalnih elektrana baziranih na korištenju uglja, u savremenim elektroenergetskim sistemima sve više su zastupljeni distribuirani generatori (DG) koji dominantno koriste obnovljive izvore energije (energiju Sunčevog zračenja i energiju vjetra) za dobijanje električne energije. Generatori ovog tipa su najčešće locirani u centrima potrošnje, a njihova izlazna snaga i energija su nekontrolisane. Pozicioniranjem distribuirane proizvodnje u blizini potrošnje utiče se na smanjenje tehničkih gubitaka u mreži i na promjenu tokova snaga.

Savremene distributivne mreže su aktivne mreže, sa dvosmjernim tokovima snaga, pa je planiranje i upravljanje ovakvim mrežama veoma zahtjevno. U novonastalim okolnostima izrada optimizacionih algoritama dobija na posebnom značaju i predstavlja način što funkcionalnijeg iskorištenja mreže i povećanja pouzdanosti napajanja potrošača.

Ekonomska opravdanost integracije DG-a u elektroenergetski sistem zahtijeva njihovo pozicioniranje na mjestima sa visokim nivoom insolacije po jedinici površine ili adekvatnom jačinom raspoloživog vjetra. Pošto se takva područja često nalaze u ruralnim predjelima sa nedovoljno jakim (krutom) električnom mrežom, vrlo je izazovno pitanje izbora lokacije i snage DG-a kako bi se postigli prihvatljivi gubici snage i eventualno poboljšale naponske prilike.

DG na bazi korištenja solarne energije, tzv. fotonaponski sistemi (*photovoltaic systems* - PV) imaju brojne pozitivne efekte po distributivnu mrežu. PV sistemi su ekološki i pouzdani izvori napajanja prihvatljivog nivoa investicionih troškova i niskih eksploatacionih troškova. U velikom broju evropskih zemalja proizvodnja električne energije iz PV sistema je subvencionirana i generalno, sva proizvedena energija se otkupljuje po podsticajnim cijenama. Zato je vrlo važno imati strategiju potrebnog nivoa PV sistema i njihovog optimalnog rasporeda u elektroenergetskom sistemu.

Problematika definisanja optimalnog rasporeda i kapaciteta PV sistema (generatora) je u fokusu ove doktorske disertacije. S tim u vezi, slijedi i hipoteza koju treba dokazati disertacijom, a koja glasi:

**Optimalnim izborom lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema moguće je umanjiti gubitke snage i padove napona u distributivnoj mreži.**

U cilju dokazivanja hipoteze analizirane su različite optimizacione metode (algoritmi). Pokazane su njihove prednosti i nedostaci, a tako veliki broj metoda koji se mogu pronaći u raspoloživoj literaturi eksplicitno upućuju na zaključak da ne postoji najbolja metoda i najbolje rješenje. S tim u vezi, potrebno je pronaći balans između složenosti metode, brzine dobijanja rješenja, zahtjevano računarske infrastrukture u cilju primjene metode i tačnosti rezultata.

Doktorskom disertacijom su prvo sprovedene simulacije u programskom paketu *DIgSILENT/Power factory*, gdje je analizom realne distributivne mreže pokazan uticaj priključenja PV generatora na vrijednost gubitaka snage i padova napona u mreži.

Nakon toga se pristupilo traženju optimalnog rješenja za lokaciju priključenja PV generatora, a za njegov poznati kapacitet, uvažavajući kriterijume minimalnih gubitaka snaga i padova napona. U tom pravcu korištena je *Decision Tree* optimizaciona metoda, koja je odabrana zbog jednostavnosti upotrebe i brzog dobijanja rješenja zadovoljavajuće tačnosti. Ova metoda ne zahtijeva upotrebu visokosofisticiranih računara, kao ni upotrebu složenog matematičkog aparata. Takođe, primjenom istog metoda i definisanih ograničenja analizirano je dobijanje optimalnog kapaciteta PV generatora, a za poznatu lokaciju priključenja, što predstavlja vrlo čest slučaj u inženjerskoj praksi.

U cilju provjere tačnosti *Decision Tree* metode i dobijenih rezultata, korištena je i dodatana optimizaciona metoda genetskog algoritma, konkretno genetskog algoritma u *Matlab-u*, koji se zove *Genetic Algorithm Optimization Toolbox (GAOT)* i koja je, za razliku od *Decision Tree* algoritma, složenija za upotrebu, pruža veću tačnost dobijenih rezultata i zahtijeva korištenje robusnih računara visokih performansi.

Dakle, treba još jednom apostrofirati da je ideja ove doktorske disertacije da se dobiju optimalna rješenja adekvatne tačnosti, ali na što jednostavniji i brži način, bez upotrebe skupih hardverskih i softverskih rješenja.

Teza je organizovana kroz pet poglavlja.

Nakon uvoda, u prvom poglavlju su prezentovane osnovne informacije o distribuiranim generatorima i fotonaponskim sistemima, kao i uticaj njihovog priključenja na performanse elektroenergetskog sistema. Takođe, predstavljen je i elektroenergetski sistem Kosova, kao i trenutna situacija u pogledu mogućnosti priključenja distribuiranih generatora baziranih na obnovljivim izvorima energije.

Drugo poglavlje se bavi optimizacijom lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema, kroz analizu različitih optimizacionih metoda zastupljenih u dostupnoj literaturi.

U trećem poglavlju su prezentovane osnovne informacije o gubicima snage i predstavljeni tipovi gubitka snage. Takođe, predstavljene su metode proračuna gubitaka snage u elektroenergetskom sistemu i mjere za njihovo smanjenje.

Četvrto poglavlje se bavi analizom gubitke snage i padova napona u distributivnoj mreži prije i nakon priključenja distribuiranih generatora.

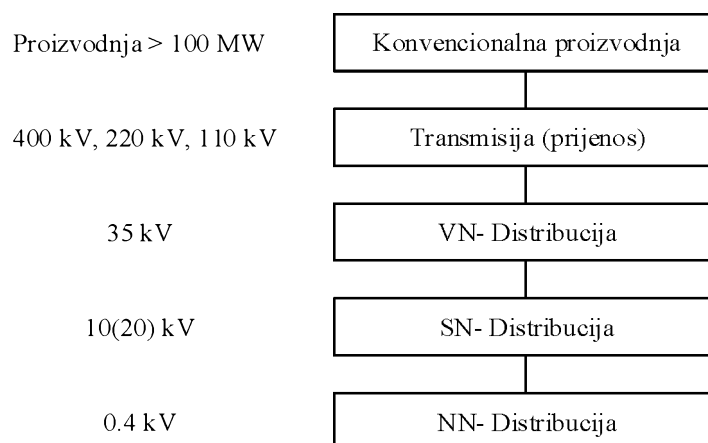
Peto poglavlje sadrži analizu priključenja, odnosno pronalaska optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskog sistema koji treba da bude priključen na realnom 10 kVvodu srednjonaponske mreže elektroenergetskog sistema Kosova. Analizirani su gubici snage i padovi napona u slučaju prije i nakon priključenja fotonaponskog generatora primjenom *DIGSILENT/Power factory* softvera. Potom je odabir optimalne lokacije PV generatora utvrđen korištenjem prethodno pomenutih optimizacionih tehnika – *Decision Tree* i *GAOT*. Takođe, korištenjem istih algoritama, definisan je optimalni kapacitet PV generatora, a za poznatu lokaciju priključenja. U cilju verifikacije dobijenih zaključaka, cijela procedura je ponovljena na primjeru još jednog srednjonaponskog voda.

Na kraju rada su dati zaključak, pregled korištene literature i smjernice za dalji naučno-istraživački rad.

# 1. UOPŠTENO O DISTRIBUIRANOJ PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE I FOTONAPONSKIM SISTEMIMA

U tradicionalnim elektroenergetskim sistemima proizvodnja električne energije je bazirana na konvencionalnim elektranama koje za pogon radnih mašina uglavnom koriste fosilna goriva. Dominantno, konvencionalne elektrane su velikih snaga od 150 do 1000 MW [1]. Takve elektrane zahtijevaju visoke investicionih i eksploatacionih troškova i locirane su daleko od jezgra potrošnje. To iziskuje potrebu za prenosom električne energije na velike daljine, a s tim u vezi i postojanje adekvatnih razvodnih postrojenja visokih i vrlo visokih napona i prenosne infrastrukture (*Ultra High Voltage (UHV)* i *Extra High Voltage (EHV)* [2].

Blok dijagram organizacije tradicionalnog monopolističkog elektroenergetskog sektora i nivo napona dat je na Slici 1.1.

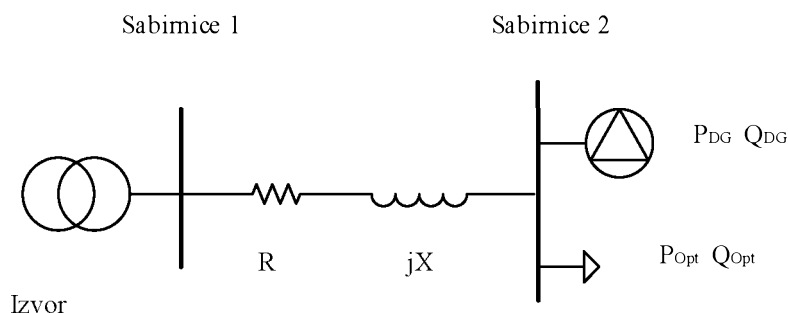


Slika 1.1 Tradicionalni – vertikalno integrisani elektroenergetski sistem

Ekonomski faktori i težnja za jeftinijom proizvodnjom električne energije, koja će kao takva biti jeftinija i krajnjem potrošaču, kao i tehnološke inovacije, rezultiraju deregulisanim tržištem električne energije i pojavom distribuiranih generatora manjih snaga, koji su smješteni blizu centara potrošnje. Njihovi proizvodni kapaciteti mogu biti od nekoliko kW do nekoliko MW i priključuju se direktno na distributivnu mrežu (Slika 1.2).



Priključenjem DG-a, pasivna distributivna mreža postaje aktivna, a tokovi snaga se značajno mijenjaju [3]. Prema brojnim prognozama, budućnost proizvodnje električne energije upravo počiva na DG.



Slika 1. 2 Jednopolni prikaz distributivne mreže sa priključenim distribuiranim generatorom [4]

U najvećem broju slučajeva elektroenergetskim sistemima nedostaje vršne snage u vrlo kratkom vremenskom periodu tokom dana (oko 10% dana), pa sa tog aspekta postaje ekonomski upitno graditi velike elektrane.

Kao što je pokazano u referenci [5], generatorski kapacitet manje snage, lociran pri centru potrošnje je bolje i isplativije rješenje. Ako se navedenom doda da se distribuirana proizvodnja električne energije bazira na obnovljivim izvorima energije i da se na taj način redukuje emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu, postaje jasno zašto se distribuirani generatori smatraju izvorima budućnosti.

Do 2050. godine očekuje se da će ukupna potražnja energije u svijetu biti najmanje udvostručena. Prema *International Energy Agency* (IEA), do 2050. godine 50 % potrošnje energije biće pokriveno proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije (OIE). U Evropi taj procenat bi se povećao na 70 %, tako da će integracija distribuiranih generatora baziranih na obnovljivim izvorima električne energije biti jedan od glavnih izazova u elektrodistributivnim mrežama.

U literaturi se mogu naći brojna istraživanja vezana za distribuirane genertatore, kao i brojne definicije koje opisuju ovu vrstu proizvodnje. Tako se DG mogu definisati kao proizvodnja električne energije u elektranama malih dimenzija i snaga, koje su obično povezane sa distributivnom mrežom i nisu povezane na prenosnu mrežu, a čija proizvodnja nije koordinisana sa ostalim kovencionalnim elektranama [2].

Distribuirani generatori su, po definiciji datoj u [6], proizvodnja električne energije u distributivnim mrežama ili na strani korisnika mreže. Takođe, mogu se susresti i ove definicije:

1. Institut za istraživanje električne energije (EPRI) definiše distribuiranu proizvodnju kao proizvodnju od nekoliko kilovata do 50 MW;
2. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems* (CIGRE) definiše DG kao proizvodnju povezanu sa distributivnom mrežom, koja je manja od 50-100 MW;
3. Sa druge strane, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) definiše distribuiranu proizvodnju kao proizvodnju električne energije koja koristi objekte koji su manji od konvencionalnih elektrana kako bi se omogućila interkonekcija u bilo kojoj tački elektroenergetskog sistema [7];
4. *International Energy Agency* (IEA) vidi distribuiranu proizvodnju kao jedinice koje proizvode električnu energiju u centru potrošnje i koja je povezana na distributivnu mrežu.

Distribuirane generatore prate i različiti termini, kao što su: *Dispersed Generation* prema sjevernoameričkim zemljama, *Embedded Generation*, prema angloameričkim zemljama i *Decentralized Generation*, prema azijskim i evropskim zemljama [6].

Cjelovit pregled različitih definicija vezanih za DG dat je u [7]. Čini se da se svi slažu da su male proizvodne jedinice povezane sa distributivnom mrežom, koja će se smatrati dijelom DG-a. Štaviše, proizvodne jedinice instalirane u blizini opterećenja ili na strani kupca obično se identifikuju kao DG. Ovaj posljednji kriterijum djelimično se preklapa sa prvim pošto je većina proizvodnih jedinica na strani kupca povezana sa distributivnom mrežom.

Prema kapacitetu DG možemo svrstati u četiri kategorije [6]:

- mikro DG, snage od 1W do 5 kW;
- male DG, snage od 5 kW do 5 MW;
- DG srednje snage (od 5 MW do 50 MW), i
- velike DG, snage od 50 MW do 300 MW.

### 1.1. Priključenje distribuiranih generatora na distributivnu mrežu

DG je jedna od mogućih opcija za ublažavanje problema porasta opterećenja, preopterećenja vodova, kvaliteta isporučene električne energije, pouzdanosti sistema i smanjenja gubitaka u vodovima [8].

Integrisanje DG u postojeći elektroenergetski sistem može rezultirati sljedećim pogodnostima:

- DG generiše snagu na lokalnom nivou kako bi bili zadovoljeni zahtjevi lokalnog konzuma;
- odgovarajuća veličina i raspored DG može dramatično smanjiti gubitke sistema, povećati ukupnu energetska efikasnost, poboljšati kvalitet isporučene električne energije i pouzdanost ukupnog sistema;
- DG koriste čistu energiju, kao što su energija Sunca, energija vjetra, biogorivo i slično, a u cilju proizvodnje električne energije;
- DG može pružiti pogodnosti za potrošače kao i za distributivni sistem, posebno na lokacijama gdje je konvencionalna proizvodnja neizvodljiva ili gdje ne postoji adekvatna infrastruktura prenosnog sistema [9].

Osim prednosti, integracija distribuiranih generatora u elektroenergetski sistem ima i određene nedostatke, a osnovni je povećanje napona na mjestu priključka.

DG tehnologije imaju i negativan uticaj na životnu sredinu, iako se ta činjenica vrlo često prenebregava. Vjetrogeneratori imaju vizuelni, akustični i uticaj na ptičije vrste. Vjetroturbine i fotonaponski sistemi zahtijevaju veliku površinu u poređenju sa konvencionalnim tehnologijama za isti instalirani kapacitet. Male hidroelektrane mogu uticati na ekosistem i riblji svijet. Biomasa može izazvati neprijatne emisije u slučaju nepotpunog sagorijevanja [10].

Nedostaci ili negativni uticaji priključenja DG na distributivnu mrežu mogu se sublimirati kroz sljedeće aspekte[11]:

- visoke specifične investicione troškove;
- nestabilnost profila napona zbog dvosmjernog protoka snage;
- odstupanja frekvencije sistema;

- viših harmonika; neki DG moraju biti povezani na mrežu preko DC/AC *interfejsa*, što može doprinijeti pojavi viših harmonika;
- pitanje održanja stabilnosti elektroenergetskog sistema postaje veoma značajno.

## **1.2. Uloga distribuiranih generatora u deregulisanim elektroenergetskim sistemima**

DG imaju potencijal da redukuju emisiju CO<sub>2</sub> i povećaju nivo učešća obnovljivih izvora energije u ukupno proizvedenoj energiji, a samim tim i učestvuje u diverzifikaciji energije. Takođe, pomaže u obezbjeđivanju rezervne snage tokom vremena povećane potražnje za električnom energijom, a time i smanjenju gubitaka snage u distributivnoj mreži [12].

DG mogu igrati vitalnu ulogu na tržištima električne energije koja se pojavljuje širom svijeta. U zavisnosti od strukture tržišta električne energije pojedinih zemalja, DG mogu biti učesnici tržišta (dan unaprijed, jedan sat unaprijed ili u realnom vremenu, ako ih ima), a mogu učestvovati i u pružanju pomoćnih usluga.

Izazovi povećane penetracije DG se mogu klasifikovati u tri glavne kategorije: komercijalne, regulatorne i tehničke [13].

Komercijalna i regulatorna pitanja su u tijesnoj vezi sa vladinim politikama i društvenim uslovima, što ćemo samo ukratko pomenuti, a nisu u fokusu ovog rada. Glavna tehnička pitanja koja se odnose na DG integracije su detaljnije razmatrana u daljnjem tekstu.

Razvoj upravljanja aktivne distributivne mreže može stimulisati dalje razdvajanje usluga distributivne mreže kroz razmjenu usluga između operatora distributivne mreže i DG. U cilju podrške razvoju aktivnih distributivnih mreža i prikupljanja odgovarajućih, koristi povezanih sa većim nivoom učešća DG-a, potrebno je razviti nove komercijalne aranžmane [13].

Generalno, postoje tri pristupa:

- nadoknada troškova sprovođenja aktivnog upravljanja direktno kroz mehanizam kontrole cijena (povećanje iznosa nadoknadivog kapitala i operativnih troškova povezanih sa aktivnim upravljanjem);

- uspostavljanje sistema podsticanja koji bi nagrađivao kompanije vlasnike distribuirane proizvodnje;
- uspostavljanje tržišnog mehanizma, izvan regulativnog okvira, za stvaranje komercijalnog okruženja za razvoj aktivnih mreža.

Svrha regulatornog tržišta električne energije je svugdje ista: ispravljanje odstupanja od rasporeda, tj. obezbjeđivanje dodatne električne energije ako se frekvencija smanji i smanjenje proizvodnje električne energije ako se frekvencija povećava. To zavisi od dizajna nacionalnog tržišta kada učesnici imaju posljednju priliku da ispravljaju svoje rasporede na drugim tržištima – dan unaprijed ili 15 minuta ranije [14].

Naravno, kao i svaki projekat koji je u začeću, proces implementacije DG prate određeni problemi: visoka cijena izgradnje istih, stalna borba za što povoljnijom *feed-in* tarifom, odabir odgovarajuće lokacije i kapaciteta DG, kao i težnja za boljom iskoristivošću pogonskih resursa.

Uticaj DG integracije na distributivne mreže je višestruk: tehnički, ekonomski, tehnno-ekonomski, tehnno-ekološki i ekonomsko-ekološki [15].

#### **1.2.1. Tehnički uticaji priključenja distribuiranih generatora**

Tehnički uticaj priključenja DG na distributivnu mrežu se ogleda kroz [4], [13] – [19]:

1. smanjenje gubitka snage;
2. poboljšanje stabilnosti napona;
3. poboljšanje kvaliteta električne energije;
4. povećanje pouzdanosti i sigurnosti sistema;
5. uticaj na koordinaciju zaštite;
6. smanjenje emisije gasova CO<sub>2</sub>.

##### **A) Smanjenje gubitka snage**

Jedan od glavnih uticaja DG je uticaj na gubitke snage u distributivnim vodovima i zato treba pozicionirati distribuirane generatore tako da doprinose umanjenju gubitaka snage.

## **B) Poboljšanje stabilnosti napona**

Nestabilnost napona u distributivnoj mreži je najčešće vezana za promjenljivost opterećenja (potrošnje). Ekonomski razvoj i sve veći zahtjevi za potrošnjom električne energije čine da distributivne mreže funkcionišu blizu granica nestabilnosti napona.

Zato je od velikog značaja razmotriti uticaj distribuiranih generatora na stabilnost naponskih prilika u distributivnoj mreži.

Stabilnost napona treba uzeti u obzir kada se radi o optimalnoj raspodjeli DG-a [19].

## **C) Odstupanja napona i uticaj na regulaciju napona**

Priključivanje DG duž voda može uticati na pravilno upravljanje naponom na distributivnoj mreži. Uticaj DG na kontrolu napona zavisi od protoka snage u mreži.

U normalnim uslovima rada, bez priključenog DG-a, napon na sabirnicama je manji od napona na primarnoj strani transformatora. Uključivanje DG-a može izazvati povratni tok snage, što rezultira da napon na priključnim sabirnicama potrošača bude veći od napona na primaru transformatora. Efekat povećanja napona je ključni faktor koji ograničava broj dodatih DG-a u distributivnoj mreži. Ako se kapacitet DG jedinica poveća, onda je potrebna analiza regulacije napona [20].

DG integracija može izazvati problem prenapona. Ovo ne mora biti problem kada je DG povezan sa sistemom koji ima problem sa niskim naponom. Međutim, za sisteme sa niskim opterećenjem, DG integracija može dovesti do visokonaponskih problema, što narušava standardnu praksu regulacije napona.

## **D) Poboljšanje kvaliteta električne energije**

Kvalitet električne energije postao je veoma važno pitanje tokom posljednje decenije. Ključni razlog za sve veći značaj je brza ekspanzija upotrebe opreme koja je osjetljiva na poremećaje u elektroenergetskim sistemima i široko rasprostranjenu upotrebu nelinearnih pretvarača električne energije.

Integracija distribuiranih generatora može doprinijeti poboljšanju kvaliteta električne energije, kroz podizanje vrijednosti napona i korekciju faktora snage. Suprotno tome, integracija DG-a, odnosno pojava dvosmjernih tokova snaga i kompleksno upravljanje

reaktivnom snagom mogu biti problematični i dovesti do fluktuacije napona, tj. degradacije kvaliteta električne energije.

Različiti DG imaju različite karakteristike, a samim tim i različiti nivo uticaja na kvalitet električne energije. Tako npr. veliki vjetrogenerator priključen na nedovoljno jaku električnu mrežu može dovesti do značajnih problema sa aspekta kvaliteta električne energije [17]. Takođe, energetska elektronika koja prati priključenje DG na mrežu sklona je generisanju viših harmonika, što opet čini problem po kvalitet električne energije.

Generalno, sa aspekta kvaliteta električne energije DG utiču na pojavu:

- oscilacije (fluktacije) napona;
- treperenja napona (flikeri);
- harmonijske distorzije napona.
- Uticaji DG na kvalitet električne energije zavise od mnogih faktora, uključujući [20]:

- tip DG;
- interfejs sa njegovim sistemom;
- veličinu DG jedinice, režim rada i očekivanu izlaznu fluktuaciju;
- ukupni kapacitet DG u odnosu na sistem;
- veličinu proizvodnje u odnosu na opterećenje u tački konekcije.

## **E) Pouzdanost i moguća sigurnost sistema**

Pitanja pouzdanosti odnose se na trajne prekide u isporuci električne energije. Liberalizacija energetskog tržišta čini potrošače svjesnijim o pouzdanosti snabdijevanja električnom energijom. U mnogim evropskim zemljama nivo pouzdanosti bio je veoma visok, uglavnom zbog visokih tehničkih standarda. Visok stepen pouzdanosti podrazumijeva visoke troškove ulaganja i održavanja mrežne i proizvodne infrastrukture.

DG sistemi mogu potencijalno pružiti sljedeće opcije za povećanje pouzdanosti elektroenergetskog sistema:

- povećanje ukupnog proizvodnog kapaciteta sistema;
- povećanje rezerve sistema i
- smanjenje opterećenosti prenosne i distributivne mreže.

Pouzdanost je oduvijek bila važno pitanje za systemske planere i operatore. Pouzdanost može biti izvedena iz *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) i *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) parametara, koji izražavaju vremensko trajanje beznaponskih pauza i učestalost ispada, respektivno [17].

Pouzdanost napajanja podrazumijeva težnju za što manjim beznaponskim pauzama na godišnjem nivou i ovaj pojam je u tijesnoj vezi sa postojanjem rezerve u sistemu. Što je veća raspoloživa rezerva, veća je i pouzdanost sistema. S tim u vezi, DG se mogu koristiti kao generatori u rezervi, koji se mogu staviti u pogon u slučaju pojave kvara u sistemu.

#### **F) Koordinacija (usklađivanje) zaštite**

Zaštita klasične distributivne mreže obično se sastoji od jednostavne prekostrujne zaštite, jer postoji samo jedan izvor napajanja i definisan je protok snage.

DG integracija zahtijeva koordinaciju zaštite koja može održavati dvosmjerne tokove snage. Doprinos DG-a jako zavisi od tipa DG-a i načina na koji je DG jedinica povezana sa distributivnom mrežom [17]. Dizajn zaštite zahtijeva dobru komunikaciju između DG-a i mrežnih dizajnera tokom procesa projektovanja.

#### **1.2.2. Ekonomski uticaji priključenja distribuiranih generatora**

DG ekonomski utiču na štednju goriva, troškove prenosa i distribucije i cijenu proizvedene električne energije. DG povećava životni vijek voda, jer utiče na njegovo rasterećenje. Takođe, poboljšava kvalitet električne energije i smanjuje ukupne troškove planiranja distributivne mreže [15].

U [21] ekonomske koristi spadaju: nove tehnologije imaju manje troškove rada i održavanja, troškovi goriva su takođe mnogo manji zbog povećane ukupne efikasnosti, obavezne rezerve i povezani troškovi su takođe veoma mali, itd. Zbog toga je DG alternativa jačanju distributivne mreže.



### **1.2.3. Tehno-ekonomski uticaji priključenja distribuiranih gneneratora**

Glavni problem šire primjene DG-a je njihova zavisnost od državnih subvencija. Generalno, zbog mnogo manje proizvodnje električne energije nego što je slučaj sa konvencionalnim elektranama, specifični investicioni troškovi su veliki, pa su stoga DG održiva rješenja samo uz stimulatívne cijene proizvedene energije.

### **1.2.4. Tehno-ekološki uticaji priključenja distribuiranih generatora**

Pored tehničkog uticaja na mrežu, DG treba posmatrati i kroz uticaj na životnu sredinu i tendenciju smanjenja zavisnosti od fosilnih goriva. Uticaj može biti pozitivan i negativan. Prednosti za životnu sredinu su smanjene emisije CO<sub>2</sub>, smanjeno zagađenje i dodatna ušteda goriva [15].

### **1.2.5. Ekonomsko-ekološki uticaji priključenja distribuiranih generatora**

Distribuirani generatori imaju značajne prednosti ako se nalazi u velikim industrijskim i stambenim oblastima, jer smanjuje potrebu za izgradnjom novih vodova i ugradnjom novih transformatora. U seoskim područjima koja koriste slabe mreže, priključenje DG-a zahtijeva dodatne investicije u prenosnu infrastrukturu.

U posljednje vrijeme, tehnološke inovacije i promjenljivo ekonomsko i regulatorno okruženje rezultirali interesovanjem za distribuiranu proizvodnju. *International Energy Agency* (IEA) navodi pet glavnih doprinosa ovoj evoluciji [22]:

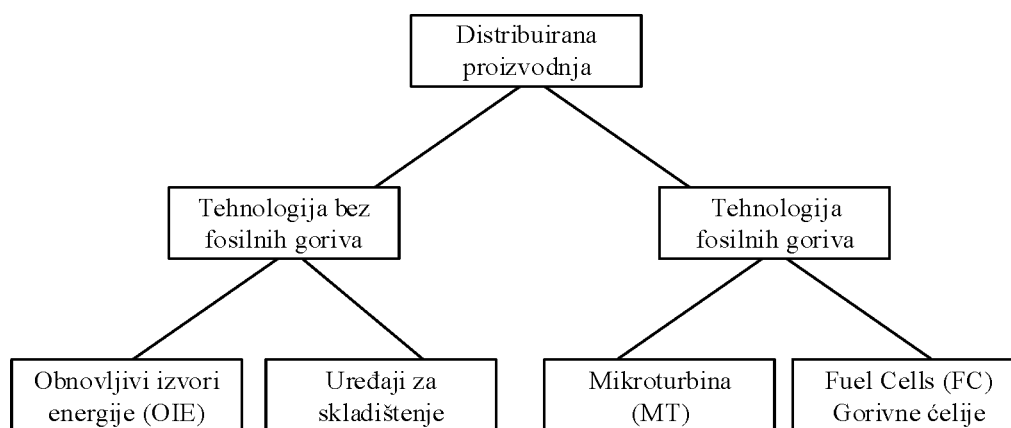
1. razvoj DG tehnologije;
2. ograničenja u izgradnji novih dalekovoda;
3. povećanu potražnju za visoko pouzdanom električnom energijom;
4. liberalizaciju tržišta električne energije;
5. zabrinutost zbog klimatskih promjena.

## **1.3. Izbor tehnologije distribuiranih geneneratora**

Motivisani težnjom za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, današnji naponi u planiranju proizvodnje sve više se fokusiraju na integraciju OIE i različitih tipova DG-a, kao što je prikazano u [23].

Distribuirani generatori su ekološki prihvatljivo rješenje, koje ne predstavlja prijetnju po okolinu i živa bića. Obično je gorivo ovih tipova DG zeleno ili je zagađenje vrlo malo [4].

DG koriste i obnovljive i neobnovljive izvore za proizvodnju električne energije. Prvoj grupi generatora pripadaju: PV generatori, vjetrogeneratori, mini hidroelektrane, geotermalni i generatori na biomasu [22]. U [24] distribuirani generatori se nazivaju “zeleni” izvori energije. Znatno rjeđe se koriste generatori iz druge grupe (Slika 1.3.), kojima npr. pripadaju generatori sa gasnom turbinom, mikroturbine, gorivne ćelije, itd, [20], [22].



Slika 1.3 Tehnologije distribuiranih generatora

Distribuirani generatori (DG) mogu se svrstati u dvije glavne skupine: DG rotirajući sistemi i DG sistemi sa inverterima, gdje ispadaju fotonaponski sistemi i koji su više dostupni u našem regionu. Kada se prključe na EES, ove DG tehnologije imaju različite uticaje na rad, kontrolu i stabilnost ESS-a [25].

Velike energetske jedinice koriste sinhronne generatore za proizvodnju električne energije. Oni, na primjer, mogu kontrolisati izlaz reaktivne snage. DG je sinhroni generator koji je priključen na mrežu i svojim svojstvima se ne razlikuje od konvencionalnih generatora. Sinhroni generator nema problema sa stvaranjem harmonika i njegova pogonska mašina je obično hidraulična turbina, parna turbina ili motor sa unutrašnjim sagorijevanjem [26].

Izvedbe distribuiranih generatora malih i srednjih kapaciteta se baziraju na asinhronim generatorima, koji su znatno jeftiniji od sinhronih. Ovo zapravo zahtijeva

reaktivnu snagu mreže tokom procesa pokretanja i rada. Postoje različite tehničke opcije za prevazilaženje nedostataka umreženog asinhronog generatora.

Asinhroni generatori, zbog svoje prirode i nedostatka ekscitacije, imaju manje kontrole nad uticajem na mrežu. Prilagođavanjem brzine rotacije moguće je regulisati radnu snagu. Količina potrebne reaktivne snage je značajna i najčešće postoji kompenzacija u postrojenju. Distribuirana proizvodnja pomoću asinhronih generatora je karakteristična za vjetroelektrane [26].

Proizvođači DG tehnologije su koristili širok spektar opcija za pretvaranje jednosmjerne struje u naizmjeničnu, kao što su kondenzatori i pretvarači električne energije.

Pretvarači su uređaji koji pretvaraju DC struje u sinusoidnu formu koja odgovara mreži. Zbog načina na koji generišu napon, oni mogu imati problema tako što injektiraju više harmonike u mrežu. Pretvarači imaju mogućnost kontrole izlazne snage, a pošto mogu da kontrolišu fazni pomak, mogu injektirati i uzimati reaktivnu snagu iz mreže. Ovo takođe može regulisati napon na izlazu iz elektrane. Većina pretvarača obično povezuje elektrane sa OIE, koje su često drugačije po prirodi i bez dodatnih rezervi energije koje se ne mogu računati u smislu pružanja mrežnih usluga [26].

Mikrosistemi, kao što su fotonaponski moduli, baterije, gorive ćelije i mikrohidroturbine moraju biti povezani preko pretvarača na mrežu, pošto ovi mikrosistemi proizvode jednosmjernu struju.

Slijedi pregled najznačajnijih DG izvedbi.

### **1.3.1. Mikroturbine**

Mikroturbine su jedan od najperspektivnijih DG proizvoda. Ključne tehničke karakteristike su visoka efikasnost (do 85 %), niska emisija CO<sub>2</sub> i mogućnost korištenja i slično. Imaju niske troškove održavanja. Tipična mjesta primjene mikroturbine su: industrijske, komercijalne i javne zgrade, velike stambene zgrade, zabavni parkovi, itd. Priključenje mikroturbine na distributivnu mrežu sprovodi se pomoću elemenata energetske elektronike. Mikroturbine su snage od 35 kW do 1 MW.

### **1.3.2. Vjetroelektrana**

Vjetar se formira uslijed promjena pritiska između različitih područja zagrijanog vazduha u atmosferi. Brzina vjetra, koja je najvažniji parametar iskorištavanja energije vjetra, proporcionalna je razlici pritiska. Minimalna ekonomska granica za korištenje vjetroelektrana podrazumijeva rad pri korištenju vjetra brzine od 5 m/s. Smatra se da je gornja brzina vjetra oko 25 m/s. Visoke brzine vjetra su opasne jer mogu oštetiti opremu elektrane.

Razvoj tehnologija utiče na redukciju cijene proizvedene električne energije iz vjetroelektrana, a snage vjetroelektrana su veoma različite i mogu biti reda nekoliko vati do nekoliko stotina megavata.

### **1.3.3. Fotonaponski (PV) sistemi**

PV sistemi dobijaju na sve većem značaju, kao posljedica benefita koje stvaraju elektroenergetskom sistemu i životnoj sredini. Sunčeva energija je besplatna i svima dostupna, a PV sistemi mogu raditi i kao autonomni sistemi i kao takvi omogućiti napajanje potrošača koji nemaju pristup električnoj mreži.

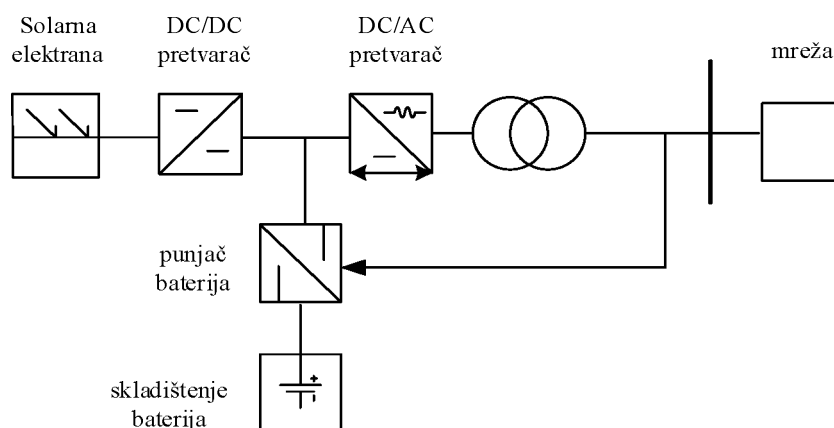
PV sistemi omogućavaju direktnu konverziju solarne energije u električnu energiju. Princip rada PV sistema baziran je na fotonaponskom efektu. Osnovni elektronski elementi u kojima se odvijaju fotonaponske transformacije su solarne ćelije. Više povezanih ćelija čini modul. Snaga jednog modula varira između 50 i 100 W, a njegova efikasnost je blizu 15 %. Ukupna snaga PV sistema je praktično neograničena.

Nedostaci PV sistema su: proizvodnja zavisi od raspoložive energije Sunca; velike površine su potrebne za instalaciju većih PV sistema – obično zahtijevaju od 30 do 40 m<sup>2</sup> za 1 kW snage i tehnologija proizvodnje solarne energije je još uvijek skupa.

PV sistem proizvodi najveću količinu energije tokom intenzivne insolacije, koja se najčešće podudara sa periodom kada je opterećenje sistema maksimalno. To znači da ovaj tip elektrana ima značajnu ulogu u pokrivanju vršnog opterećenja sistema.

PV sistemi su na raspolaganju maksimalno 12 sati na dan, a optimalno 8 do 9 sati, osim ako su dodatno opremljeni sistemom za skladištenje električne energije. PV sistem

i sistem za skladištenje električne energije se povezuje na mrežu preko invertora, kao što je prikazano na Slici 1.4.



Slika 1. 4 Priključenje fotonaponskog generatora i sistema za skladištenje električne energije u elektroenergetski sistem

Fotonaponski sistemi generišu jednosmjerni napon i njihovo priključenje na mrežu sprovodi se preko invertorskog sklopa. Električna energija odgovarajućeg kvaliteta je jedna od obaveza snabdjevača električne energije prema potrošačima. Promjena strukture distributivnog konzuma sa značajno povećanim učešćem pretvarača i ostalih elemenata energetske elektronike ima negativan uticaj na kvalitet mrežnog napona i pojavu gubitaka, pa su česte situacije da granice naponskih parametara definisanih EN 50160 standardom bivaju narušene.

PV sistemi preko invertora stvaraju negativan uticaj u vidu harmonijskih distorzija napona i fluktuacije napona. Vijek trajanja PV sistema je oko 25 godina.

#### 1.3.4. Uticaj fotonaponskih sistema na naponske uslove (prilike)

Naponske varijacije u tački priključka distribuiranih generatora mogu biti izražene i kao takve predstavljati problem. U slučaju rada PV generatora, generisana snaga ide ka srednjonaponskom vodu i utiče na povećanje napona u tački priključka, ali i u ostalim djelovima mreže. Ovaj fenomen postaje naročito izražen u slučaju nedovoljno opterećenih vodova. Pozitivna strana priključka PV sistema, sa aspekta pomenutog problema, je njihova proizvodnja električne energije tokom dnevnih sati, što se često poklapa sa maksimalnim opterećenjem voda (sistema), čime se ograničava porast napona

u mreži. Ovo nije slučaj sa vjetroelektranama, čija maksimalna proizvodnja može biti tokom noćnih sati, odnosno minimalne potražnje sistema. Generalno, može se reći da ako je razlika između trenutne potrošnje na sabirnicama voda i proizvodnje PV sistema velika, napon će se povećati u određenim tačkama mreže iznad dozvoljene granice.

#### **1.3.5. Uticaj fotonaponskih sistema na gubitke snage u mreži**

Priključenje PV sistema na distributivnu mrežu može imati pozitivan i negativan uticaj na gubitke aktivne snage. Naime, ako je proizvodnja elektrane proporcionalna potrošnji na izlazu, gubici snage ne mogu biti izraženi u značajnoj mjeri. Međutim, u slučaju da je proizvodnja električne energije elektrane znatno veća od ukupne potrošnje energije na vodu, povećaće se ukupan protok snage duž voda, pa će i ukupni gubici snage biti veći [27].

Uticaj PV sistema na gubitke u mreži je jedan od najvažnijih faktora u njihovom planiranju. Cilj OIE je da decentralizuje i djelimično odustane od izgradnje velikih elektrana gdje se energija prenosi na velike udaljenosti, što dovodi do gubitaka u sistemu. PV sistemi “oslobađaju” prenosnu mrežu i time povećavaju efikasnost sistema. Budući da su to male jedinice proizvodnje koje su povezane na mrežu srednjeg napona ili niskonaponsku mrežu, tokom planiranja treba osigurati da se proizvedena energija iskoristi na istom ili nižim naponskim nivoima. U suprotnom, došlo bi do povećanja gubitaka u mreži.

Prilikom projektovanja ovih elektrana, neophodno je utvrditi maksimalnu snagu elektrane koja se može priključiti na mrežu bez povećanja gubitaka unutar mreže. Ovo sprečava zloupotrebu sistema podsticaja za dobijanje finansijske dobiti privatnih investitora, a PV sistem ima za cilj povećanje efikasnosti elektroenergetskog sistema (EES). Sadašnji problem je u postojećim zakonskim i tehničkim propisima koji ne pominju uticaj raspodijeljenih resursa na gubitke u mreži, na što će se sigurno morati obratiti pažnja prilikom kreiranja novih.

#### **1.3.6. Uticaj fotonaponskih sistema na kvalitet električne energije**

Električna energija je roba na tržištu i neophodno je postaviti određena pravila za procjenu kvaliteta. Ne tako davno, kvalitet električne energije se mjerio kroz stabilnost

napona i učestanosti, ali su promjene nastale ekspanzijom upotrebe sofisticiranih nelinearnih potrošača, koji značajno degradiraju naponske prilike u mreži, a istovremeno za svoje nesmetano funkcionisanje zahtijevaju gotovo optimalne naponske prilike u sistemu.

Uticaj PV sistema na kvalitet električne energije može se utvrditi samo mjernim uređajima. Iz tog razloga, mjerenje se vrši na mjestu gdje je elektrana priključena.

Tokom mjerenja, treba posmatrati uticaj PV sistema na:

- nivo harmonijskog izobličenja napona i struje (faktore THDU i THDI);
- frekvenciju napona;
- treperenje napona (*Voltage Flicker*);
- naponsku nesimetriju, itd.

Svi mjereni parametri moraju biti u skladu sa važećim EN 50160 standardom.

#### **A)     Uticaj fotonaponskih sistema na harmoničnu izobličenje (distorziju) napona**

PV sistemi se priključuju na distributivnu mrežu preko invertorskih sklopova koji proizvode više harmonike i utiču na distorziju mrežnog napona. Nove tehnologije moraju zadovoljavati standard IEEE 1547 sa aspekta generisanih harmonika. Evropski standard EN 50160 definiše dozvoljenu vrijednost faktora THDU od 8% nazivnog napona.

Visoke vrijednosti generisanih harmonika usljed rada PV sistema u ranim jutarnjim i večernjim satima su posljedica tzv. efekta zasjenjenja. Ovaj efekat se pojavljuje kada PV sistemi (ili dio njih), zbog prepreka nisu zahvaćeni direktnim Sunčevim zračenjem.

#### **B)     Uticaj fotonaponskih sistema na fluktuaciju napona (flikere)**

Fluktuacija napona predstavlja elektromagnetsku pojavu, koja ima za posljedicu treperenje svjetlosti (*flicker*). Najveći uzročnici flikera su fotonaponski sistemi i vjetrogeneratori, naročito njihovog uključenja ili naglog isključenja sa mreže. Promjene u naponu dovode do treperenja svjetlosti u izvorima svetlosti, uglavnom sijalicama. Fluktuacije napona mogu biti periodične ili stohastičke. Izvori fluktuacije napona mogu se kontrolisati pomoću invertora, setova za zavarivanje, električnih otpornika i električnih peći ili asinhronog generatora u vjetroelektranama.

Frekvencijski opseg flikera je od 0 do 25 Hz. Istraživanja su pokazala da ljudsko oko zapaža promjene svjetlosnog fluksa od 1%, uzrokovane iznenadnom varijacijom napona. Najniži prag opažaja je na frekvencijama od 8 Hz do 10 Hz i sa tom frekvencijom promjene napona su od 0, 2% (samo 0, 46 V za 230 V napajanje).

#### **1.3.7. Uticaj fotonaponskog sistema na uslove kratkog spoja i zaštitu mreže**

PV sistemi ne doprinose povećanju snage kratkog spoja, jer su povezani sa mrežom isključivo putem pretvarača, tako da ne mogu razviti struju koja premašuje nominalnu vrijednost. Stoga, prilikom analize uticaja priključka takve elektrane ne postoji potreba za detaljnijom provjerom već instalirane opreme u okolnoj distributivnoj mreži zbog jačine kratkog spoja [27].

Zaštita distributivne mreže od uticaja kvarova u PV sistemima i mogućeg nepravilnog rada u odnosu na izdate tehničke uslove rješavaće se odgovarajućim zaštitnim podešavanjima koja djeluju na prekidaču. Takođe, isti prekidač se koristi da isključi elektranu iz mreže kako bi spriječio otočni rad, što takođe zahtijeva adekvatnu zaštitu. Da bi zaštitili samu elektranu i napojni vod, dovoljno je postaviti zaštitu od prekomjerne struje kako bi zaštitio odgovarajući dio voda [26]. Dodatni zahtjevi za zaštitu nisu obično potrebni jer PV sistemi ne doprinose povećanju struje kratkog spoja.

#### **1.4. Uopšteno o elektroenergetskom sistemu Kosova**

Kosovo raspolaže značajnim rezervama lignita, pa se upravo ovaj energent koristi za dobijanje električne energije na Kosovu, koja zadovoljava sve domaće potrebe. Rezerve lignita u basenu Kosova su istovremeno treće u Evropi, sa oko 12,5 milijardi tona.

Najveći proizvodni kapaciteti Kosovskog EES-a su dvije termoelektrane ("Kosova A" i "Kosova B"), koje su i glavni proizvođač električne energije na Kosovu sa učešćem od 98, 4 % u ukupno proizvedenoj električnoj energiji. Preostalih 1, 6 % električne energije proizvodi hidroelektrana "Ujman" u Gazivodi (instalirane snage  $2 \times 17.5$  [MVA]) i drugi mali proizvodni kapaciteti [28].



#### 1.4.1. Termoelektrana “Kosova A”

Termoelektrana (TE) “Kosova A” se sastoji od 5 blokova. Trenutno su u funkciji samo 3 bloka. Godišnja proizvodnja električne energije u ovoj TE iznosi oko 1874 GW. Osnovni podaci o TE su dati u Tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Energetski blokovi TE “Kosova A”

Blokovi	S <sub>inst</sub> [MVA]	S <sub>oper</sub> [MW]	Proizvodnja 2012. [GWh/Net]	Godina izgradnje	Puštanje u rad
A <sub>1</sub>	65	35/32	0	1960-1962	21.10.1962.
A <sub>2</sub>	125	0	0	1962-1965	20.05.1965.
A <sub>3</sub>	200	135/120	456	1966-1970	18.04.1970.
A <sub>4</sub>	200	135/120	813	1967-1971	15.05.1971.
A <sub>5</sub>	210	145/130	605	1971-1975	08.07.1975.

#### 1.4.2. Termoelektrana “Kosova B”

TE “Kosova B” se sastoji od 2 bloka. Investicije napravljene u proteklih nekoliko godina su održale blokove na dobrom tehničkom nivou, iako su stariji od 30 godina. Godišnja proizvodnja električne energije iznosi oko 3380 GWh. Osnovni podaci o ovoj TE su dati u Tabeli 1.2.

Tabela 1.2 Energetski blokovi TE “Kosova B”

Blokovi	S <sub>inst</sub> [MVA]	S <sub>oper</sub> [MW]	Proizvodnja 2012. [GWh/Net]	Godina izgradnje	Puštanje u rad
B <sub>1</sub>	339	290/265	1454	1977-1983	10.09.1983.
B <sub>2</sub>	339	280/265	1926	1977-1984	14.07.1984.

Kao što se može vidjeti u Tabeli 1.1, generatorski kapaciteti TE “Kosova A” su zastarjeli (već su premašili svoj životni vijek), sa niskom raspoloživošću i mnogim problemima zbog svoje starosti. Od pet proizvodnih jedinica u TE “Kosova A”, samo tri (A3, A4 i A5) su dostupne za proizvodnju. Prema energetske strategiji Kosova, TE “Kosova A” bi trebalo da bude ugašena kada se izgradi nova TE “*Kosova e Re*”.

TE “Kosova A” trenutno pokriva oko 34% domaće proizvodnje. Ostatak pokriva TE “Kosova B”, koji su u boljem stanju sa stanovišta rada i dostupnosti, ne samo zbog starosti, već i zbog poslijeratnih kapitalnih investicija, posebno od 2007. godine (Tabela

1.2). Međutim, ove jedinice bi trebalo revitalizirati tokom 2019. godine zbog obaveza koje proističu iz Direktive EU o sprovođenju standarda zaštite životne sredine, naročito obaveze koje proizlaze iz Direktive 2001/80/EC Evropskog parlamenta i Savjeta.

Trenutna dnevna proizvodnja na Kosovu je:

- Blok A-3 = 136 MW
- Blok A-4 = 130 MW
- Blok A-5 = 145 MW
- Blok B-1 = 264 MW
- Blok B-2 = 270 MW
- HE Ujman = 30 MW
- ostali obnovljivi izvori = 45 MW.

Kosovo je zemlja u razvoju i ima prosječan rast potrošnje od 6% godišnje, što znači da je izgradnja novih proizvodnih jedinica neizbježna i da je realizacija projekta izgradnje nove elektrane *Kosova e Re* jedan je od najvažnijih projekata za zemlju, ali i za region.

Vlada Kosova je potpisala je ugovor sa jednom američkom kompanijom za projekat *Kosova e Re*, a ovaj projekat predviđa izgradnju nove termoelektrane privatnim ulaganjima sa instaliranim kapacitetom od 500 MVA.

Prenosni sistem na Kosovu ima instalirani kapacitet koji može da podrži opterećenje do 1450 MW. Vršno opterećenje kosovskog elektroenergetskog sistema iznosi 1040 MW.

Tabela 1.3 Pregled mjesečne potrošnje električne energije u Kosovu tokom 2018. godine

Mjesečna opterećenja na Kosovu	Jan-18	Feb-18	Mar-18	Apr-18	Maj-18	Jun-18	Jul-18	Aug-18	Sep-18	Okt-18	Nov-18	Dec-18	Prosječna
[MW]	985	1031	1030	765	690	685	666	675	700	782	941	1109	838

Prenosni sistem igra važnu ulogu u sigurnosti snabdijevanja i održavanja cijelog EES. Kosovska prenosna mreža je važna veza sa regionalnim i evropskim elektroenergetskim sistemima. Sa susjednim zemljama postoje interkonektivne veze za međusobno povezivanje na 400 kV nivou, sa izuzetkom Albanije, sa kojom trenutno postoje samo

220 kV dalekovod. U 2014. godini započeta je izgradnja 400 kV interkonektivne linije TS Kosovo B - TS Kašar (Tirana), ali još nije završena iz objektivnih razloga.

Prenosnim sistemom upravlja Kosovski operator sistema prenosa i tržišta (KOSTT). KOSTT je odvojen od KEK-a (Kosovska elektroenergetska korporacija) i osnovan je kao samostalna kompanija 1. jula 2006. godine u skladu sa Ugovorom o energetske zajednici za jugoistočnu Evropu. KOSTT je odgovoran za planiranje, rad, održavanje i upravljanje prenosnim sistemom tako što nudi otvoreni i nediskriminatorni pristup funkcionisanju tržišta električne energije, pružajući uslove koji stimulišu konkurenciju na Kosovu i saradnju sa susjednim operatorima prenosa u korist Kosova i regiona. KOSTT je pod okriljem Vlade i potpuno je nezavisan od KEK-a. Njihove tarife odobrava *Energy Regulatory Office* (ERO).

Ukupna dužina dalekovoda (400 kV, 220 kV i 110 kV) iznosi 1.187 km. U posljednjih nekoliko godina uložena su značajna materijalna sredstva koja su doprinijela povećanju prenosnih kapaciteta, sigurnosti i pouzdanosti prenosnog sistema.

Gubici prenosa iz 2009. godine, koji su iznosili 3,31%, u 2012. godini su smanjeni na 1,32 %.

Do maja 2013. godine Distributivni operator je bio u nadležnosti KEK-a, a kao rezultat procesa razdvajanja ovaj sektor je danas u privatnom vlasništvu i njime upravlja kompanija *Kosovo Electricity Distribution and Supply* (KEDS). KEDS posjeduje 35 kV distributivne mreže dužine 625 km. Mreža 20 kV je duga oko 1260 km, 10 kV je duga oko 5744 km, 6 kV je duga oko 50 km, a mreža 0,4 kV je duga oko 11.905 km. Takođe u vlasništvu distributivne mreže nalaze se 53 trafostanice od 35/10 kV do nivoa 6/0.4 kV i 7490 trafostanica 10/0.4 kV.

#### **1.4.3. Obnovljivi izvori energije u elektroenergetskom sistemu Kosova**

Udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvedenoj količini električne energije na Kosovu nije zadovoljavajući, a postoji potreba za značajnim ulaganjima i izgradnji ovakvih kapaciteta. Zakoni Kosova koji se tiču energetike podstiču ulaganja u OIE, a naročito u solarne elektrane i vjetroelektrane.

Što se tiče razvoja OIE korištenjem raspoloživih voda, sprovedena je studija kojom je identifikovano 77 lokacija za male hidroelektrane, kapaciteta 128,197 MW. Do sada su koncesiju date za sljedeće hidroelektrane:

1. Hidroelektrana “Kožnjer”, ukupne instalirane snage od 31.19 MVA u opštini Dečan u regionu Peći,
2. Hidroelektrana “Hydrolina”, ukupne instalirane snage od 10.8 MVA u selu Valač u regionu Mitrovice,
3. Hidroelektrana “Eurokos”, ukupne instalirane snage od 10 MVA u opštini Dragaš u regionu Prizrena,
4. Hidroelektrana “Dikanca”, ukupne instalirane snage od 3.34 MVA u opštini Dragaš u regionu Prizrena,
5. Hidroelektrana “Radavc”, ukupne instalirane snage od 900 kVA u selu Radavce u regionu Peći,
6. Hidroelektrana “Burimi - Istog”, ukupne instalirane snage od 845 kVA u opštini Istog u regionu Peći.

Dodatno, KEDS je dao električnu saglasnost za još četiri hidroelektrane koje su u izgradnji:

7. Hidroelektrana “Eco Eenergy”, ukupne instalirane snage od 800 kVA u selu Požarane, opština Vitina u regionu Gnjilana;
8. Hidroelektrana “Lepenci 1”, ukupne instalirane snage od 11.76 MVA u selu Postenik, opština Kačanik u regionu Uroševca;
9. Hidroelektrana “Lepenci 3”, ukupne instalirane snage od 12.02 MVA u selu Doganaj, opština Kačanik u regionu Uroševca i
10. Hidroelektrana “Matkos Group” ukupne instalirane snage od 18.4 MVA u Brezovicu, opština Štrpce u regionu Uroševca.

KEDS ima i druge zahtjeve od privatnih investitora za izgradnju novih 15 hidroelektrana, sa ukupnim instalisanim kapacitetom od 78,46 MVA.

Na Kosovu do sada puštene u rad dvije vjetroelektrane, i to:

1. na planini Goleš, opština Lipjan, izgrađena je vjetroelektrana sa instaliranom snagom od 3x450 kVA i

2. na planini Kika, opština Kamenica, izgrađena je vjetroelektrana sa instaliranom snage od 31 MVA.

Solarna energija se može značajno iskoristiti za proizvodnju električne energije. Procjenjuje se da je solarno zračenje na Kosovu između 1500 i 1650 kWh/m<sup>2</sup> godišnje. Kosovo ima takav položaj da ima skoro 270 sunčanih dana sa mogućnošću proizvodnje do 1578 kWh/m<sup>2</sup>, a temperatura solarnih fotonaponskih panela tokom ljeta iznosi 66°C. Intenzitet Sunčevog zračenja na Kosovu i regionu je među najvećim u Evropi.

Na Kosovu trenutno postoje nekoliko manjih PV sistema povezanih sa niskonaponskom distributivnom mrežom i dvije male solarne elektrane priključene na mrežu srednjeg napona. Razlog za ovu zanemarljivu eksploataciju visokog potencijala solarne energije na Kosovu je prvenstveno u relativno složenom regulatornom okviru za prihvatanje električne energije iz ovih elektrana, kao i na probleme usklađivanja prostornih planova (za veće elektrane).

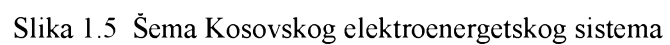
Takođe, prema tarifnom sistemu za proizvodnju električne energije iz OIE i kogeneracije, utvrđena je granica od 1 MW za ukupnu instaliranu snagu solarnih elektrana na Kosovu, čija proizvodnja se subvencionise.

Solarne elektrane koje su trenutno u pogonu na Kosovu su:

1. "LED Light Technology Kosova", sa instaliranom snagom od 100 kW koja je priključena na 10 kV vod u selu Đurđevik, opština Klina u regionu Peći;
2. "SPA - Onix", sa instalisanom snagom od 500 kW koja je priključena na 10 kV vod u selu Banja, opština Istok u regionu Peći;
3. "Feti", sa instalisanom snagom od 100 kW koja je priključena na 10 kV vod u opštini Lipljan u regionu Uroševca.

Trenutno, KEDS ima dodatne zahtjeve od privatnih investitora za izgradnju 11 PV sistema sa ukupnim instalisanim kapacitetom od 25.28 MW.

Na osnovu sveobuhvatne analize različitih DG tehnika, može se zaključiti da izbor optimalne lokacije i kapaciteta PV sistema utiče na smanjenje gubitaka snage, padova napona i kvaliteta električne energije. Ova, kao i metode optimizacije DG i PV sistema biće opisane u Poglavlju 2 naše disertacije.



## **2. OPTIMIZACIJA LOKACIJE I KAPACITETA FOTO-NAPONSKIH SISTEMA**

### **2.1. Planiranje distributivne mreže**

Planiranje proizvodnje električne energije je oblast visoke odgovornosti koja ima za cilj da garantuje sigurno snabdijevanje potrošača u budućnosti. Danas je aktivnost planiranja još složenija, jer se mora uvažiti postojanje tržišta električne energije i veliki upliv kapitala u oblast elektroenergetike, manifestovan kroz izgradnju brojnih malih izvora električne energije. Takođe, u savremenim elektroenergetskim sistemima postoje i skladišta električne energije koje se moraju uzeti u razmatranje pri planiranju. Konačno, jačanje ekološke svijesti i težnja za redukcijom nivoa CO<sub>2</sub> u atmosferi nameće procesu planiranja obavezu izgradnje budućih elektroenergetskih objekata u skladu sa ekološkim normama, a sa ciljem očuvanja životne sredine.

Protok snage takođe nameće procesu planiranja EES-a zato što u tradicionalnoj distributivnoj mreži je jednosmjernan od izvora do korisnika. Međutim, uvođenje DG-a u distributivni sistem mijenja se struktura sistema, ali i tokovi snaga, koji više nisu jednosmjerni od trafostanice do opterećenja [14].

### **2.2. Planiranje proširenja distributivne mreže sa distribuiranim generatorima**

Sve veći nivo zastupljenosti distribuiranih generatora u strukturi proizvodnje električne energije i njihovo priključenje kako na niskom, tako i na srednjonaponskom nivou pruža distributivnoj mreži, ali i kompletnom elektroenergetskom sistemu brojne benefite. Ipak, samo planiranje razvoja distributivnih mreža postaje složenije jer treba obezbijediti infrastrukturu za priključak ovog vida proizvodnje električne energije i stvoriti pretpostavke za uspješnu koordinaciju proizvodnje i potrošnje električne energije [29].

Postoji mnogo razloga koji su doveli do intenziviranja upotrebe DG u planiranju distributivne mreže. Mnogi su povezani sa dobro poznatim Kjoto sporazumom i željom da smanji emisiju CO<sub>2</sub> u atmosferu.

Studije planiranja sistema, koje se sprovode da bi se analizirala integracija distribuirane proizvodnje na mrežu, fokusiraju se na sljedeća pitanja:

1. uticaj integracije distribuiranih generatora na troškove nadogradnje mreže, tokove snaga i nivo pouzdanosti mreže;
2. uticaj integracije distribuiranih generatora na gubitke snage u mreži i naponske prilike.

Planiranje priključenja na mrežu distribuiranih generatora treba da sadrži:

- planiranje proširenja distributivne mreže sa DG;
- priključenje DG i kondenzatora;
- odabir optimalne lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora i
- mrežnu rekonfiguraciju u prisustvu DG (operativna strategija).

Studije su pokazale da se čak 13% ukupne proizvedene energije troši na nivou distribucije. Kao rezultat toga, smanjivanje gubitaka u distributivnom sistemu predstavlja veliki izazov za mnoge energetske sisteme širom svijeta. Rekonfiguracija mreže i ugradnja kondenzatora su dva glavna načina za smanjenje gubitaka u distributivnim sistemima.

### **2.3. Priključenje distribuiranih generatora i kondenzatora**

Jedna od važnih prednosti integracije DG-a i kondenzatora zajedno u mrežu je smanjenje gubitaka snage i poboljšanje naponskog profila mreže. Poboljšanje ovih parametara se dodatno može podstaći izborom optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta DG jedinice i kondenzatora. Ali, u slučaju priključenja samo kondenzatora naponski profil se poboljšava, a ne i smanjenje gubitka snage, kako je gore naglašeno [30].

Integracija DG jedinica i kondenzatora može se smatrati alternativnim pristupom za planiranje proširenja distributivnog sistema ne samo za poboljšanje kvaliteta i pouzdanosti napajanja, već i za odgađanje velikih ažuriranja sistema.

U radu [31] obrađena su tehno-ekonomska pitanja planiranja proširenja distributivnog sistema sa optimalnim dimenzioniranjem i rasporedom DG jedinica i kondenzatora.



## **2.4. Optimalna lokacija distribuiranih generatora**

Optimalne lokacije budućih distribuiranih generatora određuju se prilikom planiranja i razvoja distributivne mreže. Kao što je pomenuto, izgradnja DG-a se uglavnom finansira od strane privatnih investitora, pa je sam termin optimizacije lokacije generatora prilično upitan, imajući na umu da su investitori ti koji biraju lokaciju.

Postoji nekoliko dostupnih metoda za predlaganje optimalne DG lokacije, a za različite ciljeve. Međutim, treba posebno naglasiti da jednom sprovedena optimizacija lokacije DG-a ne znači trajno rješenje. Naime, uključenje novih potrošača, kao i integracija dodatnih DG kapaciteta rezultira novim uslovima na nivou distributivne mreže, koji odstupaju od onih uslova koji su važili u trenutku sprovođenja optimizacije.

DG integracija na optimalnoj lokaciji povećava učinak distributivnog sistema, jer predstavlja efikasno i ekonomično rješenje, dajući novu dimenziju planiranju distributivnog sistema. Da bi se maksimalno povećala učinkovitost EES-a, problem lociranja DG-a zahtijeva najsavremenije tehnike optimizacije koje mogu istovremeno upravljati višestrukim ciljevima kako bi predstavile najbolje moguće rješenje. Optimizacija se najčešće vrši korištenjem ulaznih podataka o dnevnoj potrošnji i proizvodnji električne energije.

## **2.5. Optimalna lokacija i kapacitet distribuiranih generatora**

Kao što je navedeno, lociranje i utvrđivanje kapaciteta DG je važno za postizanje bolje pouzdanosti sistema i smanjenje gubitaka. Zato će istraživanja u okviru ove doktorske teze biti usmjerena u tom pravcu, sa fokusom na fotonaponske sisteme i njihovu integraciju sa ciljem smanjenja gubitaka i padova napona u distributivnoj mreži.

Lokacija i veličina DG u postojećim distributivnim mrežama formulisana je kao višestruka funkcija koja omogućava planeru da odluči o kompromisu između troškova nadogradnje mreže, troškova gubitka energije, troškova neisporučene energije i ukupne cijene proizvedene energije iz ovih izvora koja je isporučena potrošačima. Treba dodati i to da su postojeće distributivne mreže planirane nekoliko decenija unazad i da one nisu bile predviđene za priključenje distribuiranih generatora. Sve ovo upućuje da se aktivnosti odabira optimalne lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora mora pristupiti sa naročitom pažnjom.

Najpopularnija ograničenja koja se uzimaju u obzir pri rješavanju problema veličine i lokacije DG jedinica su: ograničenja proizvodnje električne energije, ograničenja napona u sabirnici ili ograničenja pada napona, ograničenje preopterećenja ili kapaciteta transformatora, ograničenja aktivne snage, ograničenja reaktivne snage, ograničenje protoka snage, ograničenje nivoa kratkog spoja, maksimalni broj jedinica DG i ograničenja veličine DG jedinice, ograničenje penetracije DG, ograničenje ukupnog harmonijskog izobličenja napona, ograničenja budžeta, granice pouzdanosti (SAIDI faktor), itd.

Publikacije sugerišu širok spektar ciljeva i ograničenja, ali postoje dva glavna pristupa: pronalaženje optimalnih lokacija za definisani kapacitet DG-a i pronalaženje optimalnih kapaciteta na definisanim lokacijama.

Odgovarajuća veličina i ugradnja DG-a u svrhu smanjenja gubitaka snage u distributivnom sistemu sa različitim metodama optimizacije analizirani su u radovima [32] - [34].

U radu [35] određena je optimalna lokacija DG-a i za određenu veličinu, ali i određena optimalna veličina DG-a za određenu lokaciju, kako bi se maksimizirala poboljšanje profila napona u distributivnim sistemima.

Odgovarajuća lokacija DG-a može imati značajan uticaj na njihov efektivni kapacitet. Kao rezultat toga, položaj se zasniva na gubicima samo pri vršnom opterećenju [36].

U studiji datoj u [9] i [37] pokazano je da neadekvatna lokacija ili veličina distribuiranog generatora može dovesti do većih gubitaka sistema od onih u postojećoj mreži, što znači povećanje troškova i stoga ima suprotan efekat željenom.

## **2.6. Pregled korištenih optimizacionih metoda za optimizaciju lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora**

U većini evropskih zemalja, prema zakonu o energetici, elektroenergetski sistem je obavezan preuzeti svu energiju proizvedenu iz PV sistema. Stoga je nužno za razvoj distributivne mreže što tačnije predvidjeti uticaj budućih DG-a kako bi se potrošačima mogla isporučiti električna energija zadovoljavajućeg kvaliteta, težeći da se gubici u

mreži svedu na minimum. S tim u vezi, optimizacije lokacije budućih DG, ali i njihova veličina je od naglašenog značaja [38].

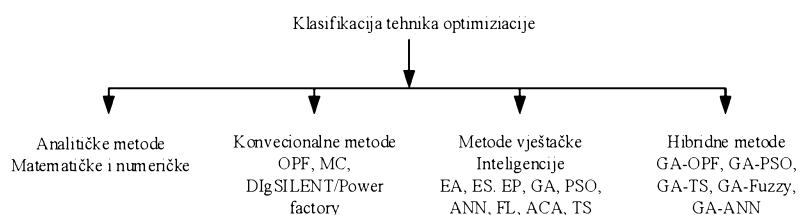
Optimizacija je matematička formulacija koja se bavi pronalaženjem minimalnih ili maksimalnih funkcija koje su predmet takozvanih ograničenja. Ovaj pristup uključuje akcije koje optimizuju (tj. smanjuju ili povećavaju) vrijednost objektivne funkcije [39].

Postoji mnoštvo tehnika optimizacije za planiranje distributivnog sistema u prisustvu DG-a, kao što će biti prikazano u daljem tekstu. Da bi se utvrdilo optimalno rješenje kompleksnog problema optimizacije, moramo razmotriti osnovne konflikte koji se javljaju između tačnosti, pouzdanosti i vremena izračunavanja. Shodno tome, neophodni su kompromisi kako bi se postiglo rješenje koje ispunjava definisane ciljeve [39].

Ova disertacija se bavi problemom optimalne lokacije i kapaciteta PV sistema i u literaturi se mogu naći različiti pristupi u rješavanju ove problematike. Postoje četiri metode i to su:

- analitičke metode,
- klasične (konvencionalne) metode,
- moderne heurističke i metaheurističke metode i
- hibridne metode.

Klasifikacija tehnika optimizacije [39] data je na Slici 2.1.



Slika 2. 1 Klasifikacija metoda optimizacije

### 2.6.1. Analitički pristup - Matematički i numerički modeli

Analitičke metode su jednostavne i neiterativne, ali nedovoljno tačne. Njima se dobijaju samo približna rješenja. Analitičke metode imaju vrlo mali uspjeh u rješavanju problema nelinearnog optimizovanja.

Ogromna većina analitičkih metoda optimizacije dostupnih u literaturi su razvijeni na osnovu tačnih formula gubitka (*Exact loss formula*) prema Olle Ingemar Elgerd-u,

(švedsko-američkom inženjeru elektrotehnike). Tačna formula gubitka je nelinearna jednačina bazirana na protoku opterećenja kako bi se odredila optimalna lokacija i veličina DG jedinice u radijalnoj mreži radi poboljšanja naponskog profila i smanjenjem gubitaka snage.

Analiza tokova snaga može se sprovesti korišćenjem analitičkih pristupa. Predloženi analitički pristupi su zasnovani na novoj formulaciji za probleme tokova snaga koja je neiterativna, direktna i ne uključuje pitanje konvergencije čak i za sisteme sa visokim R/X koeficijentom [32].

Analitičke metode nastoje da predlože matematički izraz koji se može koristiti za određivanje odgovarajuće lokacije i/ili veličine DG-a. Ove metode se mogu brzo i lako primijeniti, međutim, analitičke tehnike nisu pogodne za rješavanje složenih problema. Dobijanje analitičkih izraza zahtijeva korištenje pretpostavki koje ne uzimaju u obzir stvarnu kompleksnost mreže [22].

U protekloj deceniji su učinjeni mnogi naponi za rješavanje problema optimizacije lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora, korištenjem različitih algoritama za postizanje različitih ciljeva. Različite metodologije zasnovane na metodama analitičke optimizacije razvijene su u literaturi i koriste se za identifikaciju optimalnih lokacija i kapaciteta DG-a [32], [40]-[42].

Poređenje analitičkih metoda za položaj i veličinu DG je složeno, pošto svaki autor koristi različite sisteme dokazivanja i aproksimacije (koji mogu biti manje ili više strogi) u jednačini toka snage.

Numeričke metode uključuju sljedeće metode.

#### **A) Metoda linearnog programiranja (*Linear Programming*)**

Metoda linearnog programiranja (LP) se koristi za definisanje optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta DG-a, uz uvažavanje maksimalne penetracije i maksimalnog iskorištenja DG-a, respektivno, [25].

Tehnika linearnog programiranja primenjena je u [43] nakon formulisanja linearne jednačine za ograničenja i objektivne funkcije. Pristup LP-a ima bolju konvergenciju,

može brzo identifikovati nejasnoće i primjenjuje niz operativnih ograničenja u EES-a, uključujući i ograničenja za nepredviđene uslove.

Metoda LP može riješiti samo linearna ograničenja i ciljeve. Uprkos brojnim prednostima, njena primjena u oblasti OPF-a (*Optimal Power Flow*) ograničena je nepreciznom procjenom gubitaka sistema i neadekvatnom mogućnošću pronalaska pravog rješenja.

## **B) *Mixed Integer Non-linear Programming***

Matematičko programiranje se takođe koristi za određivanje najbolje lokacije i/ili veličine DG u distributivnim mrežama. U ovoj oblasti može se istaknuti *Mixed-Integer Non-Linear Programming* (MINLP), *Nonlinear Programming* (NLP) i *Dynamic Programming* (DP). S obzirom na prirodu distributivnih mreža, metode matematičkog programiranja za optimalnu lokaciju DG redovno koriste pojednostavljene jednačine tokova snaga i/ili energetskog bilansa.

MINLP je metoda upotrijebljena za dimenzionisanje optimalne lokacije različitih DG s obzirom na privremene tržišne cijene električne energije. Ponekad je potrebno da se koriste pravila problema optimizacije putem binarne promenljive (ako-onda), pretvarajući ga u optimizacijski problem – *Mixed Integer Non-linear Programming*.

Rad [44] koristi MINLP u cilju smanjenja gubitaka energije sistema. U navedenoj publikaciji, predložena tehnika primenjena je na ruralnu (seosku) distributivnu mrežu sa različitim scenarijima i svim mogućim kombinacijama DG jedinica.

## **C) *Nonlinear Programming***

*Nonlinear Programming* (NLP) je metoda diskretne vjerovatnoće. Da bi se riješio problem nelinearnog programiranja, prvi korak u ovom procesu je odabir pravca pretraživanja u iterativnom procesu, koji je određen izvodom jednačine prvog reda (redukovani gradijent).

Primjena NLP metode u velikom elektroenergetskom sistemu ima određena ograničenja, i to:

1. iako ima globalnu konvergenciju, što znači da se konvergencija može garantovati nezavisno od početne tačke, konvergencije je često naglašeno vremenski zahtjevna;
2. dobijaju se različita optimalna rješenja u zavisnosti od početne tačke rješenja, jer metoda može pronaći samo lokalno optimalno rješenje.

#### **D) Metoda dinamičkog programiranja (*Dynamic Programming*)**

Dinamičko programiranje (DP) se koristi za definisanje optimalne lokacije distribuiranih generatora ODGP (*Optimal Distributed Generation position*).

Rad [45] predstavlja višestruku (multi-objektivnu) funkciju za određivanje optimalnih lokacija DG-a u distributivnu mrežu pomoću dinamičkog programiranja kako bi se smanjio gubitak snage mreže i poboljšali pouzdanost i profil napona.

#### **2.6.2. Konvencionalne metode**

Konvencionalne metode mogu ponuditi fleksibilna i jednostavna rješenja sa kompromisom između kvaliteta dobijenog rješenja i vremena potrebnog za proračun. Tačna lokacija distribuiranih generatora se postiže razmatranjem svih mogućih kombinacija lokacija i veličina fotonaponskih sistema u distributivnoj mreži. Zbog velikog broja nepoznanica i ulaznih podataka, primjena ovih metoda je vremenski zahtjevna. Dobijena rješenja nisu dokazano i najbolja, već samo bolja od rješenja koja bi dobili primjenom analitičkih metoda. Među ovim metodama treba izdvojiti sljedeće.

#### **A) Monte Carlo**

*Monte Carlo*(MC) tehnika je jedna od najpoznatijih metoda za simulaciju i zasniva se na dobijanju raspodjele vjerovatnoće broja putem statistike iz ponovljivih eksperimenata. Ovaj metod je koristan za pronalaženje približnih rješenja koje je teško ili nemoguće riješiti analitički ili numerički korišćenjem numeričkih jednačina ili funkcija. Prednost *Monte Carlo* tehnike je lakoća njegove primjene. Da se dobila tačna vrijednost, odgovarajući algoritam treba biti razvijen na osnovu široke pozadine znanja uključujući razne matematičke formule.

Rad [46] predstavlja analizu rezultata *Monte Carlo* tehnikama za širenje distribuirane proizvodnje u distributivnim mrežama. *Monte Carlo* tehnika u ovom radu se koristi za

dobijanje raspodjele vjerojatnoće željenih varijabli distribuiranih generatora, kao što su: potrošnja, brzina vjetra, Sunčevo zračenje, protok vode, itd.

## **B) *DIgSILENT/Power factory***

*DIgSILENT/Power factory* je napredni softverski paket za istovremenu analizu elektroenergetskih mreža i upravljačkih sistema. Softver *DIgSILENT/Power factory* je vrlo dobro ekonomsko rješenje jer omogućava obradu podataka, modelovanje i druge aktivnosti vezane za eksploataciju i planiranje EES-a, zamjenjujući na taj način brojne druge softvere koji se djelimično koriste. *DIgSILENT/Power factory* je jednostavan za korištenje, ne zahtijeva dodatne obuke i pogodan je za sve standardne i mnoge napredne analize u EES.

Iako je *DIgSILENT/Power factory* komercijalni softver, u literaturi se može naći određeni broj radova u kojima se pomenuti softver koristi.

Rad [47] proučava uticaj većeg broja DG-a sa aspekta gubitaka snaga u distributivnu mrežu. Kapacitet i lokacija DG-a variraju kako bi se analizirao gubitak snage električne mreže. Primjenom *DIgSILENT/Power factory* softvera je pokazano da kada se DG nalazi blizu trafostanice, gubici električne snage voda u distributivnoj mreži opadaju. Međutim, ukoliko se kapacitet DG povećava, povećavaju se gubici snage duž voda.

### **2.6.3. Metode vještačke inteligencije – heurističke metode**

EES je kompleksan sistem, koji se sastoji od velikog broja povezanih čvorova i grana, koji se opisuju većim brojem različitih parametara. Stoga, mnoge analize i proračuni mogu postati veoma kompleksni i vremenski zahtjevni.

Metode vještačke inteligencije se sve češće upotrebljavaju, a njihova složenost je prilično izražena. Ova grupa metoda je posebno primjenjiva kod rješavanja problema koji se ne mogu dobro matematički opisati ili koji se ne mogu riješiti egzaktnim metodama. Nedostaci metoda vještačke inteligencije se ogledaju u dobijanju približnih rješenja problema i neophodnosti korištenja snažnih računarskih konfiguracija za njihovo pokretanje.

Metode vještačke inteligencije na osnovu populacije ili heurističke savremene metode se češće upotrebljavaju od prethodno pomenutih. Ipak, i kod njih postoji problem vezan za pouzdanost dobijenih rezultata.

Rad [22] predstavlja pregled literature glavnih metoda za definisanje lokacije i veličina distribuiranih generatora. U ovom radu zaključeno je da, iako su neke analitičke metode korištene za optimizaciju lokacije i veličine DG u distributivnim mrežama, one se ograničeno prilagođavaju realnim slučajevima (ravnomjerno raspoređeno opterećenje, jedinstveni faktor snage, itd). S druge strane, metode zasnovane na klasičnom matematičkom programiranju koriste jednostavne jednačine toka i balans snage. Konačno, heurističke i metaheurističke metode omogućavaju korištenje nelinearnih jednačina toka i bilansa snage, ali ne garantuju dolazak do optimalnog rješenja.

Heurističke metode su algoritmi obično dizajnirani da uzmu u obzir specifičnosti određenog problema i pokušaju da iskoriste to. Međutim, zbog svoje prirode, često su zarobljeni u lokalnim optimumima i ne dobijaju rješenja za globalni problem. Aplikacije koje se koriste za lociranje i veličinu DG u distributivnim mrežama koristeći heurističke metode zasnovane su na iterativnoj proceduri u kojoj se stanje mreže provjerava u svakoj iteraciji kroz protok snage [22].

U [26] autori nude heuristički pristup procesu planiranja DG, iz perspektive distributivne kompanije, koja nastoji smanjiti investicione troškove i smanjiti gubitke snage. Pristup pruža analizu troškova i koristi, predstavljajući investicioni plan DG za konkurentno tržište električne energije i za fiksne scenarije bilateralnih sporazuma.

U protekloj deceniji razvijeno je nekoliko heurističkih metoda, što olakšava rješavanje problema optimizacije koji su teško ili nemoguće rješivi do sada. Ove metode uključuju evoluciono računanje, GA (*Genetic Algorithm*), ANN (*Artificial Neural Network*), FL (*Fuzzy Logic*), TS (*Tabu Search*), ABC (*Artificial Bee Colony*), PSO (*Particle Swarm Optimization*), itd. Treba napomenuti da, iako su heurističke metode intuitivne, lako su razumljive i jednostavne za primjenu u poređenju sa analitičkim i konvencionalnim metodama.

Heurističke savremene metode su pogodne za brže rješavanje problema kada su klasične metode suviše spore i za pronalaženje približnog rješenja kada klasične metode ne uspijevaju da pronađu tačno rješenje.



Sistem vještačke inteligencije je mašina koja je dizajnirana da ispuni zadatak koji ljudi obavljaju svojom prirodnom inteligencijom.

Metode vještačke inteligencije su sljedeće.

#### **A)     *Evolutionary algorithms***

Evolucijski algoritmi (EA) pripadaju metodama sa visokim nivoom stohastičke konvergencije u cilju postizanja optimalnog rješenja. Ova vrsta metoda je veoma primjenjiva za realne sisteme i kao rezultat daje skup mogućih rješenja. EA metoda, kojima pripadaju ES i GA metode – objašnjene u daljem tekstu, su metode vještačke inteligencije za optimizaciju zasnovane na prirodnoj selekciji kao što su mutacija, rekombinacija, *crossover*, reprodukcija, selekcija itd. Mutacija slučajno dozvoljava odluku kandidata; rekombinacija nasumično miješa svoje djelove kako bi formirala novo rješenje; *crossover* uključuje odabir slučajne pozicije; reprodukcija replicira najuspješnija rješenja u populaciji; dok selekcija izbacuje loša rješenja od populacije [48].

#### **B)     Genetski algoritam (*Genetic algorithm*)**

Prvi genetski algoritam je razvijen od strane John Holland-a 1975. godine. Genetski algoritam je heurističko-stohastički metod koji pronalazi rješenja pomoću genetskog nasljeđa i Darwinove teorije.

Genetski algoritam (GA) pripada klasi heurističkih metoda optimizacije koji imitiraju procese prirodne evolucije. Zajednička karakteristika genetskih algoritama je da oni proces optimizacije vrše pomoću tehnika inspirisanih biološkom evolucijom, kao što su nasljeđivanje, izbor, skretnice i mutacija. Hromozomi se koriste da predstave moguća rješenja problema optimizacije. *Fitness* funkcija se koristi za određivanje ispravnosti svakog rješenja. Hromozom je napisan u obliku vektora i se sastoji od određenog broja parametara – pojedinaca (lokacija optimalno rješenje)  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Kvalitet rješenja (pojedince) se procjenjuje prema njegovoj sposobnosti (*fitness*), koja se zasniva na *fitness* funkciju. U slučaju lokacije DG-a ovaj *fitness* se procjenjuje na osnovu smanjenja gubitka snage, smanjenje investicija i operativnih troškova i pronalaženje optimalne veličine. Populacija se nasumično kreira *step by step* [10].

Hromozom je predstavljen od binoma 0 ili 1. Moramo uzeti u obzir da svi hromozomi imaju isti broj genoma.

Generalno, GA sadrži tri različite faze pretraživanja [29], [49]:

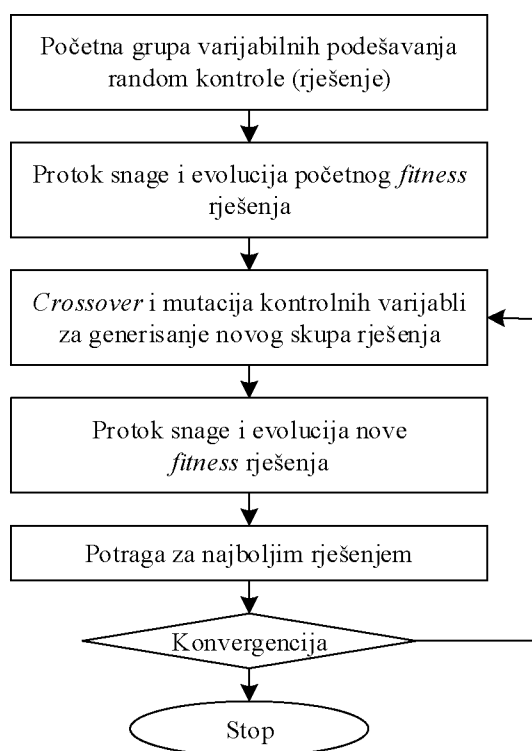
I Faza: stvaranje početne populacije;

II Faza: procjena fitnes funkcije;

III Faza: stvaranje nove populacije.

Genetski algoritam optimizuje *fitness* funkciju. Dakle, *objective function* i neka od ograničenja postojećeg problema moraju se transformisati u neku *fitness* mjeru.

Genetski algoritam [33], (slika 2.2) koji daje dobre rezultate u mnogim praktičnim problemima sastoji se od tri operacije:



Sika 2. 2 Blok dijagram izvršenja genetskog algoritma

**Selekcija** je jednostavna procedura u kojoj su dva hromozoma izabrana iz matične populacije na osnovu njihove sposobnosti. Metode selekcije (izbora) navode da GA bira roditelje za sljedeću generaciju. Što je veća verovatnoća da će fitnes rješenja imati više kopija, dokazana je spremnost poboljšanja od jedne generacije ka drugoj [5].

**Crossover** je izuzetno važan operater za GA. Odgovoran je za rekombinaciju strukture (razmjena informacija između parnih hromozoma) i stope konvergencije GA i

obično se primjenjuje sa visokom vjerovatnoćom (0,6 – 0,9). Hromozomi dva odabrana roditelja su kombinovani da formiraju nove hromosome koji nasljeđuju segmente ili informacije smještene u roditeljskim hromozomima [5].

*Crossover* mehanizam je odgovoran za način miješanja genetskog materijala između pojedinaca. *Crossover* u jednom koraku razmjenjuje genetske informacije koje se nalaze nakon slučajne pozicije u dva odabrana roditelja. *Crossover* se primjenjuje u svakoj sljedećoj generaciji sa određenom vjerovatnoćom, poznatom kao frakcija ili *crossover* stopa. Velika *crossover* stopa smanjuje raznovrsnost populacije.

Pojedinci, slučajno (nasumično) organizovani u parovima, kombinuju svoje prostorne lokacije, tako da svaki bivši par pojedinaca vodi ka novom paru. Dva pojedinca su potrebna i proizvedena od strane dva nova pojedinca kada dva roditelja razmjenjuju djelove svojih hromozoma, što dovodi do inoviranja rješenja. Broj hromozoma koji prolaze kroz operaciju *crossover* određuje se stopom *crossover* [50].

**Mutacija** je operator odgovoran za injektiranje (ubrizgavanje) novih informacija. Uz malo vjerovatnoće, slučajni djelovi potomaka hromozoma se kreću od 0 do 1 kao i obrnuto i daju nove karakteristike koje ne postoje u rodnoj populaciji. Operacije selekcije, *crossover* i mutacija se ponavljaju sve dok se ne stvori broj željenih izvora. Ciljna funkcija se zatim izračunava za sve izvore, a najbolji pojedinci iz cijelog bazena, koje sadrže roditelji i njihovi izvori, čuvaju se kako bi formirali novu generaciju. Konačni rezultat GA optimizacije je najbolji pojedinac posljednje iteracije [5].

Genetski algoritmi su nedavno pronašli široku primjenu u rješavanju globalnih problema optimizacije kada se metode za optimizaciju zatvorenog tipa ne mogu primijeniti.

GA se može koristiti kao bolja alatka od tradicionalnih metoda kako bi se planerima omogućilo da odaberu najbolju veličinu i lokaciju DG za distributivnu mrežu.

Genetski algoritmi nude novi i moćan pristup problemima globalne optimizacije koji su omogućeni povećanjem dostupnosti računara visokih performansi uz relativno niske troškove [5].

Rad [8] ima za cilj da umanja gubitak aktivne snage stavljanjem strateških DG u radialni distributivni sistem. Problem je formulisan kao problem optimizacije i rješenje se dobija korišćenjem GA, i to kroz sljedeće korake:

- inicijalizacija broja lokacija za DG jedinice;
  - određivanje DG lokacije;
  - kontrola ulaznih podataka GA;
  - inicijalizacija populacije pomoću slučajnih (nasumičnih) nizova;
  - rad sa manjim brojem generacija od maksimalnog broja;
  - dobijanje željenog rješenja, tj. optimalne veličine DG, minimalnih gubitka snage i uštede u sistemu;
- ako je ušteda veća od prethodne vrijednosti, povećava se broj lokacija; u suprotnom, ide se na sljedeći korak;
  - kraj.

Prednosti GA sa [51] su:

1. optimizuje se sa kontinualnom ili diskretnom promenljivom;
2. istovremeno traži širok uzorak troškovnih oblasti;
3. radi se o velikom broju varijabli;
4. pruža listu optimalnih varijabli, a ne samo jedno rješenje;
5. može da kodira varijable tako da se optimizacija vrši kodiranim varijablama;
6. radi sa numeričkim generisanim podacima, eksperimentalnim podacima ili analitičkim funkcijama;
7. ne zahtijevaju poznavanje gradijentskih informacija;
8. loše sugestije ne utiču negativno na krajnje rješenje jer se jednostavno odbacuju;
9. GA ne mora da zna nikakva pravila problema – radi po sopstvenim internim pravilima.

Za prednosti paralelnog pretraživanja, robusne pretrage i mehanizma pretraživanja baziranog na principu prirodne evolucije, GA je pronašao primjenu u mnogim oblastima i postao jedan od najuspješnijih algoritama optimizacije. GA je efikasna tehnika pretraživanja parametara. Razmatraju se kada konvencionalne tehnike nisu postigle željenu brzinu, tačnost ili efikasnost. GA se razlikuje od konvencionalnih optimizacija i procedura za pretragu u sljedećem:

- GA radi sa parametrima kodiranja, a ne sa samim parametrima;
- GA koristi samo objektivne funkcije, a ne dodatne informacije, kao što su njihovi izvodi;

- GA koristi pravila mogućnosti tranzicije, a ne deterministička pravila.

Upotreba GA je vrlo česta za definisanje optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta distribuiranog generatora, kako bi se postiglo smanjenje gubitaka snage [52]–[54].

Može se zaključiti da veći broj optimalno pozicioniranih distribuiranih izvora manjih snaga mogu dati veći benefit po sistem od velikog DG-a kapaciteta koji nije optimalno lociran.

U [55] GA iskorišten za optimizaciju broja priključenih distribuiranih generatora u mreži, kako bi se postigli minimalni gubici snaga. U ovom slučaju GA se koristi za određivanje nelinearnog problema izračunavanja ukupnog gubitka snage. Nelinearne metode optimizacije se ne može baviti problemom visoke kompleksnosti sa više od 2 DG jedinica, u poređenju sa GA. Iako su gubici u slučaju GA sa jednim DG nešto veći od onih sa nelinearnim metodama optimizacije, superiornost GA se pokazala kada se kompleksnost problema povećava. Rješenje koje obezbjeđuje nelinearne metode optimizacije za prilagođavanje i dimenzionisanje DG jedinica dovodi do bolje naponskog profila nego u slučaju primjene GA. Iz perspektive vremena izračunavanja, nelinearni algoritam optimizacije je brži od GA. Međutim, rezultati za dve ili čak tri DG jedinice ukazuju da su GA pogodniji metod optimizacije lokacije i veličine DG. Iako GA zahtijeva detaljnu analizu za optimalno podešavanje parametara uključenih u proces, ipak je ova metoda superiorna kao optimizacijska metoda u odnosu na predloženu nelinearnu metodu optimizacije. Prema tome, GA će se smatrati odgovarajućim metodom za rješavanje problema optimalne DG lokacije i kapaciteta.

U [56] prikazan je algoritam za pojedinačnu raspodjelu DG jedinica baziranih na prosječnoj dnevnoj potrošnji energije i krivulja proizvodnje. Cilj je bio smanjenje ukupnih prosječnih dnevnih gubitaka aktivne snage. Korišćenjem predloženog algoritma dobijeni rezultati optimalnog lociranja DG su detaljniji i precizniji, što zauzvrat može imati veliki značaj u izbjegavanju nepotrebnih i često značajnih troškova DNO (*Distribution Network Operator*).

Pored brojnih prednosti, GA, ipak, ne daju tačno optimalno rješenje. Zato se često koriste u kombinacijama sa drugim metodama, stvarajući nove hibridne metode boljih performansi.

### **C)     *Evolution Strategies***

*Evolution strategies* (ES) dijeli mnoge funkcije sa genetskim algoritmom. Metoda ES koristi prave realne kodirane varijable u originalnoj formi, oslanjajući se na mutaciju kao operatora pretraživača i veličinu populacije zajedno.

Glavna sličnost između ES i GA metoda je održavanje populacija potencijalnih rješenja i korištenje mehanizma selekcije za odabir najboljih pojedinaca iz populacije. Glavne razlike su: ES radi direktno na vektore sa plutajućim tačkama dok klasična GA radi na binarnim sekvencama. GA se prije svega oslanja na rekombinaciju kako bi tražio prostore koji se mogu pretraživati, dok ES koristi mutaciju kao dominantnog operatora, a ES je apstrakcija evolucije na nivou individualnog ponašanja, naglašavajući ponašanje pojedinca i njegovog potomstva, dok GA održava genetsku vezu.

### **D)     *Particle Swarm Optimization***

*Particle Swarm Optimization* (PSO) je heuristički globalna metoda optimizacije ili optimizacijski algoritam, koji se zasniva na *Swarm Intelligence*. Algoritam je široko upotrijebljen i razvijen zbog njegove lake implementacije.

PSO je nova metodologija u evolucionom računarstvu koja je donekle slična GA. Međutim, za razliku od drugih algoritama, svako potencijalno rješenje određuje randomiziranu brzinu, a zatim prolazi kroz problematični hiperprostor.

Utvrđeno je da je PSO izuzetno efikasan u rješavanju širokog spektra inženjerskih problema. Veoma je lako sprovodljiv i vrlo brzo rješava probleme [57].

Primjena PSO optimizacione tehnike u cilju definisanja optimalne lokacije vjetrogeneratora u cilju smanjenja gubitka snage i poboljšanje naponskog profila data je u [42]. Potvrđeni su rezultati u poređenju sa analitičkim pristupom.

Algoritam PSO [58] je predložen kao tehnika optimizacije alokacije i veličina višestrukih DG-a u distributivnim mrežama, dok je u radu [59] analizirana optimalna

lokacija i veličina u cilju smanjenje THD-a i gubitaka u distributivnoj mreži, uvažavajući minimalne troškove sistema.

Metoda PSO je jedna od najefikasnijih tehnika heurističke optimizacije koja se može primijeniti prilikom optimizacije objektivne funkcije sa određenim ograničenjima. Ali u mnogim slučajevima, nekoliko ciljeva ili atributa mora biti optimizovano istovremeno, što može izazvati sukob jednoga s drugim.

#### **E) *Fuzzy Logic***

Kao druge tehnike, *fuzzy* metode se uglavnom koriste u optimizaciji EES za modeliranje nejasnih (*fuzzy*) opterećenja, nejasnih ekonomskih troškova, cijene električne energije, nejasnih nivoa pouzdanosti i slično [10].

U [60] je predstavljen novi pristup optimizacije lokacije DG-a koristeći *fuzzy logic* (FL).

#### **F) *Artificial Neural Network***

*Artificial Neural Network* (ANN) je model inspirisan biološkim neuronskim sistemima, kao što je mozak koji obrađuje informacije. Glavni segment ovog modela je struktura sistema za obradu podataka. Sastoji se od velikog broja međusobno povezanih procesnih elemenata (neurona) koji rade zajedno u cilju rješavanja specifičnih problema. ANN, kao i ljudi, uči kroz primjere. ANN je konfigurisan za određenu aplikaciju, baš kao i klasifikacija podataka, kroz proces učenja. Učenje u biološkim sistemima uključuje regulaciju sinaptičkih veza između neurona.

Vještačke neuronske mreže sa izuzetnom sposobnošću da izvuku značenje iz složenih ili netačnih podataka mogu se koristiti za generisanje šablona i otkrivanje trendova koji su suviše složeni da bi se prikupile kroz druge ljudske ili tehnike izračunavanja. Pripremljena neuronska mreža može se smatrati “stručnjakom” u kategoriji informacija za analizu. Kasnije ovaj stručnjak se može iskoristiti da omogući dizajniranje novih situacija i istovremeno odgovori na pitanja poput “šta ako?”.

Ostale prednosti ANN metoda uključuju:

- uslov za učenje – sposobnost režima učenja na osnovu dobijenih informacija ili početnog iskustva;
- samoorganizacija: ANN može stvoriti organizaciju ili predstavljanje na osnovu informacija koje dobija tokom rada “učenja”;
- rad u realnom vremenu: izračunavanje ANN-a može se izvršiti paralelno, projektovati i napraviti odvojeni hardverski uređaj, koji će obezbijediti veće mogućnosti.

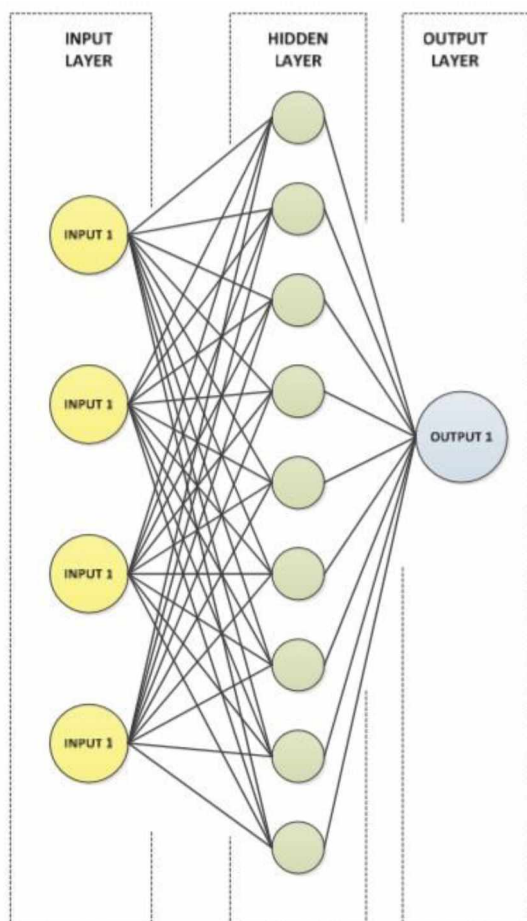
Važan korak u procesu izgradnje neuronske mreže je procjena učinka predviđanja. Uopšteno gledano, indeks učinka je mjera greške opterećenja nezavisnog skupa podataka. Greška predviđanja opterećenja bi trebala biti prihvatljiva ako je neuronska mreža precizno kreirana.

Imajući u vidu sva ograničenja i cilj optimizacije, potrebno je razviti koristan algoritam. Zbog složenosti i međuzavisnosti nelinearnih kontrolisanih varijabli, teško je pružiti brza i tačna rješenja tradicionalnim tehnikama optimizacije poput LP metode unutrašnjih tačaka ili mješovitog integrisanog programa. ANN može biti pogodan za rješavanje takvih nelinearnih problema. Postoji nekoliko različitih tipova ANN, kao što su: RBF (*Radial Base Function*), Kohonenova samoorganizujuća mreža, RNN (regenerativne neuronske mreže), dvosmjerni RNN, itd. Odgovarajuća neuronska mreža mora biti pravilno izabrana, jer ne može bilo koji tip neuronske mreže dati najbolje rješenje za određeni problem. *Back-propagation* ANN može koristiti za probleme optimizacije jer ispunjavaju kriterijume: može se opisati dijagram problema; postoji relativno jednostavan način stvaranja značajnog ili bar potrebnog broja ulaznih i izlaznih objekata; izgleda da je problem složen, ali postoji jasno rješenje. Tipičan *back-propagation* ANN mreža ima ulazni sloj, izlazni sloj i najmanje jedan skriveni sloj. Broj skrivenih slojeva je teoretski beskonačan, ali je obično jedan do četiri sloja adekvatan za rješavanje bilo kakvih složenih problema (Slika 2. 3), [3].

Kao idealno rješenje ANN su nametnute zbog njihove sposobnosti da riješe nelinearne probleme u kratkom vremenskom periodu, a ako su dobro organizovani i izgrađeni, oni su u mogućnosti da obavljaju procese u realnom vremenu, a koji su neophodni za optimizaciju distributivnih mreža. ANN ima značajan potencijal u kontrolnim sistemima koji mogu da uče i prilagode, mogu pristupiti nelinearnim



funkcijama, pogodni su za paralelnu i distribuiranu obradu i prirodno modeluju višestruke varijable sisteme. Zbog toga što se zasnivaju na ljudskom iskustvu i logičkim odnosima između inputa i rezultata, oni mogu usvojiti različite mehanizme učenja i koncepte samoregulacije ili obuke, prepoznavanja uzoraka, predviđanja, itd.



Slika. 2. 3 Struktura ANN mreže

#### G) *Ant Colony Algorithm*

*Ant Colony Algorithm* (ACA) se zasnivaju na ponašanju insekata sa izuzetnom mogućnošću da pronađu najkraću putanju od gnijezda do izvora hrane koristeći hemijsku supstancu feromon [48]. ACS (*Ant Colony Search*) je izveden iz ACA i ima bolje performanse od ACA u većini inženjerskih aplikacija.

ACA je pouzdan i daje dobre rezultate.

#### 2.6.4. Metaheurističke metode

Heurističke i metaheurističke metode omogućavaju korištenje nelinearnog protoka snage i jednačine bilansa snaga, ali ne garantuju pronalazak optimalnog rješenja. Pregledom dostupne literature utvrđeno je da je većina metoda koje se koriste za definisanje pozicije i veličine DG koriste metaheurističku optimizaciju, uključujući i istaknute evolucione algoritme.

Metaheuristički postupak se definiše kao proces iterativne proizvodnje vodećih podređenih heurističkom kombinovanju inteligentno različitih koncepata za istraživanje i eksploataciju prostora za pretraživanje. Strategije učenja se koriste za strukturiranje informacija kako bi se efikasno pronašla skoro optimalna rješenja. Složeni i “posebni” tehnički i netehnički problemi u vezi sa problemima optimizacije EES mogu se lako modelovati i uključiti u proces optimizacije. Metaheurističke metode ne zahtijevaju “zatvorenu” formulaciju različitih aspekata rješavanja, što je bitno u klasičnoj optimizaciji. Metaheuristički algoritmi mogu koristiti miješane zajedničke probleme koji su uobičajeni za probleme optimizacije EES. Sa druge strane, svi metaheuristički algoritmi zahtijevaju pažljivo prilagođavanje optimizacionih parametara, koji su neophodni za pronalaženje dobrog rješenja bez prekomernog vremena izračunavanja. Pažnja se zatim pomjera od matematičke formalizacije obje objektivne funkcije i ograničenjima parametara algoritma, što bi trebalo da omogući kompromis između kvalitativnih rješenja i vremena proračuna. Pravi izazov u korišćenju ovih tehnika je prilagoditi parametre koji dovode do optimizacije.

Jedna od prednosti metaheurističkih tehnika optimizacije je da se one mogu prilagoditi problemima sa više ciljeva. Neki od glavnih i najčešćih ciljeva su: smanjivanje gubitaka, poboljšanje naponskog profila, minimiziranje resursa i smanjenje emisije CO<sub>2</sub>.

To dovodi do najvjerojatnijeg nedostatka metaheuristike: njihove nemogućnosti da pronađu globalni optimum. Vrlo je vjerovatno da će pronaći razumno rješenje, iako ne postoji garancija da je to tačno.

Za prevazilaženje ovog problema često se koriste različite funkcije. Metaheuristički algoritmi omogućavaju inženjeru planiranja da pronađe ne samo jednu optimalnu tačku, već i porodicu skoro optimalnih alternativnih planova. Ova metaheuristička karakteristika je naročito korisna za alociranje DG, jer DNO (*Distribution Network Operator*) generalno

ima malo ili nikakve kontrole nad integracijom DG, a različite planske alternative mogu biti potrebne da bi se nosile sa neizvjesnostima i smanjile rizik.

Postoji mnogo metaheurističkih algoritama, kao što su: ACO, ABC, TS, uključujući GA. Svi ovi algoritmi su korišteni za rješavanje problema optimalne alokacije DG.

Rad [61] ima za cilj da ispita najbolje rješenje za optimalno funkcionisanje distributivnih mreža, uzimajući u obzir DG. Optimalna DG raspodjela se može smatrati čitavim problemom koji se može formulisati pomoću metaheurističkih metoda.

PSO je tehnika koja simulira roj insekata gdje agensi ili čestice pokrivaju problematično područje. Svaki od njih ima za cilj da pronađe odgovarajuću poziciju ili dobro rješenje, komunicirajući jedni sa drugima, usmjeravajući pretragu na agense sa najboljim položajem [22].

U radu [22] se opisuju glavne metaheurističke metode koje se koriste pri određivanju lokacije i/ili veličini DG. Metaheurističke metode su algoritmi koji dodaju stohastički faktor rješenjima koja nađu. Ovi algoritmi su obično poznati kao tehnike koje ne zavise od problema i ne iskorištavaju prednosti problema. Generalno, oni nisu zasnovani na potrazi za rješenjima, tako da im omogućavaju da prihvate privremena rješenja koja se protive poboljšanju rješenja. Ovo im omogućava da detaljnije istražuju prostor za pretraživanje u potrazi za pronalaženjem boljeg rješenja, što bi se u nekim slučajevima poklopilo sa globalnim optimalnim rješenjem.

Dok heuristički i metaheuristički pristup daju gotovo iste rezultate što se tiče smanjenja gubitaka snage i granice stabilnosti napona, ali vrijeme izračunavanja koje zahtijevaju metaheuristički pristupi je veoma manje i stoga su ovi pristupi pogodni za *on-line* aplikaciju za složene distributivne mreže [4].

#### **A) *Artificial Bee Colony***

*Artificial Bee Colony* (ABC) algoritam je novi pristup metaheurističke optimizacije, uveden 2005. godine od strane Karaboga.

ABC se sastoji od tri grupe pčela: zaposlenih, posmatrača i izviđačkih pčela. Zaposlene pčele su one koji slučajno traže hranu (rješenja). Zatim, ples razmjenjuje informacije o izvoru hrane, odnosno, nektarnim količinama (kvalitetna rješenja), sa

pčelama koje su odabrane u plesnom području košnice. Posmatrači i izviđači su one pčele koje čekaju u plesnom području košnice. Trajanje plesa je proporcionalno sadržaju nektara (vrijednosti fitnesa) izvora hrane koji trenutno koristi iskorištena pčela. Shodno tome, posmatrači pčela gledaju različite plesove prije izbora položaja izvora hrane u skladu sa vjerovatnoćom proporcionalnog kvaliteta tog izvora hrane. Shodno tome, dobar položaj izvora hrane (rješenje) privlači više pčela od lošeg. Posmatrači i izviđačke pčele, kada otkriju novu poziciju hrane (rješenje), mogu promijeniti svoj status i postati zaposlene pčele. Pored toga, kada je (testirano) mesto posude za hranu (rješenje) u potpunosti posvećeno, zaposlene pčele moraju da napuste i mogu ponovo postati pčelarski izviđač ili posmatrač.

U robusnom procesu traženja, proces istraživanja i eksploatacije mora se izvršiti istovremeno. U ABC algoritmu, posmatrači i zaposlene pčele obavljaju istraživački proces u prostoru za pretragu, dok sa druge strane kontrolišu istraživački proces. Inspirisan gorenavedenim inteligentnim ponašanjem pčela, uveden je ABC algoritam. Jedna polovina veličine ABC algoritma je broj zaposlenih pčela, a druga polovina je broj pčela posmatrača. Za svaku poziciju hrane dodjeljuje se samo jedna zaposlena pčela. Drugim riječima, broj izvora hrane (moguća rješenja) oko košnice jednak je broju pčela zaposlenih. Istraživač započinje ciklus pretraživanja kada zaposlena pčela privlači hranu (rješenje) [60].

ABC određuje optimalnu veličinu DG, faktor snage i lokaciju u cilju smanjenja gubitka snage distributivnog sistema.

ABC algoritam je jednostavan, efikasan, lak za implementaciju, pouzdan i sposoban za rukovanje mješovitih nelinearnih problema optimizacije.

ABC algoritam ima samo dva parametara za podešavanje (veličinu kolonije i broj maksimalnih ponavljanja). Nasuprot tome, drugi heuristički poznati algoritmi (na primjer, PSO, GA, EP) imaju mnogo parametara za podešavanje. Dakle, ažuriranje dvije najefikasnije vrijednosti parametara ima veću vjerovatnoću uspjeha nego kod drugih konkurentskih algoritama.

## B) *Tabu search*

*Tabu search* (TS) je veoma uspješan u pronalaženju gotovo optimalnih rješenja u mnogim praktičnim problemima. Ovom metodom se dobijaju približna rješenja. Tabu istraživanja je tehnologija da se postigne bilo optimalno ili suboptimalno rješenje u kratkom vremenu trajanja. Nisu potrebne mnoge iteracije da bi se postiglo bolje rješenje [48]. Uvođenjem mutacije *tabu search* algoritam poboljšava sposobnost pretrage lokacije i vreme izračunavanja u cilju smanjenja gubitaka u distributivnim sistemima velikih razmjera.

### 2.6.5. Hibridna tehnologija

Hibridne metode predstavljaju nadogradnju konvencionalnih metoda. Osnovu većine hibridnih metoda čini GA u kombinaciji sa drugim heurističkim metodama. Heurističke metode su naročito prikladne za rješavanje problema koji se ne mogu dobro matematički formulisati ili koji se ne mogu riješiti egzaktnim metodama. Kombinacija GA-TS nudi bolje rješenje u pogledu kvaliteta i broja iteracija. Hibridni pristup, koji se sastoji od TS i drugih heurističkih tehnika, upotrebljava za optimizaciju kapaciteta distribuiranih generatora. GA se koristi zajedno i s drugim tehnikama optimizacije: GA-OPF; GA-PSO i Fuzzy-GA.

Hibridne metode kombinuju različite tehnike optimizacije sa namjerom uvećanja upotrebe različitih snaga i omogućavaju robusno pretraživanje u velikom prostoru rješenja. Među glavnim hibridnim tehnikama su kombinacija populacionih algoritama sa jednostavnim heurističkim tehnikama ili lokalnim pretraživanjima. Bolji rezultati su postignuti u poređenju sa rezultatima datim heurističkim metodama [22].

Tačna lokacija DG postiže se razmatranjem svih mogućih kombinacija lokacija i veličine DG u sistemu. Broj alternativa mogao bi da bude veoma širok zbog većeg broja DG-a i broja čvorova sistema.

U radu [62], optimizacioni metod zasnovan na kombinaciji GA i PSO je iskorišten za definisanje optimalne lokacije DG-a u radijalnoj distributivnoj mreži. Rezultat je boljeg kvaliteta i dobijen u manje iteracija u poređenju sa jednostavnim GA metodama.

Isto tako i u radu [63], autori su predložili novi GA u kombinaciji sa algoritmom PSO za lokaciju i veličinu DG u cilju smanjenja gubitaka u mreži kako bi se postigla bolja regulacija napona.

Takođe u radu [3] predložen je novi metod optimizacije na osnovu ANN i GA. Ovaj metod se zasniva na formulaciji sa objektivnom funkcijom i tehničkim ograničenjima. Brzo dobijeno i ispravno rješenje date formulacije obezbijedeno je korišćenjem ANN, jer one imaju sposobnost da brzo i precizno riješe nelinearne matematičke probleme. Rad definiše optimalnu lokaciju DG-a sa ciljem smanjenja gubitaka snage i regulacije napona. Gubici aktivne snage u radijalnoj distributivnoj mreži se određuju korišćenjem ANN sa istovremenom formulacijom procesa određivanja na bazi kontrole nivoa napona i injektirane snage.

## **2.7. Rekonfiguracija distributivne mreže za izbor optimalne lokacije i kapaciteta distribuiranih generatora**

Metoda rekonfiguracije radijalne distributivne mreže se ostvaruje uključivanjem i isključivanjem rastavljača u cilju smanjenja gubitaka aktivne snage i postizanja većeg nivoa simetričnosti opterećenja. Rekonfiguracija mreže u distributivnoj mreži sa DG ima pozitivan efekat na smanjenje gubitaka i poboljšanje profila napona. Algoritmi koji se primjenjuju za rekonfiguraciju mreže su: ACO, GA, konvencionalne metode *Honey Bee* optimizacionog algoritma i *DIgSILENT/Power factory* softver.

Problem rekonfiguracije distributivne mreže u normalnom radu biće razmatran kako bi se smanjili aktivni gubici i uravnotežilo opterećenje sistema. Koncept rekonfiguracije distributivne mreže u svrhu smanjenja gubitaka može se odmah prepoznati kao profitabilan i stoga je od interesa za distributere električne energije.

U radu [64] analiziran je problem rekonfiguracije (uključivanje/isključivanje prekidača) metodom GA sa distribuiranim generatorom u distributivnim mrežama. Glavni cilj rada je odabir optimalne lokacije fotonaponskog generatora u cilju smanjenja gubitaka snage i padova napona.

U sljedećem poglavlju opisani su gubici snage i mjere za njihovo smanjenje. Takođe, opisani i vrste gubitaka snage kao i padovi napona u distributivnim mrežama.

### **3. GUBICI SNAGA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA I MJERE ZA NJIHOVO SMANJENJE**

Gubici snaga postoje na svim nivoima EES-a: u proizvodnji, prenosu i distribuciji. Ipak, najizraženiji gubici snage su u distributivnim mrežama, zbog nižih napona, visokih vrijednosti struja i dominantno radijalnih konfiguracija ovih mreža. Idealno, gubici snage u EES-u trebaju biti od 3 do 6%. U razvijenim zemljama gubici ne prelaze 10%. Međutim, u zemljama u razvoju, procenat gubitaka aktivne snage iznosi oko 20%. Stoga je veliki interes umanjeње gubitaka kako bi pojavom tržišta električne energije i konkurencije cijena električne energije bila što povoljnija.

Gubici snage mogu se podijeliti u dvije kategorije – gubitke aktivne i gubitke reaktivne snage. Struja koja protiče kroz vod i otpornost voda uzrokuje gubitke aktivne snage i kada se govori o gubicima u elektroenergetskom sistemu, uglavnom se misli na gubitke aktivne snage. Međutim, gubitak reaktivne (jalove) snage nije manje važan, zato što reaktivne snage u sistemu održava nivo napona na sabirnicama na definisanom nivou [65].

Distributivni sistem je, sa aspekta potrošača, najvidljiviji dio elektroenergetskog sistema, koji zahtijeva permanentna ulaganja i poboljšanja. Oko 30-40% od ukupnih investicija u elektroenergetskom sektoru usmjereno je na distributivne sisteme. Ipak, mnoge distributivne mreže rade sa minimalnim sistemom kontrole, uglavnom sa ručnim upravljačkim kondenzatorima, prekidačima i regulatorima napona. Stanje se mijenja i postoji rastući trend u automatizaciji distributivnih sistema kako bi se poboljšala njihova pouzdanost, efikasnost i kvalitet usluge. Kako bi se moglo uticati na smanjenje gubitaka u distributivnim mrežama, potrebno je koristiti efektivne i efikasne računarske alate koji omogućuju kvantifikovanje gubitaka u svakom mrežnom elementu.

Proračuni, analize, procjene i mjere za smanjenje gubitaka snage predstavljaju značajni tehnički i ekonomski zadatak [8].

Uzimajući u obzir česte promjene tipologije terena i protoka snage u distributivnim mrežama, posebna pažnja posvećuje se metodama izračunavanja gubitaka snage koje ne zahtijevaju visoki stepen preciznosti mrežnih podataka i fluktuacije opterećenja.

### 3.1. Uzroci gubitaka u mrežama

Prema uzroku i mjestu nastanka, gubitke u elektroenergetskim mrežama možemo klasifikovati u tri grupe:

- termogeni gubici;
- gubici magnetiziranja i
- gubici zbog nesavršenosti izolacije provodnika pod naponom – tzv. gubici zbog odvodnosti.

#### 3.1.1. Termogeni gubici

Termogeni gubici su gubici zbog zagrijavanja provodnika uslijed proticanja struje. Udio termogenih gubitaka u ukupnim gubicima je najveći i direktno je proporcionalan proizvodu otpornosti provodnika ( $R$ ) i kvadratu struje ( $I$ ) koja protiče kroz provodnik.

$$\Delta P(t) = I^2(t) \cdot R \quad (3.1)$$

Termogeni gubici se mogu smanjiti:

1. povećanjem napona ( $U$ ), tj. smanjenjem struje za data prividna opterećenja:

$$I(t) = \frac{P(t)}{U(t) \cdot \cos\varphi(t)} \quad (3.2)$$

2. povećanjem faktora snage ( $\cos\varphi$ ), tj. redukovanjem nivoa reaktivne snage:

$$S(t) = \frac{P(t)}{\cos\varphi(t)} \quad (3.3)$$

3. smanjenjem električnog otpora ili povećanjem poprečnog presjeka provodnika ( $q$ ), provodnosti ( $k$ ), odnosno smanjenjem dužine voda ( $l$ ):

$$R = \frac{l}{k \cdot q} \quad (3.4)$$



### 3.1.2. Gubici zbog magnetizacije

Ova vrsta gubitaka nastaje zbog magnetiziranja okoline provodnika, a uslijed protoka struje kroz provodnik. Za razliku od termogenih gubitaka koji zavise od opterećenja voda, gubici zbog magnetizacije su praktično nezavisni od promjene opterećenja. Glavni uzročnik ovih gubitaka su energetske transformatori. Stoga ovu vrstu gubitaka možemo tretirati kao stalne gubitke, a njihov intenzitet zavisi od broja transformatora, njihove snage, ali i rada drugih uređaja, kao što su zaštitni releji i brojila, koji koriste energiju magnetiziranja. Stoga je za smanjenje ove vrste gubitaka bitno izbjegavanje nepotrebnih transformacija i optimalno opremanje mreže mjernim i zaštitnim uređajima.

### 3.1.3. Gubici zbog odvodnosti

Gubici zbog odvodnosti su gubici zbog nesavršenosti izolacije provodnika pod naponom. Gubici zbog odvodnosti predstavljaju najmanji dio u ukupnim gubicima snage u distributivnim mrežama. U iste spadaju gubici zbog korone, gubici u dielektricima i gubici kroz nesavršene izolacije. Ovi gubici su u većini praktičnih slučajeva zanemarljivi. Izuzetak čine veće srednjonaponske mreže izvedene kablovima sa PVC izolacijom.

Gubici uslijed odvodnosti u izolatorima zavise od stanja izolatora, tj. od oštećenja, prljavštine, a osim toga i od atmosferskih prilika. Prljavština povezana sa rosom i maglom znatno smanjuje izolacione sposobnosti na površini izolatora uslijed čega dolazi do prelaza struje od provodnika koji je pod naponom prema uzemljenim djelovima.

Gubitak snage uslijed odvodnosti se izračunava prema izrazu:

$$P_{odv}=3 \cdot U^2 \cdot \gamma_i \cdot n \quad [\text{kW/km}] \quad (3.5)$$

gdje su:

$U$  – fazni napon u [kV];

$\gamma_i=1/r_i$  – provodljivost (izračunava se iz izolacionog otpora izolatora  $r_i$ ) i

$n$  – broj izolatora po kilometru dužine voda za jednu fazu.

Kod vazdušnih 10 kV vodova gubici snage nezavisni o opterećenju nastaju uglavnom uslijed odvodnih struja na izolatorima. Ovi gubici nisu veliki, ali njihov značaj je naglašen isključivo zbog velike dužine vodova ove vrste.

### **3.2. Osnovne vrste gubitaka električne snage**

Prema načinu nastanka, gubitke snag možemo klasifikovati u dvije grupe:

- Komercijalni gubici (netehnički gubici) i
- Tehnički gubici.

#### **3.2.1. Komercijalni gubici**

Ovi gubici nastaju na osnovu razlike evidentiranih veličina nabavljene i predate snage u određenim vremenskim periodima, a javljaju se kao posljedica nesavršenosti organizacije eksploatacije sistema, nesavršenosti uređaja za registraciju protoka električne snage, te utrošene električne snage prilikom kvarova na postrojenjima. Ovi gubici imaju veoma varijabilne vrijednosti, tako da ih je gotovo nemoguće odrediti proračunom [66].

#### **3.2.2. Tehnički gubici**

Ovoj grupi pripadaju gubici koji su posljedica stavljanja postrojenja pod napon i proticanja struje kroz mrežu. Veličina ovih gubitaka zavisi od električnih karakteristika elemenata električne mreže i režima proticanja struje kroz sva postrojenja koja se nalaze između proizvođača i potrošača električne energije. Oni se u jednom EES ne mogu precizno odrediti, čak ni primjenom savremenih softvera, a zbog velikog broja elemenata u mreži i različitih intenziteta struja koje protiču kroz pomenute elemente.

Tehnički gubici sa stanovišta uzroka nastanka [66] mogu se podijeliti na:

- gubitke snage nezavisne od opterećenja (gubici praznog hoda) i
- gubitke snage zavisne od opterećenja (promjenljivi gubici).

### **3.3. Gubici snage nezavisni od opterećenja (gubici praznog hoda)**

Ovi gubici se pojavljuju u pojedinim elementima elektroenergetskih sistema ili uređaja bez obzira da li potrošači koriste električnu snagu ili ne. Ovi gubici, kako je naglašeno, predstavljaju gubitke praznog hoda mreže i one se u elementima mreže javljaju tokom cijelog vremenskog perioda u toku koga se ti elementi nalaze pod naponom.

U ovu vrstu gubitaka snage spadaju gubici praznog hoda kod transformatora snage, naponskih transformatora, dielektrički gubici u kablovima i kondenzatorima, zatim gubici korone i odvodnih struja u vazдушnim vodovima, gubici praznog hoda u naponskim namotajima brojila, releja, mjernih instrumenata itd.

Gubici praznog hoda pojavljaju se u sljedećim sklopovima i elementima mreže:

- transformatorima 35/10 kV i 10(20)/0.4 kV,
- vazдушnim vodovima 20 i 10 kV,
- kablovskim vodovima 20 i 10 kV,
- kondenzatorima,
- napojnim i strujnim transformatorima i
- mjernim uređajima (brojilima) električne energije.

### 3.3.1. Gubici praznog hoda u transformatorima

Gubici praznog hoda u transformatorima nastaju kao posljedica postojanja struje praznog hoda ( $I_0$ ). Pri praznom hodu transformator ne vrši koristan rad. Prema tome, snaga praznog hoda ( $P_0$ ) troši se samo na pokriće gubitaka praznog hoda. Praktično se ti gubici svode na gubitke u gvožđu ( $\Delta P_{Fe}$ ), jer su gubici u bakru primarnog namotaja mali (zbog male vrijednosti struje  $I_0$ ).

Tako imamo:

$$P_0 \approx \Delta P_{Fe} \quad (3.6)$$

Gubici u gvožđu transformatora sastoje se iz dva dijela. Prvi dio predstavlja gubitke histerezes, a drugi gubitke uslijed vrtoložnih struja [66].

Gubici histerezes se manifestuju zagrijavanjem transformatora i izračunavaju se prema empirijskom izrazu:

$$\Delta P_h = G_{Fe} \cdot k_h \left( \frac{f}{100} \right) B^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (3.7)$$

gdje su:

$\Delta P_h$  – histerezesni gubici u [kW];

$G_{Fe}$  – težina gvozdenog jezgra transformatora u [kg];

$f$  – frekvencija u [Hz];

$B$  – magnetna indukcija u  $[\text{Wb/m}^2]$  i

$k_h$  – histerezni gubici po jedinici težine  $[\text{W/kg}]$ .

Zbog naizmjeničnog magnetnog fluksa čija je frekvencija  $f$ , u gvožđu transformatora se javljaju vrtložne struje, koje takođe proizvode gubitke u gvožđu transformatora, a koji se zovu gubici zbog vrtložnih struja i izračunavaju po empirijskom izrazu:

$$\Delta P_v = G_{Fe} \cdot k_v \left( \frac{f}{100} \right)^2 \cdot B^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (3.8)$$

gdje je:

$k_v$  – fuko gubici po jedinici težine  $[\text{W/kg}]$ .

Ukupni gubici praznog hoda u gvožđu transformatora su:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v = G_{Fe} \left[ k_h \left( \frac{f}{100} \right)^2 + k_v \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (3.9)$$

Za frekvenciju  $f=50 [\text{Hz}]$  imamo:

$$\Delta P_{Fe} = G_{Fe} (0.5k_h + 0.25k_v) \cdot B^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (3.10)$$

ako je:

$$K_{Fe} = (0.5k_h + 0.25k_v) \quad (3.11)$$

gdje je:

$K_{Fe}$  – konstanta gubitka u  $[\text{W/kg}]$  koja za limove koji se danas upotrebljavaju u transformatorima iznosi od 0.7–1.3  $[\text{W/kg}]$ .

Konačan izraz za gubitke praznog hoda transformatora se može predstaviti sljedećom relacijom:

$$\Delta P_{Fe} = G_{Fe} \cdot K_{Fe} \cdot B^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (3.12)$$

Ukoliko ne raspolažemo sa katalogskim podacima za svaki transformator, gubitke praznog hoda je moguće izračunati i na drugi način. Naime, poznato je da gubici snage u gvožđu transformatora rastu približno linearno sa nominalnom snagom transformatora, ( $S_n$ ) pa se mogu izračunati kao:

$$\Delta P_{Fe} = P_{Fec} + P_{Fes} \cdot S_n \quad [\text{kW}] \quad (3.13)$$

gdje je:

$P_{Fec}$  – dio gubitaka nezavisan od snage transformatora, a

$P_{Fes}$  – dio gubitaka zavisao od snage transformatora.

### 3.3.2. Gubici praznog hoda u vazдушnim distributivnim vodovima

Gubici električne snage u vazдушnim vodovima nastaju stavljanjem voda pod napon i uglavnom su nezavisni od opterećenja (gubici praznog hoda), koje se prenosi vodom. Kažemo uglavnom, jer sa promjenom opterećenja dolazi do izvjesnih promjena napona na vodu, a ovi gubici su direktno zavisni od veličine napona.

Gubici praznog hoda na vodovima su kao što je već rečeno, gubici uslijed korone i gubici uslijed odvoda preko izolatorskih lanaca.

Korona je posljedica razlike u jačini električnog polja na spoljnoj površini provodnika i probojne čvrstoće okolnog vazduha. Najveće djelovanje korone na gubitke javlja se u slučaju loših vremenskih uslova (kiša, magla, itd).

Gubici snage uslijed korone po kilometru dužine voda izračunavaju se prema Maurovom izrazu [66]:

$$P=4.44 \cdot 10^{-4} \cdot k_r \cdot (k_r - k_d) \cdot f r^2 \left( \ln \frac{\sqrt{2} \cdot 10^3 \cdot k_r}{f r} - 1 \right) \quad [\text{kw/km}] \quad (3.14)$$

gdje je:

$k_r$  – jačina električnog polja po površini;

$$k_r = 104 \cdot 10^3 \frac{U \cdot C_p}{r} \quad [\text{kV/cm}] \quad (3.15)$$

gdje su:

$U$  – napon u [kV];

$k_d$  – probojna čvrstoća (jačina električnog polja kroz vazduh);

$f$  – frekvencija u [Hz];

$r$  – poluprečnik provodnika u [cm] i

$C_p$  – pogonski kapacitet u [F/km].

Tačan proračun gubitaka snage uslijed pojave korone nije moguće tačno izvesti zato što se pojedini parametri koji znatno utiču na rezultat, neprekidno mijenjaju, posebno probojna čvrstoća vazduha.

### 3.3.3. Gubici praznog hoda u kablovima

Gubici praznog hoda u kablovima predstavljaju dielektrične gubitke, koji nastaju iz razloga što izolacioni materijal upotrebljen kao dielektrik nije idealan izolator, što znači da posjeduje određenu provodnost, te struja ipak protiče kroz dielektrik. Ovo predstavlja dodatnu komponentu koja se u dielektriku pretvara u toplotu uzrokujući pri tom gubitke električne snage. Po pravilu su gubici u dielektriku mali, međutim oni rastu sa temperaturom zagrijavanjem dielektrika [66].

Kao što je poznato, kablovi pod naponom djeluju kao kondenzatori, tj. u njima se pojavljuje struja punjenja ( $I_C$ ):

$$I_C = U_f \cdot \omega \cdot C_p \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (3.16)$$

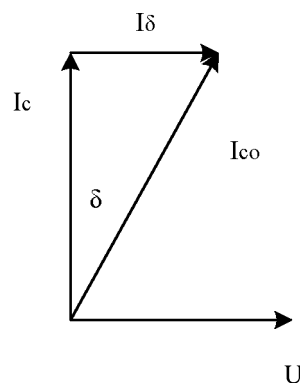
gdje su:

$U_f$  – fazni napon u [kV];

$\omega = 2\pi f$  – kružna frekvencija u [Hz] i

$C_p$  – pogonski kapacitet u [F/km].

Struja punjenja prednjači naponu za  $90^\circ$ , ali samo u idealnim kondenzatorima. U stvarnim kondenzatorima, kao što su kablovi, pojavljuje se aktivna komponenta struje ( $I_\delta$ ), pa je vektorski oblik ukupne struje dat na Slici 3.1.



Slika 3.1 Vektorski prikaz ukupne struje u kablovima

Zbog struje punjenja ( $I_C$ ) u kablu se javlja reaktivna snaga ( $Q_C$ ):

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C \cdot 10^{-3} \quad [\text{kVAr}] \quad (3.17)$$

dok je struja ( $I_\delta$ ) posljedica pojave dielektričnih gubitaka ( $P_\delta$ ):

$$P_{\delta} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\delta} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (3.18)$$

Kako je:

$$I_{\delta} = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{A}] \quad (3.19)$$

dobija se:

$$P_{\delta} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_c \cdot 10^{-3} \cdot \operatorname{tg} \delta = Q_c \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{kW}] \quad (3.20)$$

gdje je:

$\operatorname{tg} \delta$  – koeficijent dielektričnih gubitaka i različit je za razne vrste kablova.

Ukupni gubici ove vrste u kablovskoj mreži nekog područja mogu se izračunati bez većih poteškoća, ako se poznaju karakteristike ovih vodova (presjeci, dužine i vrste izolacije).

### **3.3.4. Gubici praznog hoda u kondenzatorima**

Izračunavanje ovih gubitaka vrši se na istim principima kao i kod kablova. Može se uzeti da vrijednost faktora gubitaka u visokonaponskim kondenzatorima iznosi od 0.004 do 0.006, što znači da je gubitak snage po [kVAr] od 4 do 6 [W].

### **3.3.5. Gubici praznog hoda u naponskim i strujnim transformatorima**

Ovi gubici su istog karaktera kao gubici u praznom hodu kod transformatora snage, tj. to su gubici u magnetnom kolu uslijed pojave histereze i vrtložnih struja. Gubici se razlikuju po tome da li je transformator jednopolno ili dvopolno izolovan.

U svakom slučaju, gubici snage u naponskim transformatorima nisu veliki, skoro snage jedne sijalice (prosječni iznosi 55 W po fazi).

### **3.3.6. Gubici praznog hoda u brojilima električne energije**

Kod brojila, gubici električne snage nezavisni od operećenja predstavljaju vlastitu potrošnju u naponskom namotaju. Ovi gubici su visoki, za monofazna brojila iznose od 0,5 do 0,8 W po brojilu, dok za trofazne brojila iznose oko 2 W po brojilu.

### 3.4. Gubici snage zavisni od opterećenja (promenljivi gubici)

Promjenljivi gubici se javljaju u pojedinim elementima elektroenergetskih postrojenja ili uređaja isključivo u direktnoj zavisnosti o potražnji za snagom od strane potrošača. Gubici zavisni od opterećenja nastaju u trenutku kada potrošači potražuju snagu, neovisno da li su postrojenja i uređaji bili pre toga već pod naponom. Njihov intenzitet nije vremenski konstantan, već se mijenja sa kvadratom traženog opterećenja u amperima.

Gubici snage se prema mjestu nastanka se mogu pojaviti kao:

- gubici u transformatorima snage zavisni od opterećenja;
- gubici snage u vodovima zavisni od opterećenja i
- ostali gubici zavisni od opterećenja.

#### 3.4.1. Gubici snage u transformatorima zavisni od opterećenja

Gubici snage u transformatorima čine najveći dio gubitaka snage u distributivnim mrežama. Ovi gubici su gubici u namotajima transformatora ili, kako se još često zovu, gubici u bakru ( $\Delta P_{Cu}$ ). Nominalna vrijednost gubitaka u bakru (vrijednost pri nominalnom opterećenju transformatora ( $\Delta P_{Cun}$ )) daju proizvođači u katalogima. Gubici snage u bakru izračunavaju se na osnovu izraza:

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cun} \cdot \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 \quad (3.21)$$

gdje su:

$S_n$  – nominalna prividna snaga u [kVA] i

$S$  – snaga opterećenja transformatora [kVA].

Pri analizi gubitaka snage, naročito je važno da se vrijednost gubitaka ustanovi pri vršnom opterećenju transformatora ( $\Delta P_{Cuv}$ ):

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cun} \cdot \left( \frac{S_g}{S_n} \right)^2 \quad (3.22)$$

gdje je:

$S_g$  – vršna opterećenja transformatora u [kVA],

odnosno gubici pri vršnom opterećenju sistema ( $\Delta P_{Cuv}$ ) imaju vrijednost:



$$\Delta P_{Cuv_s} = \Delta P_{Cun} \cdot f^2 \cdot \left(\frac{S_g}{S_n}\right)^2 \quad (3.23)$$

gdje je:

$f$  – faktor istovremenosti maksimalnog opterećenja transformatora sa maksimumom sistema ( $f \leq 1$ ).

Ukupni gubici snage u  $n$  transformatora sistema pri vršnom opterećenju sistema ( $P_{Cuv}$ ) biće:

$$P_{Cuv} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{Cuni} \cdot f_i^2 \cdot \left(\frac{S_g}{S_n}\right)^2 \quad (3.24)$$

### 3.4.2. Gubici snage u vodovima zavisni od opterećenja

S obzirom na to da se mjerenjem daleko lakše može odrediti pad napona nego gubitak snage, zanimljivo je, posebno za proračun gubitaka u niskonaponskim mrežama, ustanoviti uzajamne odnose između relativnih pada napona ( $\Delta U\%$ ) i relativnih gubitaka snage ( $\Delta P\%$ ).

Gubici snage u vodu, zavisni od opterećenja, dati su sljedećim opštim izrazom:

$$\Delta P = k \cdot R \cdot I^2 \quad (3.25)$$

odnosno:

$$\Delta P = k \cdot \frac{l}{\gamma} \cdot \frac{P^2}{3U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (3.26)$$

gdje su:

$k$  – konstanta koja zavisi od raspodele struje opterećenja duž voda (kreće se u granicama od 1 do 3);

$R$  – aktivna otpornost voda po fazi u  $[\Omega]$ ;

$I$  – struja koja teče datim vodom u  $[A]$ ;

$\gamma$  – specifična provodnost materijala provodnika u  $[S/mm^2]$ ;

$l$  – dužina voda u  $[km]$ ;

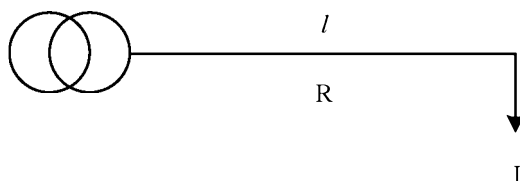
$P$  – aktivna snaga na početku ili kraju voda  $[kW]$ ;

$U$  – napon na početku ili kraju voda  $[kV]$  i

$\cos \varphi$  – faktor snage na početku ili kraju voda.

Radi određivanja konstante  $k$  i odnosa između relativnih padova napona i gubitaka snage, razmotriće se dva granična slučaja, tj. slučaj kada je opterećenje skoncentrisano na kraju voda ili u nekoliko tačaka na vodu i slučaj kada je opterećenje ravnomjerno raspoređeno duž voda. U oba slučaja izračunavanja se uzima u obzir samo aktivna otpornost voda i faktor snage približno jednak jedinici.

Na Slici 3.2 je prikazan vod sa opterećenjem skoncentrisanim na kraju.



Slika 3.2 Vod sa opterećenjem koncentrisanim na kraju voda

U ovom najjednostavnijem slučaju relativni pad napona je:

$$\Delta u\% = \frac{R \cdot \sqrt{3} \cdot I}{U} \cdot 100 \quad (3.27)$$

gdje su:

$I$  - struja opterećenja u [A] i

$U$  - nominalni napon u [V].

Relativni gubici snage su:

$$\Delta P\% = \frac{3 \cdot R \cdot I^2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I}{U} \cdot 100 \quad (3.28)$$

odakle slijedi:

$$\Delta P\% = \Delta u\% \quad (3.29)$$

Za slučaj voda sa  $n$  potrošača povezanih duž voda (Slika 3.3) gubici snage će biti:

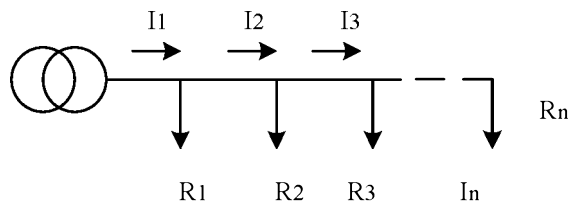
$$\Delta P = 3 \cdot r \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot l_i \quad (3.30)$$

gdje su:

$r$  – podužna otpornost po fazi voda [ $\Omega$ / km];

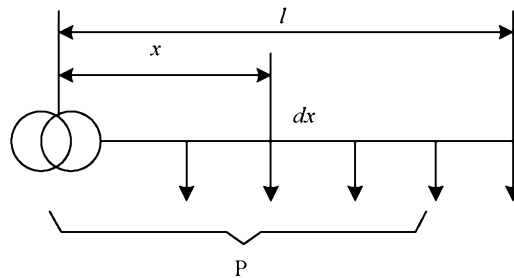
$l_i$  – dužina  $i$ -tog dijela [km] i

$I_i = \sum_{k=1}^n I_k$  – struja koja prolazi kroz  $i$ -ti dio voda.



Slika 3.3 Potrošači raspoređeni duž voda

Slučaj ravnomjerno raspoređenog opterećenja duž voda je prikazan na Slici 3.4.



Slika 3.4 Ravnomjerno raspoređeno opterećenje duž voda

Ako sa (i) označimo veličinu struje koja se odnosi na jedinicu dužine provodnika, onda su padovi napona uzrokovani opterećenjem provodnih sekcija ( $dx$ ) na rastojanju ( $x$ ) od izvora napajanja dati izrazom:

$$d(\Delta U) = \frac{\sqrt{3} \cdot (I dx) \cdot x}{\gamma \cdot S} \quad (3.31)$$

Padovi napona ( $\Delta u$ ) na vodu dužine ( $l$ ) su:

$$\Delta u = \frac{\sqrt{3} \cdot I}{\gamma \cdot S} \int_0^l x dx = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot l^2}{\gamma \cdot 2 \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot (I \cdot l)}{2} \cdot \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot R}{2} \quad (3.32)$$

gdje su:

$\gamma$  – specifična provodnost materijala provodnika u [ $S/mm^2$ ] i

$S$  – površina provodnika [ $mm^2$ ]

$$\Delta u \% = \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I}{2 \cdot U} \cdot 100 \quad (3.33)$$

Na taj način su padovi napona u razmatranom slučaju ravnomjerne raspodjele opterećenja duž voda dva puta manji nego u slučaju koncentrisanog opterećenja na kraju voda.

Gubici snage za ovaj slučaj su:

$$d(\Delta P) = 3[(l-x)I]^2 \frac{dx}{\gamma \cdot S} = 3\left(\frac{I}{l}\right)^2 (l-x)^2 \frac{dx}{\gamma \cdot S} \quad (3.34)$$

$$\Delta P = 3 \frac{I^2}{l^2 \cdot \gamma \cdot S} \left[ l \int_0^l dx - 2l \int_0^l x dx + \int_0^l x^2 dx \right] = \frac{I^2 \cdot l}{\gamma \cdot S} \quad (3.35)$$

$$\Delta P = R \cdot I^2 \quad (3.36)$$

$$\Delta P\% = \frac{I^2 \cdot R}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100 = \frac{I \cdot R}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot 100 \quad (3.37)$$

odnosno konstanta k je k=1.

Prema tome, pri ravnomjernoj raspodjeli opterećenja duž voda, gubici snage su tri puta manji nego kada je to opterećenje skoncentrisano na kraj voda.

U slučaju kada je faktor snage  $k \neq 1$ , imamo:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I \cdot \cos \varphi}{U} \cdot 100 \quad (3.38)$$

$$\Delta P\% = \frac{3 \cdot I^2 \cdot R}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I}{U \cdot \cos \varphi} \cdot 100 \quad (3.39)$$

Prema tome, u ovom slučaju je:

$$\Delta P\% = \frac{\Delta U\%}{\cos^2 \varphi} \quad (3.40)$$

Svaki drugi slučaj raspodjela opterećenja duž voda napajenog sa jedne strane može se izvesti kao kombinacija gore navedenih slučajeva. Ako je vod napajan sa oba kraja, onda se u cilju izračunavanja gubitaka snage može odrediti razdjelna tačka, te onda takav vod tretirati kao dvije jednostrano napajane dionice.

### 3.4.3. Ostali gubici zavisni od opterećenja

Pored pomenutih gubitaka u vodovima i transformatorima snage javljaju se još gubici u mjernim uređajima i instrumentima i mjernim transformatorima zavisnih od

opterećenja. Iznalaženje ovih gubitaka snage bilo bi veoma komplikovano i teško da bi se mogli dobiti bar približno tačni rezultati.

### **3.5. Metode izračunavanja gubitaka snage u elektroenergetskim mrežama**

Kako su veličine gubitaka različite po raznim djelovima mreže, naponskim nivoima i elementima mreže to se tek razdvajanjem gubitaka po naponskim nivoima, elementima mreže i pojedinim regionima mogu se ustanoviti kritična mjesta pojavljivanja gubitaka, a analizom odrediti uzroke nastajanja i predvidjeti mjere za njihovo smanjenje.

Da bi se moglo sprovesti ovakvo razdvajanje gubitaka, potrebno je izvršiti određena mjerenja kako bi se utvrdili tokovi snaga u posmatranoj mreži, što znači da je potrebno, pored postojećih mjernih uređaja, postaviti mjerne uređaje na mjestima prelaska između različitih naponskih nivoa i različitih elemenata u mreži. Koristeći podatke dobijene mjerenjem u raznim tačkama razmatrane mreže i poznate relacije za izračunavanje gubitaka u raznim elementima mreže, moguće je na osnovu računsko-mjernih metoda izračunati gubitke po djelovima mreže.

Mjerenje veličina potrebnih za proračun utoliko je lakše implementirati što je naponski nivo viši, jer se ima manji broj vodova i trafostanica, a time i manji broj mjernih mjesta. Uz to kod viših naponskih nivoa (35 kV i više), opterećenje je obično skoncentrisano na kraju voda, za razliku od mreža niskog napona gdje se duž jednog voda ima više potrošača čije se maksimalna opterećenja ne pojavljuju istovremeno. Mjereći potrebne veličine relativno lako i dosta tačno se mogu izračunati gubici snage kod viših naponskih nivoa, dok je u mreži niskog napona i samo mjerenje dosta otežano, a računski postupak zbog toga nedovoljno tačan.

Postoje četiri osnovne grupe metoda za izračunavanje gubitaka snage u elektroenergetskim sistemima, i to:

- metode maksimalnih opterećenja i empirijske zavisnosti vremena trajanja gubitaka;
- metode srednjih strujnih opterećenja;
- metode srednje kvadratnih opterećenja; i
- metode koje koriste teoriju vjerovatnoće i matematičku statistiku.

### **3.6. Mjere za smanjenje gubitaka**

Mjere za smanjenje nivoa gubitaka u distributivnim mrežama mogu se svrstati u dvije grupe:

- prva grupa – mjere za smanjenje gubitaka koje zahtijevaju posebne investicije i
- druga grupa – mjere za smanjenje gubitaka koje ne zahtijevaju investicije.

#### **3.6.1. Mjere za smanjenje gubitaka koje zahtijevaju posebne investicije**

Prvu grupu korektivnih mjera čine one mjere koje zahtijevaju određene zahvate u mreži u cilju njenog poboljšanja i vezane su za određena investiciona ulaganja, dok se u drugu grupu mogu svrstati one mjere koje ne zahtijevaju nikakva investiciona ulaganja i efekti smanjenja gubitaka se postižu odgovarajućim izmjenama u načinu eksploatacije mreže [66].

Stoga, prvoj grupi (mjere sa potrebnim investicionim ulaganjima) možemo pridružiti:

- povećanje poprečnog presjeka provodnika njegovom zamjenom;
- uvođenje novih trafostanica u mrežu;
- kompenzaciju reaktivne snage;
- prelaz na viši naponski nivo;
- zamjenu stare opreme novom, sa manjim gubicima u eksploataciji;
- povećanje broja izvoda iz trafostanica u cilju rasterećenja preopterećenih vodova
- implementaciju distribuirane proizvodnje i kondenzatora.

#### **A) Povećanje poprečnog presjeka provodnika**

Gubici električne snage su obrnuto proporcionalni poprečnom presjeku provodnika, zbog čega se povećanje presjeka provodnika može smatrati jednom od najefikasnijih mjera za smanjenje gubitaka. Pored smanjenja gubitaka, povećanjem presjeka provodnika smanjuju se i padovi napona na određenom vodu, dok se povećava njegova propusna snaga.

## **B) Uvođenje novih trafostanica u mrežu**

Uvođenjem novih trafostanica u distributivnoj mreži smanjuje se prenosna snaga, s obzirom na to da dolazi do preraspodjele potrošača među pojedinim trafostanicama. Ovo normalno dovodi i do smanjenja gubitka snage u dijelu mreže u kome je instalirana trafostanica.

## **C) Kompenzacija reaktivne snage**

Ovo je jedna od mjera koja daje mnogobrojne, značajne tehničke i ekonomske efekte. Zbog toga se investicije uložene u implementacije ove mjere vrlo brzo vraćaju i mnogostruko kasnije isplate. Kompenzacijom reaktivne snage, odnosno njenom proizvodnjom kod potrošača, smanjuje se reaktivna snaga prenošena vodovima, a takođe i struja u istim. S obzirom na to da je gubitak snage direktno proporcionalan kvadratu struje, smanjenjem struje smanjuju se i gubici snage.

Gubitak snage prije kompenzacije je:

$$\Delta P = k \cdot R \cdot I^2 \quad (3.41)$$

Kompenzacijom reaktivne snage, odnosno generisanjem dijela reaktivne struje iz kompenzatora ( $I_c$ ), smanjuje se reaktivna struja koja se prenosi vodom sa ( $I_q$ ) na ( $I_q'$ ), odnosno prividna struja sa ( $I$ ) na ( $I'$ ), tako da su gubici snage nakon kompenzacije:

$$\Delta P' = k \cdot R \cdot I'^2 \quad (3.42)$$

gdje su:

$k$  – konstanta koja zavisi od raspodele struje opterećenja duž voda i

$R$  – aktivna otpornost voda po fazi u [ $\Omega$ ].

Izjednačavanjem vrijednosti za aktivnu komponentu struje, koja je prije i nakon kompenzacije ostala nepromijenjena, može se dobiti odnos gubitaka snage prije i nakon kompenzacije

$$I' \cos \varphi' = I \cos \varphi \quad (3.43)$$

gdje je:

$$I' = I \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} \quad (3.44)$$

U pogledu gubitaka, nakon kompenzacije imamo:

$$\Delta P' = k \cdot R \cdot I^2 \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi'} \quad (3.45)$$

Na kraju, vidimo da je odnos gubitaka prije i nakon kompenzacije obrnuto proporcionalan kvadratima faktora snage koji važe do i nakon kompenzacije.

$$\Delta P' = \Delta P \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi'} \quad (3.46)$$

#### **D) Prelaz na viši naponski nivo**

Gubici snage ( $\Delta P_1$  i  $\Delta P_2$ ) su obratno proporcionalni kvadratima nominalnih napona ( $U_{n1}$  i  $U_{n2}$ ) mreže, tj.

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{U_{n2}^2}{U_{n1}^2} \quad (3.47)$$

To znači da se uvođenjem duplo većeg napona gubici snage u mreži smanjuju četiri puta.

#### **E) Zamjena stare opreme novom, sa manjim gubicima u eksploataciji**

Nove tehnologije omogućavaju smanjenje gubitaka u određenim djelovima mreže ugradnjom nove opreme sa smanjenim gubicima. Tako proizvodnjom transformatora sa hladno valjanim limovima smanjuju se gubici u gvožđu transformatora za više od dva puta, u odnosu na one koji su imali transformatori sa vruće valjanim limovima.

Takođe, nova tehnologija omogućava proizvodnju kablova sa vrlo niskim faktorima dielektričnih gubitaka ( $\tan \delta = 0.0003$ ) za kabal sa izolacijom od umreženog polietilena za  $f=50$  Hz i  $20^\circ\text{C}$  u odnosu na onaj koji su ranije imali kablovi od PVC mase ( $\tan \delta = 0.06-0.11$ ).

#### **F) Povećanje broja izvodova iz trafostanica u cilju rasterećenja preopterećenih vodova**

U mreži nisu rijetki slučajevi korištenja vodova koji često bivaju preopterećeni, što pored drugih nedostataka, vezanih za preopterećenje, ima za posljedicu i povećane gubitke snage. Naime, radom jednog voda sa maksimalnom dozvoljenom strujom



opterećenja nastaju i maksimalno mogući gubici snage, s obzirom na zavisnost gubitaka od struje.

Jedan od načina rasterećenja tih vodova je i povlačenje novih vodova iz trafostanica i preraspodjela potrošača između preopterećenih i novih vodova. Ovo rasterećenje vodova ima za posljedicu padove napona ( $\Delta u$ ) i smanjenje gubitaka snage ( $\Delta P_V$ ) i to proporcionalno smanjenju kvadrata struje.

$$\Delta u = \frac{RP + QX}{U^2} \cdot 100 \quad (3.48)$$

$$\Delta P_V = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \quad (3.49)$$

gdje su:

P – aktivna snaga voda [W],

Q – reaktivna snaga voda [W],

R – aktivna otpornost u [ $\Omega$ ] i

X – induktivna reaktansa u [ $\Omega$ ].

### 3.6.2. Mjere za smanjenje gubitaka koje ne zahtijevaju investicije

U drugu grupu ovih mjera spadaju:

- poboljšanje naponskih prilika (uslova);
- kontrola dijagrama opterećenja i što ravnomjernije korišćenje elektroenergetskih kapaciteta;
- simetriranje opterećenja uzimajući u obzir raspored opterećenja među pojedinim fazama;
- iznalaženje optimalnih snaga transformatora, kao i najboljih lokacija trafostanica;
- ravnomjernost pri raspodjeli opterećenja po pojedinim trafostanicama.

#### A) Poboljšanje naponskih prilika

Kao što je poznato, gubici snage u distributivnoj mreži su obrnuto proporcionalni kvadratu napona. Često se može naći transformator u pogonu sa naponom ispod nominalnog napona što rezultira pojavom stvaranja dodatnih gubitaka i smanjenjem prenosne snage mreže.

Gubici snage na vodu ( $\Delta P_v$ ) iznose:

$$\Delta P_v = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \quad (3.50)$$

povećanjem napona za ( $\alpha$ ) procenata, gubici snage su:

$$\Delta P'_v = \frac{P^2 + Q^2}{\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)^2 \cdot U^2} \cdot R \quad (3.51)$$

Apsolutni iznos smanjenja gubitaka je:

$$\Delta P_v - \Delta P'_v = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)^2}\right] \quad (3.52)$$

dok se relativni odnos može iskazati relacijom:

$$\frac{\Delta P_v - \Delta P'_v}{\Delta P_v} \cdot 100 = \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)^2}\right] \cdot 100 \quad (3.53)$$

## **B) Kontrola dijagrama opterećenja i što ravnomjernije korištenje elektroenergetskih kapaciteta**

Ova mjera ima za cilj smanjenje vršnih opterećenja, koja se javljaju u dijelu distributivne mreže i što veće “peglanje” dijagrama opterećenja. Posljedica takvih smanjenih vršnih opterećenja je znatno smanjenje gubitaka vršnih snaga (zbog smanjenja kvadrata vršne struje).

## **C) Simetriranje opterećenja**

U trofaznoj mreži, zbog neravnomjernog opterećenja određenih faznih provodnika, dolazi do povećanja gubitaka snage i to zbog gubitaka u nultom provodniku, kao i povećanja opterećenja u nekoj od faza u odnosu na opterećenje kod sasvim simetričnog opterećenja. Ovo je posebno uobičajan slučaj u niskonaponskoj mreži, gdje se ne vodi dovoljno računa o rasporedu potrošača po pojedinim fazama prilikom njihovog priključenja. Jasno je da u mreži moraju postojati male nesimetrije i da je nemoguće stvoriti mrežu u kojoj se neće javiti makar kratkotrajna nesimetrija opterećenja. Ipak, treba uraditi sve kako bi nivo simetrije bio što veći.

#### **D) Iznaženje optimalne snage transformatora i najboljih lokacija trafostanica**

U fazi projektovanja neke distributivne mreže treba sa dosta realnosti ulaziti u prognoze konzuma napajanog područja. Naime, nerealna prognoza budućih opterećenja dovodi do ugradnje trafostanica daleko veće snage od stvarno potrebne, što s obzirom na činjenicu da transformatori veće snage imaju i veće gubitke u gvožđu, izazivaju nepotrebne dodatne gubitke snage u distributivnoj mreži. Pored toga, pri projektovanju se mora voditi računa da se trafostanica nalazi što bliže centru potrošnje. Na taj način se smanjuju struja opterećenja i dužine pojedinih vodova, što doprinosi da gubici u mrežama sa trafostanicom u centru potrošnja budu manji i do četiri puta u odnosu na gubitke kada je trafostanica na granici potrošnje.

#### **E) Ravnomjernost pri raspodjeli opterećenja po pojedinim transfozanicama**

Promjenljivi gubici snage u transformatorima i opterećenje napajano iz trafostanice imaju sljedeći odnos:

$$\Delta P_x = \left( \frac{X}{100} \right)^2 \cdot \Delta P_{100} \quad (3.54)$$

gdje su:

$X$  – procenat opterećenosti transformatora, s obzirom na nominalnu snagu;

$\Delta P_{100}$  – gubitak snage pri nominalnom opterećenju transformatora [%] ili [kW] i

$\Delta P_x$  – gubitak snage pri opterećenju  $X$  % od nominalnog opterećenja [%] ili [kW].

Vodeći računa o ravnomjernosti u raspodjeli opterećenja među pojedinim transformatorima koji snabdijevaju električnom energijom određenu potrošnju, može se uticati na smanjenje gubitaka snage.

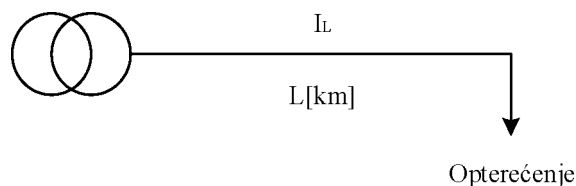
Sljedeće poglavlje analizira gubitke snage i padova napona u distributivnoj mreži u slučajevima prije i nakon priključenja distribuiranih generatora.

#### 4. ANALIZA GUBITKA SNAGE I PADOVA NAPONA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI PRIJE I NAKON PRIKLJUČENJA DISTRIBUIRANIH GENERATORA

U cilju definisanja relacije za proračun gubitaka snage prije i nakon priključenja distribuiranog izvora u distributivnu mrežu, analizirana je prosta radijalna mreža sa koncentrisanim opterećenjem na kraju voda. Ukupna dužina voda je  $L$  [km], a analizirani slučajevi su predstavljeni na Slikama 4.1 i 4.2.

##### 4.1. Analiza gubitka snage u vodovima distributivne mreže prije priključenja distribuiranog generatora

Slika 4.1 prikazuje prostu radijalnu konfiguraciju voda koja ne sadrži distribuirani generator.



Slika 4.1 Jednostavni radijalni distributivni vod prije priključenja distribuiranog generatora

Gubitak snage voda u distributivnim mrežama je proporcionalan proizvodu kvadrata trenutne jačine struje i otpornosti voda. Dakle, matematički model za izračunavanje gubitka snage u slučaju prije priključenja DG-a se može predstaviti relacijom:

$$P_{LossI} = 3 \cdot I_L^2 \cdot r \cdot L \quad (4.1)$$

gdje su:

$P_{LossI}$  – gubici u distributivnom vodu prije priključenja DG-a;

$r$  – linijski otpor voda u [ $\Omega$ /km];

$L$  – rastojanje između trafostanice i opterećenja u [km] i

$I_L$  – efektivna vrijednost struje voda u [A].

Prividna snaga voda je:

$$S_L = P_L + jQ_L \quad (4.2)$$

gdje su:

$P_L$  – aktivna snaga opterećenja u [kW] i

$Q_L$  – reaktivna snaga opterećenja [kVAr]

Stoga se struja voda može predstaviti relacijom:

$$I_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{3U_L} \quad (4.3)$$

gdje je:

$U_L$  – napon voda [kV].

Ako ( $I_L$ ) iz relacije (4.3) uvrstimo u relaciju (4.1), gubici za trofazni sistem prije priključenja DG mogu se izraziti kao:

$$P_{\text{Loss}} = \frac{r \cdot L (P_L^2 + Q_L^2)}{3U_L^2} \quad (4.4)$$

#### **4.2. Analiza gubitka snage u vodovima distributivne mreže nakon priključenja distribuiranog generatora**

Pretpostavimo da je distribuirani generator priključen na radijalnom vodu, na rastojanju  $G$  [km] od napojne trafostanice (Slika 4.2).

Prividna snaga koju daje DG može se predstaviti relacijom:

$$S_G = P_G + jQ_G \quad (4.5)$$

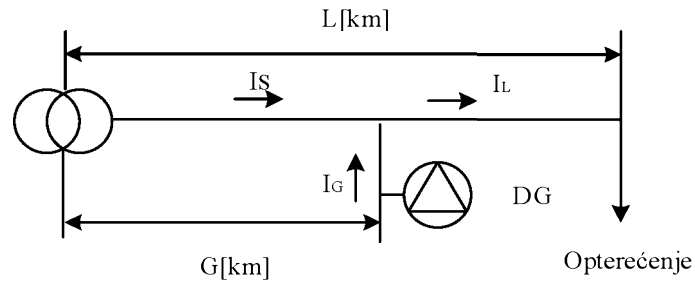
gdje su:

$P_G$  – aktivna snaga DG-a u [kW] i

$Q_G$  – reaktivna snaga DG-a u [kVAr].

Izlazna struja iz DG-a se izračunava korištenjem relacije:

$$I_G = \frac{(P_G - jQ_G)}{3U_L} \quad (4.6)$$



Slika 4.2 Jednostavni radijalni distributivni vod nakon priključenja distribuiranog generatora

Struja voda od napojne trafostanice do lokacije priključenja DG-a može se izraziti kao:

$$I_S = I_L - I_G \quad (4.7)$$

tako da je:

$$I_S = \frac{(P_L - P_G)}{3U_L} + j \frac{(Q_L - Q_G)}{3U_L} \quad (4.8)$$

Gubici aktivne snage voda od napojne trafostanice do lokacije priključenja DG-a mogu se izraziti kao:

$$P_{LSG} = \frac{r \cdot G [(P_L - P_G)^2 + (Q_L - Q_G)^2]}{3V_L^2} \quad (4.9)$$

$$P_{LSG} = \frac{r \cdot G (P_L^2 + Q_L^2 + P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G)}{3U_L^2} \quad (4.10)$$

gdje je:

$P_{LSG}$  – gubitak aktivne snage voda koji se javlja između trafostanice i DG-a u [W].

Gubici aktivne snage voda između lokacije priključenja DG-a i lokacije opterećenja (L-G) mogu se izraziti na sljedeći način:

$$P_{LGL} = \frac{r(L-G)(P_L^2 + Q_L^2)}{3U_L^2} \quad (4.11)$$

gdje je:

$P_{LGL}$  – gubitak aktivne snage voda koji se javlja između DG-a i lokacije opterećenja nakon priključenja DG-a u [W].

Kada se distribuirani generator priključi na distributivnu mrežu, gubici snaga voda mogu se izračunati kombinacijom gubitka snage voda između trafostanice i distribuiranih

generatora ( $P_{LSG}$  – jednačina 4.10) i gubitka snage voda između distribuiranih generatora i lokacije opterećenja ( $P_{LGL}$  – jednačina 4.11):

$$P_{LT} = \frac{rG(P_L^2 + Q_L^2 + P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G)}{3U_L^2} + \frac{r(L-G)(P_L^2 + Q_L^2)}{3U_L^2} \quad (4.12)$$

$$P_{LT} = \frac{rG(P_L^2 + Q_L^2 + P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G) - rG(P_L^2 + Q_L^2)}{3U_L^2} + \frac{rL(P_L^2 + Q_L^2)}{3U_L^2} \quad (4.13)$$

$$P_{LT} = \frac{rL[(P_L^2 + Q_L^2 + (P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G) \frac{G}{L})]}{3U_L^2} \quad (4.14)$$

gdje su:

$P_{LT}$  – ukupni gubici nakon uključivanja DG u [W];

$P_L$  – aktivna snaga opterećenja voda u [kW];

$P_G$  – aktivna snaga DG-a u [kW];

$Q_L$  – reaktivna snaga opterećenja u [kVar];

$U$  – napon opterećenja u [kV];

$r$  – linijski otpor voda u [ $\Omega$ /km];

$L$  – rastojanje između trafostanice i opterećenja u [km] i

$G$  – rastojanje između napojne trafostanice i DG-a u [km].

#### 4.3. Promjena gubitaka snage u distributivnoj mreži

Umanjenje gubitaka u bilo kojoj tački na vodu može se prikazati kao razlika između gubitaka snage voda prije i nakon priključenja DG-a.

Promjena gubitaka električne snage u vodu distributivne mreže  $\Delta P_{Loss}$  se može izračunati na bazi relacije:

$$\Delta P_{Loss} = P_{LSG} - P_{LT} = \frac{rG(P_G^2 + Q_G^2 - 2P_L P_G - 2Q_L Q_G)}{3U_L^2} \quad (4.15)$$

gdje je:

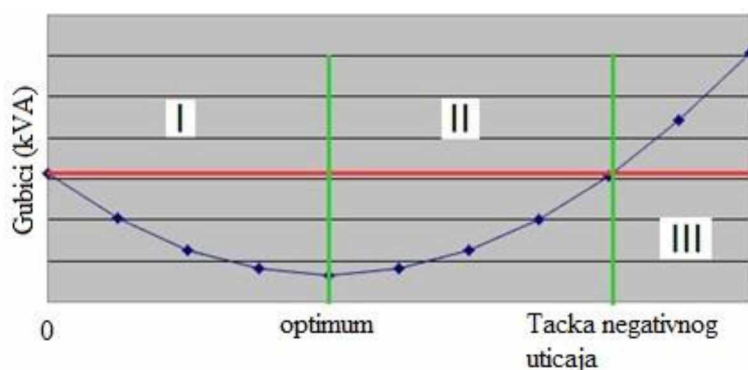
$\Delta P_{Loss}$  – promjena gubitaka aktivne snage voda.

Pozitivna vrijednost  $\Delta P_{Loss}$  znači da su ukupni gubici aktivne snage voda veći nakon uključivanja distribuiranog generatora. U suprotnom, priključenje distribuiranog generatora je pozitivno uticalo na umanjeње gubitaka snage voda [67].

Položaj i kapacitet priključenog distribuiranog generatora su veoma važni za pouzdanost sistema i smanjenje gubitaka. Kao dodatni uticajni faktor treba uzeti u razmatranje i ukupno opterećenje analiziranog voda. Generalno, veće opterećenje voda znači mogućnost priključenja distribuiranog generatora veće snage, bez opasnosti po povećanje gubitaka aktivne snage.

Takođe, gubici snage voda su manji ukoliko je distribuirani generator lociran bliže opterećenju, uz uslov dobre izbalansiranosti ukupnog opterećenja i kapaciteta razmatranog generatora. Slika 4.3 predstavlja grafičku sublimaciju prethodno navedenog. U slučaju da kapacitet dodanog DG-a prevazilazi vrijednost opterećenja voda, gubici rastu, jer je na raspolaganju veća količina snage od potreba konzuma.

Na Slici 4.3 crvena linija predstavlja gubitke na vodu koji postoje prije priključenja DG-a. Kriva označena plavom bojom podijeljena je u tri sekcije. Prva, u kojoj gubici voda opadaju sa porastom snage priključenog DG, pri čemu snaga DG-a niža od ukupnog opterećenja voda. U drugoj sekciji, snaga priključenog DG-a postaje veća od opterećenja voda, što rezultira porastom gubitaka, sve do tačke kada počinje treća sekcija i kada su gubici voda nakon priključenja DG-a, veći nego u slučaju koji je važio prije priključenja distribuiranog generatora.



Slika 4.3 Kriva gubitaka sa porastom snage priključenog distribuiranog generatora

U radu [35] efekat gubitaka snage voda prikazan je kada je višestruko distribuirana proizvodnja povezana s distributivnom mrežom. Kako bi se procijenio uticaj višestrukih DG-a na gubitke snage, upoređuju se gubici u slučaju bez priključenja DG-a i nakon toga. Rezultati pokazuju da kada je DG blizu trafostanice, gubici na električnoj mreži se smanjuju. Međutim, ako se kapacitet DG-a povećava, kao i udaljenost između DG-a i opterećenja, gubici u distributivnoj mreži postaju veći.



#### 4.4. Analiza padova napona u distributivnim mrežama

Kod radijalnih mrežnih konfiguracija, sa povećanjem udaljenosti od napojne tačke do tačke priključka potrošača rastu padovi napona.

Ono što se mora uzeti u obzir prilikom proračuna distributivnih mreža je odnos  $X/R$  jer kod distributivnih mreža ne možemo zanemariti aktivnu otpornost kao kod prenosnih mreža, pa se, s tim u vezi, distributivni vodovi modeluju impedansom  $Z = R + jX$ . Na vodu dolazi do pada napona zbog postojanja impedanse voda ( $Z$ ) i taj pad napona je moguće računati prema formuli:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = (R + jX)I \quad (4.16)$$

Pretpostavimo da je prividna snaga voda:

$$S_2 = P_2 + jQ_2 \quad (4.17)$$

struja voda se može izračunati na bazi relacije:

$$I = \frac{(P_2 - jQ_2)}{U_2} \quad (4.18)$$

tada je pad napona je moguće računati prema formuli:

$$\Delta U = (R + jX)I = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (4.19)$$

gdje su:

$\Delta U$  – pad napona na vodu;

$R + jX$  – impedansa voda;

$Q_2$  – reaktivna snaga u sabirnicama 2;

$P_2$  – aktivna snaga u sabirnicama 2;

$U_1, U_2$  – amplitude napona na sabirnicama 1 i 2 i

$I$  – efektivna vrijednost struje koja protiče kroz vod.

Zbog malih odnosa  $X/R$  u distributivnim mrežama i radijalnim strukturama ovih mreža, uticaj DG na napon distributivne mreže je značajan [68].

Sljedeće poglavlje opisuje nova rješenja za optimalnu lokaciju i kapacitet PV sistema, u cilju smanjenja gubitaka i padova napona u realnoj distributivnoj mreži.

## **5. IZBOR OPTIMALNE LOKACIJE I KAPACITETA FOTONAPONSKOG GENERATORA NA PRIMJERU REALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE**

Ovo poglavlje predstavlja centralno u doktorskoj disertaciji. Analizirana je realna srednjonaponska mreža u okviru elektroenergetskog sistema Kosova i korištenjem odabranog optimizacionog metoda (*Decision Tree*) sprovedena je dvostruka optimizaciona analiza koja se odnosi na:

1. definisanje optimalne lokacije PV generatora čiji je kapacitet poznat i
2. definisanje optimalnog kapaciteta PV generatora za poznatu lokaciju.

U oba slučaja optimizacija je sprovedena uz uvažavanje dva kriterijuma: minimalnih gubitaka snage i minimalnih padova napona u mreži.

U cilju provjere dobijenih rezultata primijenjena je dodatna optimizaciona tehnika (GAOT).

Prije korištenja samih optimizacionih metoda sprovedene su simulacije u *DIgSILENT/Power factory* softverskom paketu, koje imaju za cilj da pokažu kako se promjena kapaciteta priključenog PV generatora i promjena lokacije priključenja odražavaju na gubitke snage i padove napona.

### **5.1. Primjena *DIgSILENT/Power factory* softvera za analizu priključenja fotonaponskog generatora u realnoj distributivnoj mreži**

Za potrebe simulacija analiziran je realni 10 kV vod “Mučiverce“, na kojem je, a prema zahtjevu investitora kompanije *Green Solar Energy* trebalo priključiti PV generator snage  $S_n = 2 \times 1$  MVA. Imajući na umu da je dužina razmatranog voda  $L = 26.02$  km, njegovo maksimalno opterećenje  $P_{max} = 2.56$  MW i da se na vodu nalazi pet sabirnica (čvorova), bilo je potrebno odrediti optimalnu tačku priključka kako bi gubici snage i padovi napona bili minimalni.

Tabela 5.1 Tehničke karakteristike 10 kV voda "Mučiverce"

Karakteristike provodnika		Jedinica	Tip	Tip
			ACSR 50/8	ACSR 35/6
			<i>Aluminium Core</i>	<i>Aluminium Core</i>
Tip provodnika			<i>Steel Reinforced</i>	<i>Steel Reinforced</i>
1	Broj aluminijumskih provodnika		6	6
2	Prečnik aluminijumskih provodnika	Mm	3.2	2.7
3	Poprečni presjek aluminijumskog dijela	mm <sup>2</sup>	48.25	34.35
4	Broj slojeva aluminijumskog provodnika		1	1
5	Broj čeličnih žica		1	1
6	Prečnik čeličnih žica	Mm	3,2	2.7
7	Poprečni presjek čelika	mm <sup>2</sup>	8.04	5.73
8	Pocinkovana čelična žica		Yes	Yes
9	Prečnik provodnika	Mm	9.6	8.1
10	DC otpor provodnika na 20 °C [R]	Ω/km	0.5946	0.8353
11	Induktivna reaktansa [X]	Ω/km	0.409	0.421
12	Induktivnost [L]	H/km	0.00130	0.00134
13	Susceptansa [B]	μS/km	3.296476	3.193366
14	Kapacitet [C]	μF/km	0.0105	0.0102

Simulacije su sprovedene za dva slučaja: prije i nakon uključenja PV generatora. Raspored opterećenja po sabirnicama 10 kV voda "Mučiverce" dat je u Tabeli 5.2. Kako bi simulacijama bio uvažen uticaj promjene opterećenja voda na vrijednosti gubitaka snage i padova napona, vodu "Mučiverce" je "pridodato" i dodatno opterećenje (sabirnice broj 6 u Tabeli 5.2).

Tabela 5.2 Raspored opterećenja po sabirnicama 10 kV voda "Mučiverce"

Sabirnica	Rastojanje	Opterećenje
	[km]	[MW]
1	3.35	0.01
2	4.62	0.20
3	1.7	0.50
4	6.36	0.78
5	9.99	1.08
6	3.43	0.64

### 5.1.1. Gubici snage u slučaj prije priključenja fotonaponskog generatora

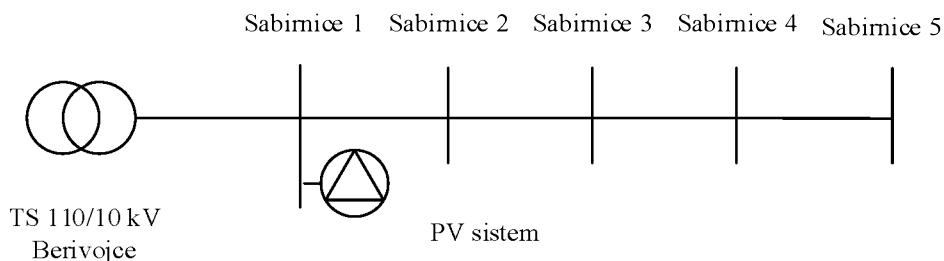
Na osnovu sprovedenih simulacija za vod “Mučiverce” pri punom opterećenju, registrovanom u septembru 2013. godine, dobijena je vrijednost ukupnih gubitaka snage u iznosu od 451.36 kW. Vrijednosti gubitaka snage po sabirnicama, kao i ukupni gubici predstavljeni su u Tabeli 5.3.

Tabela 5.3 Gubici snage na 10 kV vodu “Mučiverce” u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora.

Sabirnica	Gubici [kW]
1	0.00089
2	5.52
3	10.77
4	101
5	334.06
<b>Ukupni gubici voda</b>	<b>451.35</b>

### 5.1.2. Gubici snage voda nakon priključenja fotonaponskog generatora

Naredni korak u analizi predstavljao je priključenje PV generatora na sabirnice razmatranog 10 kV voda (Slika 5.1). Analizirane su promjene gubitaka snage za različite pozicije priključenja PV generatora i različite vrijednosti kapaciteta priključenog generatora. S tim u vezi, razmatrani su kapaciteti generatora vrijednosti: 0.4 MW, 1 MW, 2 MW i 4 MW. Dobijeni rezultati simulacija su prikazani u Tabeli 5.4. Za ovu analizu treba zanemariti podatke koje se odnose za sabirnice broj 6 (Tabela 5.2).



Slika 5.1 Jednopolna šema 10 kV voda “Mučiverce” sa priključenim fotonaponskim generatorom na sabirnicama 1

Tabela 5.4 Ukupni gubici snage na 10 kV vodu “Mučiverce” za različite vrijednosti kapaciteta priključenih fotonaponskih generatora

Ukupni gubici nage na vodu [kW]				
Sabirnica	Kapacitet PV sistema od 0.4 MW	Kapacitet PV sistema od 1 MW	Kapacitet PV sistema od 2 MW	Kapacitet PV sistema od 4 MW
1	443	433	425	440
2	431	409	390	426
3	427	400	377	413
4	413	366	329	401
5	396	313	253	370
6	655	362	156	445

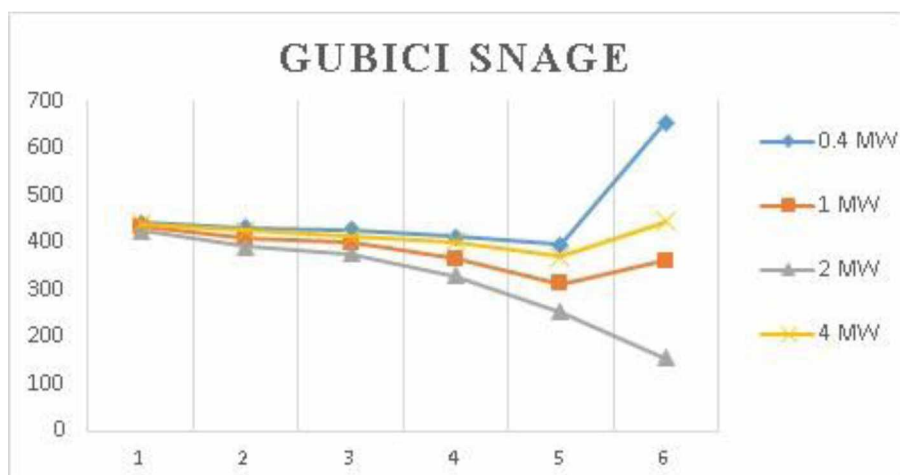
Poređenjem rezultata datih u Tabelama 5.3 i 5.4 nedvosmisleno se može zaključiti da vrijednosti gubitaka snage voda opadaju nakon priključenja PV generatora. Bilo koji priključeni kapacitet generatora, na bilo kojoj od 5 sabirnica voda, rezultiraće ukupnim gubicima snage koji su manji od vrijednosti date u Tabeli 5.3 (451.35 kW). Dakle, priključenje PV generatora ima pozitivan uticaj na redukciju gubitaka snage.

Poređenjem lokacija priključka PV generatora može se konstatovati da pri konstantnom kapacitetu PV generatora njegovo priključenje na prvoj polovini voda (sabirnice 1, 2 i 3) rezultira većim ukupnim gubicima snage nego u slučaju priključenja na drugom dijelu voda (sabirnice 4 i 5). Drugim riječima, što je priključeni generator bliže, potrošnji gubici snage su manji.

Daljom analizom podataka u Tabeli 5.4 može se zaključiti da različite vrijednosti priključenih kapaciteta PV generatora na istoj sabirnici rezultiraju različitim nivoom gubitaka snage. U konkretnom slučaju, kapacitet generatora od 2 MW će dati manje vrijednosti gubitaka snage u poređenju sa generatorima snage 0.4 MW ili 1 MW. Generalni zaključak bi bio da je optimalni kapacitet priključenog generatora treba da bude blizak ukupnom opterećenju voda. U konkretnom slučaju, za opterećenje voda od 2.56 MW, optimalan scenario, sa aspekta minimizacije gubitaka snage voda, bi bio priključenje PV generatora snage 2 MW na sabirnici 5. Gubici snage u tom slučaju iznose  $\Delta P=253$  kW.

Za kapacitet priključenog PV generatora koji je veći od ukupnog opterećenja voda, ukupni gubici snage imaju tendenciju rasta (generator proizvodi više energije nego što je potrebno napajanim potrošačima priključenim na vodu). Potvrda navedenog je ostvarena kroz dodato opterećenje voda Mučiverce od susjednog voda Koretin, ukupnog iznosa 0.63 MW (sabirnice broj 6 u Tabeli 5.4). Zaključuje se da u slučaju visokog kapaciteta priključenog PV generatora i malog opterećenja na sabirnicama, ukupni gubici snage voda imaju tendenciju rasta.

Konačno, a kao što i pokazuje Slika 5.2, gubici snage voda su minimalni u slučaju kada je kapacitet priključenog generatora blizak ukupnom opterećenju voda i kada je priključno mjesto što dalje od trafostanice (uz pretpostavku da je opterećenje priključeno u krajnjim sabirnicama voda).



Slika. 5.2 Grafički prikaz vrijednosti gubitaka snage za različite kapacitete priključenih fotonaponskih generatora i različita mjesta priključka duž voda

### 5.1.3. Analiza uticaja priključenja fotonaponskog generatora na padove napona u realnoj distributivnoj mreži

Osim analize gubitaka snaga, simulacije u *DIgSILENT/Power factory* softveru su sprovedene sa ciljem utvrđivanja uticaja priključenja PV generatora određenog kapaciteta na naponske prilike na sabirnicama razmatranog 10 kV voda. Prvo je konstatovano da se padovi napona u radijalnoj distributivnoj mreži bez prisustva PV generatora povećavaju sa povećanjem udaljenosti napajanog mjesta od trafostanice.

Tabela 5.5 Padovi napona u 10 kV vod “Mučiverce“ u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora

Sabirnica	Padovi napona
	$\Delta u\%$
1	3.73
2	14.68
3	20.57
4	27.99
5	<b>32.13</b>

Rezultati simulacija za slučaj priključenja PV generatora su dati u Tabeli 5.6.

Tabela 5.6 Vrijednosti padova napona za slučaj nakon priključenja fotonaponskog generatora različitog kapaciteta u 10 kV vod “Mučiverce”

Padovi napona u krajnjoj tački voda (%)				
Sabirnica	Kapacitet PV	Kapacitet PV	Kapacitet PV	Kapacitet PV
	sistema od	sistema od	sistema od	sistema od
	0.4 MW	1 MW	2 MW	4 MW
1	22.41	21.72	20.57	18.28
2	30.6	28.29	24.46	16.78
3	30.27	27.48	22.82	13.5
4	29.05	24.41	16.69	1.25
5	27.12	19.6	7.07	0.001

Može se zaključiti da povećanje snage priključenog distribuiranog generatora utiče na smanjenje padova napona. Takođe, pri konstantnom kapacitetu PV generatora, tačka njegovog priključka na vod utiče na naponske prilike i to na način da padovi napona opadaju sa priključenjem generatora u daljoj tački od početka voda.

Pad napona u krajnjoj tački razmatranog 10 KV voda (sabirnici broj 5) u slučaju prije priključenja PV generator iznosi  $\Delta u = 32.13\%$ . Nakon priključenja generator snage 0.4 MW na sabirnice broj 5, pad napona opada i njegova vrijednost iznosi  $\Delta u = 27.12\%$ . Sa povećanjem snage priključenog PV generatora (npr. 1 MW i 2MW) padovi napona su još manji i ispod su standardom IEC 61000 definisanih vrijednosti (Tabela 5.6).

## 5.2. Implementacija *Decision Tree* algoritma za utvrđivanje optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora

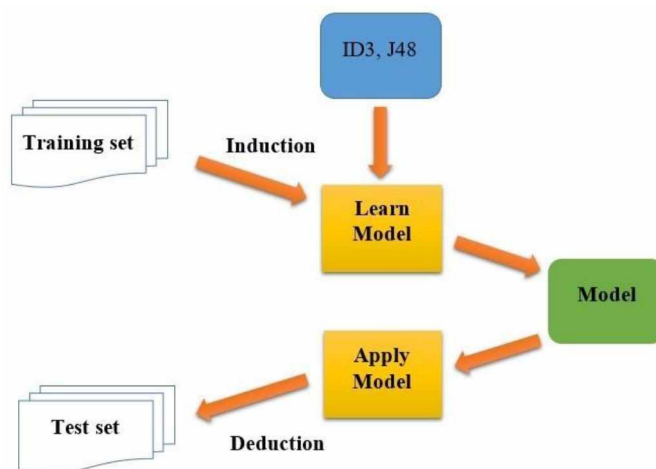
U okviru doktorske disertacije biće korišten *Decision Tree* algoritam u cilju definisanja optimalne lokacije i kapaciteta PV generatora, uz uslov postizanja minimalnih gubitaka snage i padova napona. Korištenje ovog algoritma je vrlo pogodno sa praktičnog aspekta, jer ne uključuje primjenu složenog matematičkog aparata.

*Decision Tree* metoda je veoma popularna i bazirana je na treningu (učenju) podataka. Naziv metode proizilazi iz tzv. strukture drveta po kojoj se gradi klasifikacioni ili regresioni model. Finalni rezultat je drvo sa tzv. *decision* čvorovima i *leaf* čvorovima. *Decision* čvor ima jednu ili više grana, a najbolje rješenje proisteklo primjeno metode se zove čvor korijena (*root node*). *Decision Tree* klasifikuje događaje na bazi serije pitanja o atributima događaja, a ti atributi mogu biti bilo koji tip varijable.

*Decision Tree* koristi tzv. *Top-down* pristup i uključuje grupisanje sličnih podataka (vrijenosti) u podgrupe. Algoritmi ID3 i J48 koriste entropiju za proračun homogenosti uzoraka. Ako su uzorci potpuno homogeni, vrijednost entropije iznosi nula. Proračun entropije se sprovodi na bazi relacije 5.1 [69]

$$H(x) = E_x[I(x)] = - \sum_{x \in X} p(x) \log p(x) \quad (5.1)$$

Blok dijagram primjene *Decision Tree* algoritma dat je na Slici 5.3.



Slika 5.3 Dijagram *Decision-Making* algoritma



### 5.2.1. Primjena *Decision Tree* Algoritma za optimizaciju u realnoj distributivnoj mreži

*Decision Tree* optimizacijska metoda će u konkretnom primjeru biti iskorištena za procjenu optimalne lokacije PV generatora poznate snage (kapaciteta), a uvažavajući težnju za smanjenjem gubitaka snage i padova napona. Osnovni algoritmi koji se koriste su ID3 – J48, koji konstruisanje *Decision Tree*-a baziraju na entropiji (*Entropy*) i dobijanju informacija (*Information Gain*).

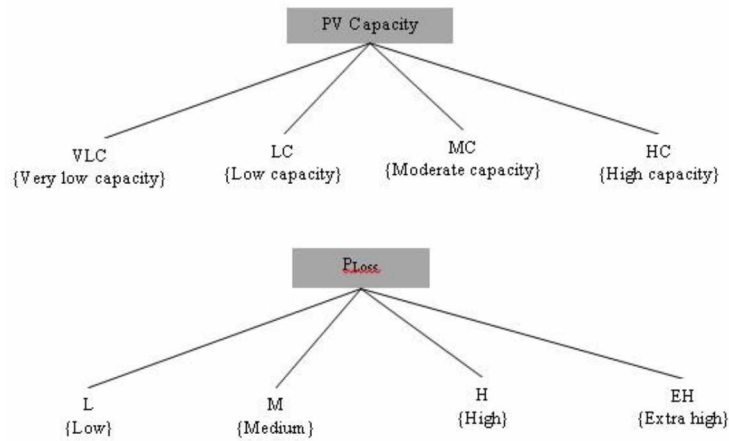
### 5.2.2. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za slučaj poznatog kapaciteta PV generatora

Rezultati simulacija u *DIGSILENT/Power factory* softveru poslužiće kao osnova, tj. trening podaci našeg *Decision Tree* algoritma. S tim u vezi, prvo definišemo trening podatke, u konkretnom slučaju to su kapacitet generatora (*PV Capacity*) i gubici snage ( $P_{LOSS}$ ), a potom definišemo attribute trening podataka.

Sabirnice se uzimaju kao klasa (*class*) odlučivanja u smislu najbolje lokacije za priključenje PV generatora, a koja će rezultirati minimalnim gubitkom snage.

Vizuelizacijom sprovedenom pomoću softvera *VEKA Toolbox* definišu se sljedeći atributi za trening podatke (dobijene *DIGSILENT/Power factory* softverom – Slika 5.4):

- za trening podatka PV kapacitet postoje sljedeći atributi: {*VLC* – *Very Low Capacity*, *LC* – *Low Capacity*, *MC* – *Moderate Capacity* i *HC* – *High Capacity*} i
- za trening podatka  $P_{LOSS}$  imamo sljedeće attribute: {*L* – *Low*, *M* – *Medium*, *H* – *High* i *EH* – *Extra high*}.



Slika 5.4 Atributi ID 3-J 48 algoritma

Budući da se bavimo stalnim treningom podataka, primjenjujemo proces globalne diskretizacije (kategorizacije) za PV kapaciteta kao što je prikazano u Tabeli 5.7.

Tabela 5.7 Globalna diskretizacija za date kapacitete PV generatora

Atributi	<i>PV System Capacity</i>	Domet
VLC	<i>Very Low Capacity</i>	$0 < PV \leq 0.4$
LC	<i>Low Capacity</i>	$0.4 < PV \leq 1$
MC	<i>Moderate Capacity</i>	$1 < PV \leq 2$
HC	<i>High Capacity</i>	$2 < PV \leq 4$

Trening podaci za proces globalne diskretizacije za gubitke snage ( $P_{Loss}$ ) su dati u Tabeli 5.8.

Tabela 5.8 Globalna diskretizacija za gubitke snage  $P_{Loss}$

Atributi	$P_{Loss}$	Domet
L	<i>Low</i>	$P_{Loss} \leq 0.25$
M	<i>Medium</i>	$0.25 < P_{Loss} \leq 0.39$
H	<i>High</i>	$0.39 < P_{Loss} \leq 0.41$
EH	<i>Extra high</i>	$P_{Loss} > 0.41$

Da bismo upoređivali podatke iz *DIgSILENT/Power factory* softvera i našeg *Decision Tree* algoritma, moramo konvertovati rezultate iz Tabele 5.4 u format *Decision Tree* podataka, kao što je prikazano u Tabeli 5.9.

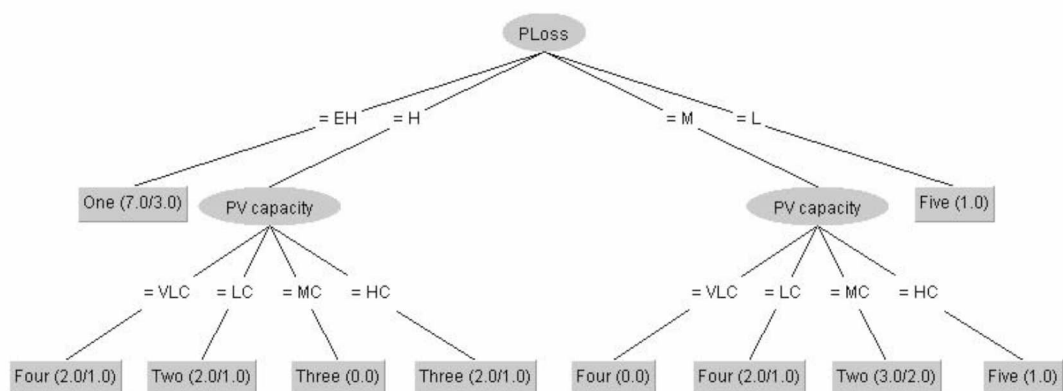
Tabela 5.9 Podaci *Decision Tree* algoritma konvertovani iz *DIGSILENT/Power factory* softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV kapacitete

<i>Power Losses</i> [MW]				
Terminal	0.4 MW	1 MW	2 MW	4 MW
1	0.44	0.43	0.42	0.44
2	0.43	0.41	0.39	0.42
3	0.42	0.40	0.37	0.41
4	0.41	0.36	0.33	0.40
5	0.40	0.31	0.25	0.37

↓

<i>Power Losses</i> [MW]				
Terminal	VLC	LC	MC	HC
<i>One</i>	EH	EH	EH	EH
<i>Two</i>	EH	H	M	EH
<i>Three</i>	EH	H	M	H
<i>Four</i>	H	M	M	H
<i>Five</i>	H	M	L	M

Na osnovu ovih trening podataka možemo dobiti vizuelizaciju *Decision Tree*-a, kao što je prikazano na Slici 5.5.



Slika 5.5 Vizualizovani *Decision Tree* algoritam za gubitke snage -  $P_{LOSS}$  i kapaciteta PV generatora

Tabela 5.10 Upoređivanje rezultata dobijenih primjenom *Decision Tree* algoritma sa simulacionim rezultatima dobijenih *DIGSILENT/Power factory* softverom

Upoređivanje <i>DIGSILENT/Power factory</i>			
<i>Decision Tree</i>			
$P_{Loss}$	<i>PV Capacity</i>	Terminali	Odgovor
EH	VLC	One	Correct
EH	LC	One	Correct
EH	MC	One	Correct
EH	HC	One	Correct
L	VLC	Five	Correct?
L	LC	Five	Correct?
L	MC	Five	Correct
L	HC	Five	Correct?
M	MC	Two	Correct
M	LC	Four	Correct
M	HC	Five	Correct
M	VLC	Four	Correct?
H	MC	Three	Correct?
H	LC	Two	Correct
H	HC	Three	Correct
H	VLC	Four	Correct

Rezultati sa <i>DIGSILENT/Power factory</i>		
$P_{Loss}$	<i>PV Capacity</i>	Terminali
EH	VLC	One
EH	VLC	Two
EH	VLC	Three
H	VLC	Four
H	VLC	Five
EH	LC	One
H	LC	Two
H	LC	Three
M	LC	Four
M	LC	Five
EH	MC	One
M	MC	Two
M	MC	Three
M	MC	Four
L	MC	Five
EH	HC	One
EH	HC	Two
H	HC	Three
H	HC	Four
M	HC	Five

Primjenom optimizacionog algoritma pokazano je da najveći gubici (EH) *Extra high category* –  $P_{Loss} > 0.414$ ) će biti u slučaju priključenja PV generatora na sabirnice 1 za sve date kapacitete generatora (VLC, LC, MC i HC). Rezultat se poklapa sa rezultatima simulacija u *DIGSILENT/Power factory* softveru.

Analizom rezultata datih u Tabeli 5.9 može se provjeriti ispravnost *Decision Tree* algoritma. Ako upoređujemo rezultate ovog algoritma sa rezultatima simulacija

dobijenih u *DIGSILENT/Power factory* u slučaju gubitka kategorije L (*low*), vidjećemo da imamo odgovor (*class*) *Correct* u sabirnici 5 samo jednom i to za kategoriju (MC) *Moderate capacity*.

U slučajevima kada upoređivanje rezultata daje odgovor *Correct*, to znači da je izlaz *Decision Tree*-a 100 % tačan. U slučajevima kada poređenje rezultata daje odgovor *Correct?*, to znači da su trening podaci na neki način “siromašni” i da treba prikupiti još podataka u cilju boljeg treninga. Nakon toga, za očekivati je da odgovor bude *Correct*.

### 5.2.3. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za datu lokaciju PV generatora

U ovom slučaju prvo definišemo trening podatke, a to su lokacija PV generatora (priključne sabirnice) i gubici snage ( $P_{LOSS}$ ), a potom definišemo attribute trening podataka. Vizuelizacijom sprovedenom pomoću softvera *VEKA Toolbox*, definišu se sljedeći atributi za trening podatke:

- za trening podatka PV terminal postoje sljedeći atributi: {1 – *One*, 2 – *Two*, 3 – *Three*, 4 – *Four* i 5 – *Five*} i
- za trening podatka  $P_{LOSS}$  imamo sljedeće attribute: {L – *Low*, M – *Medium*, H – *High* i EH – *Extra high*}.

Proces globalne diskretizacije (kategorizacije) za PV lokaciju je predstavljen u Tabeli 5.11, dok su trening podaci za proces globalne diskretizacije za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) dati u Tabeli 5. 8.

Tabela 5.11 Globalna diskretizacija za lokaciju fotonaponskog sistema

Atributi	PV terminali	Domet
1	<i>One</i>	0 - 1
2	<i>Two</i>	1 - 2
3	<i>Three</i>	2 - 3
4	<i>Four</i>	3 - 4
5	<i>Five</i>	4 - 5

Konvertovani podaci iz *DIGSILENT/Power factory* softvera i oblik pogodan za *Decision Tree* algoritma dati su u Tabeli 5.12.

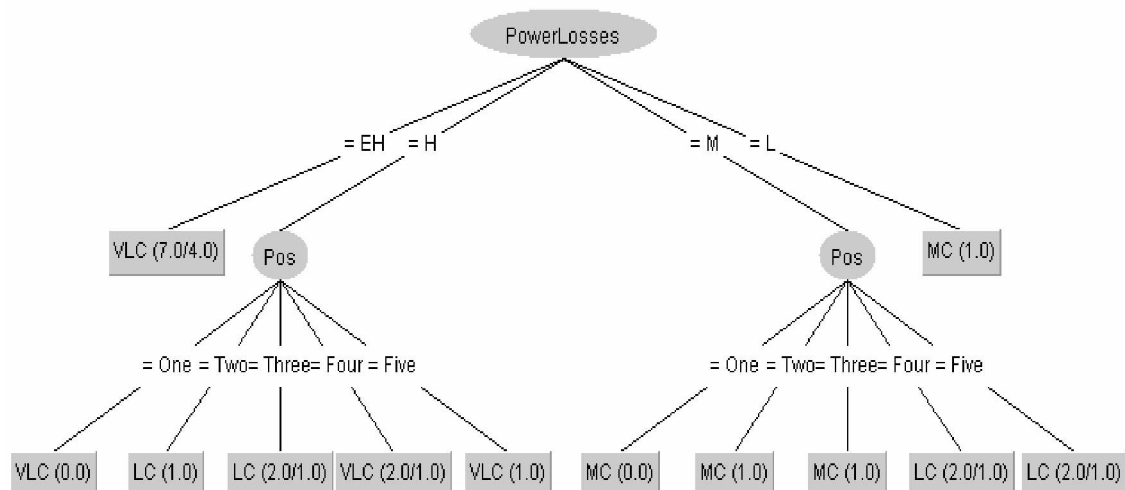
Tabela 5.12 Podaci *Decision Tree* algoritama konvertovani iz *DIGSILENT/Power factory* softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV lokacije

<i>Power Losses</i> [MW]					
<i>Capacity</i> [MW]	1	2	3	4	5
VLC	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40
LC	0.43	0.41	0.40	0.36	0.31
MC	0.42	0.39	0.37	0.33	0.25
HC	0.44	0.42	0.41	0.40	0.37

↓

<i>Power Losses</i> [MW]					
<i>Capacity</i> [MW]	One	Two	Three	Four	Five
VLC	EH	EH	EH	H	H
LC	EH	H	H	M	M
MC	EH	M	M	M	L
HC	EH	EH	H	H	M

Vizuelizacija *Decision Tree*-a za razmatrani slučaj je data na Slici 5.6.



Slika 5 6 Vizualizovani *Decision Tree* algoritam za gubitke snage -  $P_{LOSS}$  i priključne sabimice PV generatora

Tabela 5.13 Upoređivanje rezultata  $P_{Loss}$  za date PV lokacije dobijenih primjenom *Decision Tree* algoritma sa rezultatima dobijenih *DIGSILENT/Power factory* softverom

Upoređivanje <i>DIGSILENT/Power factory</i>			
<i>Decision Tree</i>			
$P_{Loss}$	Terminali	PV Capacity	Odgovor
EH	One	VLC	Correct
EH	Two	VLC	Correct
EH	Three	VLC	Correct
EH	Four	VLC	Correct?
EH	Five	VLC	Correct?
L	One	MC	Correct?
L	Two	MC	Correct?
L	Three	MC	Correct?
L	Four	MC	Correct?
L	Five	MC	Correct
M	One	MC	Correct?
M	Two	MC	Correct
M	Three	MC	Correct
M	Four	LC	Correct
M	Five	LC	Correct
H	One	VLC	Correct?
H	Two	LC	Correct
H	Three	LC	Correct
H	Four	VLC	Correct
H	Five	VLC	Correct

Rezultati sa <i>DIGSILENT/Power factory</i>		
$P_{Loss}$	Terminali	PV Capacity
EH	One	VLC
EH	One	LC
EH	One	MC
EH	One	HC
EH	Two	VLC
H	Two	LC
M	Two	MC
EH	Two	HC
EH	Three	VLC
H	Three	LC
M	Three	MC
H	Three	HC
H	Four	VLC
M	Four	LC
M	Four	MC
H	Four	HC
H	Five	VLC
M	Five	LC
L	Five	MC
M	Five	HC

Analizom rezultata datih u Tabeli 5.13 može se provjeriti ispravnost *Decision Tree* algoritma. Ako upoređujemo rezultate ovog algoritma sa rezultatima simulacija dobijenih u *DIGSILENT/Power factory* u slučaju gubitka kategorije (L) *Low*, vidjećemo da imamo odgovor (*class*) *Correct* za kapacitet kategorije MC za slučaj priključka generatora na sabirnicama 5. Rezultat se poklapa sa rezultatima simulacija u *DIGSILENT/Power factory* softveru.

I u slučaju priključenja PV generatora na sabirnice 1 za date kapacitete generatora VLC kategorije, pokazano je da su dobijaju gubici EH kategorije, što se u potpunosti podudara sa rezultatima simulacija u *DIgSILENT/Power factory* softveru.

#### 5.2.4. Procjena padova napona bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za dati kapacitet PV generatora

I u ovom slučaju prvo definišemo trening podatke. Konkretno, to su kapacitet generatora (*PV Capacity*) i padovi napona ( $\Delta u\%$ ), a potom definišemo attribute trening podataka. Sabirnice se uzimaju kao klasa (*class*) odlučivanja u smislu najboljeg PV kapaciteta, koja će rezultirati najmanjim padom napona u krajnjoj tački voda.

Vizuelizacijom sprovedenom pomoću softvera *VEKA Toolbox*, definišu se sljedeći atributi za trening podatke (dobijene *DIgSILENT/Power factory* softverom):

- za trening podatka (PV kapacitet) postoje sljedeći atributi: {*VLC – Very Low Capacity*, *LV – Low Capacity*, *MC – Moderate Capacity* i *HC – High Capacity*};
- za trening podatka ( $\Delta u\%$ ) imamo sljedeće attribute: {*L – Low*, *M – Medium* i *H – High*}.

Slično kao i u prethodno definisanom slučaju za gubitke snage, primjenjujemo proces globalne diskretizacije (kategorizacije) za PV kapaciteta kao što je prikazano u Tabeli 5.7.

Trening podaci za proces globalne diskretizacije za  $\Delta u\%$  su dati u Tabeli 5.14.

Tabela 5.14 Globalna diskretizacija za pad napona

Atributi	Voltage drops	Domet
H	High	$\Delta u\% > 19.6$
M	Medium	$19.6 \geq \Delta u\% > 16.78$
L	Low	$\Delta u\% \leq 16.78$

Da bismo upoređivali rezultate simulacija sprovedene u *DIgSILENT/Power factory* softveru sa rezultatima dobijenih primjenom *Decision Tree* algoritma, moramo konvertovati rezultate iz Tabele 5.5 u format *Decision Tree* podataka (Tabela 5.15).



Tabela 5.15 Podaci *Decision Tree* algoritama konvertovani iz *DIGSILENT/Power factory* softvera za pad napona

Voltage drop in the last point [%]				
Terminal	0.4 MW	1 MW	2 MW	4 MW
1	22.41	21.72	20.57	18.28
2	30.6	28.29	24.46	16.78
3	30.27	27.48	22.82	13.5
4	29.05	24.41	16.9	1.25
5	27.12	19.6	7.07	0.001

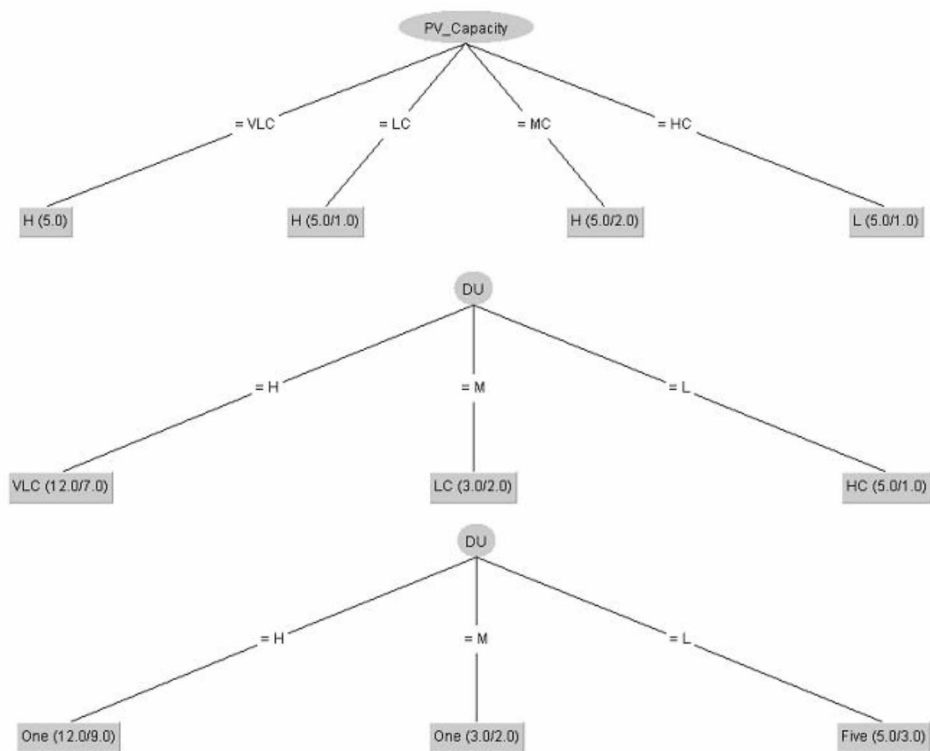
↓

$\Delta u$ %				
Terminal	VLC	LC	MC	HC
<i>One</i>	H	H	H	M
<i>Two</i>	H	H	H	L
<i>Three</i>	H	H	H	L
<i>Four</i>	H	H	M	L
<i>Five</i>	H	M	L	L

Na osnovu vizualizacije *Decision Tree* algoritma može se vidjeti da za PV kapacitet VLC kategorije padovi napona svih pet sabirnica potpadaju pod kategoriju (*high*) i u svim situacijama imamo tačne odgovore (Slika 5.9). Rezultat se poklapa sa rezultatima simulacija u *DIGSILENT/Power factory*. Suprotno, najmanji padovi napona (*Low* kategorija) će biti na svim sabirnicama, izuzev u sabirnici broj 1, u slučaju priključenja PV generatora snage 4 MW.

Analizom rezultata sa Slike 5.7 može se provjeriti ispravnost *Decision Tree* algoritma. Ako upoređujemo rezultate ovog algoritma sa rezultatima dobijenih u *DIGSILENT/Power factory*, vidimo da u slučaju priključenja PV generatora u sabirnici 1, padovi napona pripadaju kategorije H (*High*) i M (*Medium*) za sve date veličine PV generatora. Takođe, u slučaju veličine PV generatora koja pripada kategoriji HC (*High Capacity*), padovi napona su iz kategorije L (*Low*), a tačan odgovor se odnosi na sabirnicu 5.

Dakle, može se zaključiti da je *Decision Tree* metoda kvalitetna, naročito sa aspekta dobijanja brzog rješenja. Ipak, tačnost metode je potrebno dodatno provjeriti, pa je sa tim ciljem korištena nova optimizaciona metoda – metoda genetskog algoritma.



Slika 5.7 Vizualizovani *Decision Tree* algoritam za padove napona

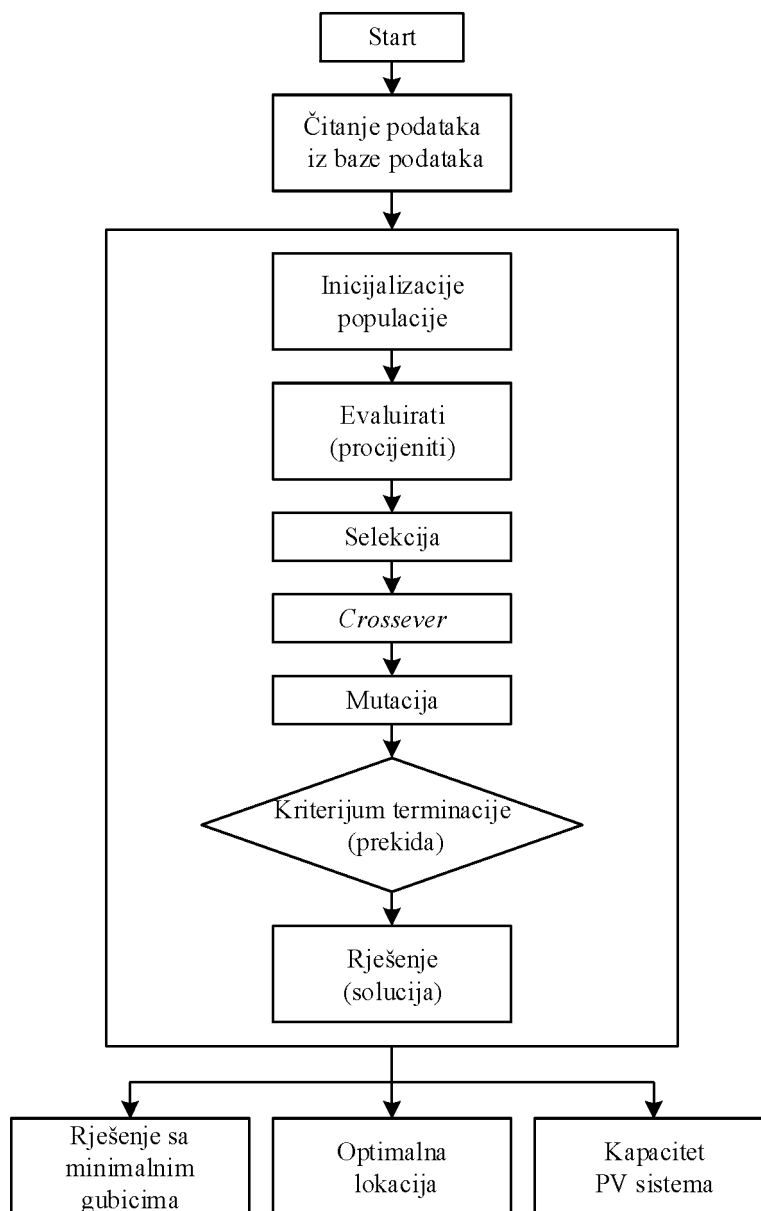
### 5.3. Provjera dobijenih rezultata kroz primjenu genetskog algoritma

Jedan od glavnih razloga za korištenje genetskog algoritma je njegova efikasnost pri rješavanju problema optimizacije, posebno u slučajevima postojanja velikog broja parametara i brojnih ograničenja.

U ovoj doktorskoj disertaciji će biti korištena grupa povezanih funkcija na bazi genetskog algoritma, implementirana u MATLAB-u, koja se označava sa *GAOT*.

*GAOT* omogućava rješavanje brojnih problema koje nije moguće riješiti klasičnim matematičkim programiranjem [70].

Grafički prikaz optimizacionih koraka *GAOT* algoritma dat je na slici 5.8.



Slika 5.8 Blok dijagram *GAOT*-a

Primjena *GAOT*-a podrazumijeva sljedeće korake:

- **Inicijalizacija:** U ovom koraku, stvaranje slučajnih hromozoma za distribuirani generator se vrši prema relaciji:

$$X_j(0)=[X_{j1}(0), X_{j2}, \dots, X_{jm}(0)] \quad (5.2)$$

$X_j(0)$  je slučajno generisan u prostoru za pretraživanje  $(X_k^{\min}, X_k^{\max})$

gdje je:

$X_j(0)$  – genom binarne vrijednosti 0 ili 1.

Zbog činjenice da su ulazne vrijednosti korištene u ovom problemu dvostruki tipovi podataka, najprikladniji kriterijum za inicijalizaciju populacije je dvostruki vektorski metod.

- **Evaluacija:** u ovom koraku, za svaki hromozom u inicijalnoj populaciji izračunava se vrijednost zasnovana na specifičnoj objektivnoj funkciji. Najbolja vrijednost je izabrana kao vrijednost *fitness*-a.

$$F(\text{chromosome}) \Rightarrow \text{best chromosome} \quad (5.3)$$

Objektivna funkcija prije priključenja PV generatora ( $P_{lossl}$ ) je:

$$P_{Lossl} = 3 \cdot \left( \frac{P_L}{U} \right)^2 \cdot r \cdot L \quad (5.4)$$

gdje su:

$P_{Lossl}$  – gubici u distributivnom vodu prije priključenja PV generatora;

$r$  – linijski otpor voda u [ $\Omega/\text{km}$ ];

$L$  – rastojanje između trafostanice i opterećenja u [km];

$I_L$  – efektivna vrijednost struje voda u [A] i

$P_L$  – aktivna snaga opterećenja u [kW].

*Fitness* funkcija prije priključenja PV generatora je:

$$\text{Fitness function} = \frac{1}{|P_{LOSSl}|} \quad (5.5)$$

*Fitness* funkcija i gubici snage su obrnuto proporcionalni, pa kako je proklamovani cilj postići što manje gubitke snage, ova funkcija treba da je što veća.

Za objektivnu funkciju u slučaju nakon priključenja PV generatora ( $P_{lossT}$ ) imamo:

$$P_{LossT} = \frac{r \cdot G (P_G^2 - 2 \cdot P_L \cdot P_G)}{3 \cdot U_L^2} \quad (5.6)$$

gdje su:

$P_G$  – aktivna snaga PV generatora u [kW] i

$G$  – rastojanje između napojne trafostanice i PV generatora u [km].

*Fitness* funkcija je:

$$\text{Fitness function} = \frac{1}{|P_{LOSST} - P_{LOSSl}|} \quad (5.7)$$

I u ovom slučaju, sa aspekta smanjenja gubitaka snage, *fitness* funkcija je najbolja kada je najveća.

- **Selekcija (izbor):** u ovom koraku izbor potencijalnih korisnih rekombinacionih rješenja se vrši kroz stohastičko univerzalno uzorkovanje koristeći dva različita hromozoma kao roditeljske hromozome i upoređujući ih sa drugom metodom selekcije, poznatom kao selekciju ruleta.

- **Crossover:** u ovom koraku, korišćenjem hromozoma iz koraka 3, stvoren je novi potomak koji ima neke djelove genetskog materijala oba roditelja. Ovaj izbor osigurava da izvodljivi roditelji dovode do izvodljivih potomaka. Proces se obavlja korištenjem pravila:

$$O_i = P_1 \alpha (P_2 - P_1) \quad (5.8)$$

gdje su:

$O_1$  – potomak,

$P_1$  – prvi roditelj i

$P_2$  – drugi roditelj.

- **Mutacija:** u ovom koraku se pokušavaju poboljšati hromozomi promjenom specifičnih gena. Mutacija se vrši korištenjem Gaussove metode koja dodaje slučajni broj svakom vektorskom unosu jednog hromozoma. Ovaj slučajni broj je uzet iz Gaussove distribucije usredsređene na nulu.

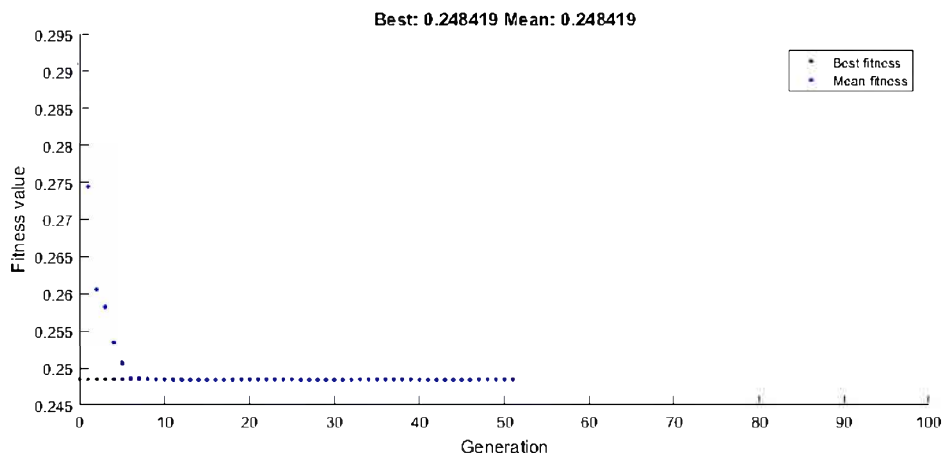
### 5.3.1. Primjena *GAOT*-a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja gubitka snage u realnoj distributivnoj mreži

Rezultati dobijeni primjenom *GAOT*-a uglavnom odgovaraju rezultatima simulacija dobijenih u *DIGSILENT/Power factory* softveru (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 Definisane optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta priključenog PV generatora primjenom *GAOT*-a

Najbolji položaj	Sabirnica 5
Kapacitet PV sistema [MW]	2.56
Gubici aktivne snage [MW]	0.25

*GAOT* je dostigao stabilno (optimalno) rješenje za 56 iteracija (Slika.5.9). Optimalna lokacija za PV sistem je terminal 5, a gubici snage u tom slučaju iznose 0.25 MW [71].

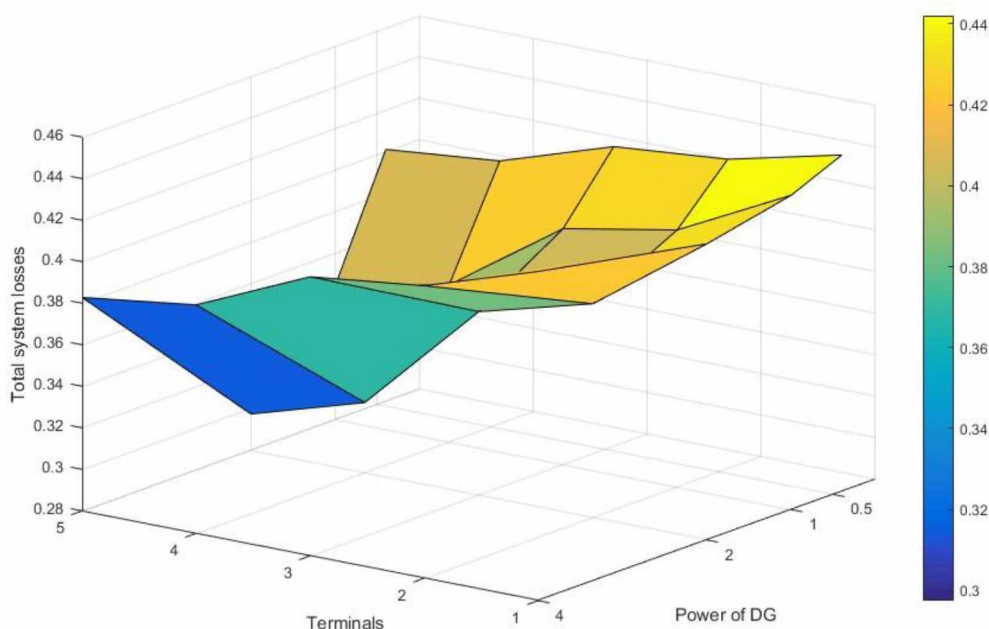


Slika 5. 9 Iznalaženje optimalnog rješenja za lokaciju i kapacitet PV generatora primjenom *GAOT*-a

U cilju provjere optimalnog kapaciteta PV generatora na prethodno definisanoj optimalnoj lokaciji, analizirane su različite vrijednosti mogućih optimalnih kapaciteta. Rezultati su prikazani u formi dijagrama datim na Slici 5.10. Tamnoplava oblast predstavlja skup optimalnih rješenja u skladu sa formulacijom optimizacije definisanim ranije u ovom radu. Snaga PV sistema od 2 MW do 2.56 MW uzrokuje najniži nivo ukupnih gubitaka aktivne snage u analiziranom sistemu i to se može smatrati optimalnim rješenjem sa aspekta kapaciteta.

Plava boja na skali osi predstavlja manje gubitke od 0, 29 MW do 0, 37 MW za vrijednost kapaciteta PV sistema između 2 MW i 4 MW. Zelena boja predstavlja gubitak od 0, 37 MW do 0, 39 MW za vrijednost kapaciteta PV sistema između 1 MW i 2 MW, dok žuta boja na skali predstavlja najveće gubitke od 0, 4 MW do 0, 44 MW za PV sistem kapaciteta od 0, 4 MW.

Ukupni gubici aktivne snage prije ugradnje PV sistema bili su 0.451 MW. Nakon implementacije PV sistema na određenom terminalu, ukupni gubici sistema iznose 0,25 MW, tj. niži su za 45, 09 %.



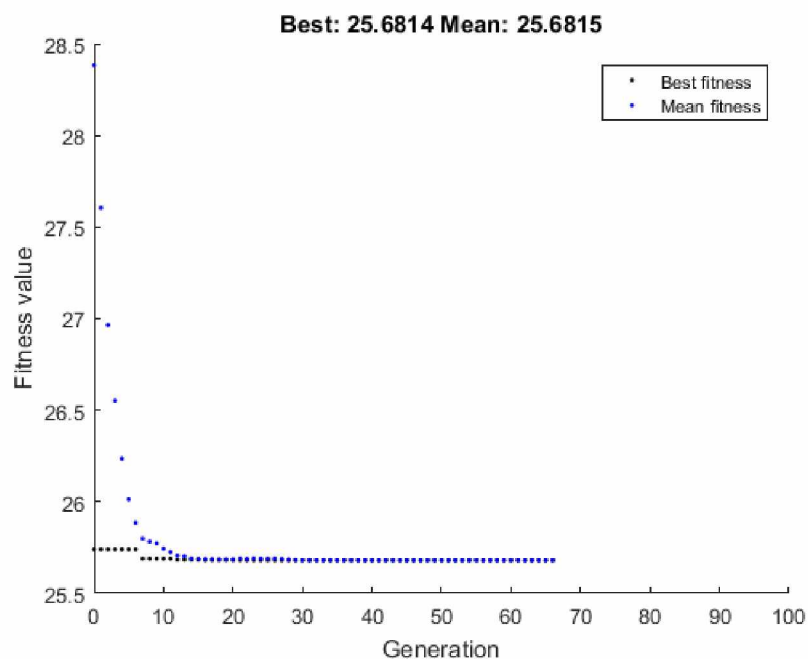
Slika 5.10 *Surface* dijagram generisan pomoću *GAOT* rezultata

### 5.3.2. Primjena *GAOT*-a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja padova napona u realnoj distributivnoj mreži

I za pad napona rezultati dobijeni primjenom *GAOT*-a odgovaraju rezultatima dobijenim simulacijama sprovedenim pomoću *DIGSILENT/Power factory* softvera.

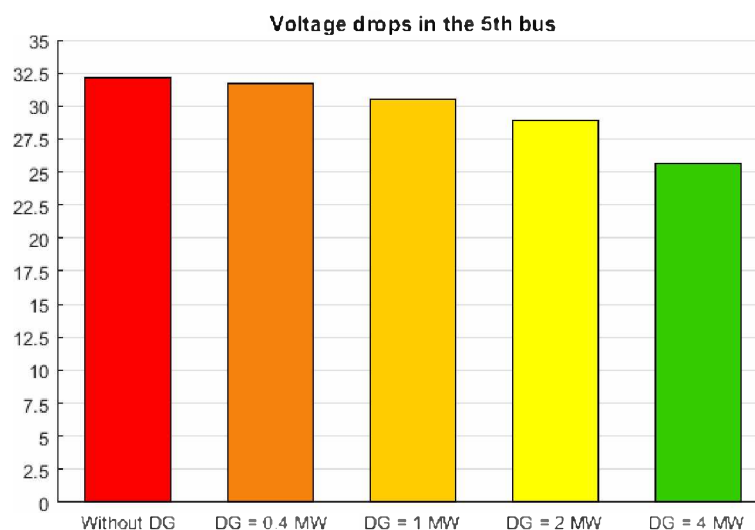
*GAOT* je dostigao optimalno rješenje za 68 iteracija (Slika 5.11). Za veličinu PV generatora od 0.4 MW dobijaju se najmanji padovi napona u krajnoj tački voda i iznose  $\Delta u \% = 25.68$ .

Padovi napona u krajnoj tački (u našem slučaju u sabirnici broj 5 razmatranog 10 kV voda u slučaju prije priključenja PV generatora iznose  $\Delta u = 32.13 \%$ . Nakon priključenja generatora snage 0.4 kW na sabirnici 5 padovi napona se smanjuju ( $\Delta u \% = 25.68$ ). Sa povećanjem snage priključenog PV generatora padovi napona su još manji.



Slika 5.11 Optimalni pad napona u krajnoj tački voda dobijen primjenom *GAOT*-a

Bar dijagram rezultata dobijenih primjenom *GAOT*-a je prikazan na Slici 5.12.



Slika 5.12 Bar dijagram za padove napona u krajnoj tački voda dobijenih primjenom *GAOT*-a

Crvena boja na dijagramu predstavlja pad napona prije priključenja PV generatora, dok ostale boje na dijagramu predstavljaju padove napona u krajnoj tački voda za date vrijednosti kapaciteta PV sistema (između 0.4 MW do 4 MW). Snaga PV sistema od 0.4 MW uzrokuje najniži pad napona u krajnoj tački od  $\Delta u\% = 25.68$ . Treba napomenuti da



kada veličina PV sistema prelazi 2 MW, padovi napona u krajnoj tački voda se dodatno smanjuju.

U narednom potpoglavlju, da bi se pokazala tačnost metode, uzeli smo u razmatranje drugi primjer s Kosovske distributivne mreže, 10 kV voda “Koretine”, gdje smo pokazali da sa ovim metodama može da se pokaže da li je ta tačka priključka PV generatora, koja je odabrana, optimalna.

#### 5.4. Gubici snage u slučaj prije priključenja fotonaponskog generatora u 10 kV vod “Koretine”

U cilju provjere optimalne lokacije i kapaciteta priključenja PV generatora, u razmatranje je uzet i drugi primjer drugog voda s Kosovskog distributivnog sistema i njegovo maksimalno opterećenje  $P_{max} = 2.856$  MW

Tabela 5.17 Raspored opterećenja po sabirnicama 10 kV voda “Koretine”

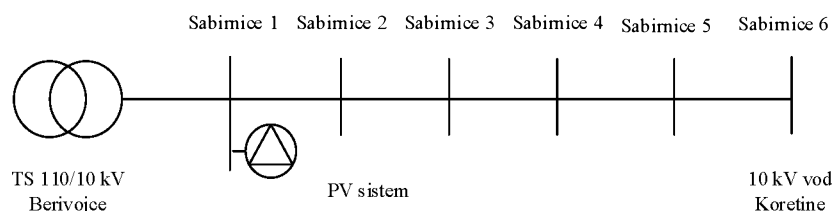
Sabirnica	Rastojanje [km]	Opterećenje [MW]
1	4.71	1.04
2	4.83	0.33
3	5.37	0.34
4	2.03	0.11
5	3.03	0.57
6	7.87	0.47

Tabela 5.18 Gubici snage na 10 kV vodu “Koretin“ u slučaju prije priključenja fotonaponskog generatora.

Sabirnica	Gubici [kW]
1	127.41
2	26.67
3	42.18
4	4.77
5	162.02
6	155.2
<b>Ukupni gubici u 10 V vod</b>	<b>518.25</b>

#### 5.4.1. Gubici snage voda nakon priključenja fotonaponskog generatora u 10 kv vodu “Koretine”

Naredni korak u ovoj analizi je priključenje PV generatora na sabirnice 10 kV voda “Koretine” (Slika 5.13). Razmatrane su promjene gubitaka snage za različite pozicije priključenja PV generatora i različite vrijednosti kapaciteta priključenog generatora. S tim u vezi, razmatrani su kapaciteti generatora vrijednosti: 0.4 MW, 1 MW, 2 MW i 4 MW. Dobijeni rezultati simulacija su prikazani u Tabeli 5.19.



Slika 5.13 Jednopolna šema 10 kV voda “Koretine” sa priključenim fotonaponskim generatorom na sabirnicama 1

Tabela 5.19 Ukupni gubici snage na 10 kV vodu “Koretine” za različite vrijednosti kapaciteta priključenih fotonaponskih generatora

Ukupni gubici snage na vodu [kW]				
Sabirnica	Kapacitet PV sistema od 0.4 MW	Kapacitet PV sistema od 1 MW	Kapacitet PV sistema od 2 MW	Kapacitet PV sistema od 4 MW
1	503	486	466	470
2	488	452	414	422
3	471	415	355	368
4	465	401	333	347
5	456	380	300	317
6	431	325	214	238

Poređenjem rezultata datih u Tabelama 5.18 i 5.19 nedvosmisleno se može zaključiti da vrijednosti gubitaka snage voda opadaju sa priključenjem PV generatora.

Isto kao kod 10 kV voda “Mučiverce” i u ovom vodu, bilo koji priključeni kapacitet generatora na bilo kojoj od 6 sabirnica voda rezultiraće ukupnim gubicima koji su manji

od vrijednosti prije priključenja generatora (518.25 kW). Dakle, priključenje PV generatora ima pozitivan uticaj na redukciju gubitaka snage.

Ako upoređujemo i u ovom dalekovodu lokacije priključka PV generatora, može se konstatovati da pri konstantnom kapacitetu PV generatora, njegovo priključenje na prvoj polovini voda (sabirnice 1, 2 i 3) rezultira većim ukupnim gubicima snage nego u slučaju priključenja na drugom dijelu voda (sabirnice 4, 5 i 6). Drugim riječima, što je priključeni generator bliže potrošnji, gubici snage su manji.

I u ovom slučaju daljom analizom podataka u Tabeli 5.19 može se zaključiti da različite vrijednosti priključenih kapaciteta PV generatora na istoj sabirnici rezultiraju različitim nivoom gubitaka snage. U konkretnom slučaju, kapacitet generatora od 2 MW će dati manje vrijednosti gubitaka snage u poređenju sa generatorima snage 0.4 MW ili 1 MW. Generalni zaključak bi bio da je optimalni kapacitet priključenog generatora treba da bude blizak ukupnom opterećenju voda. U konkretnom slučaju, za opterećenje voda od 2.856 MW, optimalan scenario, sa aspekta minimizacije gubitaka snage voda, bi bio priključenje PV generatora snage 2 MW na sabirnici 6 u ovom slučaju. Gubici snage u tom slučaju iznose  $\Delta P = 214$  kW. Takođe, i u ovom dalekovodu za kapacitet priključenog PV generatora koji je veći od ukupnog opterećenja voda, ukupni gubici snage imaju tendenciju rasta (generator proizvodi više energije nego što je potrebno napajanim potrošačima priključenim na vodu).

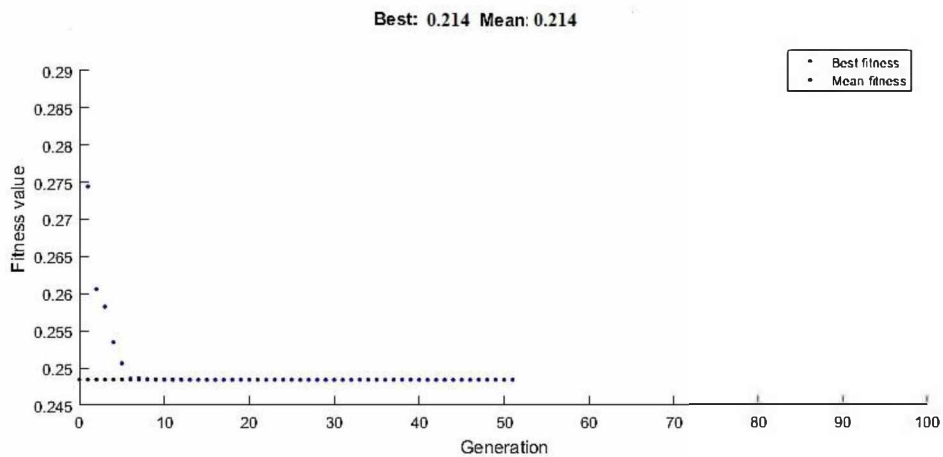
#### 5.4.2. Primjena GAOT-a za optimizaciju lokacije i kapaciteta fotonaponskog generatora u cilju smanjenja gubitka snage u 10 kv vodu “Koretine”

Rezultati dobijeni primjenom GAOT-a uglavnom odgovaraju rezultatima simulacija dobijenih u *DIGSILENT/Power factory* softveru (Tabela 5.16).

Tabela 5.20 Definisanje optimalne lokacije i optimalnog kapaciteta priključenog PV generatora primjenom GAOT-a u 10kV vodu „Koretine“

Najbolji položaj	Sabirnica 6
Kapacitet PV sistema [MW]	2.856
Gubici aktivne snage [MW]	0.21

GAOT je dostigao stabilno (optimalno) rješenje za 50 iteracija (Slika.5.14). Optimalna lokacija za PV sistem je terminal 6, a gubici snage u tom slučaju iznose 0.21 MW.



Slika 5.14 Iznalaženje optimalnog rješenja za lokaciju i kapacitet PV generatora primjenom *GAOT*-a u 10 kV vodu ‘Koretine’

#### 5.4.3. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za slučaj poznatog kapaciteta PV generatora na 10 kV “Koretine”

Rezultati simulacija u *DIgSILENT/Power factory* softveru poslužiće kao osnova, tj. trening podaci našeg *Decision Tree* algoritma. S tim u vezi, prvo definišemo trening podatke, u konkretnom slučaju to su kapacitet generatora (*PV Capacity*) i gubici snage ( $P_{LOSS}$ ), a potom definišemo attribute trening podataka.

I u ovom slučaju, vizuelizacijom sprovedenom pomoću softvera *VEKA Toolbox*, definišu se sljedeći atributi za trening podatke (dobijene *DIgSILENT/Power factory* softverom):

- za trening podatka PV kapacitet postoje sljedeći atributi: {VLC – Very Low Capacity, LC – Low Capacity, MC – Moderate Capacity i HC – High Capacity} i
- za trening podatka  $P_{LOSS}$  imamo sljedeće attribute: {L – Low, M – Medium, H – High i EH - Extra high}.

Tabela 5.21 Globalna diskretizacija za date kapacitete PV generatora za 10 kV voda “Koretine”

Atributi	<i>PV System capacity</i>	Domet
VLC	<i>Very Low Capacity</i>	$0 < PV \leq 0.4$
LC	<i>Low Capacity</i>	$0.4 < PV \leq 1$
MC	<i>Moderate Capacity</i>	$1 < PV \leq 2$
HC	<i>High Capacity</i>	$2 < PV \leq 4$

Trening podaci za proces globalne diskretizacije za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) su dati u Tabeli 5.22.

Tabela 5.22 Globalna diskretizacija za gubitke snage  $P_{LOSS}$  za 10 kV voda “Koretine”

Atributi	$P_{LOSS}$	Domet
L	<i>Low</i>	$P_{LOSS} \leq 0.24$
M	<i>Medium</i>	$0.24 < P_{LOSS} \leq 0.38$
H	<i>High</i>	$0.38 < P_{LOSS} \leq 0.47$
EH	<i>Extra high</i>	$P_{LOSS} > 0.47$

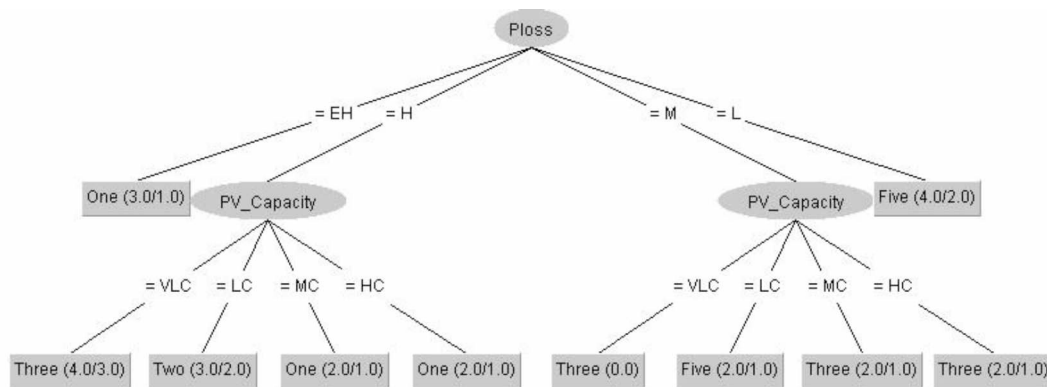
Tabela 5.23 Podaci *Decision Tree* algoritama konvertovani iz *DIGSILENT/Power factory* softvera za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) i date PV kapacitete za 10 kV voda “Koretine”

Power Losses [MW]				
Terminal	0.4 MW	1 MW	2 MW	4 MW
1	0.50	0.49	0.47	0.47
2	0.49	0.45	0.41	0.42
3	0.47	0.41	0.36	0.37
4	0.47	0.40	0.33	0.35
5	0.46	0.38	0.30	0.32
6	0.43	0.33	0.21	0.24

↓

Power Losses [MW]				
Terminal	VLC	LC	MC	HC
<i>One</i>	EH	EH	H	H
<i>Two</i>	EH	H	H	H
<i>Three</i>	H	H	M	M
<i>Four</i>	H	H	M	M
<i>Five</i>	H	M	L	L
<i>Six</i>	H	M	L	L

Na osnovu ovih trening podataka možemo dobiti vizuelizaciju *Decision Tree*-a, kao što je prikazano na Slici 5.15.



Slika 5.15 Vizualizovani *Decision Tree* algoritam za gubitke snage –  $P_{Loss}$  i kapacitete PV generatora za 10 kV voda “Koretine”

I kod 10 kV voda “Koretine” isto kao kod 10 kV voda Mučiverce, analizom rezultata datih u Tabeli 5.24 može se provjeriti ispravnost *Decision Tree* algoritma. Ako upoređujemo rezultate ovog algoritma sa rezultatima simulacija dobijenih u *DIgSILENT/Power factory* u slučaju gubitka kategorije  $L$  (*low*), vidjećemo da imamo odgovor (*class*) *Correct* u sabirnici 5 za kategoriju ( $MC$ ) *Moderate capacity* i ( $HC$ ) *High capacity*.

Tabela 5.24 Upoređivanje rezultata dobijenih primjenom *Decision Tree* algoritma sa simulacionim rezultatima dobijenih *DIGSILENT/Power factory* softverom za 10 kV vod “Koretine”

Upoređivanje <i>DIGSILENT/Power factory</i>			
<i>Decision Tree</i>			
$P_{Loss}$	$PV Capacity$	Terminali	Odgovor
EH	VLC	One	Correct
EH	LC	One	Correct
EH	MC	One	Correct?
EH	HC	One	Correct?
L	VLC	Five	Correct?
L	LC	Five	Correct?
L	MC	Five	Correct
L	HC	Five	Correct
M	VLC	Three	Correct?
M	LC	Five	Correct
M	MC	Three	Correct
M	HC	Three	Correct
H	VLC	Three	Correct
H	LC	Two	Correct
H	MC	One	Correct
H	HC	One	Correct

Rezultati sa <i>DIGSILENT/Power factory</i>		
$P_{Loss}$	$PV Capacity$	Terminali
EH	VLC	One
EH	VLC	Two
H	VLC	Three
H	VLC	Four
H	VLC	Five
H	VLC	Six
EH	LC	One
H	LC	Two
H	LC	Three
H	LC	Four
M	LC	Five
M	LC	Six
H	MC	One
H	MC	Two
M	MC	Three
M	MC	Four
L	MC	Five
L	MC	Six
H	HC	One
H	HC	Two
M	HC	Three
M	HC	Four
L	HC	Five
L	HC	Six

#### 5.4.4. Procjena gubitaka snage bazirana na primjeni *Decision Tree* algoritma za datu lokaciju PV generatora u 10 kV vodu “Koretine”

Prvo definišemo trening podatke, a to su lokacija PV generatora (priključne sabirnice) i gubici snage ( $P_{LOSS}$ ), a potom definišemo attribute trening podataka. Vizuelizacijom sprovedenom pomoću softvera *VEKA Toolbox*, definišu se sljedeći atributi za trening podatke:

- za trening podatka PV terminal postoje sljedeći atributi: {1 – *One*, 2 – *Two*, 3 – *Three*, 4 – *Four*, 5 – *Five* i 6 – *Six*} i
- za trening podatka  $P_{LOSS}$  imamo sljedeće attribute: {L – *Low*, M – *Medium*, H – *High* i EH – *Extra high*}.

Proces globalne diskretizacije (kategorizacije) za PV lokaciju je predstavljen u Tabeli 5.25, dok su trening podaci za process globalne diskretizacije za gubitke snage ( $P_{LOSS}$ ) dati u Tabeli 5.22

Tabela 5.25 Globalna diskretizacija za lokaciju fotonaponskog Sistema za 10 kV vod  
“Koretine”

Atributi	PV terminali	Domet
1	<i>One</i>	0 - 1
2	<i>Two</i>	1 - 2
3	<i>Three</i>	2 - 3
4	<i>Four</i>	3 - 4
5	<i>Five</i>	4 - 5
6	<i>Six</i>	5 - 6

Konvertovani podaci iz *DIGSILENT/Power factory* softvera i oblik pogodan za *Decision Tree* algoritma dati su u Tabeli 5.26.



Tabela 5.26 Podaci *Decision Tree* algoritama konvertovani iz *DIGSILENT/Power factory* softvera za gubitke snage ( $P_{Loss}$ ) i date PV lokacije za 10 kV vod “Koretine”

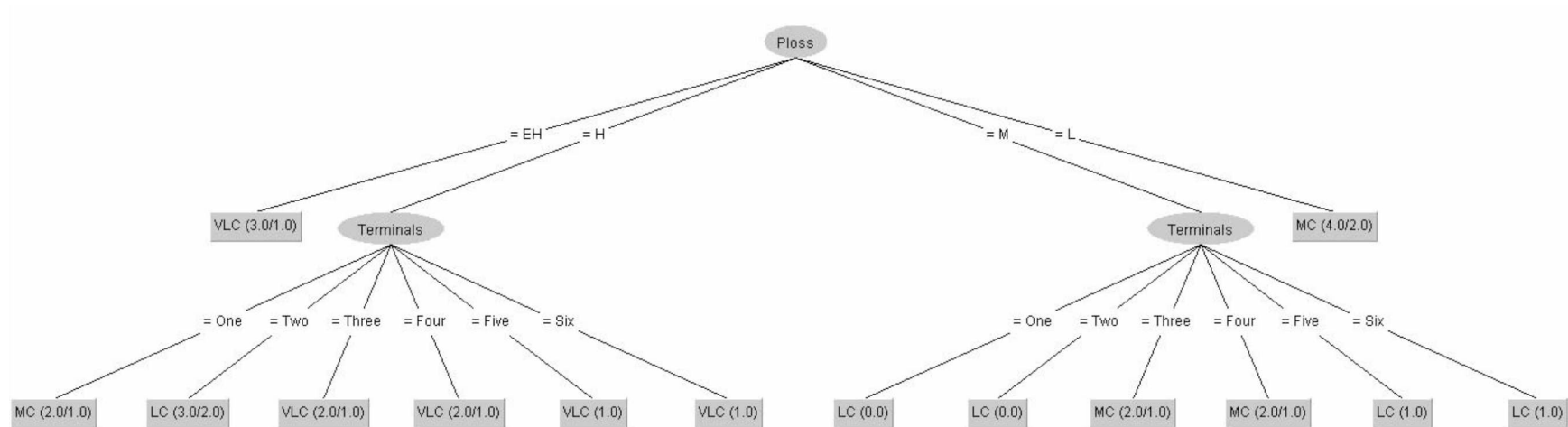
<i>Power Losses</i> [MW]						
<i>Capacity</i>	1	2	3	4	5	6
[MW]						
VLC	0.50	0.49	0.47	0.47	0.46	0.43
LC	0.49	0.45	0.41	0.40	0.38	0.33
MC	0.47	0.41	0.36	0.33	0.30	0.21
HC	0.47	0.42	0.37	0.35	0.32	0.24

↓

<i>Power Losses</i> [MW]						
<i>Capacity</i>	<i>One</i>	<i>Two</i>	<i>Three</i>	<i>Four</i>	<i>Five</i>	<i>Six</i>
[MW]						
VLC	EH	EH	H	H	H	H
LC	EH	H	H	H	M	M
MC	H	H	M	M	L	L
HC	H	H	M	M	L	L

Vizuelizacija *Decision Tree* -a za razmatrani novi slučaj je data na Slici 5.16.

Analizom rezultata i kod 10 kV voda “Koretine”, datih u Tabeli 5.27 može se provjeriti ispravnost *Decision Tree* algoritma. Ako upoređujemo rezultate ovog algoritma sa rezultatima simulacija dobijenih u *DIGSILENT/Power factory* u slučaju gubitka kategorije (*L*) *Low* vidjećemo da imamo odgovor (*class*) “*Correct*” za kapacitet kategorije (*MC*) *moderate capacity* u terminalima (sabirnice) pet i šest. Rezultat se poklapa sa rezultatima simulacija u *DIGSILENT/Power factory* softveru. I u slučaju priključenja PV generatora na sabirnice 1 za date kapacitete generatora (*VLC*) *Very low capacity* kategorije, pokazano je da su gubici (*EH*) *Extra high category* -  $P_{Loss} > 0.47$ . Rezultat se poklapa sa rezultatima simulacija u *DIGSILENT/Power factory* softveru.



Slika 5.16 Vizualizovani *Decision Tree* algoritam za gubitke snage -  $P_{Loss}$  i priključne sabirnice PV generatora u 10 kV vod “Koretine”

Tabela 5.27 Upoređivanje rezultata  $P_{LOSS}$  za datih PV lokacija dobijenih primjenom *Decision Tree* algoritma sa rezultatima dobijenih *DIGSILENT/Power factory* softverom za 10 kV vod “Koretine”

Upoređivanje <i>DIGSILENT/Power factory</i>			
<i>Decision Tree</i>			
$P_{Loss}$	Terminali	PV Capacity	Odgovor
EH	One	VLC	Correct
EH	Two	VLC	Correct
EH	Three	VLC	Correct?
EH	Four	VLC	Correct?
EH	Five	VLC	Correct?
EH	Six	VLC	Correct?
L	One	MC	Correct?
L	Two	MC	Correct?
L	Three	MC	Correct?
L	Four	MC	Correct?
L	Five	MC	Correct
L	Six	MC	Correct
M	One	LC	Correct?
M	Two	LC	Correct?
M	Three	MC	Correct
M	Four	MC	Correct
M	Five	LC	Correct
M	Six	LC	Correct
H	One	MC	Correct
H	Two	LC	Correct
H	Three	VLC	Correct
H	Four	VLC	Correct?
H	Five	VLC	Correct
H	Six	VLC	Correct

Rezultati sa <i>DIGSILENT/Power factory</i>		
$P_{Loss}$	Terminali	PV Capacity
EH	One	VLC
EH	One	LC
H	One	MC
H	One	HC
EH	Two	VLC
H	Two	LC
H	Two	MC
H	Two	HC
H	Three	VLC
H	Three	LC
M	Three	MC
M	Three	HC
H	Four	VLC
H	Four	LC
M	Four	MC
M	Four	HC
H	Five	VLC
M	Five	LC
L	Five	MC
L	Five	HC
H	Six	VLC
M	Six	LC
L	Six	MC
L	Six	HC

## ZAKLJUČAK

Fotonaponski generatori se sve češće susrijeću u distributivnim mrežama, pa je vrlo važno imati strategiju potrebnog nivoa njihovog upliva, kao i mjesta priključenja, a sve sa ciljem ostvarenja maksimalnog benefita od njihove integracije u elektroenergetski sistem (elektrodistributivnu mrežu).

Pravilnim pozicioniranjem distribuirane potrošnje i odabirom adekvatnih kapaciteta generatorskih jedinca moguće je uticati na brojne parametre sistema, što je sprovedenim analizama potvrđeno u ovoj doktorskoj disertaciji. Naime, osnovna teza disertacije je da se optimalnim izborom lokacije i kapaciteta PV sistema može uticati na umanjenje gubitka snage i padova napona u distributivnoj mreži.

U pravcu dokazivanja navedenog, doktorskom disertacijom su razmatrane različite optimizacione metode (algoritmi). Pokazane su njihove prednosti i nedostaci, a mnoštvo metoda koje se mogu pronaći u raspoloživoj literaturi upućuju na zaključak da ne postoji najbolja metoda i najbolje rješenje u smislu optimizacije.

Doktorskom disertacijom su prvo sprovedene simulacije u programskom paketu *DIGSILENT/Power factory*, gdje je analizom realne distributivne mreže pokazan uticaj priključenja PV generatora na vrijednost gubitaka snage i padova napona u mreži. Pokazano je da priključenje PV generatora na bilo koju od sabirnica analiziranog voda rezultira manjim gubicima snage nego u slučaju koji je bio prije njegovog priključenja. Takođe, zaključeno je da lociranje generatora bliže potrošnji dodatno redukuje gubitke snage. Što se tiče kapaciteta priključenog generatora, konstatovano je da bi optimalna vrijednost trebala da bude bliska ukupnom opterećenju voda. Drugim riječima, veći stepen podudarnosti instalisanog kapaciteta PV generator i opterećenja voda rezultiraće manjim gubicima snage voda.

Pri konstantnom kapacitetu PV generatora, tačka njegovog priključka na vod utiče na naponske prilike i to na način da padovi napona opadaju sa priključenjem generatora u tački daljoj od početka voda, tj. priključnih sabirnica kojima je vod povezan na napojnu transformatorsku stanicu.

Nakon dobijanja rezultata simulacija, pristupilo se traženju optimalnog rješenja za lokaciju i veličinu priključenog PV generatora korištenjem dvije optimizacione metode.

S tim u vezi, prvo je optimizacija sprovedena metodom *Decision Tree* algoritma. Osnovu ovog algoritma čine trening podaci dobijeni prethodno sprovedenim simulacijama.

Drugi optimizacioni metod korišten u disertaciji je genetski algoritam *Matlab Toolbox (GAOT)*, koji se implementira kao grupa povezanih funkcija. *GAOT* ima mogućnost jako brzog i tačnog rješavanja kompleksnih nelinearnih matematičkih problema.

Poređenjem rezultata navedenih algoritama konstatovan je visok nivo podudarnosti, na osnovu čega se može zaključiti da *Decision Tree* optimizacioni metod predstavlja veoma primjenjivo rješenje u inženjerskoj praksi, zadovoljavajuće tačnosti i brzine rada, a bez upotrebe kompleksnih matematičkih operacija ili potrebe za visoko sofisticiranim hardverom.

Na osnovu sprovedenih istraživanja u okviru doktorske disertacije, posebno treba apostrofirati sljedeće.

- Lokacija i kapacitet distribuiranog generatora, u konkretnom slučaju PV generatora, utiče na gubitke snage i padove napona na vodu. Konstatovano je da kapacitet dodatog PV generatora treba da bude na nivou maksimalnog opterećenja voda, kako bi bili redukovani gubici snage i padovi napona. Dodatno, potvrđeno je da se ukupno opterećenje voda prije priključenja distribuiranog generatora treba uzeti u razmatranje pri optimizaciji lokacije generatora.
- Padovi napona opadaju sa priključenjem PV generatora u tački koja je bliža priključenom opterećenju.
- *DIGSILENT/Power factory softver* omogućava određivanje optimalne lokacije PV generatora zadatog kapaciteta, uvažavajući uslove minimalnih gubitaka snaga i padova napona, a bez potrebe za uključivanjem složenih matematičkih proračuna i uključivanja numeričkih metoda.
- *Decision Tree* algoritam omogućava jednostavnu i relativno tačnu optimizacionu proceduru, koja rezultira izborom najpovoljnije lokacije PV sistema za zadate kriterijume.

Takođe, moguće je dobiti i vrijednost optimalnog kapaciteta PV generatora za definisanu lokaciju priključenja.

- *GAOT* je naprednija i složenija optimizaciona metoda od prethodno analizirane, koja omogućava veću brzinu rada i tačnije rezultate optimizacije u odnosu na *Decision Tree* algoritam.

Generalno, disertacija potvrđuje da se *Decision Tree* algoritam može koristiti kao precizna i jednostavna optimizaciona tehnika za definisanje optimalne lokacije i kapaciteta PV generatora, uz uvažavanje definisanih kriterijuma.

Dio rezultata predstavljenih u ovoj disertaciji se nalaze u radovima *Impact of Photovoltaic Systems Placement, Sizing on Power Quality in Distribution Network* i *Optimal Location and Sizing of Photovoltaic Systems in Order to Reduce Power Losses and Voltage Drops in the Distribution Grid*, koji su objavljeni u naučnim časopisima *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)* i *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, respektivno.

## PRAVCI BUDUĆEG ISTRAŽIVAČKOG RADA

Ova doktorska disertacija predstavlja dobru osnovu za nastavak naučno-istraživačkog rada u oblasti distribuirane proizvodnje električne energije. Konkretno, ideja je da se primjenom korištenih i novih optimizacionih metoda rješavaju optimizacioni problemi za slučaj priključenja većeg broja distribuiranih generatora, a uz uvažavanje definisanih kriterijuma/ograničenja (CSP – *constraints satisfaction problems*).

## LITERATURA

- [1] H. L. Willis, W. G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, CRC Press, Power Engineering, New York, 2000.
- [2] N. Mithulananthan, T. Oo, L. V. Phu, „Distributed Generator Placement in Power Distribution System Using Genetic Algorithm to Reduce Losses“, *Thammasat International Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 3, July-September 2004, pp. 55–62.
- [3] M. Vukobratovic, Ž. Hederic, M. Hadžiselimovic, “Optimal Distributed Generation Placement in Distribution Network”, *Energycon 2014*, May 13-16, 2014, pp.1236-1243.
- [4] M. R. Farooqi, D. Agarwal, N. Jain, “Allocation and Minimizing of Distributed Generator in a Distribution Network, an Overview of Different Approaches First”, *International Journal of Engineering, Management & Sciences (IJEMS)*, vol. 1, Issue. 4, April 2014, pp.1-4.
- [5] T. M. Kumar, V. Ganesh, “Optimal Allocation of DG Unit for the Radial Distribution System Using Genetic Algorithm”, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronic, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 3, Issue 1, January 2015, pp. 87-90.
- [6] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, “Distributed Generation: A Definition”, *Elsevier - Electric Power Systems Research*, vol. 57, 2001, pp. 195–204.
- [7] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer, “Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues”, *Elsevier - Energy Policy*, 33, 2005, pp. 787-798.
- [8] T. N. Shukla, S. P. Singh, K. B. Naik, “Allocation of Optimal Distributed Generation Using GA for Minimum System Losses in Radial Distribution Networks”, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 3, 2010, pp. 94-106.
- [9] C. L. T. Borges, D. M. Falcao, ”Optimal Distributed Generation Allocation for Reliability, Losses and Voltage Improvement“, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, 2006, pp. 413-420.



- [10] S. Huddar, H. G. Amulya, B. Kantharaj, R. Magdum, "Review Paper on Optimal Location and Sizing of DG", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, Issue. 2, February 2014, pp.1825–1829.
- [11] J. A. P. Lopes, "Integration of Dispersed Generation on Distribution Networks Impact Studies", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, January 2002, pp. 323–328.
- [12] V. Vita, T. Alimardan, L. Ekonomou, "The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks, Voltage Profile and Energy Losses", *2015 IEEE European Modelling Symposium*, 6–8 October 2015, pp. 260–265.
- [13] J. A. P. Lopes, N. Hatziaargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins, „Integrating Distributed Generation Into Electric Power Systems: A Review of Drivers, Challenges and Opportunities“, *Elsevier - Electric Power Systems Research*, 77, 2007, pp.1189-1203.
- [14] N. Rugthaicharoencheep, S. Auchariyamet, "Technical and Economic Impacts of Distributed Generation on Distribution System", *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, vol. 6, No. 4, 2012, pp. 385 – 389.
- [15] G. Naik, D. K. Khatod, M. P. Sharma, "Distributed Generation Impact on Distribution Networks: A Review", *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEET)*, vol. 2, Issue 1, 2012, pp. 68-72.
- [16] A. Keane, M. O'Malley, "Optimal Utilization of Distribution Networks for Energy Harvesting", *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 22, No. 1, Feb. 2007, pp. 467–475.
- [17] S. Kayalvizhi, D. M. V. Kumar, "Distributed Generation – Planning, Control and Management: State-Of-The-Art", *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)*, *National Conference on Renewable Energy Innovations for Rural Development (NCREIRD)*, 2014, pp. 53-59.
- [18] A. Keane, "Integration of Distributed Generation," *PhD Dissertation*, School of Electrical, Electronic & Mechanical Engineering University College Dublin, 2007.
- [19] N. G. A. Hemdan, M. Kurrat, "Distributed Generation Location and Capacity Effect on Voltage Stability of Distribution Networks", *Research Gate, Conference Paper*, March 2008, pp. 1–5.
- [20] S. Ahmad, M. D. Farman, "Power Quality Issues of Distributed Generation in Distribution Network and its Impact on System Power Loss and Voltage Profile", *2nd*

- International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, April 12, 13, 2013, pp. 1–10.
- [21] M. A. Yadav, R. S. Babu, "Impact of Distributed Generation on Three Feeder Radial Distribution System", *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, Nov-Dec 2013, pp. 983-988.
- [22] D. C. L. Tamayo, P. A. N. Burgos, J. M. L. Lezama, "Optimal Location and Sizing of Distributed Generation: A Review of the State of the Art", *Revista Politécnica*, vol. 11, mo. 20, 2015, pp. 99-110.
- [23] S. R. Krishna, I. S. Kumar, "Analysis on Techno-Economic Benefits of a Strategically Placed Distributed Generator in a Radial Distribution System", *International Journal of Computer Applications*, vol. 59, No.10, December 2012, pp. 26-34.
- [24] S. Mukhopadhyay, B. Singh, "Distributed Generation - Basic Policy, Perspective Planning and Achievement so far in India", *Research Gate, Conference Paper*, August 2009, pp. 1-7.
- [25] S. D. M. Shareef, T. V. Kumar, "A Review on Models and Methods for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution System", *International Journal of Education and Applied Research*, vol. 4, no. 1, 2014, pp. 161–169.
- [26] M. Zidar, „Utjecaj Distribuirane Proizvodnje na Planiranje Distribucijske Mreže“, *Sveučilište u Zagrebu Fakultet Elektrotehnike i Računarstva*, Zagreb, pp.1-7.
- [27] R. Goić, D. Jakus, J. K. Opara, I. Zlatunić, I. Penović, „Priključak Velikih Fotonaponskih Elektrana na Distribucijsku Mrežu“, *Hrvatski Ogranak Međunarodne Elektrodistribucijske Konferencije (Cired)*, 2 Savjetovanje Umag, 2010, pp.1-11.
- [28] S. Limari, A. Ymeri, F. Azemi, „Reforms in Kosovo’s Power System“, *12th WSEAS International Conference on Systems*, Heraklion, Greece, July 22-24, 2008, pp. 513-518.
- [29] M. Gandomkar, M. Vakilian, M. Ehsan, "A Combination of Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal DG Allocation in Distribution Networks", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, June 2005, pp.645-648.
- [30] G. Naik, D. K. Khatod, M.P. Sharma, „Optimal Allocation of Combined DG and Capacitor for Real Power Loss Minimization in Distribution Networks“, *Electrical Power and Energy System*, vol. 53, 2013, pp. 967–973.

- [31] K. Zou, A. Agalgaonkar, S. Perera, K. M. Muttaqi, "Optimization of Distributed Generation Units and Shunt Capacitors for Economic Operation of Distribution Systems", *AUPEC - Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2008, pp. 1-7.
- [32] T. Gozel, M. H. Hocaoglu, "An Analytical Method for the Siting and Sizing of Distributed Generators in Radial Systems", *Electric Power Systems Research*, 2009, pp. 912-918.
- [33] M. Vatankhah, S. M. Hosseini, "Determination of Optimum Size and Location of Distributed Generators for Loss Reduction Using GA", *Journal of Electrical Engineering*, pp.1-9.
- [34] K. R. Guerriche, T. Bouktir, "Optimal Allocation and Sizing of Distributed Generation with Particle Swarm Optimization Algorithm for Loss Reduction", *Revue des Sciences et de la Technologie - RST*, vol.6, No. 1, January 2015, pp. 59–69.
- [35] K. M. Muttaqi, A. D. T. Le, M. Negnevitsky, G. Ledwich, "Distributed Generation for Minimization of Power Losses in Distribution Systems", *IEEE PES General Meeting*, 2006, pp.1-8.
- [36] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, A. Law, "Placement of Dispersed Generation Systems for Reduced Losses", *33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000, pp.1-9.
- [37] I. Pisićă, C. Bulac, M. Eremia, "Optimal Distributed Generation Location and Sizing Using Genetic Algorithms", *Research Gate, Conference Paper*, 2009, pp.1-6.
- [38] G. Naik, D.K. Khatod, M.P Sharma, „Optimal Allocation of Distributed Generation in Distribution System for Loss Reduction ", *2012 IACSIT Coimbatore Conferences, IPCSIT*, vol. 28, 2012, pp. 42-46.
- [39] G. Naik, D.K Khatod, M.P Sharma, "Planing and Operation of Disitributed Generation in Distribution Networks“, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, Issue. 9, September 2012, pp. 381-388.
- [40] N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulananthan: "An Analytical Approach for DG Allocation in Primary Distribution Network", *Electrical Power & Energy Systems*, 28, 2006, pp. 669-678.
- [41] R. Singh, G. S. Brar, N. Kaur, „Optimal Placement of DG in Radial Distribution Network for Minimization of Losses“, *International Journal of Advanced Research in*

*Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 1, Issue. 2, August 2012, pp.84-90.

[42] S. Kansal, B. B. R. Sai, B. Tyagi, V. Kumar, “Optimal Placement of Wind-Based Generation in Distribution Networks“, *Renewable Power Generation (RPG), IET Conference*, 2011, pp. 1–6.

[43] A. Keane, M. O’Malley, “Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, No. 3, Aug. 2005, pp. 1640–1646.

[44] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, R. Seethapathy, “Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, No. 1, February 2010, pp. 360-370.

[45] N. Khalesi, N. Rezaei, M. R. Haghifam, “DG Allocation with Application of Dynamic Programming for Loss Reduction and Reliability Improvement”, *Electrical Power Energy Systems*, vol. 33, No. 2, Feb. 2011, pp. 288–295.

[46] C. P. Corral, H. Bludszuweit, J. A. D. Navarro, „Probabilistic Model for Distributed Generation Expansion in Distribution Power Network“, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011, pp. 1366-1371.

[47] S. Thongsuk, A. Ngaoptakkul, „Impacts of Electrical Line Losses Comprising Multi-Distributed Generation in Distributed System“, *Energy and Power Engineering*, 5, 2013, pp. 1037-1042.

[48] R. P. Payasi, A. K. Singh, D. Singh, “Review of Distributed Generation Planning: Objectives, Constraints, and Algorithms”, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, No. 3, 2011, pp. 133-153.

[49] S. Biswas, S. K. Goswami, “Genetic Algorithm Based Optimal Placement of Distributed Generation Reducing Loss and Improving Voltage Sag Performance”, *ACEEE, International Journal on Electrical and Power Engineering*, vol. 02, No. 01, February 2011, pp. 21-23.

[50] K. Zou, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, S. Perera, “Voltage Support by Distributed Generation Units and Shunt Capacitors in Distribution Systems”, *IEEE Power & Energy Society, General Meeting*, 2009, pp. 1-8.

- [51] A. Soumya, A. Amudha, "Optimal Location and Sizing of Distributed Generators in Distribution System", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, Issue. 2, February 2013, pp. 1-5.
- [52] D. Singh, D. Singh, K. S. Verma," GA Based Optimal Sizing & Placement of Distributed Generation for Loss Minimization", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2, 8, 2007, pp. 556-562.
- [53] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, O. O. Akinola, "Optimal Location, Sizing, and Appropriate Technology Selection of Distributed Generators for Minimizing Power Loss Using Genetic Algorithm", *Hindawi Publishing Corporation Journal of Renewable Energy*, vol. 2015, pp. 1-9.
- [54] E. Haesen, M. Espinoza, B. Pluymers, I. Goethals, V. V. Thong, J. Driesen, R. Belmans, B. D. Moor, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generator Units Using Genetic Optimization Algorithms", *K.U. Leuven, ESAT – ELECTA, K.U. Leuven, ESAT - SCD - SISTA*, Belgium, May 3, 2005, pp.1-19.
- [55] A. K. Saonerkar, B. Y. Bagde, B. S. Umre, "DG Placement in Distribution Network for Power Loss Minimization Using Genetic Algorithm", *International Journal of Research in Engineering and Science, IJREAS*, vol. 2, Issue. 2, July 2014, pp. 41-47.
- [56] R. Prenc, Bogunović, A. Cuculić, „The Effect of Distributed Generation Type and Location Constraints on the Solution of the Allocation Algorithm“, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 10, No. 1, 2015, pp. 88-97.
- [57] A. M. El-Zonkoly, "Optimal Placement of Multi-Distributed Generation Units Including Different Load Models Using Particle Swarm Optimization", *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 11, 2011, pp. 50-59.
- [58] N. Jain, S. N Singh, S. C. Srivastava, „Particle Swarm Optimization Based Method for Optimal Siting and Sizing of Multiple Distributed Generators“, *16th National Power Systems Conference*, 15th-17th December 2010, pp. 669–674.
- [59] O. Amanifar, M. E. H. Golshan, "Optimal Distributed Generation Placement and Sizing for Loss and THD Reduction and Voltage Profile Improvement in Distribution Systems Using Particle Swarm Optimzation and Sensitivity Analysis", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, vol. 3, No. 2, issue 7, June 2011, pp. 47-53.

- [60] D. Hore, D. Chowdhury, "Review: An Analysis of Different Population Based Optimization Techniques Used for Optimum Allocation and Sizing of Distributed Generations in Distributed Network", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, Issue 5, May 2013, pp. 1691-1702.
- [61] N. Cristian, A. A. Ahmed, B. Dakyo, "Impact Analysis of Distribution Generation on Mesh and Radial Distribution Network. Overview and State of The Art", *Proceedings of Phumee*, 2013, pp.180-187.
- [62] A. Safari, R. Jahani, H. A. Shayanfar, J. Olamaei, ,, Optimal DG Allocation in Distribution Network", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 39, 2010, pp. 834-837.
- [63] M. H. Moradi, M. A. Abedini, "A combination of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Optimal DG Location and Sizing in Distribution Systems", *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, 2012, pp. 66-74.
- [64] T. Lantharthong, N. Rugthaicharoencheep, „Network Reconfiguration for Load Balance in Distribution System with Distributed Generation and Capacitor Placement“, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, No. 4, 2012, pp.409-414.
- [65] N. Rugthaicharoencheep, S. Nedphograw, S. Noyraiphoom, "Network Reconfiguration for Loss Reduction and Improved Voltage Profile in Distribution System with Distributed Generation using Genetic Algorithm", *5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology*, 2013, pp. 1-4.
- [66] G. Pula, "Elektroenergjetika", Pristinski Univerzitet, Pristina, 1986.
- [67] R. Rajaram, K. S. Kumar, N. Rajasekar, "Power System Reconfiguration in a Radial Distribution Network for Reducing Losses and to Improve Voltage Profile Using Modified Plant Growth Simulation Algorithm with Distributed Generation (DG)", *Energy Reports, Elsevier*, vol.1, 2015, pp. 116-122.
- [68] S. A. Gilani, B. Ahmad, "Analysis of Voltage Drop in a Low Voltage Electrical System for Statistical Control Process", *Magnt Research Report*, 2015, vol. 3, No. 1, pp. 67-80.

- [69] A. Ymeri, S. Mujović, “Impact of Photovoltaic Systems Placement, Sizing on Power Quality in Distribution Network”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 18, No. 4, 2018, pp. 107-112.
- [70] C. R. Houck, J. A. Joines, M. G. Kay, “A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation”, *North Carolina State University*, 1996, pp. 1-14.
- [71] A. Ymeri, S. Mujović, “Optimal Location and Sizing of Photovoltaic Systems in Order to Reduce Power Losses and Voltage Drops in the Distribution Grid”, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol.12. Nr.6, November – December 2017, pp. 498-504.

## KRATKA BIOGRAFIJA

Armend Ymeri rođen je 1971. godine u Gnjilanu, Kosovo. Osnovnu školu završio je u Gnjilanu. Srednju školu (Gimnaziju, Prirodno-matematički smjer) završio je u Gnjilanu u 1989. godine. Po završetku gimnazije, upisao je Elektrotehnički fakultet na Univerzitetu u Prištini na kojem je, na smjeru Elektroenergetski sistemi, stekao diplomu diplomiranog inženjera elektrotehnike juna 1997. godine. Nakon toga je na istom Fakultetu upisao magistarske studije na smjeru Elektroenergetski sistemi i juna 2008. godine je odbranio magistarski rad na temu “Mogućnosti i metode za podizanje kapaciteta postojećih i novih linija visokog napona prenosne mreže EES Kosova“ i stekao diplomu magistra elektrotehničkih nauka. Doktorske studije, smjer Elektroenergetski sistemi, upisao je 2014 god. Od januara 2000. god. radi u KEDS- Elektrodistrbuciji Kosova kao inženjer i menadžer na mnogim pozicijama (menadžer mreže Distribucije Gnjilana, menadžer održavanja distributivne mreže u KEDS-u, Menadžer investicije u KEDS-u). Publikovao je jedan rad u međunarodnom časopisu (sa SCI liste), jedan rad u međunarodnom časopisu (*indexed in Scopus*) i tri rada na ostalim međunarodnim konferencijama.



## IZJAVA O AUTORSTVU

Potpisani: Armend Ymeri

Broj indeksa: 1/13

### **Izjavljujem**

da je doktorska disertacija pod naslovom:

**“Izbor optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema u cilju smanjenja gubitaka snage i padova napona u distributivnoj mreži”**

- rezultat sprovedenog naučno-istraživačkog rada;
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo kakve diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam povrijedio autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, novembar 2019.

Potpis doktoranda:



## **IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA**

Ime i prezime autora: Armend Ymeri

Broj indeksa/upisa: 1/13

Studijski program: Elektroenergetski Sistemi

Naslov rada: **Izbor optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema u cilju smanjenja gubitaka snage i padova napona u distributivnoj mreži**

Mentor: Prof. dr Saša Mujović

Potpisani: Armend Ymeri

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, odnosno zvanja doktora umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

U Podgorici, novembar 2019.

Potpis doktoranda:



## IZJAVA O KORIŠTENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**Izbor optimalne lokacije i kapaciteta fotonaponskih sistema u cilju smanjenja gubitaka snage i padova napona u distributivnoj mreži**

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

U Podgorici, novembar 2019.

Potpis doktoranda:



1. Autorstvo – Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korištenja djela.

4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.