



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Irena Laković

**OPTIMALNA ALOKACIJA DISTRIBUIRANIH IZVORA
ELEKTRIČNE ENERGIJE I REKONFIGURACIJA
DISTRIBUTIVNE MREŽE PRIMJENOM L-SHADE
ALGORITMA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Irena Laković

**OPTIMALNA ALOKACIJA DISTRIBUIRANIH IZVORA
ELEKTRIČNE ENERGIJE I REKONFIGURACIJA
DISTRIBUTIVNE MREŽE PRIMJENOM L-SHADE
ALGORITMA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Irena Laković

Datum i mjesto rođenja: 11.12.1999. godine, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:
Energetika i automatika (smjer: Elektroenergetski sistemi), 2022.

Naziv završenog master studijskog programa i godina završetka studija:
Energetika i automatika (smjer: Elektroenergetski sistemi), 2024.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Studijski program: Energetika i automatika (smjer: Elektroenergetski sistemi)

Naslov rada: Optimalna alokacija distribuiranih izvora električne energije i rekonfiguracija distributivne mreže primjenom L-shade algoritma

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet Podgorica,
Univerzitet Crne Gore

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave master rada: 15.11.2024.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 16.12.2024.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

prof. dr Martin Ćalasan, Elektrotehnički fakultet Podgorica

prof. dr Vladan Radulović, Elektrotehnički fakultet Podgorica

doc. dr Snežana Vujošević, Elektrotehnički fakultet Podgorica

Mentor: prof. dr Martin Ćalasan, Elektrotehnički fakultet Podgorica

Komisija za ocjenu rada:

prof. dr Martin Ćalasan, Elektrotehnički fakultet Podgorica

prof. dr Vladan Radulović, Elektrotehnički fakultet Podgorica

doc. dr Snežana Vujošević, Elektrotehnički fakultet Podgorica

Komisija za odbranu rada:

prof. dr Martin Ćalasan, Elektrotehnički fakultet Podgorica

prof. dr Vladan Radulović, Elektrotehnički fakultet Podgorica

doc. dr Snežana Vujošević, Elektrotehnički fakultet Podgorica

Datum odbrane: 10.07.2025.

Ime i prezime autora: Irena Laković

E T I Č K A I Z J A V A

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

"OPTIMALNA ALOKACIJA DISTRIBUIRANIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE I REKONFIGURACIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE PRIMJENOM L-SHADE ALGORITMA"

moje originalno djelo.

Podnositelj izjave,

Irena Laković

U Podgorici, dana 09.05.2025. godine

PREDGOVOR

Stalni rast potražnje za električnom energijom i nekontrolisana integracija distribuiranih izvora električne energije (DIEE), dovode do smanjenja pouzdanosti i stabilnosti elektroenergetskih mreža. Ovo uključuje pogoršanje naponskih prilika, preopterećenje komponenti, povećanje gubitaka aktivne snage, a što zajedno rezultira smanjenom efiksanošću distributivnih mreža i rastom operativnih troškova. Distributivne mreže igraju vitalnu ulogu u pouzданoj isporuci električne energije, te je unapređenje njihove funkcionalnosti i stabilnosti od suštinskog značaja. Tradicionalne metode rekonfiguracije i lociranja DIEE odgovarajuće snage često ne postižu optimalne rezultate zbog složenosti problema i dinamičkih promjena u mreži.

Jedan od potencijalnih načina za prevazilaženje prethodnih problema jeste koordinisana optimalna alokacija i dimenzionisanje DIEE i rekonfiguracija distributivne mreže. Efikasnim kombinovanjem ovih strategija, mreža postaje bolje pripremljena za savladavanje izazova modernih energetskih potreba. Rekonfiguracija i integracija DIEE zajedno mijenjaju dinamiku mreže, i ne samo da se minimizuju gubici, već se omogućava stabilnija i pouzdanija isporuka električne energije, što je ključno za održivost elektroenergetskog sistema (EES-a). Prethodno definisan problem istraživanja ovog master rada je implementiran u *Matlab* programskom paketu primjenom *Linear Shade (L-shade)* algoritma. Algoritam istovremeno optimizuje veličinu i lokaciju DIEE i rekonfiguriše mrežu prema željenom kriterijumu - minimizacija gubitaka aktivne snage. Primjenom *L-shade* algoritma, ovaj rad teži da ponudi inovativna rješenja za poboljšanje performansi distributivnih mreža sa potencijalom da podstakne razvoj energetski efikasnih i ekološki održivih rješenja.

Tema rada, koja je za mene bila vrlo interesantna i inspirativna, predložena je i dogovorena sa prof. Zoranom Miljanićem i prof. dr Martinom Čalasanom. Zahvaljujem im se na savjetima prije i tokom procesa izrade.

Svom mentoru, prof. dr Martinu Čalasanu, zahvaljujem se na stručnoj pomoći i strpljenju tokom pisanja rada, kao i na kontinuiranom ohrabruvanju u daljoj profesionalnoj karijeri.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici i partneru, na podršci i razumijevanju, bez čije ljubavi i bodrenja ne bih uspjela u ostvarenju svog cilja.

Irena Laković

IZVOD RADA

U savremenim distributivnim mrežama, integracija DIEEE, pasivne distributivne mreže pretvara u aktivne, u kojima je nadgledanje i upravljanje znatno složenije i zahtijeva konstantna unapređenja. Efikasno upravljanje distributivnom mrežom postaje ključno za postizanje energetske održivosti i pouzdanosti EES-a, gdje su od posebnog značaja gubici aktivne snage. Ovi gubici su neizbjegni, ali se mogu redukovati integracijom distribuiranih izvora i adekvatnom rekonfiguracijom distributivne mreže. Neplansko priključivanje DIEEE i haotična rekonfiguracija mogu da pogoršaju tehničke performanse mreže. Rješenje koje se nameće zasniva se na koordinisanom, optimalnom dimenzionisanju i lociranju DIEEE i rekonfiguraciji distributivne mreže. Ovaj master rad se temelji na analizi različitih scenarija rekonfiguracije distributivne mreže i alokacije DIEEE odgovarajuće snage, u cilju minimizacije gubitaka, a time i poboljšanja naponskog profila, pri čemu je očuvana radikalnost mreže i obezbijeđeno napajanje svih potrošača. Mreža na ovaj način postiže značajna poboljšanja u efikasnosti i stabilnosti i postaje bolje prilagođena za savremene izazove.

U okviru istraživanja ovog master rada, biće dat pregled i kritička razmatranja postojećih pristupa rekonfiguraciji mreže, opisana u brojnim naučnim radovima, i lociranju DIEEE, sa fokusom na identifikaciju njihovih prednosti i nedostataka. Podstaknuti rastućom primjenom i dobrom performansama *L-shade* algoritma u elektroenergetici, u ovom radu će biti istražena mogućnost njegove primjene u rješavanju problema minimizacije gubitaka u distributivnoj mreži. Prema tome, cilj je minimizacija gubitaka snage u distributivnoj mreži kroz optimalnu rekonfiguraciju i alokaciju DIEEE, uz osvrт i na analizu uticaja koje navedene strategije imaju na naponske prilike, tokove snaga, stabilnost, itd. Algoritam paralelno sprovodi optimizaciju kapaciteta i položaja DIEEE, kao i rekonfiguraciju mreže, pema željenom kriterijumu. Istraživanje ovog master rada će biti sprovedeno na standardnim IEEE-33 i IEEE-69 (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers - Institut inženjera elektrotehnike i elektronike) distributivnim mrežama, a razmatraće se slučajevi samo rekonfiguracije mreže, samo alokacije DIEEE i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIEEE.

Kroz primjenu *L-shade* algoritma, ovaj rad teži da ponudi inovativna rješenja za poboljšanje performansi distributivnih mreža, omogućavajući efikasniju integraciju DIEEE, smanjenje gubitaka i povećanje pouzdanosti cjelokupnog sistema. Dodatno, ovo istraživanje ima potencijal i da doprinese razvoju održivih i ekološki prihvatljivih energetskih rješenja, a rezultati simulacije pokazuju se visoko konkurentnim u poređenju sa rezultatima drugih ekvivalentnih algoritama. Analizom dobijenih rezultata, izvedeni su relevantni zaključci opštег karaktera.

Ključne riječi: distributivna mreža, optimalna rekonfiguracija, integracija DIEEE, gubici aktivne snage, *L-shade* algoritam

ABSTRACT

In modern distribution networks, the integration of Distributed Energy Resources (DER) transforms passive networks into active ones, in which monitoring and control become significantly more complex and require constant improvement. Efficient management of the distribution network is crucial for achieving energy sustainability and reliability of the power system, with active power losses being of particular importance. These losses are inevitable, but can be reduced through the integration of DER and appropriate network reconfiguration. Unplanned DER integration and uncoordinated reconfiguration may worsen the technical performance of the network. A promising solution lies in the coordinated, optimal sizing and placement of DER units, along with the reconfiguration of the distribution network. This master thesis is based on an analysis of various scenarios of distribution network reconfiguration and the allocation of DER units with appropriate capacities, aimed at minimizing power losses and thereby improving the voltage profile, while maintaining the radial structure of the network and ensuring uninterrupted power supply to all consumers. In this way, the network achieves significant improvements in both efficiency and stability, becoming better suited to modern energy challenges.

As part of the research, a review and critical assessment of existing approaches to network reconfiguration and DER placement - described in numerous scientific publications, with a focus on identifying their advantages and limitations. Encouraged by the growing use and promising performance of the *L-shade* algorithm in power system applications, this thesis explores the possibility of applying this algorithm to solve the power loss minimization problem in distribution networks. Accordingly, the objective is to minimize power losses through optimal reconfiguration and DER allocation, while also analyzing the impact of these strategies on voltage conditions, power flows, system stability, and more. The algorithm simultaneously performs the optimization of DER capacities and locations, as well as the network reconfiguration, based on the desired objective function. The study is conducted using standard *IEEE-33* and *IEEE-69* test distribution networks, considering three distinct cases: network reconfiguration only, DER allocation only, and the simultaneous application of both.

Through the application of the *L-shade* algorithm, this work aims to offer innovative solutions for enhancing distribution network performance, enabling more efficient DER integration, reducing power losses, and increasing overall system reliability. Furthermore, the research holds potential to contribute to the development of sustainable and environmentally friendly energy solutions. Simulation results demonstrate high competitiveness when compared with other equivalent optimization algorithms, and relevant general conclusions are drawn from the analysis of the obtained results.

Keywords: distribution network, optimal reconfiguration, integration of DER, active power losses, *L-shade* algorithm

SADRŽAJ

1. UVOD	13
2. SAVREMENE DISTRIBUTIVNE MREŽE	17
2.1. Distribuirani izvori električne energije	21
2.1.1. Solarna energija	23
2.1.2. Energija vjetra	25
2.1.3. Hidroenergija	27
2.1.4. Biomasa	28
2.1.5. Geotermalna energija	28
2.2. Efekti priključenja DIE na mrežu	29
2.2.1. Tokovi snaga, naponske prilike i gubici u mreži sa DIE	31
2.2.2. Kvalitet električne energije uslijed integracije DIE	32
2.2.3. Zaštita i upravljanje u mreži sa DIE	33
2.3. Rekonfiguracija mreže	34
3. L-SHADE ALGORITAM	37
3.1. Primjena L-shade algoritma	37
3.1.1. Inicijalizacija	40
3.1.2. Mutacija	40
3.1.3. Prilagođavanje parametara	41
3.1.4. Ukrštanje	42
3.1.5. Selekcija	42
3.1.6. Linearno smanjenje veličine populacije	43
3.1.7. Kriterijumska funkcija	44
4. NUMERIČKI REZULTATI	48
4.1. Testne distributivne <i>IEEE</i> mreže	50
4.2. Ideja rekonfiguracije distributivne mreže	51
4.3. Analiza rezultata za mrežu od 33 čvora	53
4.4. Analiza rezultata za mrežu od 69 čvorova	76
5. ZAKLJUČAK	93
PRILOG	96
LITERATURA	102

SADRŽAJ SKRAĆENICA

DIEE – Distribuirani izvori električne energije

EES – Elektroenergetski sistem

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* - Institut inženjera elektrotehnike i elektronike

DIE – Distribuirani izvori energije

OIE – Obnovljivi izvori energije

NE – nuklearna elektrana

TE – termoelektrane

HE – hidroelektrane

GA – *Genetic Algorithm* - Genetički algoritam

GWA – *Gray Wolf Algorithm* - Algoritam sivih vukova

FWA – *FireWorks Algorithm* - Algoritam vatrometa

CSA – *Cuckoo search algorithm* - Algoritam pretrage kukavice

MBFOA – *Modified Bacterial Finding Optimization Algorithm* - Modifikovani algoritam za optimizaciju bakterijskog traženja

MPSO – *Modified Particle Swarm Optimization* - Modifikovani algoritam roja čestica

BAS – Beetles Antennae Search - prirodni proces buba za traženje hrane pomoću antenna

JFS - *Jellyfish Search* - metoda traganja za hranom meduza

MRF – *Manta Ray Foraging* - metoda traganja za hranom manta morskih pasa

ACO – *Ant Colony Optimization* - optimizacija kolonijom mrava

ABC – *Artificial Bee Colony* - optimizacija vještačkim rojem pčela

SIO-Q – *Quasi-Oppositional Swine Influenza Model Based Optimization with Quarantine* - metod inspiriran dinamikom gripe svinja

ACSA – *Adaptive Cuckoo Search Algorithm* - algoritam adaptivne pretrage kukavice

UVDA – *Uniform Voltage Distribution Algorithm* - zasnovan na ravnomjernoj raspodjeli napona

ABC – *Artificial Bee Colony* - optimizacija vještačkom kolonijom pčela

WOA – *Whale Optimization Algorithm* - algoritam optimizacije kitova

FN sistem – fotonaponski sistem

SE – solarne elektrane

VE – vjetroelektrane

KS – kratak spoj

DG – distribuirani generator

SADRŽAJ SLIKA

Slika 2.1 Infrastruktura tradicionalnih EES-a

Slika 2.2 Infrastruktura savremenih EES-a sa svojim osnovnim funkcijama

Slika 2.3 Komponente pametne elektroenergetske mreže

Slika 2.1.1 Trenutna i prognozirana struktura učešća pojedinih primarnih energenata u ukupnoj svjetskoj proizvodnji električne energije ¹

Slika 2.1.2 Proizvodnja električne energije u Crnoj Gori iz OIE i termoeletrane ¹

Slika 2.1.1.1 Osnovni elementi solarne elektrane (za mrežne sisteme)

Slika 2.1.1.2 Osnovni elementi solarne elektrane (za ostrvske sisteme)

Slika 2.1.1.3 Proizvodnja SE

Slika 2.1.2.1 Komponente vjetroagregata [38]

Slika 2.1.3.1 Osnovne komponente HE

Slika 2.2.2.1 Zavisnost THD₁ faktora od izlazne snage SE

Slika 3.1.1 Pseudo-kod L-shade algoritma

Slika 3.1.7.1 Upravljački prostor sa krivama ograničenja

Slika 3.1.7.2 Određivanje maksimuma kriterijumske funkcije

Slika 3.1.7.3 Ilustracija lokalnog i globalnog minimuma funkcije $f(x)$

Slika 3.1.7.4 Geometrijski prikaz potrebnih uslova optimalnosti

Slika 4.1.1 Standardna distributivna IEEE mreža sa 33 čvora

Slika 4.1.2 Standardna distributivna IEEE mreža sa 69 čvorova

Slika 4.2.1 Provjera radijalnog karaktera distributivne mreže

Slika 4.2.2 Standardna distributivna IEEE mreža sa 33 čvora

Slika 4.2.3 Standardna distributivna IEEE mreža sa 69 čvorova

Slika 4.3.1 Studija slučaja 2 - alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a u mreži sa 33 čvora

Slika 4.3.2 Različiti scenariji rekonfiguracije mreže i istovremene rekonfiguracije i alokacije odgovarajuće snage DIE za mrežu sa 33 čvora

Slika 4.3.3 Scenario 24 (mreža sa 33 čvora)

Slika 4.3.4 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 33 čvora

Slika 4.3.5 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Slika 4.3.6 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Slika 4.3.6 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Slika 4.3.7 Scenario 17 (mreža sa 33 čvora)

Slika 4.3.8 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 33 čvora

Slika 4.3.9 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Slika 4.3.10 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Slika 4.4.1 Studija slučaja 5 - alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a u mreži sa 69 čvorova

Slika 4.4.2 Različiti scenariji rekonfiguracije mreže i istovremene rekonfiguracije i alokacije odgovarajuće snage DIE za mrežu od 69 čvorova

Slika 4.4.3 Scenario 14 (mreža sa 69 čvorova)

Slika 4.4.4 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 69 čvora

Slika 4.4.5 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova

Slika 4.4.6 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova

Slika 4.4.7 Scenario 6 (mreža sa 69 čvorova)

Slika 4.4.8 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 69 čvora

Slika 4.4.9 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova

Slika 4.4.10 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova

SADRŽAJ TABELA

Tabela 4.1 Sažetak studija slučaja

Tabela 4.2 Dimenzije problema optimizacije i primijenjeni parametri za L-shade algoritam

Tabela 4.3.1 Gubici aktivne snage za različite scenarije za mrežu sa 33 čvora

Tabela 4.4.1 Gubici aktivne snage za različite scenarije za mrežu sa 69 čvorova

Tabela P.1 Opšti podaci o mreži sa 33 čvora

Tabela P.2 Opšti podaci o mreži sa 69 čvorova

Tabela P.3 Podaci o čvorovima za mrežu sa 33 čvora

Tabela P.4 Podaci o čvorovima za mrežu sa 69 čvorova

Tabela P.5 Podaci o granama za mrežu sa 33 čvora

Tabela P.6 Podaci o granama za mrežu sa 69 čvorova

1. UVOD

Tradicionalno koncipiran EES obezbeđuje prenos električne energije od centralnih elektrana do potrošača. Proizvodnja električne energije oslanja se na konvencionalne izvore - nuklearne, termo i hidroelektrane (NE, TE, HE). Usljed štetnog dejstva i ograničenosti fosilnih goriva, od gore pomenutih, HE imaju značajnu prednost i održiv karakter jer pomažu u smanjenju emisije CO₂, čime se smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu. Distributivna elektroenergetska mreža predstavlja završnu kariku EES-a, odgovornu za transport električne energije od prenosne mreže do krajnjih korisnika. Decenijama temelj pouzdanog i stabilnog snabdijevanja električnom energijom, ove mreže se suočavaju sa brojnim izazovima, koji su doveli do sve češće potrebe za integracijom distribuiranih izvora energije (DIE). Jedan od glavnih problema je starenje infrastrukture koja je sklona kvarovima i smanjuje pouzdanost sistema. Stalna varijabilnost i porast potražnje za električnom energijom dodatno otežavaju planiranje i upravljanje takvom mrežom. Održavanje postojeće infrastrukture i izgradnja novih objekata iziskuje ogromna finansijska sredstva, a vrijeme potrebno za obnovu nakon kvarova može biti dugotrajno, što dodatno povećava troškove. Ekstremne vremenske prilike mogu izazvati velike posljedice po mrežu, dok promjene u dinamici opterećenja mogu dovesti do nestabilnosti napona. Sve navedeno, kao i nezanemarljivi gubici energije, predstavljaju značajne izazove za tradicionalne distributivne mreže.

Kao rješenje ovih problema nameće se upotreba distribuiranih (obnovljivih) izvora električne energije (OIE) na svim naponskim nivoima, odnosno tranzicija ka čistoj energiji i održivom EES-u u cijelini. Integracija ovih decentralizovanih proizvodnih jedinica omogućava proizvodnju električne energije u blizini konzuma, smanjujući tako gubitke snage i doprinoseći efikasnijem prenosu električne energije do krajnjih potrošača. Ovi izvori imaju male nazivne snage i najčešće proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora, što ih čini jeftinijim i pogodnijim za zaštitu životne sredine u odnosu na konvencionalne elektrane velikih nazivnih snaga. Integracija OIE u elektroenergetske mreže, povlači za sobom potrebu za korišćenjem dodatnih uređaja i tehnologija kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost sistema. Proizvodnja energije iz ovih izvora varira u zavisnosti od vremenskih uslova, a to uzrokuje fluktuacije u naponskim prilikama i opterećenju mreže. Ove dodatne tehnologije mogu uključivati napredne regulacione sisteme, baterijske sisteme za skladištenje energije, pametne mreže i druge uređaje koje omogućavaju efikasno upravljanje proizvodnjom i potrošnjom energije. Sva potencijalna rješenja teže uspostavljanju održivog EES-a u cijelini.

Međutim, stalni rast potražnje za električnom energijom i nekontrolisana integracija DIEE, dovode do smanjenja pouzdanosti i stabilnosti mreža. Ovo uključuje pogoršanje naponskih prilika, preopterećenje komponenti, povećanje gubitaka aktivne snage, a što zajedno rezultira smanjenom efikasnošću distributivnih mreža i rastom operativnih troškova. Distributivne mreže igraju vitalnu ulogu u pouzdanoj isporuci električne energije, te je unapređenje njihove funkcionalnosti i stabilnosti od suštinskog značaja. Tradicionalne metode rekonfiguracije i lociranja DIEE odgovarajuće snage često ne postižu optimalne rezultate zbog složenosti problema i dinamičkih promjena u mreži.

Jedan od potencijalnih načina za prevazilaženje prethodnih problema jeste koordinisana optimalna alokacija i dimenzionisanje DIEE i rekonfiguracija distributivne mreže [1-3]. Efikasnim kombinovanjem ovih strategija, mreža postaje bolje pripremljena za savladavanje izazova modernih energetskih potreba. Rekonfiguracija i integracija DIEE zajedno mijenjaju dinamiku mreže, i ne samo da se minimizuju gubici, već se omogućava stabilnija i pouzdanija isporuka električne energije, što je ključno za održivost EES-a.

Distributivne mreže često uzrokuju značajne gubitke snage, ponekad u rasponu od 10-13% generisane energije [4]. Ovi visoki gubici ukazuju na neefikasnost i lošu regulaciju napona unutar mreže [5]. Pravilna rekonfiguracija mreže i lokalna instalacija DIEE, poput dizel generatora, solarnih panela i vjetrogeneratora, može smanjiti gubitke, poboljšati naponski profil i povećati kapacitet sistema. Zbog toga, optimalne veličine i lokacije DIEE, kao i grane u mreži koje se isključuju, treba da budu pažljivo proračunati, uzimajući u obzir sistemska ograničenja kao što su balans snage, kapacitet vodova i naponi u čvorovima.

U poslednjih nekoliko godina, mnoga istraživanja su se bavila minimizacijom gubitaka putem rekonfiguracije mreže [6,7]. U radu [8] prikazana je primjena genetičkog algoritma (*GA - Genetic Algorithm*) koji smanjuje gubitke aktivne snage i troškove prekida u napajanju kroz optimalnu rekonfiguraciju distributivne mreže. Problem je formulisan kao višekriterijumska funkcija sa ograničenjima, uključujući radijalnost mreže, naponske granice i kapacitete vodova, a simulacije su sprovedene na stvarnoj 35 kV mreži sa 54 čvora i 68 grana. Modifikovana verzija algoritma sivih vukova (*GWA - Gray Wolf Algorithm*) za rješavanje koncepta rekonfiguracije radijalnog distributivnog sistema prikazana je u radu [9]. Rad istražuje metode za optimizaciju konfiguracije kako bi se smanjili gubici energije, povećala pouzdanost sistema i poboljšao kvalitet napajanja. Predloženi pristup omogućava istovremeno unapređenje više aspekata, što je ključno za modernizaciju EES-a i implementaciju u pametne mreže, s nedostatkom što je testirana samo na malom standardnom *IEEE-33* sistemu, pa se sa sigurnošću ne može evaluirati primjenljivost algoritma na veće mreže. Skoriji naučni radovi koriste metaheurističke algoritme [10] za optimizaciju, kao što su algoritam vatrometa (*FWA - FireWorks Algorithm*) [11], mehanizam pretraživanja zasnovan na ponašanju kukavica (*CSA - Cuckoo Search Algorithm*) [12], modifikovani algoritam za optimizaciju inspirisan ponašanjem bakterija u potrazi za hranom (*MBFOA - Modified Bacterial Finding Optimization Algorithm*) [13] i modifikovani algoritam roja čestica (*MPSO - Modified Particle Swarm Optimization*) [14]. *FWA* algoritam se koristi za generisanje visokokvalitetnih rješenja problema optimizacije, uz poštovanje tehničkih ograničenja, a simulacije su sprovedene na standardnoj *IEEE-33* testnoj distributivnoj mreži. *CSA* primjenjuje jednostavan, ali moćan mehanizam pretraživanja, baziran na ponašanju kukavica koje polažu jaja u gnijezda drugih ptica. Algoritam generiše nova rješenja balansirajući između globalne i lokalne optimizacije, a ciljevi uključuju smanjenje gubitaka snage i poboljšanje naponskog profila. Algoritam je pokazao brzu konvergenciju, s nedostatkom što je moguće zaglavljivanje u lokalnim optimumima u složenijim mrežama. U radu [15], algoritam pretrage koji koristi prirodni proces buba za traženje hrane pomoću antena (*BAS - Beetles Antennae Search*) predstavljen je za optimalnu rekonfiguraciju distributivnih mreža. *BAS* zahtijeva samo jednu tačku evaluacije po iteraciji, što ga čini bržim i manje računski zahtjevnim u poređenju sa drugim algoritmima, ali to može dovesti do slabije pokrivenosti prostora rješenja. Nedavna istraživanja ističu važnost tehnika rekonfiguracije zajedno sa drugim optimizacionim strategijama radi unapređenja performansi mreže. Istraživanje predstavljeno u [16], koristi algoritam optimizacije inspirisan ponašanjem suncokreta koji se okreće prema suncu za pretragu prostora rešenja, uzimajući u obzir vjetrogeneratore i *Monte Carlo*¹ metodologiju za smanjenje gubitaka snage. Cilj je da se kroz optimalnu rekonfiguraciju mreže minimizuju gubici energije i poboljša naponski profil, uz poštovanje tehničkih ograničenja. Dodatno, algoritam potrage meduza za hranom, uključujući kretanje prema strujama i unutar roja (*JFS - Jellyfish Search*) i algoritam potrage morskih raža za hranom (*MRF - Manta Ray Foraging*), primijenjeni su za optimalno upravljanje distributivnim mrežama, u cilju minimizacije gubitaka snage, poboljšanja stabilnosti napona i povećanja pouzdanosti mreže, kroz istovremenu alokaciju DIEE i kondenzatorskih baterija [17, 18]. Obje studije potvrđuju visoku efikasnost metode u rješavanju problema i fleksibilnost u primjeni na različitim mrežama.

¹ *Monte Carlo* metoda je statistički i matematički pristup čija osnovna ideja je simulacija velikog broja scenarija pomoću slučajno generisanih podataka. Problem se definiše kao model ili funkcija cilja koja zavisi od nekih parametara. Metoda koristi slučajno generisane podatke (uzorke) za simulaciju različitih scenarija. Svaki uzorak se koristi za izračunavanje ishoda modela, tj. evaluira se funkcija cilja. Na osnovu velikog broja simulacija, računa se prosječan rezultat, koji predstavlja približno rješenje problema.

S druge strane, brojne studije posvetile su pažnju samo optimizaciji alokacije DIEE u cilju smanjenja gubitaka [19, 20]. Nedavna istraživanja usredstvljena su isključivo na alokaciju DIEE, koristeći različite strategije. U radu [21], matematički model koji koristi analitičke formule za izračunavanje optimalne veličine i lokacije DIEE pokazao je brzu konvergenciju i precizne rezultate u poređenju sa složenijim heurističkim algoritmima. Ipak, ograničenja u primjeni na nebalansirane mreže i dodatna prilagođavanja za složenije mrežne konfiguracije predstavljaju značajan nedostatak. U radu [22] korišćen je GA koji optimizuje lokaciju i veličinu DIEE, uključujući izbor tehnologije (solar, vjetar, biomasa), ali je uslijed složenosti implementacije u stvarnim mrežama upitna njegova šira primjena. Hibridni metod koji kombinuje optimizaciju kolonijom mrava (*ACO - Ant Colony Optimization*) i vještačkim rojem pčela (*ABC - Artificial Bee Colony*) predstavljen je u radu [23]. Kombinacija diskretnih (lokacija) i kontinuiranih (dimenzionisanje) struktura kako bi se iskoristile prednosti globalne pretrage *ACO* i lokalne pretrage *ABC* algoritma, omogućila je superiornost u poređenju sa drugim evolutivnim metodama optimizacije. Nadalje, metod inspiriran dinamikom gripe svinja (*SIO-Q - Quasi- Oppositional Swine Influenza Model Based Optimization with Quarantine*) primijenjen je na višekriterijumsku funkciju za optimalno postavljanje i dimenzionisanje DIEE, a kombinacijom globalne i lokalne pretrage dobijeni su bolji rezultati u odnosu na druge evolutivne tehnike [24]. Cilj je bio postići bolju regulaciju napona, smanjiti gubitke u mreži i poboljšati stabilnost napona. Ipak, u prethodnim studijama razmatrani su samo nominalni uslovi opterećenja. U istraživanju [25], predstavljen je višekriterijumski hibridni algoritam velikog praska (*BB-BC - Big Bang-Big Crunch*) za alokaciju DIEE, primijenjen na dvije testne mreže sa 33 i 25 čvorova, uzimajući u obzir promjenljivost opterećenja. Metoda *MRF* za pronalaženje optimalne pozicije DIEE implementirana je na testnim *IEEE-33*, *IEEE-69* i *IEEE-85* distributivnim mrežama [26]. U pomenutom radu postignuto je samo smanjenje gubitaka snage, dok su varijacije napona i ekološki uticaji zanemareni.

Istovremena rekonfiguracija mreže i alokacija DIEE, predmet su istraživanja ograničenog broja studija. Ovim pristupom se mogu postići bolji rezultati u pogledu ukupnih gubitaka, naponskih prilika i tokova snaga, u odnosu na pojedinačne strategije. Istraživanje [27] koristi algoritam inspiriran principom ravnoteže masa u fizici, kombinuje eksploraciju (široko pretraživanje) i eksploraciju (fino podešavanje) prostora rješenja, brzo konvergira, a pri tom pokušava da izbjegne lokalne minimume. U radu [28], za rješavanje optimizacionog problema upotrijebljen je algoritam *FWA*. Prvo se sprovodi rekonfiguracija mreže, a zatim se izvršava alokacija DIE uzimajući u obzir nova stanja sistema. Metod ne uzima se u obzir nesigurnost u potrošnji ili varijabilnost proizvodnje iz distribuiranih generatora. Ovi rezultati su unaprijeđeni primjenom algoritma adaptivne pretrage kukavice (*ACSA - Adaptive Cuckoo Search Algorithm*) u radu [29]. Kombinacijom diskretnih i kontinuiranih varijabli, postiže se istovremena rekonfiguracija mreže (diskretna) i alokacija DIEE (kontinuirana). Pokazuje bolje performanse u pogledu brzine konvergencije i smanjenja gubitaka u odnosu na druge algoritme. Jedan od konkurentnijih metoda je heuristički algoritam konstruktivne rekonfiguracije, zasnovan na ravnomjernoj raspodjeli napona (*UVDA - Uniform Voltage Distribution Algorithm*) [30], koji je postigao značajne rezultate u rješavanju problema rekonfiguracije mreže uz optimalnu alokaciju DIEE. Predstavlja unaprijeđeni pristup koji koristi devijaciju napona i gubitke kao osnovu za odlučivanje tokom optimizacije. Manja fleksibilnost za višekriterijumske probleme i ograničena primjenjivost na veće i kompleksnije mreže, gdje su potrebni napredniji algoritmi su nedostaci ovog pristupa. Takođe, metoda vještačke kolonije pčela (*ABC - Artificial Bee Colony*) korišćena je u istraživanju [31] za optimalnu alokaciju DIEE i rekonfiguraciju mreže sa funkcijom smanjenja gubitaka i prosječnim padom napona, pri čemu ekološki efekti nijesu uzeti u obzir. U radu [32] je primijenjen adaptivni modifikovani algoritam optimizacije inspiriran ponašanjem kitova tokom lova (*WOA - Whale Optimization Algorithm*), u cilju smanjenja gubitaka u mreži i poboljšanja stabilnosti napona, a radikalna struktura distributivne mreže ostaje očuvana. Uz uvažavanje nesigurnosti u opterećenju, algoritam je i adaptivan, što znači da se parametri tokom izvršavanja automatski prilagođavaju.

Podstaknuti rastućom primjenom i dobrom performansama *L-shade* algoritma [33], u ovom master radu je predstavljena mogućnost njegove primjene u rješavanju optimizacionog problema. Cilj je minimizacija gubitaka aktivne snage kroz istovremeno, optimalno dimenzionisanje i lociranje DIEE i različite scenarije rekonfiguracije distributivne mreže, koje prethodni naučni radovi nijesu razmatrali. Sve veća integracija DIEE, iako donosi brojne prednosti, može dovesti i do smanjenja pouzdanosti i stabilnosti mreže, pojave devijacije napona i preopterećenja komponenti mreže, pogoršanja kvaliteta električne energije, povećanja gubitaka, troškova prenosa energije, itd. Upravo zbog toga, optimalna alokacija i dimenzionisanje DIEE i rekonfiguracija distributivne mreže, postaju ključni faktori za postizanje poboljšanih tehničkih performansi mreže. Istraživanje ovog master rada će biti sprovedeno na standardnim IEEE-33 i IEEE-69 distributivnim mrežama, a razmatraće se slučajevi samo rekonfiguracije mreže, samo alokacije DIEE i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIEE.

Ostatak ovog master rada organizovan je na sljedeći način:

U drugom poglavlju biće napravljen osvrt na izazove sa kojima se susrijeću savremene distributivne mreže, rekonfiguracija mreže, kao i prednosti i mane DIEE. Takođe, biće opisan princip rada karakterističnih DIEE i efekti njihovog priključenja na performanse mreže. U istom poglavlju će biti opisane i standardne, testne IEEE-33 i IEEE-69 distributivne mreže, koje su iskorišćene za analizu problema u ovom radu.

U trećem poglavlju biće dat detaljan opis *L-shade* algoritma, njegovih karakteristika, kao i način primjene u rješavanju optimizacionih problema. Takođe, data je matematička formulacija samog problema optimizacije i opisan način na koji se traži minimum i maksimum kriterijumske funkcije.

U četvrtom poglavlju, upotrebom *L-shade* algoritma na testnim distributivnim mrežama IEEE-33 i IEEE-69, analizirani su slučajevi samo rekonfiguracije, samo alokacije DIEE i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIEE. Efekti sprovodenja navedenih strategija u distributivnoj mreži, uključujući i napomske prilike, predstavljeni su tabelarno i grafički sa akcentom na gubitke aktivne snage za svaki proučavani scenario. Na kraju, biće sumirani rezultati i napravljeno poređenje sa sličnim prethodnim istraživanjima, ali i dati komentari o konkurentnosti i primjenljivosti metoda u realnim uslovima i mogućnosti unapređenja.

U petom poglavlju, zaključku, biće napravljen osvrt na cijelokupno istraživanje, predstavljena završna razmatranja i definisani mogući pravci daljeg istraživanja iz ove oblasti.

2. SAVREMENE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Distributivna elektroenergetska mreža predstavlja završnu kariku EES-a, odgovornu za transport električne energije od prenosne mreže do krajnjih korisnika. Tradicionalne distributivne mreže su decenijama bile temelj pouzdanog i stabilnog snabdijevanja potrošača električnom energijom. Njihov dizajn i operativna logika oslanjaju se na zastarjele tehničke principe koji danas sve više pokazuju svoja ograničenja, naročito u kontekstu savremenih zahtjeva energetske tranzicije, decentralizacije i dekarbonizacije. Ovakve mreže nazivaju se pasivnim, jer ne posjeduju sposobnost aktivnog upravljanja energetskim tokovima, kao ni mehanizme za povratne informacije i adaptivno ponašanje, a električna energija se isporučuje jednosmjerno – iz centralizovanih izvora krajnjim korisnicima.

Pasivne mreže ne uključuju prisustvo DIE, kao što su solarne fotonaponske (FN) elektrane (SE), vjetroelektrane (VE) ili mikroturbine, niti niti obezbeđuju uslove za njihovu efikasnu integraciju. Radikalna konfiguracija tradicionalnih distributivnih mreža, gdje svaka grana vodi od glavne trafostanice prema određenom broju potrošača, jednostavna je za projektovanje i analiziranje, ali je istovremeno veoma osjetljiva na kvarove - prekid na jednoj grani može izazvati gubitak napajanja za cijelu dionicu. Uobičajeno, ove mreže ne raspolažu mogućnostima automatske rekonfiguracije, niti naprednim sistemima za detekciju i izolaciju kvarova, pa se većina intervencija obavlja manuelno. Komunikacija u ovim sistemima je minimalna ili potpuno odsutna, što ograničava mogućnosti monitoringa, analize i optimizacije rada mreže u realnom vremenu. Gubici aktivne snage, predstavljaju značajan problem u pasivnim mrežama, a zastarjela infrastruktura sklona je kvarovima, što smanjuje pouzdanost i otežava održavanje sistema. Nestabilnost naponskih prilika, uzrokovana promjenama u opterećenju, dodatno komplikuje planiranje i upravljanje sistemom. Modernizacija mreže, proširenje i izgradnja novih kapaciteta, zahtijevaju značajna finansijska ulaganja.

Tradicionalno koncipiran EES suočava se i sa ekološkim izazovima. TE, koje dominiraju u proizvodnji električne energije u svijetu, oslanjaju se na sagorijevanje fosilnih goriva, pri čemu dolazi do emisije velikih količina ugljen-dioksida (CO_2) i drugih štetnih gasova koji doprinose zagađenju vazduha i klimatskim promjenama. Uz to, rezerve fosilnih goriva su ograničene i gotovo iscrpljene, što dugoročno predstavlja ozbiljan problem za stabilnost snabdijevanja potrošača električnom energijom.

U savremenom EES-u, koji karakterišu dinamične promjene u potrošnji, povećano prisustvo OIE i potrebe za održivošću, tradicionalne pasivne distributivne mreže više ne mogu da odgovore na ključne tehničke, operativne i ekonomski izazove. Njihova transformacija ka aktivnim i pametnim mrežama postao je imperativ u pravcu povećanja energetske efikasnosti, pouzdanosti i održivosti cjelokupnog EES-a [34].

Na Slici 2.1, prikazana je struktura tradicionalnog EES-a, koji karakteriše jednosmjerni protok električne energije - od velikih proizvodnih postrojenja, poput HE, TE i NE, ka krajnjim korisnicima, uključujući industrijske potrošače i domaćinstva [35]. Ovakav sistem zasniva se na centralizovanoj proizvodnji energije.



Slika 2.1 Infrastruktura tradicionalnih EES-a

U posljednjoj deceniji, tradicionalni model proizvodnje i prenosa električne energije doživio je značajne promjene pod uticajem globalnog porasta potrošnje i rastućih opterećenja. Ovi trendovi su doveli do zasićenja mrežnih kapaciteta i povećanja negativnih ekoloških efekata velikih centralizovanih elektrana, uključujući globalno zagrijavanje i visoku emisiju CO₂. Istovremeno, promjene u potrošnji električne energije i sve veća integracija OIE, ubrzali su tranziciju ka "zelenijem" i održivijem EES-u. Tradicionalna elektroenergetska mreža razvijena je u napredniji i inteligentniji sistem, koji omogućava efikasnije upravljanje proizvodnjom, distribucijom i potrošnjom električne energije. Kako bi odgovorile na zahtjeve savremenog energetskog okruženja, distributivne mreže moraju biti sposobne da se adaptiraju promjenama u realnom vremenu, brzo detektuju i otklone poremećaje, kao i da omoguće aktivnu ulogu potrošača u upravljanju potrošnjom.

Sigurnost, fleksibilnost, robusnost, pouzdanost i efikasnost EES-a značajno je unaprijeđena primjenom koncepta savremenih pametnih mreža. Prednost ove tehnologije je mogućnost dvosmjernog protoka energije i podataka, što je ujedno osnova za aktivno upravljanje sistemom u realnom vremenu. Pametne mreže omogućile su sve veće prisustvo DİEE - proizvodne jedinice, direktno integrisane u distributivne mreže ili vododve, u blizini krajinjih potrošača. Njihova implementacija doprinosi poboljšanju performansi mreže, povećanju kvaliteta isporučene električne energije i pouzdanosti sistema, te smanjenju gubitaka i odlaganju potrebe za dodatnim infrastrukturnim ulaganjima i proširenjem kapaciteta.

Lokacija i kapacitet (instalisana snaga) DİEE mogu značajno da utiču na performanse mreže. Takođe, varijabilna proizvodnja električne energije uslijed zavisnosti od vremenskih uticaja je njihov nedostatak, što za posljedicu ima izazov preciznog predviđanja proizvodnje iz DİEE. U slučajevima kada se ovi izvori integriraju u mrežu bez prethodne detaljne studije i adekvatnog planiranja, mogu se javiti problemi poput pogoršanja naponskog profila, preopterećenja određenih komponenti sistema i povećanja ukupnih gubitaka aktivne snage. Zato je potrebno precizno odrediti instalirane kapacitete, geografski raspored i vremensku dinamiku DİEE, jer se jedino na taj način mogu maksimizovati tehničke i ekonomski koristi njihove integracije. Dakle, pažljiva analiza i sveobuhvatan pristup integraciji DİE, kao i razumijevanje njihovog uticaja na rad i stabilnost elektroenergetskih mreža, predstavlja pravi put ka uspješnoj i efikasnoj implementaciji DİE tehnologija u distributivnu mrežu.

Pozitivni efekti proizvodnje električne energije iz DIE su:

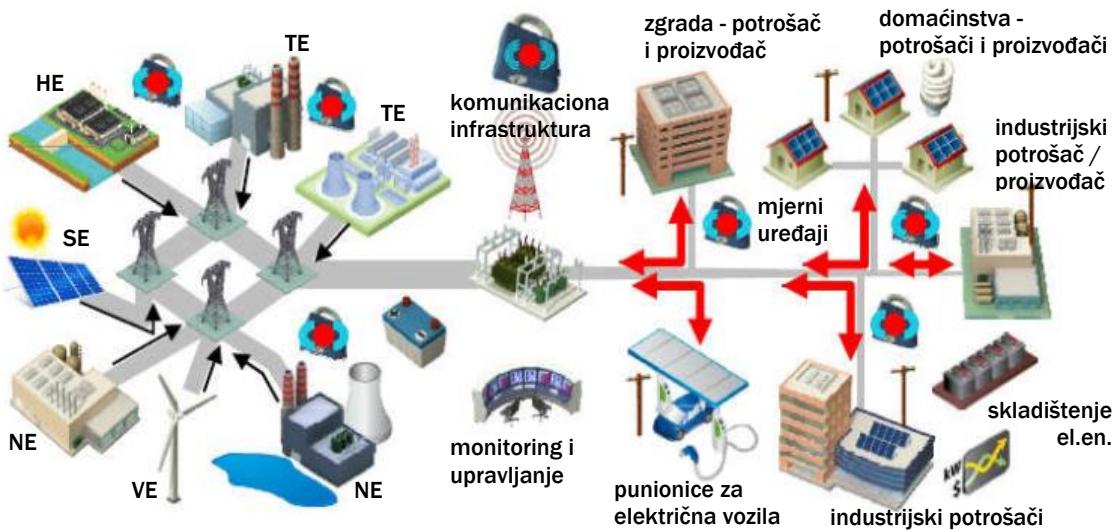
- Smanjuju se gubici u prenosu i distribuciji uslijed proizvodnje električne energije u neposrednoj blizini potrošača.
- Integracijom DIE smanjuje se zavisnost od centralizovanih proizvodnih jedinica, a sistem postaje otporniji na prekide u snabdijevanju.
- Sve veće prisustvo OIE doprinosi očuvanju životne sredine i klimatskoj stabilnosti.
- Integracija DIE omogućava stabilizaciju naponskog profila, redukciju gubitaka i smanjenje opterećenja na ključnim komponentama sistema.

Ograničeni kapaciteti za proizvodnju električne energije, uz stalne promjene opterećenja, proces upravljanja i kontrole mreže čine složenim i izazovanim. U takvim uslovima, minimizacija gubitaka snage ne može biti efikasno postignuta primjenom jedinstvene, fiksne mrežne konfiguracije za sve režime varijabilnog opterećenja. Kao rješenje se nameće česta rekonfiguracija distributivne mreže. Ipak, simultana primjena strategija rekonfiguracije mreže i optimalne alokacije DIE, pokazuje se kao moćan alat za smanjenje gubitaka snage, poboljšajući stabilnost rada mreže i unapređenju naponskog profila.

Rekonfiguracija distributivne mreže donosi brojne prednosti:

- Promjena strukture mreže omogućava optimizaciju tokova snage, čime se značajno smanjuju gubici i izbjegava preopterećenje vodova.
- Pomaže u stabilizaciji napona u svim čvornim tačkama distributivne mreže.
- Promjenom topologije, mreža se može bolje pripremiti za integraciju OIE i stanica za punjenje električnih vozila.
- Rekonfiguracija doprinosi smanjenju prekida u napajanju kroz fleksibilnije upravljanje mrežom i bržim reakcijama u slučaju kvarova.

Na Slici 2.2, prikazani su ključni elementi koji čine potpuno funkcionalan savremeni pametni sistem. Ovu infrastrukturu karakteriše dvosmjerni protok električne energije u realnom vremenu, omogućavajući dinamičku interakciju između proizvođača i potrošača. Pored toga, sastavni dio ovakvog sistema čine i uređaji za skladištenje energije, pametni mjerni uređaji, napredni sistemi za upravljanje potrošnjom, te digitalne platforme za praćenje i optimizaciju rada mreže. Ove komponente zajedno doprinose povećanju efikasnosti, fleksibilnosti i pouzdanosti EES-a, smanjujući operativne gubitke i omogućavajući bolje balansiranje opterećenja.



Slika 2.2 Infrastruktura savremenih EES-a sa svojim osnovnim funkcijama

Savremene energetske sisteme još uvijek karakterišu velike centralizovane proizvodne jedinice, ali se istovremeno odvija proces tranzicije ka obnovljivim i čistijim izvorima energije i savremenijim tehnologijama. U tradicionalnim distributivnim mrežama postojali su isključivo pasivni potrošači, transformatori, baterije kondenzatora, vodovi i druge komponente, a zaštitni sistemi su planirani pod pretpostavkom da u mreži ne postoje izvori energije. Pojava DIE, uređaja za skladištenje energije, kao i naprednih tehnologija i šire primjene električnih vozila, kao novih neizostavnih elemenata sistema, može značajno uticati na pouzdanost i funkcionalnost konvencionalnih zaštitnih mehanizama. Sada aktivna distributivna mreža sa dvosmjernim protokom energije i informacija, zahtijeva aktivno učešće potrošača u upravljanju energetskim tokovima [35].

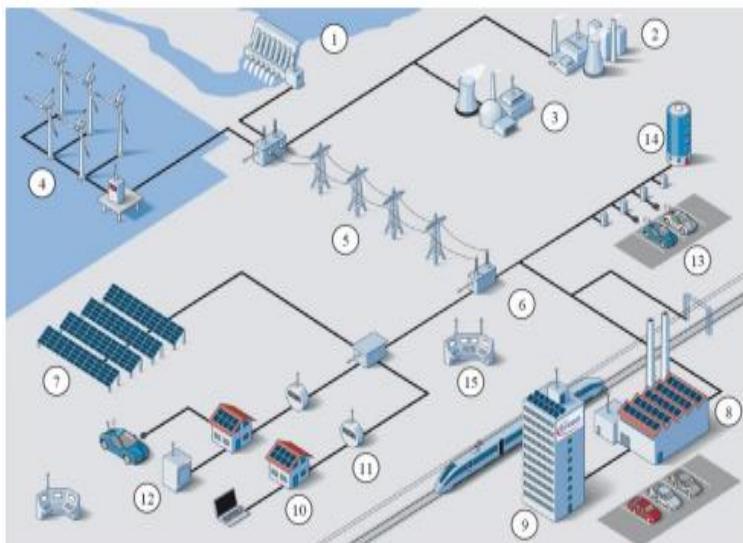
Prelazak sa pasivne na aktivnu distributivnu mrežu sa sobom nosi niz izazova:

- Upravljanje mrežom postaje složenije uslijed dvosmjernog toka energije i varijabilne proizvodnje obnovljivih izvora, što zahtijeva napredne strategije planiranja.
- Varijacije u proizvodnji energije iz OIE mogu uzrokovati nestabilnosti u mreži, povećavajući potrebu za naprednjim metodama balansiranja opterećenja i regulacije napona.
- Optimalna raspodjela opterećenja i efikasno upravljanje energetskim tokovima zahtijeva primjenu naprednih sistema za koordinaciju proizvodnih izvora i sistema za skladištenje energije.
- Digitalizacija i razvoj komunikacionih sistema donosi nove rizike, te se nameće i potreba za novim mjerama za zaštitu podataka i mrežne infrastrukture.
- Transformacija EES-a zahtijeva značajna finansijska ulaganja u nove tehnologije, pametne mreže i napredne sisteme upravljanja, uz potrebu za održivim finansijskim modelima koji podržavaju ovu tranziciju.

Kako bi se ovi izazovi uspješno prevazišli, neophodno je kontinuirano unapređenje tehnologija, razvoj algoritama za optimizaciju mrežnih operacija i uvođenje regulatornih okvira koji će podržati efikasnu i sigurnu tranziciju ka aktivnim, pametnim mrežama.

Pametne mreže (Slika 2.3) predstavljaju napredan tehnološki koncept koji omogućava efikasniju integraciju DIE. Ove mreže mijenjaju tradicionalni način rada EES-a, omogućavajući stabilniji, fleksibilniji i precizniji pogon kroz primjenu savremenih tehnologija upravljanja, monitoringa i optimizacije energetskih tokova.

Najznačajnije komponente pametne mreže sa slike 2.3 su:



- 1 - HE
- 2 - TE
- 3 - NE
- 4 - VE
- 5 - visokonaponski prenosni sistem
- 6 - distributivna mreža
- 7 - SE
- 8 - industrija
- 9 - komercijalni korisnici
- 10 - individualni korisnici
- 11 - pametni mjerni uređaji
- 12 - upravljivi uređaji
- 13 - električna vozila
- 14 - uređaji za skladištenje energije
- 15 - upravljački informaciono-komunikacioni sistemi.

Slika 2.3 Komponente pametne elektroenergetske mreže

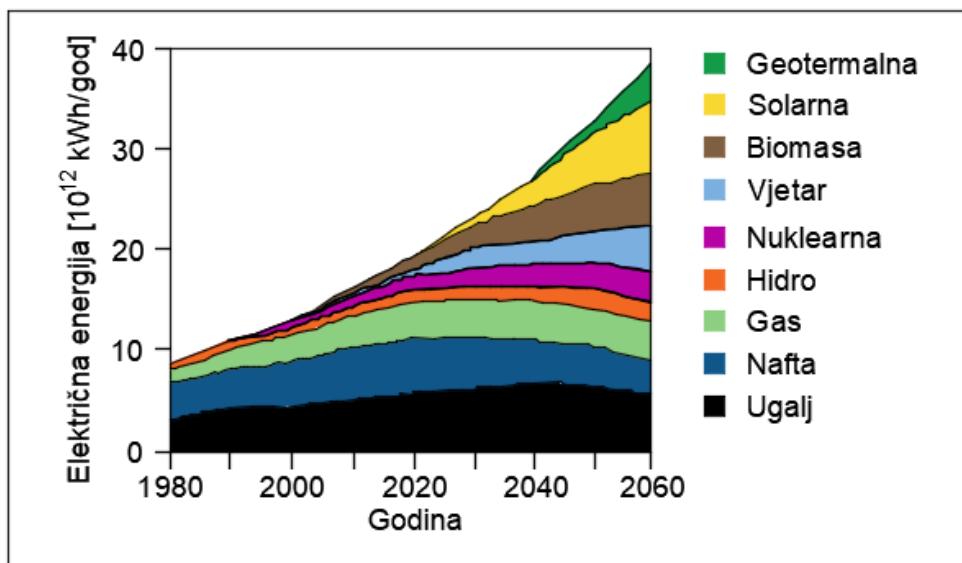
2.1. Distribuirani izvori električne energije

Ubrzani razvoj globalne ekonomije rezultira sve većom potrošnjom prirodnih resursa, pri čemu je dominantna upotreba fosilnih goriva. Posebno zabrinjava činjenica da se svijet bliži iscrpljivanju neobnovljivih, konvencionalnih energetskih izvora koji predstavljaju osnovu energetske proizvodnje, što ugrožava dugoročnu stabilnost i efikasnost EES-a. Istovremeno, nekontrolisan industrijski razvoj i potrošnja neobnovljivih resursa, negativno utiču na životnu sredinu, ugrožavajući prirodne ekosisteme i kvalitet života. U ovakvim okolnostima, koncept održivog razvoja predstavlja rješenje za očuvanje prirodnih dobara, uz ostvarenje optimalnih ekonomskih rezultata, a sve sa ciljem očuvanja resursa za buduće generacije.

DIE su postali nosioci energetske tranzicije na globalnom nivou. Distribuirana proizvodnja najčešće podrazumijeva korišćenje OIE, dok se neobnovljivi izvori energije koriste znatno rjeđe. Neprestan pad specifičnih troškova ulaganja u OIE, pozicionira ih kao najekonomičniju i najperspektivniju opciju za budući energetski razvoj. SE koje imaju najbrži pad ovih troškova, zajedno sa VE, prednjače u globalnoj dekarbonizaciji i "prijete" da postanu vodeća tehnologija obnovljivih izvora za buduće energetske sisteme. I pored brojnih prednosti, varijabilna proizvodnja, jedan je od izazova prilikom integracije ovih izvora u mrežu. Međutim, ovo nije karakteristika svih DIE - elektrane na biomasu, biogas, geotermalnu energiju i akumulacione HE imaju sposobnost da proizvode energiju kada je to potrebno, u zavisnosti od potražnje u mreži, što omogućava veću stabilnost u napajanju.

U ovom poglavlju se daje sažet prikaz SE i VE, koje se svrstavaju u varijabilne tehnologije i HE kao stabilnog obnovljivog izvora, sa najvećim potencijalom da predvode zelenu energetsku tranziciju. Sunčeva energija dostupna je samo tokom dnevnih časova, ili uopšte nije dostupna u slučaju nepovoljnih vremenskih uslova poput oblačnog vremena, čime se značajno ograničava proizvodnja iz SE. Materijali od kojih se izrađuju solarni paneli nijesu lako razgradivi, što za posljedicu ima nagomilavanje otpada. Ova situacija može nepovoljno uticati na ekološku održivost korišćenja OIE. Slično, rad VE zavisi od brzine vjetra - proizvodnja započinje pri brzini većoj od 5 m/s, dok pri brzini od oko 25 m/s (poznatoj kao brzina isključivanja) obustavlja rad iz sigurnosnih i razloga i efikasnosti rada turbine. Ovo predstavlja izazov savremenih distributivnih mreža, jer proizvodnja iz ovih izvora često nije usklađena sa trenutnim obrascima potrošnje električne energije. Upravo ova neusklađenost, za posljedicu ima proizvodnju obnovljivih izvora veću od trenutnih potreba u sistemu ili nedovoljnu proizvodnju u odnosu na stvarne, trenutne zahteve za električnom energijom. Za nesmetanu integraciju varijabilnih DIE ovo je glavna prepreka, budući da EES zahtijeva neprekidno balansiranje, gdje u svakom trenutku proizvodnja mora precizno odgovarati potrošnji. U suprotnom, može doći do neravnoteže koja izaziva ozbiljne poremećaje frekvencije i napona. Jedan od najvažnijih, stabilnih prirodnih resursa za proizvodnju električne energije je i voda. Efikasnost HE zavisi od geografskih uslova i dostupnosti resursa - količine vode mogu biti ograničene uslijed sezonskih ili klimatskih promjena ili suša. U tom kontekstu, hidroenergija se često prepoznaće kao "čista energija" koja ne troši resurse, ali zahtijeva pažljivo planiranje i očuvanje prirodnog okruženja.

Razvoj i primjena novih tehnologija su osnova za realizaciju tranzicije prema održivom energetskom sistemu. Iako je udio u proizvodnji električne energije iz OIE sve značajniji na globalnom nivou, još uvijek primarni izvori električne energije su neobnovljivi izvori: ugalj, nafta, prirodni gas, nuklearna energija. Na slici 2.2.1 data je trenutno i prognozirano stanje u proizvodnji električne energije iz različitih energetskih izvora.

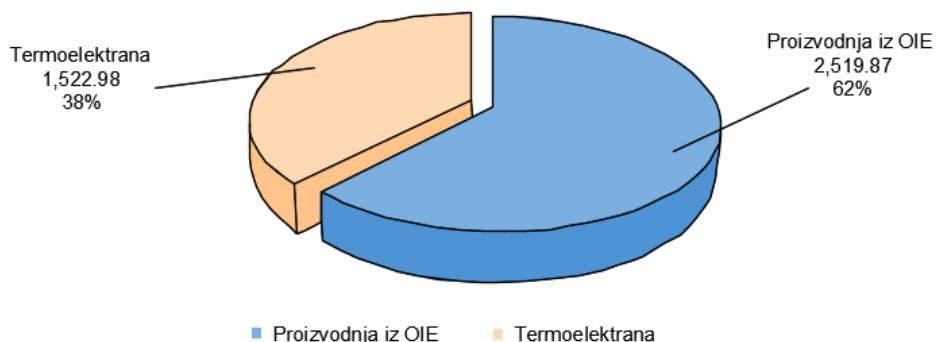


Slika 2.1.1 Trenutna i prognozirana struktura učešća pojedinih primarnih energetskih izvora u ukupnoj svjetskoj proizvodnji električne energije¹

U 2023. godini u Crnoj Gori, proizvodnja iz OIE ostvarena je u iznosu od 2.519,62 GWh što čini oko 62% ukupne proizvodnje, a proizvodnja TE "Pljevlja" je iznosila 1.522,98 GWh ili oko 38% ukupne proizvodnje, što se može vidjeti na slici 2.1.2.

¹ Preuzeto iz "Distribuirani izvori električne energije – Predavanja, 2018"

Proizvodnja iz OIE i Termoelektrane u 2023.godini



Slika 2.1.2 Proizvodnja električne energije u Crnoj Gori iz OIE i termoeletrane¹

2.1.1. Solarna energija

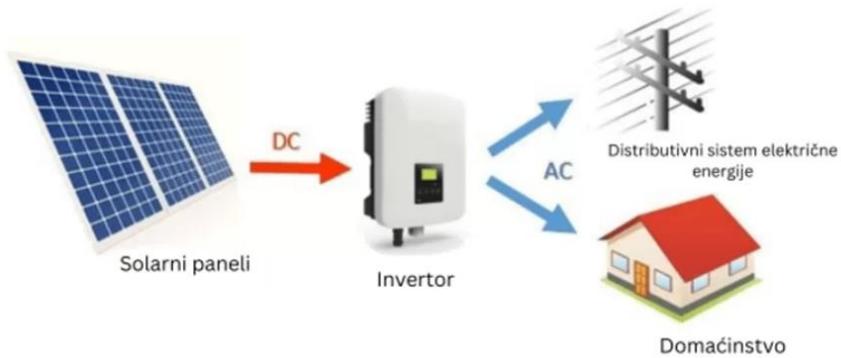
Količina sunčeve energije koja dospije do površine Zemlje tokom samo jednog sata odgovara ukupnoj godišnjoj potrošnji energije u svijetu, ali postojeće tehnologije još uvijek nijesu dostigle nivo razvoja koji bi omogućio potpuno iskorišćenje ovog potencijala. Prepostavlja se da bi energija Sunca, prikupljena tokom jednog dana, mogla da zadovolji energetske potrebe čovječanstva tokom narednih decenija [36]. Takođe, smatra se da svega 1% raspoložive solarne energije može da pokrije rastuće potrebe za električnom energijom današnjice.

Trenutne solarne tehnologije omogućavaju ograničeno iskorišćenje sunčeve energije, a njena varijabilna dostupnost, uslovljena vremenskim, sezonskim i geografskim faktorima, otežava njenu neprekidnu eksplotaciju. Da bi energija proizvedena iz solarnih izvora bila dostupna u vijek, neophodno je razvijati sisteme za njeno skladištenje i distribuciju. Efikasnost solarnih tehnologija zavisi od brojnih činilaca kao što su osunčanost, konfiguracija terena i zagađenost, dok šira primjena zavisi i od ekonomskih, društvenih i političkih okolnosti.

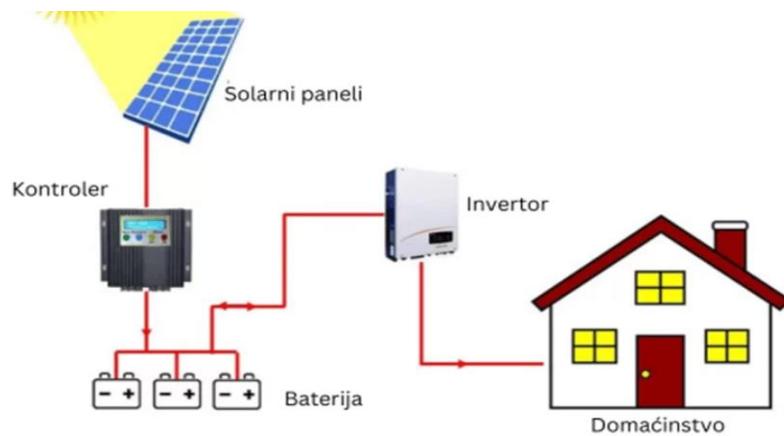
Solarna energija predstavlja efikasno rješenje za snabdijevanje energijom udaljenih i teško dostupnih lokacija, gdje je izgradnja mrežne infrastrukture otežana ili neisplativa. Istovremeno, sve češće se primjenjuje i u urbanim sredinama, gdje se Sunčeva energija konvertuje u električnu energiju za napajanje javne rasvjete, punjenje električnih uređaja na javnim punionicama i drugih potreba, doprinoseći održivom razvoju gradskih sredina.

Solarni električni sistemi, bez obzira na tip, sastoje se iz tri osnovne komponente. Prva su solarni FN paneli, koji pretvaraju sunčevu energiju u jednosmjernu električnu energiju. Druga ključna komponenta je invertor, koji tu energiju transformiše u naizmjeničnu struju, prilagođenu standardnim potrošačima. Treći element, prisutan kod autonomnih sistema, je sistemi za akumulaciju energije, najčešće u vidu baterija, koji omogućavaju skladištenje, te upotrebu energije i u trenucima kada nema sunčeve svjetlosti. Pored ovih glavnih dijelova, prateća infrastruktura solarnih sistema uključuje električne vodove, zaštitne uređaje i konstrukciju za montažu panela. Prikaz solarnog sistema direktno priključenog na mrežu (*on-grid*) dat je na slici 2.1.1.1, dok je jedan autonomni, ostrvski sistem (*off-grid*) predstavljen na slici 2.1.1.2. Ovakav sistem funkcioniše nezavisno od javne elektroenergetske mreže.

¹ Preuzeto iz "Izvještaja o realizaciji energetskog bilansa za 2023. godinu", Ministarstvo energetike i rудarstva, mart 2024.godine



Slika 2.1.1.1 Osnovni elementi solarne elektrane (za mrežne sisteme)



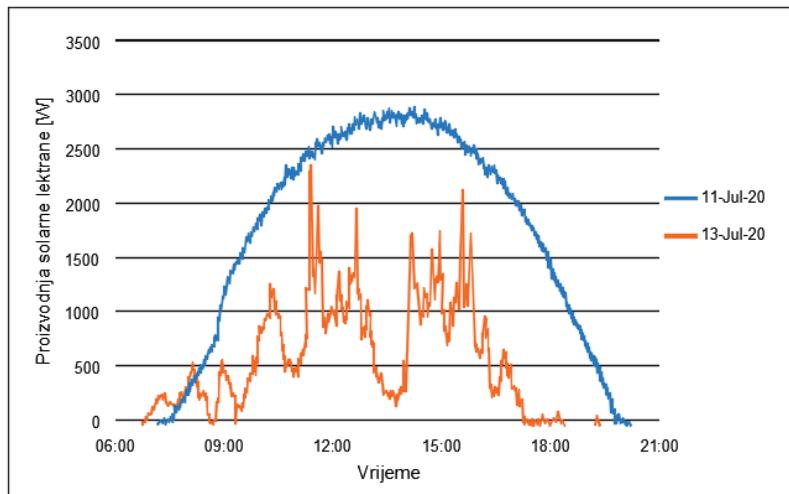
Slika 2.1.1.2 Osnovni elementi solarne elektrane (za ostrvske sisteme)

Rad FN panela podložan je uticaju različitih klimatskih i ambijentalnih uslova. Visoke temperature smanjuju efikasnost pretvaranja sunčeve svjetlosti u električnu energiju, dok niske temperature, u kombinaciji sa smanjenom Sunčevom radijacijom, negativno utiču na izlaznu snagu sistema. Dodatno, faktori poput oblačnog neba, padavina, nakupljenog snijega i prisustva prašine na površini panela mogu ograničiti njihov učinak. Zato je kontinuirano održavanje i pravilno dimenzionisanje sistema ključno za stabilnu proizvodnju.

Slika 2.1.1.3 prikazuje uticaj vremenskih prilika na rad solarnih panela. Proizvodnja solarnih panela zavisi od različitih faktora:

- Vedri dani omogućavaju maksimalnu proizvodnju iz FN sistema, ali previsoke temperature mogu smanjiti njihovu efikasnost. Ovo se može ublažiti pravilnom orientacijom i nagibom panela, što omogućava prirodnu cirkulaciju vazduha i hlađenje.
- Oblačni uslovi umanjuju proizvodnju, ali rješenje su solarni paneli optimizovani za difuznu svjetlost, koji mogu djelimično nadoknaditi gubitke i povećati energetsku efikasnost.
- Kratkoročno, padavine mogu pozitivno djelovati uklanjanjem nataloženih nečistoća sa površine panela, ali u dužem vremenskom okviru smanjuju ukupnu proizvodnju električne energije zbog slabijeg sunčevog zračenja.

- Nakupljanje snijega na površini FN panela blokira pristup sunčevoj energiji, čime se značajno smanjuje proizvodnja električne energije. Za prevazilaženje ovih okolnosti, u regijama s čestim padavinama se primjenjuje sistem sa automatskim uklanjanjem snijega ili montaža panela pod odgovarajućim nagibom kako bi se olakšalo njegovo oticanje.
- Blagi vjetrovi mogu omogućavaju hlađenje te poboljšavaju rad panela, dok snažni udari vjetra predstavljaju opasnost zbog mogućih mehaničkih oštećenja sistema. Zato je u područjima s jakim vjetrovima neophodno koristiti konstrukcije otporne na ekstremne spoljašnje uticaje.



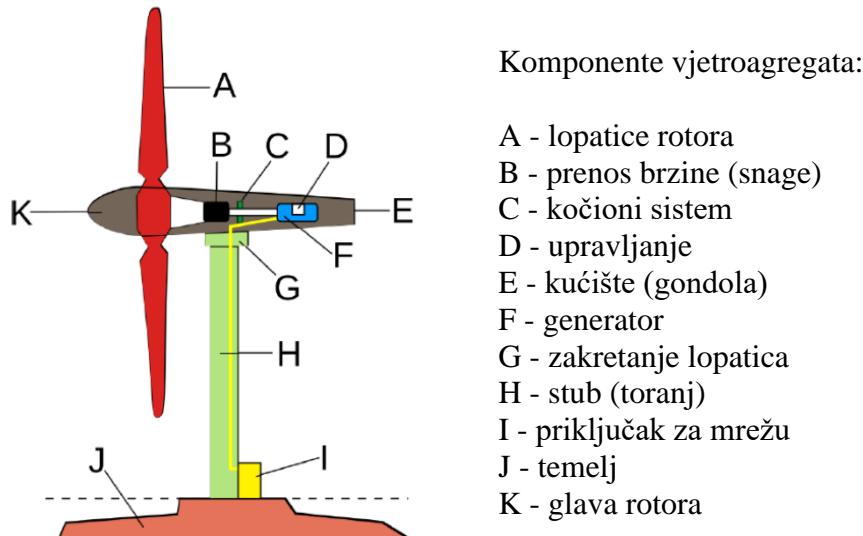
Slika 2.1.1.3 Proizvodnja SE

2.1.2. Energija vjetra

Upotreba vjetra kao izvora energije nije novitet - njegovi počeci sežu unazad nekoliko stotina godina, kada su vjetrenjače korišćene za mljevenje žita i navodnjavanje. Vremenom se ova tehnologija usavršavala i postala najbrže rastući izvor obnovljive energije, sa prosječnom godišnjom stopom rasta većom od 25%. Danas vjetroturbine efikasno pretvaraju kinetičku energiju vjetra u električnu energiju, kombinovanjem različitih naprednih tehnologija - aerodinamički optimizovane lopatice, intelligentni sistemi za upravljanje orijentacijom prema vjetru, napredni generatori sa promjenljivom brzinom rotacije i sl.

Visina stubova i dužina lopatica u posljednjim generacijama turbina, značajno su porasli, čime se maksimizuje proizvodnja iz VE. Pored kopnenih sistema, sve je više vjetroparkova na moru, gdje konstantni vjetrovi omogućavaju veću proizvodnju uz manji uticaj na naseljena područja. Iako nepredvidiv, na ovaj način, vjetar postaje sve pouzdaniji izvor energije u globalnom energetskom miksu [37].

U zavisnosti od primjene i lokacije, snaga vjetroturbina može varirati od 50 kW do nekoliko MW. Veliki vjetroparkovi obično sadrže više stotina turbina raspoređenih na velikim površinama, dok se manji sistemi, snage ispod 50 kW, koriste za domaćinstva, udaljena sela, navodnjavanje, punjenje baterijskih sistema. Konstrukcija savremenih vjetroagregata obuhvata osnovne elemente kao što je dato na slici 2.1.2.1. U zavisnosti od dizajna, turbine mogu imati horizontalnu ili vertikalnu osu rotacije, pri čemu su horizontalne najzastupljenije u praksi zbog veće efikasnosti.



Slika 2.1.2.1 Komponente vjetroagregata [38]

Vjetroagregat se pokreće pri brzini vjetra od 3 m/s - sa daljim porastom brzine, proizvodnja električne energije se povećava do maksimalne, koja se postiže na brzini vjetra od oko 12 m/s. Za brzine vjetra koje premašuju 25 do 30 m/s, vjetroagregat se isključuje kako bi se izbjegla oštećenja usljed prevelikih mehaničkih opterećenja.

Prije nego što se pristupi izgradnji VE, potrebno je sprovesti iscrpna istraživanja vremenskih uslova na predmetnoj lokaciji radi procjene potencijala vjetra, a posebno na visini rotora zbog direktnog uticaja na očekivanu proizvodnju. Brojne su prednosti ove tehnologije doprinjеле njenoj popularnosti u svijetu energetike:

- Ekološki je prihvatljiva jer ne doprinosi zagađenju životne sredine, nema emisije štetnih gasova.
- Nepostojanje troškova za gorivo, čini je ekonomski isplativom tehnologijom.
- Pomaže u smanjenju zavisnosti od uvoza fosilnih goriva.
- Zauzimaju manji prostor u odnosu na druge energetske sisteme sličnog kapaciteta.
- Mogu se instalirati na poljoprivrednom zemljištu koje ne gubi svoju funkciju.
- Mogu se postaviti i na teško dostupnim područjima.

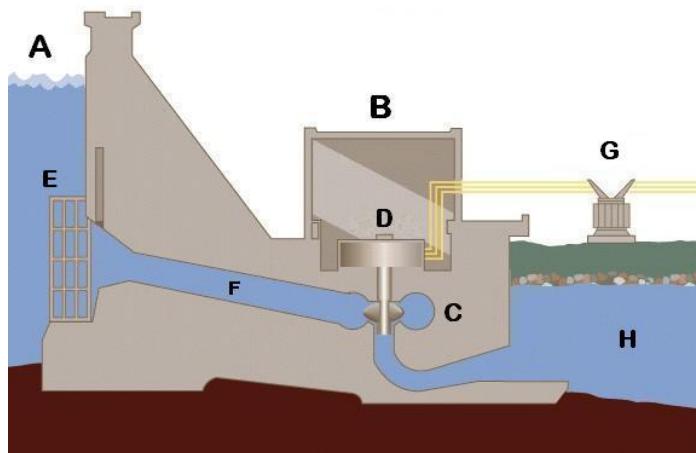
Ipak, primjena VE nije bez izazova. Stariji modeli stvaraju značajnu buku pri radu, što može biti smetnja u naseljenim područjima, izazivaju smetnje radio i telekomunikacionim sistemima, a predstavljaju i prijetnju pticama. Izgradnja VE zahtijeva značajna finansijska ulaganja, dok sama proizvodnja zavisi od brzine i pravca vjetra. Da bi se kompenzovala ova varijabilnost proizvodnje, primjenjuju se dodatne tehnologije za skladištenje energije ili kombinovanje sa drugim izvorima energije.

2.1.3. Hidroenergija

Hidroenergija predstavlja najrazvijeniji i najznačajniji OIE, sa stabilnim učešćem u globalnoj proizvodnji električne energije. Radno tijelo kod HE je voda, čija se kinetička i potencijalna energija pretvara u električnu energiju. Najzastupljenije su akumulacione HE, koje funkcionišu zahvaljujući vještačkim jezerima nastalim izgradnjom bran ana rijeci. Na ovaj način je moguća potpuna regulacija protoka vode, a to za posljedicu ima optimizaciju proizvodnje električne energije. Osim što proizvode električnu energiju, ove akumulacije imaju i niz dodatnih uloga: kontrola poplava i suša, navodnjavanje poljoprivrednih površina, obezbjeđivanje vode za piće, rekreativna i plovidba. Pored tradicionalnih, postoje i protočne HE, kod kojih se dio toka rijeke preusmjerava kroz cjevovode ka turbinama, pa im je i proizvodnja zavisna od trenutnog stanja vodotoka. Idealne su za rijeke sa stalnim i snažnim protokom, a imaju i manje troškove izgradnje u odnosu na akumulacione HE. Postoje i reverzibilne HE, posebna vrsta postrojenja koje ne samo da proizvode električnu energiju, već mogu i skladištiti višak energije iz EES-a. One balansiraju proizvodnju i potrošnju tako što u periodima niskog opterećenja ili pri visokoj proizvodnji iz OIE, ponašaju se kao potrošači prebacujući vodu iz donjeg u gornje akumulaciono jezero, dok u slučaju vršnog opterećenja, voda se iz gornjeg jezera pušta u donje kroz turbine, a one postaju proizvođači električne energije.

Osnovne komponente HE za dobijanje električne energije, date su na slici 2.1.3.1. Pretvaranje energije u klasičnim HE započinje s korišćenjem potencijalne energije vode akumulisane u jezeru, koja se dalje kroz cjevovode usmjerava prema turbini. Ovdje potencijalna energija prelazi u kinetičku energiju uslijed kretanja radnog tijela - vode. Pod velikim pritiskom i brzinom, kinetička energija vode okreće lopatice turbine, koja je osovinom povezana sa električnim generatorom. Ovim procesom dobijena mehanička energija se dalje prenosi do generatora, koji koristi rotaciju turbine da generiše električnu energiju i šalje je u elektrodistributivnu mrežu.

Osnovne komponente HE:



- A - akumulaciono jezero
- B - mašinska zgrada služi za smještaj turbina i generatora HE i pomoćne opreme
- C - turbina
- D - generator
- E - ulaz vode
- F - cjevovod
- G - dalekovod
- H - vraćanje vode u njen prirodan vodotok

Slika 2.1.3.1 Osnovne komponente HE

Iako se HE smatraju zelenim izvorima energije, one ipak mogu značajno da utiču na vodene ekosisteme i kvalitet voda u svijetu. Savremeni inženjerski pristupi uključuju prilagođene režime ispuštanja vode, ugradnju ribljih prolaza i ekološki prihvatljivijih turbina. Sve ovo za cilj ima nesmetano funkcionisanje i opstanak vodenih organizama i minimizaciju uticaja na rječne ekosisteme. Potrebno je pronaći kompromis između energetske efikasnosti i zaštite životne sredine, i ovdje kao i kod drugih energetika.

2.1.4. Biomasa

Bioenergija je oblik obnovljive energije koji se dobija iz biomase - organskog materijala biljnog i životinjskog porijekla, a koristi se za proizvodnju električne, toplotne energije i biogoriva. Pod pojmom biomasa podrazumijevaju se: drvna masa, poljoprivredni ostaci, otpad iz prehrambene industrije i životinjski otpad. Iako još uvijek ne zauzima značajno mjesto u svjetskoj proizvodnji električne energije, upotreba biomase stalano raste zahvaljujući unapređenju tehnologija za njenu preradu.

Ključna prednost biomase leži u činjenici da se ona često dobija kao nusproizvod različitih industrijskih i poljoprivrednih aktivnosti. Za razliku od vjetra i sunca, biomasa se može skladištiti i koristiti po potrebi, a to za posljedicu ima veću stabilnost sistema. Sadrži znatno niži procenat sumpora i azota u odnosu na fosilna goriva, što je čini manje odgovornom za pojavu kisjelih kiša. Dodatno, biomasa je ugljenično neutralan energet - tokom rasta biljke apsorbiraju onoliko CO₂ koliko se oslobodi u procesu sagorijevanja. Ova karakteristika čini bioenergiju ključnim elementom u strategijama dekarbonizacije. Ipak, prekomjerna upotreba biomase može dovesti do smanjenja biodiverziteta i sječe šuma, što nije u skladu s principima održivosti.

Pretvaranje biomase u korisnu energiju metodom gasifikacije, omogućilo je efikasniju upotrebu ovog resursa. Biomasa se zagrijava na visokoj temperaturi uz prisustvo kiseonika, pri čemu nastaje gas koji se dalje koristi za proizvodnju električne energije u gasnim turbinama. Još jedan značajan proces odvija se na deponijama ili u specijalizovanim postrojenjima, gdje mikroorganizmi razgrađuju organski otpad u uslovima bez kiseonika. Rezultat ove biološke razgradnje je biogas, koji se dalje koristi kao gorivo za grijanje, kuvanje ili proizvodnju električne energije. Takođe, proces pirolize omogućava termičku obradu biomase u odsustvu kiseonika. U ovom procesu nastaju: pirolizno ulje koje se može koristiti kao zamjena za fosilna goriva i bio - ugljenik, koristan za poboljšanje zemljišta.

Zahvaljujući niskom uticaju na životnu sredinu i mogućnostima primjene na različite načine, bioenergija postaje sve atraktivnija kao održiva alternativa fosilnim gorivima.

2.1.5. Geotermalna energija

Geotermalna energija, jedan od najstabilnijih i pouzdanih obnovljivih izvora, zasniva se na korišćenju toplote iz unutrašnjosti Zemlje. Ova toplota se oslobađa kao rezultat prirodnih procesa poput raspada radioaktivnih elemenata, a dijelom predstavlja i preostalu toplotu iz vremena nastanka planete. Za razliku od mnogih drugih OIE, geotermalni sistemi omogućavaju stabilnu proizvodnju električne i toplotne energije tokom cijele godine, nezavisno od vremenskih uslova. S druge strane, ograničena je geografskom dostupnošću i zahtijeva visoke početne investicije.

Geotermalna energija se može eksplorativati na nekoliko načina, u zavisnosti od dostupnosti geotermalnih resursa i tehnoloških mogućnosti:

- Direktna upotreba - primjena toplih voda iz podzemlja za grijanje domaćinstava, u poljoprivredi, industrijskim procesima i dr.
- Geotermalne elektrane - proizvodnja električne energije korišćenjem pare ili veoma vruće vode za pogon turbina koje pokreću generatore.

- Geotermalne topotne pumpe - stabilne temperature tla na malim dubinama koriste se za grijanje i hlađenje objekata, što doprinosi povećanju energetske efikasnosti u sektoru zgradarstva.

U zavisnosti od karakteristika geotermalnog izvora i tehnološkog pristupa konverziji energije, razlikuju se tri osnovna tipa elektrana: elektrane sa suvom parom direktno koriste paru iz podzemnih rezervoara za pokretanje turbine i proizvodnju električne energije, elektrane sa toplom vodom koriste podzemnu vodu visoke temperature, koja dolaskom na niži pritisak naglo isparava i pokreće turbine, i elektrane koje koriste topotu geotermalne vode za isparavanje sekundarnog radnog fluida sa nižom tačkom ključanja, a koji dalje pokreće turbine.

Geotermalna energija posjeduje niz prednosti koje je čine atraktivnim energetskim resursom:

- Geotermalna energija se obnavlja prirodno kroz geološke procese u Zemljinoj unutrašnjosti.
- Za razliku od solarne i energije vjetra, geotermalni sistemi omogućavaju neprekidnu proizvodnju energije.
- Geotermalne elektrane emituju minimalne količine ugljen-dioksida (CO_2) u poređenju sa fosilnim gorivima, a zahtijevaju relativno malu površinu zemljišta za izgradnju.
- Pored proizvodnje električne energije, geotermalna energija se koristi i za grijanje, industrijske procese i poljoprivredu.

Primjena geotermalne energije, iako obećavajuća, suočava se sa nizom ograničenja. Prvi izazov su visoki početni troškovi - istraživanja, bušenja Zemljine kore i izgradnja geotermalnih postrojenja. Proizvodnja je geografski ograničena jer najveći potencijal postoji u vulkanski i seizmički aktivnim područjima poput Islanda, Indonezije, Filipina, Kalifornije i Italije. Dodatno, proces bušenja i eksploatacije geotermalnih izvora donosi rizik od nastanka zemljotresa i zagađenja podzemnih voda.

Ovaj stabilan i ekološki prihvatljiv izvor predstavlja pouzdanu osnovu za dugoročno održiv energetski razvoj, ali sa sobom nosi i brojne izazove.

2.2. Efekti priključenja DIE na mrežu

Priklučenje DIE na distributivnu mrežu ne smije da ugrožava stabilnost, kvalitet i bezbjednost EES-a. Neki tehnički kriterijumi za priključenje DIE na distributivnu mrežu Crne Gore [39], koji definišu minimalne tehničke zahtjeve koji se moraju ispuniti, su:

- kriterijum reaktivne snage male elektrane,
- kriterijum flikera,
- kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika,
- kriterijum dozvoljenog napona viših harmonika,
- kriterijum snage kratkog spoja - provjerava se samo za male elektrane instalirane snage preko 1 MVA.

Kriterijum reaktivne snage je ključni tehnički parametar koji obezbjeđuje da proizvodnja električne energije iz DIE ne utiče negativno na kvalitet napona i stabilnost sistema, tj. DIE moraju imati mogućnost kontrole proizvodnje reaktivne snage u skladu sa zahtjevima mreže.

Flikeri su varijacije naponskih prilika koje nastaju uslijed iznenadnih promjena u snazi koju DIE isporučuju - promjena u brzini vjetra kod VE ili smanjenja oblačnosti kod SE. Ove promjene mogu uzrokovati neudobnost ili smetnje korisnicima.

Kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika podrazumijeva ograničavanje sadržaja viših harmonika u strujama koje generišu DIE pri njihovom priključenju na elektrodistributivnu mrežu. Veće prisustvo viših harmonika može pogoršati kvalitet napajanja, ugroziti rad uređaja i stabilnost mreže. Slično važi za kriterijum dozvoljenog naponi viših harminika.

Kriterijum snage kratkog spoja (KS) se definiše kao maksimalna snaga koja može nastati prilikom KS na tački priključenja DIE na mrežu. Ovaj kriterijum je bitan jer određuje sposobnost EES-a da izdrži energetske udare i da efikasno pronađe i izoluje kvarove. U procesu projektovanja i integracije DIE na mrežu, provjera ovog kriterijuma predstavlja neizostavan korak.

Priključenje DIE na elektrodistributivnu mrežu uzrokuje značajne promjene u načinu rada i performansama celokupnog EES-a. Ove promjene posljedica su integracije decentralizovanih izvora, koji utiču na tradicionalnu strukturu i dinamiku mreže. Među značajnjim prednostima ističe se činjenica da se proizvodnja električne energije, približava krajnjim korisnicima, smanjujući gubitke koji nastaju tokom prenosa električne energije, ujedno čineći distributivnu mrežu manje zavisnom od isporuke energije iz prenosnog sistema.

Priključenje DIE na elektrodistributivnu mrežu sa sobom nosi niz izazova, među kojima se izdvajaju sledeći:

- Proizvodnja električne energije iz DIE je često vođena interesom i ostvarenjem većeg profita vlasnika (proizvodača), a ne stvarnim potrebama mreže.
- Distributivna mreža koja je obično radikalne strukture, može izgubiti ovo svojstvo jer se uvođenjem DIE omogućava dvosmejran protok energije.
- Naponi na mjestu priključenja nerijetko izlaze van propisanih granica, što može izazvati nestabilnost sistema.
- Umjesto da podrži mrežu, mnogi manji izvori preuzimaju reaktivnu energiju iz mreže, što dodatno opterećuje sistem.
- Usljed nestabilnosti naponskih prilika dolazi do češćih kvarova i poremećaja u radu mreže.
- Priključenje DIE u nekim slučajevima može povećati tehničke gubitke u mreži, što negativno utiče na ukupnu efikasnost sistema (uslijed nepažljive i nepravilne integracije DIE, struja može teći u neželjenim pravcima i na veće udaljenosti).
- Umjesto unapređenja kvaliteta napajanja, DIE ponekad izazivaju njegovo pogoršanje zbog neadekvatnog planiranja i tehničkih izazova.
- Upravljanje EES-om postaje otežano, posebno u periodima nepovoljnih vremenskih uslova i niskih opterećenja.
- Nedostatak sistema daljinskog monitoringa i upravljanja otežava rad operatorima distributivnog sistema, jer ne mogu efikasno kontrolisati rad DIE.

Pravni i tehnički okviri za integraciju DIE u distributivne mreže razlikuju se od države do države, pri čemu ne postoji jedinstven pristup koji bi bio opšteprihvacen na globalnom nivou. Zakonske regulative su često nedovoljno razrađene ili u raskoraku sa razvojem tehnologije, a uobičajeno je da svaka zemlja razvija svoje regulative, uzimajući u obzir specifične potrebe, ekonomski uslove i tehničke mogućnosti svog EES-a. Rezultat je raznolikost standarda, procedura i tehničkih zahtjeva, što može otežati međunarodnu saradnju, stvaranje jedinstvenog tržišta i integraciju DIE.

2.2.1. Tokovi snaga, naponske prilike i gubici u mreži sa DIE

Uticaj DIE na tokove snaga, profil napona i energetske gubitke u distributivnoj mreži zavisi od konfiguracije same mreže, tehničkih parametara mrežnih elemenata, karakteristike i raspodjele opterećenja, kao i od samih izvora energije - tip proizvodnih jedinica, instalisana snaga, mjesto priključenja. Upravo su snaga i lokacija proizvodnih jedinica, faktori koji imaju najveći uticaj na mrežni balans.

Glavni aspekti koji su razmatrani prilikom integracije DIE u distributivnu mrežu uključuju gubitke aktivne i reaktivne snage u mreži i naponske prilike u zavisnosti od parametara DIE, a dati su u nastavku ovog rada.

Kako instalisana snaga DIE raste, napon u mreži u blizini tačke priključenja DIE takođe raste, jer DIE počinje da predaje snagu u mrežu. Ovaj efekat smanjuje pad napona koji se obično javlja kada potrošači povlače snagu iz prenosne mreže, smanjujući tako i gubitke. Sa povećanjem instalisane snage DIE iznad potreba lokalnog konzuma, rastu gubici aktivne snage u mreži. Ovo je i očekivano ako se uzme u obzir da se sa predimenzionisanim kapacitetima povećava struja koja teče kroz vodove, a gubici u mreži su proporcionalni kvadratu struje ($P = I^2 * R$). Takođe, gubici aktivne snage su najveći kada DIE radi sa kapacitivnim faktorom snage. U ovom režimu, DIE povlači reaktivnu snagu iz prenosne mreže, što povećava gubitke na elementima sistema (naročito na transformatorima i dalekovodima) uslijed većih strujnih opterećenja, a ujedno i smanjuje vrijednosti napona. Ovo smanjenje napona, naročito je izraženo u djelovima mreže koji su udaljeni od izvora energije. U induktivnom režimu, kada DIE predaje reaktivnu snagu mreži, gubici su manji, a naponi u mreži rastu. Ovo je posljedica smanjenja struje koju potrošači povlače iz prenosne mreže zahvaljujući proizvodnji lokalnih DIE, smanjujući tako i padove napona na elementima sistema.

Ako se DIE priključi na mrežu sa višim naponskim nivoom (npr. 35 kV), efekat na napon je manji nego kada se priključi na niži naponski nivo (npr. 10 kV). Na višem naponskom nivou, struja koja teče kroz mrežu je manja, a time i padovi napona su manji, što dovodi do stabilnijeg napona u mreži. Kada se DIE istih instalisanih kapaciteta priključi na mrežu sa višim naponskim nivoom (npr. 35 kV) i nižim (npr. 10 kV), gubici aktivne snage su manji u prvom slučaju. Ovo je rezultat toga što se pri višim naponima struja koja teče kroz mrežu i padovi napona su manji, a smanjenje struje dovodi do smanjenja gubitaka. U mreži sa višim naponskim nivoima, promjena napona izazvana priključkom DIE je manja. Takođe, kada se DIE priključi na mreže nižeg naponskog nivoa, postoji veća potreba za regulacijom napona, naročito ako su instalisane snage velike, a sve kako bi se očuvala stabilnost sistema i zadovoljile propisane vrijednosti napona.

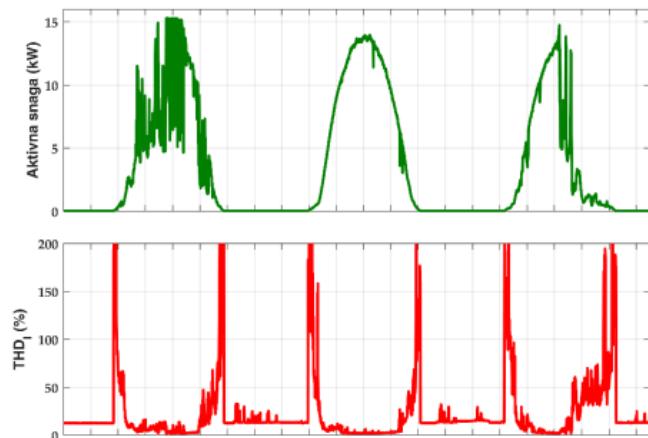
Ako je instalisana snaga DIE manja od snage lokalnog potrošačkog konzuma, njihove prednosti dolaze do izražaja kroz smanjenje gubitaka aktivne snage u mreži i poboljšanjem naponskog profila. U suprotnom, predimenzionisani proizvodni kapaciteti dovode do porasta gubitaka aktivne snage u mreži, destabilizacije napona, opterećujući dodatno sistem i smanjujući ukupnu efikasnost.

2.2.2. Kvalitet električne energije uslijed integracije DIE

Usljed sve većeg broja potrošača, kvalitet napona u elektroenergetskoj mreži predstavlja ključni aspekt sigurnog i efikasnog funkcionisanja sistema, jer utiče na rad i pouzdanost krajnjih korisnika, kao i na stabilnost same mreže. U uslovima liberalizovanog tržišta električne energije, kvalitet napona dobija dodatnu težinu kao regulacioni i ugovorni parametar.

Svi učesnici EES-a, uključujući proizvođače iz OIE, dužni su da ograniče svoj negativni uticaj na kvalitet napona. Glavni problemi uključuju pojavu harmonijske distorzije - viših harmonika, varijacije napona i naponske flikere. Vrsta DIE (HE, SE, VE, itd.), njegove tehničke karakteristike i karakteristike lokalne distributivne mreže, mogu značajno uticati na intenzitet ovih pojava, pa je analiza efekata njihovog priključenja na kvalitet električne energije obavezan tehnički korak.

Smanjeno sunčev zračenje, karakteristično za promjenljive i oblačne vremenske prilike, uzrokuje povećanje faktora totalne harmonijske distorzije struje (THD_I - *Total harmonic distortion*) na izlazu iz SE. U ovakvim uslovima, dolazi do pada osnovnog harmonika struje, dok udio viših harmonika ostaje povišen. Ovo za posljedicu ima povećanje ukupnog THD_I faktora. Analizom različitih meteoroloških uslova utvrđeno je da se THD_I faktor kreće u rasponu 2–3% kada je vrijeme vedro, pa sve do 40–50% pri potpuno oblačnom nebu, kako je prikazano na slici 2.2.3.1.



Slika 2.2.2.1 Zavisnost THD_I faktora od izlazne snage SE

Generatori koji se na elektroenergetsku mrežu povezuju preko DC/AC pretvarača, često doprinose većem nivou harmonijske distorzije napona. Ova pojava može uticati na stabilnost i kvalitet napajanja, naročito u osjetljivim potrošačkim sistemima. Nasuprot tome, generatori koji su direktno spojeni na mrežu, iako mogu generisati sopstvene harmonike struje, u nekim slučajevima mogu prigušiti postojeće harmonike napona u mreži. Takva situacija rezultira pojmom harmonijske rezonanse - male količine harmonijskih struja mogu se značajno pojačati, što rezultira dodatnim naponskim izobličenjem i potencijalnim oštećenjem opreme.

Promjene napona i pojava flikera uslijed uključivanja i isključivanja DIEE, predstavljaju značajan izazov za stabilnost, a posebno su izražene kod izvora sa promjenjivim režimima rada (npr. VE). Za ublažavanje ovih problema, ključno je korišćenje savremenih sistema upravljanja koji omogućavaju preciznu regulaciju izlazne snage i brzinu reakcije na promjene u mreži. Osim toga, tehnička optimizacija samih generatora može značajno redukovati negativne efekte na napon.

Propisi koji se odnose na kvalitet električne energije, a posebno na ograničenja harmonijske distorzije i faktora snage, značajno se razlikuju od zemlje do zemlje, u zavisnosti od nacionalnih standarda i energetskih politika koje su na snazi. Prema evropskom standardu *EN 50160 (European Standard)* maksimalna ukupna harmonijska distorzija iznosi 5% nominalnog napona pri osnovnoj frekvenciji od 50 Hz. Ova vrijednost se smatra granicom do koje potrošači ne bi trebali da osjete degradaciju u kvalitetu isporučene električne energije. Američki standard *IEEE 519* je još strožiji, pri čemu se razlikuju ograničenja za naponske i strujne harmonike u zavisnosti od naponskog nivoa i tačke priključenja.

Minimalni dozvoljeni faktor snage je takođe predmet nacionalnih regulativa. Ova vrijednost odražava sposobnost DIE da doprinosi regulaciji reaktivne snage u sistemu i sprečava nepovoljan uticaj na stabilnost mreže. U Njemačkoj, propisana minimalna vrijednost faktora snage iznosi 0.8, u Francuskoj 0.87, dok je u Holandiji, Danskoj i Italiji 0.9, a u Velikoj Britaniji 0.85. Ova raznolikost ukazuje na potrebu da se prilikom planiranja i priključenja DIE vodi računa i o važećim lokalnim i međunarodnim normama. Zbog toga je pri planiranju priključenja DIE potrebno sprovesti detaljnu analizu harmonijskih efekata u zavisnosti od tipa generatora i konfiguracije mreže.

2.2.3. Zaštita i upravljanje u mreži sa DIE

Integracija DIE donosi značajne promjene u načinu funkcionisanja distributivnih mreža, posebno kada je riječ o zaštitnim uređajima i strategijama upravljanja kvarovima. Tradicionalno projektovane zaštitne šeme oslanjaju se na jednosmjerni tok snage, pa se uvođenjem DIE, koji mogu mijenjati tokove snage i napona, javila potreba za unapređenjem postojećih zaštita.

Jedan od ključnih izazova je održavanje selektivnosti zaštite - sposobnost sistema da precizno identificuje i izoluje samo dio mreže pogoden kvarom. Prisustvo DIE može otežati pravilnu detekciju mjesta i vrste kvara, jer ovi izvori mogu napajati mrežu i nakon što glavni izvori isključe napon, čime se narušava logika djelovanja zaštitnih uređaja. Dodatni problem predstavlja pojava tzv. ostrvskog rada, kada DIE nastavlja sa radom i nakon što se mreža ili njen dio isključi iz globalnog sistema. Ovo može dovesti do ozbiljnih sigurnosnih i tehničkih problema, kao što su kvarovi na opremi i nestabilnost napona i frekvencije.

Zaštitne funkcije u mrežama sa DIEE zavise od više faktora, uključujući instalisanu snagu i tip proizvodne jedinice, nivo napona u tački priključenja, kao i karakteristike postojećeg zaštitnog sistema distributivne mreže. Obično se implementira osnovni skup zaštita koje obuhvataju nadnaponsku i podnaponsku zaštitu, kao i nadfrekventnu i podfrekventnu zaštitu, koje služe za detekciju odstupanja od dozvoljenih parametara mreže i sprečavanje oštećenja opreme. Pored toga, važnu ulogu ima i zaštita priključnog voda od preopterećenja, KS-a i zemljospoja.

Novija rješenja podrazumijevaju primjenu brzih relejnih zaštita, mjernih sistema i adaptivnih algoritama zaštite koji mogu prilagoditi svoje parametre promjenjivim uslovima u mreži. Sve češće se primenjuju i naprednije zaštitne funkcije, poput zaštite od povratne snage (koja sprečava nepoželjni tok snage nazad ka mreži), zaštite od nesimetričnog opterećenja (koja reaguje na neuravnoteženost faza), kao i diferencijalne zaštite (koja omogućava brzo i selektivno isključenje u slučaju kvarova u zoni štićenja). Izbor i konfiguracija zaštitnih funkcija moraju biti prilagođeni specifičnostima svake mreže. Time se obezbjeđuje siguran i stabilan rad sistema, čak i u prisustvu velikog broja DIE.

U kontekstu sve šire integracije DIE, posebnu ulogu ima modernizacija sistema upravljanja distributivnom mrežom. Implementacija naprednih komunikacionih tehnologija, omogućava detaljan nadzor i optimizaciju rada mreže u realnom vremenu. Za DIE većih instalisanih snaga, ovakvi sistemi omogućavaju i daljinsku kontrolu nad radnim režimima, uključujući nadzor prekidača za isključenje i aktivaciju zaštita. Time se povećava sigurnost i efikasnost upravljanja i doprinosi boljoj stabilnosti i pouzdanosti čitavog EES-a.

2.3. Rekonfiguracija mreže

Pravilna rekonfiguracija distributivnih mreža, koje su obično radikalne, omogućava optimizaciju njihovih performansi, smanjenje gubitaka, poboljšanje sigurnosti napajanja i unapređenje kvaliteta isporuke električne energije korisnicima. Ovaj proces se realizuje ručnim ili automatskim promjenama konfiguracije mreže, pri čemu svim potrošačima obezbijeđeno besprekidno napajanje, a radikalna struktura ostaje očuvana.

Pristupi rješavanju ovog problema obuhvataju širok spektar metoda, koje se obično klasifikuju u tri glavne kategorije.

- Klasične
- Heurističke i
- Metaheurističke metode.

Klasične optimizacione metode poznate su po preciznosti i mogućnosti pronalaženja globalno optimalnih rješenja. One se oslanjaju na matematičke tehnike poput gradijentne optimizacije, linearog i nelinearnog programiranja. Kroz iterativne procese, ove metode konvergiraju prema optimalnom rješenju, ali zahtijevaju jasan analitički izraz funkcije cilja i izračunavanje njenog gradijenta. Ipak, u realnim sistemima, gdje su uslovi promjenjivi a broj promjenljivih velik, primjena ovih metoda može biti otežana ili neizvodljiva zbog nedostupnosti tačnih matematičkih modela i složenosti funkcije cilja. U takvim slučajevima, njihova efikasnost značajno opada.

Heurističke metode imaju fleksibilniji i praktičniji pristup optimizaciji, a posebno su korisne u rješavanju složenih i nelinearnih problema, gdje su klasične metode neprimjenljive. Umjesto iscrpnog pretraživanja svih mogućnosti, oslanjaju se na pametne strategije koje brzo konvergiraju do dobrih rješenja. Tehnike poput genetskih algoritama, algoritama roja čestica i diferencijalne evolucije (DE) omogućavaju traženje rješenja, čak i kada nije moguće precizno matematički definisati problem. Iako ne garantuju najbolje, globalno optimalno rješenje, često postižu rezultate koji su dovoljno dobri za praktičnu upotrebu. Njihov uspjeh zavisi od pažljivog podešavanja parametara i pravilnog izbora metode za konkretan problem.

Problem rekonfiguracije distributivne mreže uključuje složenu funkciju cilja i brojna tehnička ograničenja. Kako broj mrežnih elemenata raste, broj mogućih konfiguracija se eksponencijalno povećava, što značajno otežava pretragu rješenja. Zbog toga klasične optimizacione metode često nisu dovoljno brze ni efikasne da bi pronašle optimalno rješenje u razumnom vremenu, što ih čini nepraktičnim za primjenu u ovakvim složenim problemima.

Da bi se prevazišle poteškoće koje prate klasične metode, sve više se primjenjuju metaheuristički pristupi. Umjesto da iscrpno pretražuju svaki mogući ishod, ovi algoritmi koriste različite načine da brzo i efikasno pronađu dobra rješenja. Zbog toga su posebno korisni

za kompleksne probleme kao što je rekonfiguracija distributivne mreže, gdje prostor rješenja raste veoma brzo. Ovi pristupi inspirisani su prirodnim fenomenima, poput evolucije, ponašanja insekata u rojevima ili životinja u potrazi za hranom. Zbog sposobnosti da se prilagode raznim uslovima i pronađu rješenja u složenim okruženjima, postale su ključno sredstvo za optimizaciju.

Algoritmi za rekonfiguraciju distributivne mreže klasificuju se prema dva osnovna pristupa:

- Tip zamjene grana - Pristup se primjenjuje kod radijalnih mreža, gdje algoritmi istovremeno otvaraju i zatvaraju prekidače u parovima, uz očuvanje radijalnosti.
- Tip prekidanja petlji - Primjenjuje se u povezanim (upetljanim) sistemima, po principu otvaranja prekidača radi dobijanja radijalne konfiguracije mreže.

Pri rekonfiguraciji distributivne mreže ključno je zadovoljiti dva osnovna toploška ograničenja:

- Potrebno je očuvati radijalnu strukturu mreže kako bi se izbjeglo formiranje petlji i višestrukih putanja do potrošača.
- Potrebno je osigurati da u normalnim uslovima nijedan potrošač ne ostane izolovan, odnosno bez napajanja električnom energijom.

Proces rekonfiguracije mora uzeti u obzir i pogonska ograničenja mreže, kao što su dozvoljene vrijednosti napona u čvorovima i opterećenja elemenata, što dodatno otežava ponalaženje optimalne rekonfiguracije mreže.

Rekonfiguracija se vrši korišćenjem sekciione i spojne komutacione opreme (prekidači, rastavljači i rastavljači snage). Plansko sprovođenje ove strategije može smanjiti preopterećenje mrežnih komponenti i optimizovati distribuciju električne energije. Za rekonfiguraciju mreže u realnom vremenu potrebbni su visokoautomatizovani sistemi za brzo prikupljanje podataka i primjenu efikasnih algoritama optimizacije, a veliki broj istraživača se bavio upravo ovo problematikom.

Rekonfiguracija mreže se primjenjuje za:

- Održavanje ravnoteže isporuke električne energije u uslovima kvara. Ovo pomaže u smanjenju prekida i osigurava kontinuitet napajanja.
- Uravnoteženje opterećenja sa ciljem:
 - Smanjenja preopterećenja elemenata mreže i
 - Optimizacije naponskog profila.
- Planiranje prekida zbog održavanja smanjujući tako negativne efekte na korisnike.
- Smanjenje gubitaka snage optimalnom preraspodjelom snage.

Rekonfiguracija mreže temelji se na osnovnoj sklopnjoj operaciji - zatvara se prekidač u trenutno otvorenoj grani, dok se otvara prekidač u zatvorenoj grani. Zbog očuvanja radijalne strukture mreže i diskretne prirode prekidača, tradicionalne optimizacione metode često nisu efikasne. Zbog toga se u savremenim istraživanjima, u oblasti rekonfiguracije mreže, koriste, već pomenuti, napredni heuristički i metaheuristički pristupi, kao što su genetski algoritmi, optimizacija zasnovana na ponašanju organizama u potrazi za hranom i optimizacija zasnovana na teoriji grafova [40-43].

Proces rekonfiguracije distributivnih mreža započinje definisanjem specifičnih ciljeva, kao što su smanjenje gubitaka aktivne snage (što je fokus ovog master rada), poboljšanje naponskog profila ili ravnoteža opterećenja u mreži. U prvom koraku prikupljaju se ključni podaci o trenutnom stanju mreže - informacije o statusu prekidača, raspodjeli opterećenja i kapacitetima vodova. Detaljna analiza trenutne konfiguracije mreže od presudnog je značaja za pronalaženje djelova sistema sa visokim gubicima energije ili lošim naponskim prilikama, nakon čega se primjenjuju različiti algoritmi optimizacije.

Većina istraživanja u literaturi bavila se problemom statičke jednokratne rekonfiguracije distributivnih mreža, koja se koristi za postavljanje fiksne konfiguracije na određeni vremenski period, bilo da je riječ o satu, sezoni ili godini. Ovaj pristup podrazumijeva da su proizvodnja i opterećenje fiksni, postavljeni na maksimalne ili prosječne vrijednosti, što ne oslikava pravu dinamiku mreže. Zato se ovakav pristup nije pokazao optimalnim, pogotovo u sistemima sa DIE čija je izlazna snaga varijabilna.

S druge strane, dinamička višesatna rekonfiguracija mijenja topologiju mreže u skladu s promjenama u proizvodnji i potrošnji energije, uz optimalnu raspodjelu snage i minimalne gubitke, dok istovremeno zadovoljava tehnička ograničenja. Ovaj pristup omogućava bolju adaptaciju uslovima u realnom vremenu. Iako statička rekonfiguracija može imati prednost u ekonomskom smislu zbog fiksne konfiguracije koja smanjuje troškove, dinamička rekonfiguracija je preciznija i efikasnija za mreže sa izvorima promjenljive proizvodnje.

Rekonfiguracija distributivne mreže ima ključnu ulogu i u fazi planiranja i u upravljanju u realnom vremenu. Tokom planiranja, vremenski period se dijeli na kraće intervale, a za svaki se određuje optimalna mrežna konfiguracija prema očekivanim okolnostima, što omogućava efikasnije upravljanje mrežom i prilagođavanje promjenama potrošnje i proizvodnje. U realnom vremenu, rekonfiguracija služi za brzo prilagođavanje topologije mreže u slučaju kvarova ili naglih oscilacija u opterećenju i proizvodnji, naročito iz OIE. Zahvaljujući naprednim sistemima nadzora, daljinskom upravljanju i komunikacionim tehnologijama, ovakve promjene se mogu pratiti i sprovoditi automatski. Dodatno, adaptivni algoritmi visoke preciznosti, postaju neizostavan alat operaterima mreže u cilju obezbjeđenja pouzdanog, efikasnog i održivog rada sistema.

Iako je rekonfiguracija distributivne mreže moćna strategija za optimizaciju rada EES-a, njen puni potencijal dolazi do izražaja tek kada se kombinuje sa dodatnim rješenjima poput: šant kondenzatora, DIE i sistema za skladištenje. Ovakav sveobuhvatan pristup omogućava efikasnije upravljanje postojećim resursima, kao i izgradnju otpornijeg i održivijeg energetskog sistema. Integracija tehnologija i optimizacionih tehnika daje odgovore na izazove savremenih mreža i postavlja temelje za elektroenergetsku infrastrukturu budućnosti - fleksibilnu, pouzdanu i ekološki odgovornu.

3. L-SHADE ALGORITAM

U ovom istraživanju matematički problem optimalne alokacije DICE i rekonfiguracije distributivne mreže, biće realizovan primjenom *L-shade* algoritma u *Matlab* programskom paketu.

Podstaknuti rastućom primjenom i dobim performansama *L-shade* algoritma [44], u radu je predstavljena mogućnost njegove primjene u rješavanju problema distributivnih mreža. Cilj je minimizacija gubitaka aktivne snage kroz istovremeno, optimalno dimenzionisanje i lociranje DICE i različite scenarije rekonfiguracije distributivne mreže. *L-shade* se ističe po svojoj visokoj efikasnosti i brzini u poređenju sa drugim algoritmima. Njegova sposobnost prilagođavanja parametara kontrole, strategija mutacije "*current-to-pbest/1/bin*"¹ i smanjenje veličine populacije omogućavaju brže pronalaženje globalnog minimuma, što je ključno za složene probleme u distributivnim mrežama.

Istraživanje će biti sprovedeno na standardnim *IEEE-33* i *IEEE-69* distributivnim mrežama, a razmatraju se slučajevi samo rekonfiguracije mreže, samo alokacije DIE i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE. Problem optimizacije uključuje diskretne (lokacija DIE i grane koje se isključuju) i kontinuirane (snaga DIE) promjenljive. Algoritam kao rezultat daje grane u distributivnoj mreži koje je potrebno isključiti, optimalne kapacitete i lokacije DIE, vrijednosti napona i gubitaka za taj slučaj. Važno je napomenuti da broj i ukupna snaga dodatih DIE igraju ključnu ulogu u konačnom gubitku mreže. Povećanje broja DIE iznad određene vrijednosti možda nije tehnički i/ili komercijalno izvodljivo. Takođe, penetracija DIE ne sme biti previšoka, jer bi mreža mogla postati aktivna mreža. Prevelika ukupna snaga dodatih DIE može povećati nivo kratkog spoja komponenti povezanih sa sistemom. Zato je pažljivo ograničen broj i snaga DIE u skladu sa ranijim literaturama, kako bi se omogućilo fer i validno poređenje trenutnih rezultata sa prethodno prijavljenim rezultatima.

3.1. Primjena L-shade algoritma

DE se posljednjih decenija pokazala kao jedna od najpouzdanijih stohastičkih metoda za rješavanje optimizacionih problema u kontinuiranim prostorima pretraživanja. Njena snaga leži u jednostavnoj iterativnoj primjeni evolutivnih principa mutacije, ukrštanja i selekcije, čijom primjenom se dolazi do rješenja. Ipak, uspješnost DE algoritma u velikoj mjeri zavisi od fino podešenih parametara, uključujući faktor skaliranja (F), stopu ukrštanja (CR), veličinu populacije (Np), kao i odabir strategije mutacije i ukrštanja.

Da bi se smanjila osjetljivost algoritma na početna podešavanja parametara i povećala njegova efikasnost, razvijene su napredne, adaptivne varijante DE [45, 46]. *L-shade* algoritam, istakao se među njima, uvođenjem automatskog prilagođavanja ključnih parametara tokom procesa evolucije, na osnovu podataka iz prethodnih uspješnih iteracija. Time se postiže bolja ravnoteža između istraživanja novih i eksploatacije postojećih rješenja. Dodatno, *L-shade* postepeno smanjuje veličinu populacije kako evolucija napreduje, ubrzavajući konvergenciju

¹ Strategija "*current-to-pbest/1/bin*" je varijanta mutacije posebno korišćena u algoritmu L-shade. Omogućava generisanje novih individua koristeći najbolju osobinu kao referencu, sa jednim roditeljskim vektorom i jednakom vrijednom selekcijom za sve individue. Razlika između trenutne osobine (*current*) i najbolje osobine (*pbest*) se koristi za kreiranje mutantnog vektora. "/1" označava da će se koristiti jedan roditeljski vektor za kreiranje nove individue, a (/bin) ukazuje na korišćenje binarnog principa za selekciju.

bez gubitka kvaliteta rješenja. Zahvaljujući tim karakteristikama, L-shade se pozicionirao kao izuzetno moćan alat za rješavanje složenih optimizacionih zadataka.

Osnovni koraci algoritma obuhvataju sljedeće faze:

1. Inicijalizacija: Nasumično se generiše početna populacija kandidata unutar dozvoljenog prostora rješenja, vodeći računa da svi zadovoljavaju zadana ograničenja. Zatim se definišu osnovni parametri algoritma - veličina populacije (N_p), maksimalan broj iteracija, faktor skaliranja (F), stopa ukrštanja (CR), kao i funkcija cilja, ograničenja i uslovi prekida optimizacionog postupka. Važno je naglasiti da od pravilnog izbora početnih vrijednosti za ove parameter, zavisi uspješnost algoritma i kvalitet rješenja.
2. Generisanje nasljednika: U svakoj generaciji algoritma, nova rješenja nastaju kroz tri evolutivne operacije - selekciju, mutaciju i ukrštanje:
 - Selekcija: Najprije se biraju roditelji, odnosno kandidati koji imaju bolje rezultate, a pritom se čuva raznolikost populacije da algoritam ne bi prerano konvergirao ka lokalnom minimumu.
 - Mutacija: Potom se generišu mutirani vektori kombinovanjem više roditelja, uz prilagođavanje veličine koraka mutacije, čime se osigurava dobra ravnoteža između istraživanja novih i usavršavanja postojećih rješenja.
 - Ukrštanje: Na kraju, mutirani vektor se ukršta s originalnim roditeljem, pri čemu se kontroliše stepen nasljeđivanja osobina između generacija. Tako nastaje nasljednik koji posjeduje osobine oba roditelja, što omogućava dovoljnu raznolikost da se pretraživački prostor šire pokrije.
3. Adaptivno smanjenje populacije: *L-shade* algoritam koristi dodatnu strategiju - postepeno smanjenje populacije tokom iteracija. U početku, veća populacija omogućava šire pretraživanje prostora rješenja, dok se kasnije, približavanjem optimumu, broj kandidata smanjuje radi efikasnije pretrage. Ovim se poboljšava stabilnost konvergencije i ubrzava nalaženje najboljeg rješenja (globalni optimum).
4. Evaluacija kandidata: Nakon što se nova rješenja generišu, vrši se evaluacija svakog od njih pomoću ciljne funkcije. Ako neko od njih pokaže bolje rezultate od prethodno poznatih prema željenom kriterijumu optimizacije, ono postaje novi kandidat za globalni optimum. Ovaj proces se ponavlja kroz velik broj iteracija, dovodeći do postepenog poboljšanja i konvergencije ka konačnom rješenju.
5. Završetak optimizacije: Optimizacija se završava kada algoritam dostigne unaprijed određen broj iteracija ili kada je dostignuta prethodno definisana tolerancija greške (više se ne bilježe značajna poboljšanja u rješenjima). Krajnji rezultat predstavlja najbolje pronađeno rješenje unutar zadatih ograničenja i ciljeva.

Ukratko, algoritam započinje nasumičnim generisanjem populacije potencijalnih rješenja. Kroz iteracije, novi kandidati se formiraju primjenom operatora mutacije i ukrštanja, a zatim se vrši njihova kvalitativna procjena pomoću ciljne funkcije. Ako novi kandidat nadmaši postojeće rješenje, zamjenjuje ga u populaciji. Proces se ponavlja dok se ne ispuni neki od unaprijed definisanih kriterijuma za zaustavljanje, npr. maksimalni broj iteracija ili zadovoljavajuća vrijednost funkcije cilja.

Zahvaljujući sposobnosti da pronađe globalno najbolje rješenje, balansirajući između preciznosti i računske složenosti, odnosno manipulacije postojećih najboljih rješenja i pretraživanja novih, sve je češća njegova upotreba u naučnim i inženjerskim optimizacionim zadacima.

Na Slici 3.1.1 slijedi prikaz algoritma DE pseudo-kodom, a nakon toga su koraci algoritma DE detaljnije opisani.

- ```

○ Postavi parametre N_p , F i CR
○ Inicijalizuj početnu populaciju rješenja
○ Za $i=0$ do N (maksimalan broj iteracija)
 ▪ Za $j=1$ do N_p (broj rješenja/jedinki u populaciji)
 - Generiši mutirani vektor $v_{i,j}$ operatorom mutacije
 - Ukrsti mutirani vektor $v_{i,j}$ sa ciljnim vektorom $x_{i,j}$ kako bi se
 dobio probni vektor $u_{i,j}$
 - Ako je $f(u_{i,j}) \leq f(x_{i,j})$ onda
 - $x_{i,j+1} = u_{i,j}$
 - U suprotnom
 - $x_{i,j+1} = x_{i,j}$
 - Završi
 ▪ Završi petlju
○ Završi petlju

```

*Slika 3.1.1 Pseudo-kod L-shade algoritma*

Proces optimizacije u algoritmu DE obuhvata dvije ključne faze: globalnu i lokalnu pretragu [47]. Globalna pretraga omogućava široko istraživanje prostora rješenja kako bi identifikovao potencijalno dobra područja i izbjegao zaglavljivanje u lokalnim minimumima. Zatim prelazi u lokalnu fazu, gdje se precizno usavršavaju pronađena najbolja rješenja iz prethodne faze i približavaju se funkciji cilja. Uspjeh algoritma zavisi od ravnoteže između ove dvije faze. DE se pokazao kao snažan i fleksibilan alat koji efikasno pronalazi globalna rješenja čak i u složenim optimizacionim problemima. Ovo je dovelo do njegove široke primjene u različitim tehničkim i naučnim oblastima.

Kao što je već pomenuto, uspješnost algoritma u velikoj mjeri zavisi od dobro postavljenih vrijednosti za parametre na samom početku ( $N_p$ ,  $F$ ,  $CR$ ). Ako se ovi parametri nepravilno inicijalizuju, algoritam može sporije konvergirati ili ostati zarobljen u lokalnim optimumima. Glavni izazovi u radu algoritma su:

- Preuranjena konvergencija - kad algoritam prerano "zaključa" rješenje i zapne u lokalnom optimumu, a posebno je izražen problem kod višekriterijumske funkcije cilja.
- Sporo konvergiranje - javlja se kad algoritam napreduje presporo, čineći ga računski zahtjevnijim i sa dužim vremenom izvršavanja procesa optimizacije, a izraženo je kod optimizacionih problema sa velikim brojem promjenljivih.

Za bolju efikasnost i pouzdanost algoritma, ključno je automatsko podešavanje parametara kroz iteracije. Time se postiže bolja ravnoteža između brzine, tačnosti i stabilnosti konvergencije, a povezivanjem sa drugim heurističkim tehnikama, moguće je značajno poboljšati rezultate, posebno kod kompleksnih optimizacionih zadataka.

### 3.1.1. Inicijalizacija

Proces DE započinje definisanjem inicijalne populacije koja se sastoji od  $N_p$  vektora sa  $d$  dimenzija. Ova populacija čine slučajno generisana kandidatska rješenja unutar unaprijed definisanog prostora pretrage, a koji je definisan donjim i gornjim granicama svake dimenzije. Pojedinačne komponente vektora odluke unutar populacije ( $j$ -ta komponenta  $i$ -tog vektora odluke), inicijalizuje se na sljedeći način:

$$x_{i,j}(0) = x_{min,j} + rand_{ij}[0,1](x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (3.1.1.1)$$

gdje su:

$i$  (indeks vektora odluka) se kreće od 1 do  $N_p$ ,

$j$  (indeks komponente/jedinke vektora odluke) se kreće od 1 do  $d$ ,

$x_{min,j}$  i  $x_{max,j}$  su donja i gorna granica za komponentu  $x_{ij}$ ,

$rand_{ij}[0,1]$  je slučajno generisan broj iz uniformne raspodjele između 0 i 1,

a oznaka  $^{(0)}$  znači inicijalizaciju.

Ovakva inicijalizacija osigurava ravnomjeran raspored početnih rješenja u okviru cijelog pretraživačkog prostora. Time se povećava šansa za kvalitetnu pretragu, izbjegava zagruženje u jednom dijelu prostora i smanjuje rizik od preranog zaglavljivanja u lokalnim minimumima.

Raznovrsnost početnih rješenja igra ključnu ulogu u efikasnosti daljih iteracija algoritma. Veća raznovrsnost rješenja omogućava bolju pretragu prostora optimizacije u početnim fazama algoritma, a pravilno definisan prostor pretrage obezbjeđuje stabilnu osnovu za konvergenciju prema optimalnim rješenjima. Zato je pažljivo postavljanje vrijednosti parametara i definisanje ograničenja, jedan od temelja efikasnog rada DE algoritma.

### 3.1.2. Mutacija

Nakon faze inicijalizacije, za svaki pojedinačni član populacije, poznat kao ciljni vektor ili vektor odluke  $x_{i(t)}$ , u tekućoj generaciji  $t$  generiše se odgovarajući donor ili mutant vektor  $v_{i(t)}$ . Ovaj postupak se odvija primjenom mutacione operacije, pri čemu se u ovom istraživanju koristi strategija mutacije “current-to-pbest/1”, koja kombinuje trenutnu jedinku, jednog od najboljih članova populacije ( $x_{pbest}^{(t)}$ ), te dva nasumično izabrana, međusobno različita člana populacije ( $x_{R_1^i}^{(t)}$  i  $x_{R_2^i}^{(t)}$ ):

$$v_i^{(t)} = x_i^{(t)} + F_i^{(t)} \cdot (x_{pbest}^{(t)} - x_i^{(t)}) + F_i^{(t)} \cdot (x_{R_1^i}^{(t)} - x_{R_2^i}^{(t)}) \quad (3.1.2.1)$$

gdje indeksi  $R_1^i$  i  $R_2^i$  predstavljaju nasumično odabранe članove populacije unutar opsega  $[1, N_p]$ , pri čemu su međusobno isključivi.  $x_{pbest}^{(t)}$  je jedan od najboljih članova trenutne populacije i bira se iz skupa najkvalitetnijih jedinki  $N_p \times p$  ( $p \in [0,1]$ ). Faktor skaliranja  $F_i^{(t)}$  je pozitivni kontrolni parameter koji određuje intenzitet skaliranja razlike između vektora koji odgovaraju  $i$ -tom pojedincu u  $t$ -toj generaciji.

Ako komponenta  $v_{i,j}^{(t)}$  mutantnog/donor vektora izlazi van dozvoljenog opsega definisanog intervalom  $[x_{min,j}, x_{max,j}]$ , koriguje se prema sljedećem pravilu:

$$v_{i,j}^{(t)} = \begin{cases} \frac{(x_{min,j} + x_{i,j}^{(t)})}{2}, & \text{ako je } v_{i,j}^{(t)} < x_{min,j} \\ \frac{(x_{max,j} + x_{i,j}^{(t)})}{2}, & \text{ako je } v_{i,j}^{(t)} > x_{max,j} \end{cases} \quad (3.1.2.2)$$

Ova procedura osigurava da sve vrijednosti mutantnog vektora ostanu unutar definisanog prostora pretrage i očuvaju validnost.

Mutacija igra ključnu ulogu u DE jer generiše raznovrsnost unutar populacije i omogućava istraživanje šireg prostora mogućih rješenja. Strategija “*current-to-pbest/I*” koja se koristi u ovom radu, oslanja se na trenutno stanje populacije i najbolje jedinke, kako bi proizvela konkurentnija rješenja i ubrzala konvergenciju. Mutantni vektor tada postaje kandidat za evaluaciju tokom sljedeće faze algoritma.

Treba napomenuti da postoje mnogobrojne strategije mutacije opisane u relevantnoj literaturi, a izbor zavisi od prirode konkretnog optimizacionog problema [48, 49].

Navedene su druge strategije mutacije koje se najčešće koriste:

- “*rand/I*”: U ovoj strategiji mutantni vektor se kreira na osnovu razlike između dva nasumično odabrana vektora iz populacije.
- “*best/I*”: Koristi trenutno najbolje rješenje kao bazu i dodaje mu razliku između dva nasumična vektora, što ubrzava konvergenciju, ali može povećati rizik od zaglavljivanja u lokalnim optimumima.
- “*rand-to-best/I*”: Kombinuje karakteristike “*rand/I*” i “*best/I*” strategija. Mutantni vektor se formira kao linearna kombinacija trenutnog ciljnog vektora, najboljeg rješenja i razlike između nasumično odabranih vektora iz populacije. Na ovaj način algoritam ide ka boljem rješenju, ali ne prebrzo i ne slijepo, već zadržava šansu da istraži i druge pravce.

### 3.1.3. Prilagođavanje parametara

U svakoj generaciji  $t$ , svaki pojedinac unutar populacije formira novi vektor pokušaja (poznat i kao potomak) uz pridružene parametre skaliranja  $F_i^{(t)}$  i stope ukrštanja  $CR_i^{(t)}$ , koji se iterativno prilagođavaju prema sledećim formulama:

$$F_i^{(t)} = randc(\mu F_r^{(t)}, 0.1) \quad (3.1.3.1)$$

$$CR_i^{(t)} = randn(\mu CR_r^{(t)}, 0.1) \quad (3.1.3.2)$$

gdje  $randc(\mu F_r^{(t)}, 0.1)$  i  $randn(\mu CR_r^{(t)}, 0.1)$  označavaju generisanje uzorka iz Košijeve i normalne raspodjele, sa parametrom lokacije  $\mu F_r^{(t)}$  i sa srednjom, očekivanom vrijednošću raspodjele  $\mu CR_r^{(t)}$ . Vrijednost 0.1 označava standardnu devijaciju i skalarni parametar za odgovarajuće raspodjele.  $\mu F_r^{(t)}$  i  $\mu CR_r^{(t)}$  inicijalno su postavljene na 0.5, ali se vremenom dinamički mijenjaju koristeći Lehmerov ponderisani prosjek koji daje prednost uspešnijim jedinkama iz prethodnih generacija [50]. Ovakav pristup omogućava algoritmu da uči iz dosadašnjeg toka optimizacije i bolje se prilagođava promjenama tokom optimizacije.

Faktor skaliranja  $F$  kontroliše koliko će se kandidatno rješenje udaljiti od postojećih (veličina promjene između ciljnog i donorskog vektora). Veći  $F$  podstiče šire istraživanje prostora rješenja, dok manja vrijednost omogućava finije podešavanje. Slično, stopa ukrštanja  $CR$  određuje u kojoj mjeri će novi vektor naslijediti karakteristike od mutiranog rješenja (različitost ciljnog i mutiranog vektora). Veće vrijednosti vode ka većoj raznolikosti, a niže ograničavaju promjene i čuvaju stabilnost. Prilagođavanjem ovih parametara tokom rada algoritma, uspješnije se balansira između istraživanja prostora pretrage i usavršavanja dobrih rješenja, što dovodi do brže konvergencije i kvalitetnijeg finalnog rješenja.

### 3.1.4. Ukrštanje

Ukrštanje predstavlja kombinovanje karakteristika roditeljskih jedinki s ciljem stvaranja novih potencijalnih rješenja, čime se povećava šansa za pronalaženje boljih rješenja. Konkretno, u operaciji ukrštanja, donor vektor  $v_i^{(t)}$  kombinuje svoje komponente sa cilnjim vektorom  $x_i^{(t)}$  kako bi se generisao vektor potomka  $v_i^{(t)} = (v_{i,1}^{(t)}, v_{i,2}^{(t)}, \dots, v_{i,d}^{(t)})$ .

Jedan od najčešće korišćenih pristupa u ovom procesu je binomijalno ukrštanje, gdje se za svaku komponentu vektora pojedinačno odlučuje da li će biti preuzeta iz donorskog ili iz ciljnog vektora [51]. Odluka se donosi na osnovu stope ukrštanja  $CR_i^{(t)}$ , koja definiše vjerovatnoću preuzimanja komponente iz donor vektora. Matematički, binomijalno ukrštanje se izražava kao:

$$u_{i,j}^{(t)} = \begin{cases} v_{i,j}^{(t)}, & \text{ako je } j = K \text{ ili } \text{rand}_{ij}[0,1] \leq CR_i^{(t)} \\ x_{i,j}^{(t)}, & \text{ostalo} \end{cases} \quad (3.1.4.1)$$

gdje je  $K$  nasumično odabrani indeks iz intervala  $[1,d]$ , koji osigurava da najmanje jedna komponenta bude preuzeta od donor vektora, čime se spričava da potomak bude identičan roditelju,  $d$  je dimenzija problema, a  $\text{rand}_{ij}[0,1]$  je slučajno generisan broj iz uniformne raspodjеле između 0 i 1.

U evolutivnim algoritmima, ukrštanje je važan mehanizam kojim se kombinuju osobine različitih jedinki, čime se povećava raznolikost populacije i podstiče otkrivanje boljih rješenja. Binomijalno ukrštanje funkcioniše tako što se za svaku komponentu potomka nasumično odlučuje da li će biti preuzeta iz donor ili cilnjih roditelja, u zavisnosti od vrijednosti parametra  $CR$ . Vrijednost veća ili jednaka vrijednosti parametra  $CR$  znači više preuzetih osobina od donora, dok manji  $CR$  čuva strukturu ciljnog vektora. Ovo pomaže algoritmu da izbjegne lokalne minimume i poboljša pretragu rješenja.

### 3.1.5. Selekcija

Selekcija je završni korak u svakoj iteraciji DE algoritma i odlučuje koji vektor će preći u narednu generaciju  $(t+1)$ , vektor potomak  $u_i^{(t)}$  ili se zadržava ciljni vektor  $x_i^{(t)}$ . Ako novo rješenje (potomak) ima bolju ili jednaku vrijednost ciljne funkcije u poređenju s postojećim rješenjem (cilnjim vektorom), ono ga zamjenjuje. U suprotnom, zadržava se staro rješenje. Ovaj proces se sprovodi na osnovu sljedećeg kriterijuma:

$$x_i^{(t+1)} = \begin{cases} u_i^{(t)}, & \text{ako je } f(u_i^{(t)}) \leq f(x_i^{(t)}) \\ x_i^{(t)}, & \text{ostalo} \end{cases} \quad (3.1.5.1)$$

gdje je  $f(u_i^{(t)})$ , odnosno  $f(x_i^{(t)})$  ciljna funkcija za potomka i ciljni vektor, respektivno, koja se minimizuje u postupku optimizacije. Ovaj jednostavan, ali efikasan mehanizam osigurava da se kvalitet rješenja ne pogoršava kroz generacije, čime se omogućava konvergencija ka optimalnom rješenju.

Selekcija u DE algoritmu igra ključnu ulogu u očuvanju kvaliteta rješenja kroz generacije. Kada novi vektor potomka pruži jednaku ili bolju vrijednost ciljne funkcije od postojećeg rješenja, on ga zamjenjuje i prelazi u sljedeću generaciju. Time se izbjegava da slabija rješenja naruše napredak algoritma.

Prednosti ovakvog pristupa uključuju povećanu stabilnost i postepenu tendenciju ka poboljšanju, jer se lošija rješenja automatski odbacuju. Međutim, pošto se samo bolja ili jednak rješenja prihvataju, postoji rizik od prerane konvergencije - situacije kada algoritam prerano "zapne" u lokalnom minimumu. Ovaj nedostatak se može ublažiti dobrim podešavanjem parametara i uvođenjem dodatnih mehanizama za održavanje raznovrsnosti. U cjelini, selekcija je jednostavna, ali u kombinaciji sa mutacijom i ukrštanjem, pruža snažan okvir za efikasnu optimizaciju.

### 3.1.6. Linearno smanjenje veličine populacije

*L-shade* je unaprijeđena verzija DE koja automatski podešava ključne parametre – faktor skaliranja ( $F$ ) i stopu ukrštanja ( $CR$ ) – na osnovu uspješnosti prethodnih rješenja. Umjesto fiksnih vrijednosti, algoritam koristi istorijske podatke kako bi ove parametre kontinuirano prilagođavao, čime se postiže bolji balans između istraživanja prostora i iskorištavanja dobrih rješenja.

Pored toga, algoritam uvodi mehanizam za postepeno smanjenje veličine populacije tokom vremena, što dodatno ubrzava konvergenciju. Veličina populacije se linearno smanjuje u skladu s napretkom optimizacije – od početne vrijednosti do minimalne potrebne (najmanje 4 jedinke, zbog zahtjeva izabrane mutacione strategije). Veličina populacije u svakoj narednoj generaciji  $t+1$  računa se pomoću jednačine:

$$N_{p(t+1)} = \text{round} \left[ \left( \frac{N_{Pmin} - N_{Pini}}{NFE_{max}} \right) \cdot NFE + N_{Pini} \right] \quad (3.1.6.1)$$

gdje je  $N_{Pmin}$  minimalna veličina populacije,  $N_{Pini}$  je inicijalna veličina populacije, dok su  $NFE_{max}$  i  $NFE$  maksimalan broj evaluacija funkcije cilja i trenutni broj evaluacija funkcije cilja, respektivno. Ova sposobnost adaptacije omogućava bržu i efikasniju pretragu, posebno u kasnijim fazama kada su velike populacije manje korisne.

Ako se u nekoj iteraciji dogodi da je nova veličina populacije postane manja od trenutne, tj.  $N_{p(t+1)} < N_{p(t)}$ , tada se jedinke sa najlošijim rezultatima uklanjuju iz populacije u broju:  $(N_{p(t)} - N_{p(t+1)})$  [50]. Na taj način, populacija se kontrolisano smanjuje kako algoritam odmiče, čime se podstiče preciznije pretraživanje prostora rješenja u završnim fazama

optimizacije. Istovremeno se uklanjaju manje dobra rješenja i smanjuje broj potrebnih računskih operacija, što doprinosi bržoj konvergenciji algoritma.

Prednosti dinamičkog smanjenja populacije:

- manja populacija u kasnijim fazama ubrzava proces optimizacije.
- omogućava brzu i široku pretragu prostora rješenja u početku, a potom se usmjerava na usavršavanje najboljih rješenja.
- umanjuje računsko opterećenje.

Uvođenje ovog mehanizma u *L-shade* algoritam predstavlja značajan napredak, jer omogućava inteligentno prilagođavanje veličine populacije, čime se poboljšava efikasnost i preciznost konačnih rješenja.

### 3.1.7. Kriterijumska funkcija

Planiranje sistema podrazumijeva izbor optimalnog rješenja koje zadovoljava tehničke, ekonomске i operativne zahtjeve. U praksi često postoji više mogućih rješenja koja su prihvatljiva, ali se optimizacijom traži najbolje u skladu sa jasno definisanim kriterijumima.

Osnova bilo kog optimizacionog procesa je definisanje kriterijumske (objektivne) funkcije - matematičkog izraza koji ocjenjuje kvalitet pojedinačnih rješenja u zavisnosti od promjenljivih parametara. U energetskim sistemima, ciljevi optimizacije zavise od konkretne primjene, a najčešće uključuju:

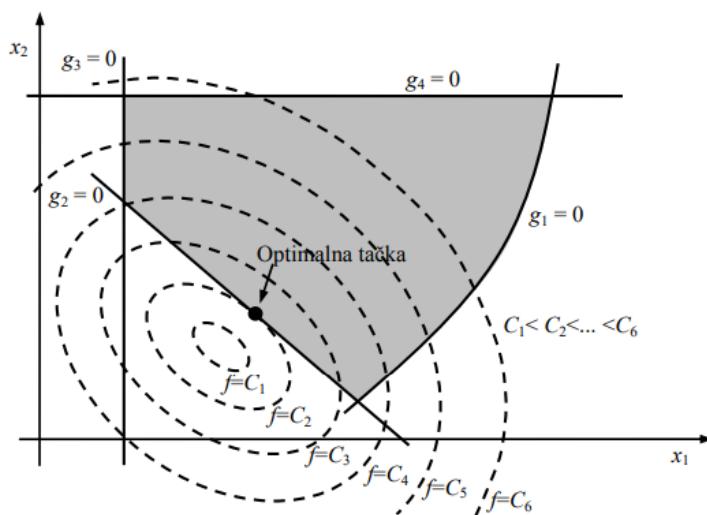
- smanjenje gubitaka aktivne snage,
- redukciju troškova (operativnih i investicionih),
- povećanje efikasnosti rada sistema,
- skraćivanje vremena izvršenja,
- ili maksimizaciju profita.

Konačan izbor cilja zavisi od prirode konkretnog problema koji se rješava.

U inženjerskoj praksi često je potrebno istovremeno zadovoljiti više ciljeva, što zahtijeva primjenu višekriterijumske optimizacije. U takvim slučajevima ne postoji jedno optimalno rješenje, već skup kompromisnih rješenja, gdje se poboljšanje jednog kriterijuma može postići samo uz pogoršanje drugog. Matematički, sve tačke koje zadovoljavaju uslov:

$$f(x) = C \quad (3.1.7.1)$$

formiraju tzv. površ kriterijumske funkcije. Za različite vrijednosti konstante  $C$  dobijaju se različite površine u prostoru upravljačkih promjenljivih. U dvodimenzionalnom slučaju (Slika 3.1.7.1), moguće ih je prikazati grafički zajedno sa površinama ograničenja, što olakšava pronalaženje optimalnog rješenja. Međutim, kada broj upravljačkih promjenljivih premaši tri, vizuelizacija više nije moguća i tada se primjenjuju numeričke metode - linearna i nelinearna optimizacija, heuristički i metaheuristički algoritmi, višekriterijumski evolucijski algoritmi, itd. Zato je izbor odgovarajuće kriterijumske funkcije i metode optimizacije od presudnog značaja za uspješno rješavanje inženjerskih problema.



Slika 3.1.7.1 Upravljački prostor sa krivama ograničenja

Optimizacija se svodi na traženje najveće ili najmanje vrijednosti ciljne funkcije  $f(x)$ . Svaki problem maksimizacije može pretvoriti u ekvivalentan problem minimizacije tako što se uzme negativna vrijednost funkcije:

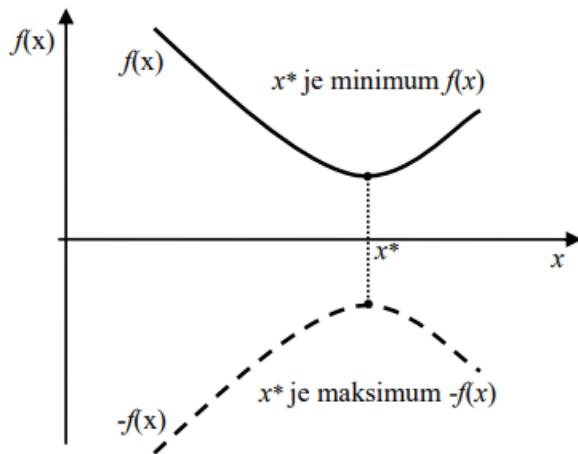
$$\max f(x) \leftrightarrow \min -f(x) \quad (3.1.7.2)$$

Ova osobina omogućava jedinstven pristup svim problemima optimizacije - kroz proces minimizacije - bez obzira na to da li se u suštini traži maksimum ili minimum, matematički postupci su uvijek isti.

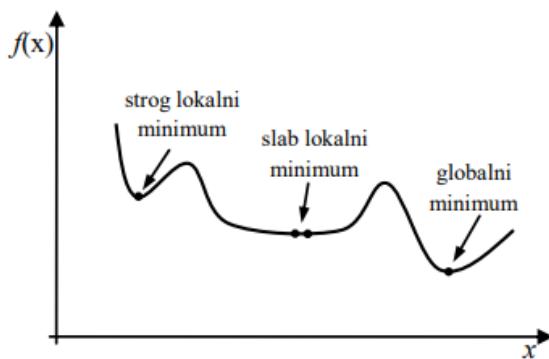
Cilj minimizacije je pronalaženje globalnog minimuma, odnosno tačke u kojoj ciljna funkcija dostiže svoju najnižu vrijednost unutar cijelog definisanog domena. Međutim, u mnogim problemima nailazi se i na lokalne minimume, koji predstavljaju najnižu vrijednost funkcije, ali samo u ograničenom području oko te tačke. Lokalni minimum može biti:

- Strogi lokalni minimum, ako je vrijednost funkcije u toj tački manja od svih ostalih u okruženju.
- Slabi lokalni minimum, ako postoje i druge tačke u blizini sa istom vrijednošću.

Na ilustraciji (Slika 3.1.7.2) prikazana je razlika između globalnog i lokalnog minimuma. Svaki globalni minimum jeste ujedno i lokalni, ali lokalni ne mora biti globalni - on može predstavljati samo djelimično rješenje u širem prostoru funkcije [52]. Grafički prikaz lokalnog i globalnog minimuma funkcije  $f(x)$  je dat na Slici 3.1.7.3.



Slika 3.1.7.2 Određivanje maksimuma kriterijumske funkcije



Slika 3.1.7.3 Ilustracija lokalnog i globalnog minimuma funkcije  $f(x)$

Jedan od ključnih izazova u optimizaciji je izbjegavanje lokalnih minimuma, naročito kod složenijih funkcija sa mnogo ekstremnih tačaka. Da bi se to postiglo, primjenjuju se različite napredne tehnike:

- stohastičke metode (npr. GA, DE, simulirano kaljenje),
- gradijentne metode (poput Njutnove metode i metode konjugovanih gradijenata),
- metaheuristički pristupi (roj čestica, tabu pretraga, evolucione strategije).

Zbog ovih izazova, pravilan izbor optimizacionog algoritma i metode pretrage igra ključnu ulogu u nalaženju globalno optimalnog rješenja.

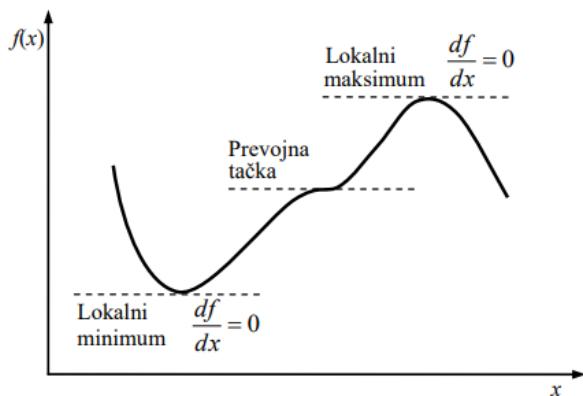
Za određivanje minimuma ili maksimuma kriterijumske funkcije  $f(x)$ , potrebno je analizirati njene izvode. Prvi uslov koji mora biti ispunjen da bi neka tačka bila kandidat za ekstrem funkcije jeste da njen prvi izvod bude jednak nuli:

$$\frac{df(x)}{dx} = 0 \quad (3.1.7.3)$$

Kada je prvi izvod funkcije jednak nuli, funkcija u toj tački nema nagib - tangenta je horizontalna. Takve tačke nazivaju se stacionarnim, a mogu označavati:

- Lokalni minimum,
- Lokalni maksimum,
- Tačku infleksije (tačka prevoja - gdje funkcija mijenja oblik, ali nema ekstremnu vrijednost).

Na Slici 3.1.7.4 prikazano je kako analiza prvog izvoda pomaže u identifikaciji tih tačaka. (potreban uslov egzistencije ekstremne vrijednosti).



Slika 3.1.7.4 Geometrijski prikaz potrebnih uslova optimalnosti

Da bi se razlikovali ovi slučajevi, analizira se drugi izvod funkcije  $f''(x)$ , koji opisuje konkavnost ili konveksnost funkcije u blizini stacionarne tačke (dovoljan uslov egzistencije ekstremne vrijednosti):

- Ako je  $f''(x)>0$ , u toj tački je funkcija konveksna, što znači da postoji lokalni minimum.
- Ako je  $f''(x)<0$ , funkcija je konkavna, što ukazuje na lokalni maksimum.
- Ako je  $f''(x)=0$ , rezultat nije jednoznačan, dodatna analiza je potrebna jer ta tačka može biti prevojna tačka.

Upravo ekstremne vrijednosti kriterijumske funkcije predstavljaju potencijalno najbolja (ili najgora) rješenja u zavisnosti od cilja, pa je važna pravila identifikacija tih tačaka.

## 4. NUMERIČKI REZULTATI

Ovo poglavlje se sastoji iz četiri potpoglavlja. U prvom dijelu opisane su testne distributivne mreže *IEEE - 33 bus* i *IEEE - 69 bus*. U drugom potpoglavlju će biti opisana ideja rekonfiguracije mreže. U trećem dijelu će biti data analiza rezultata za *IEEE - 33 bus* distributivnu mrežu, dok su u četvrtom dijelu prikazani rezultati za *IEEE - 69 bus* distributivnu mrežu.

Svi rezultati dobijeni su primjenom programskog jezika *Matlab*. Analiza se sprovodi na *IEEE 33 bus* radijalnom distributivnom sistemu koji se sastoji od 33 čvora i 32 grane, kao i *IEEE 69 bus* radijalnom distributivnom sistemu koji se sastoji od 69 čvorova i 68 grana. Bazna vrijednost napona svakoga čvora iznosi 12.66 kV, a bazna snaga je 10 MVA za mrežu sa 69 čvorova, odnosno 100 MVA za mrežu sa 33 čvora. Razlog tome je intuitivan, jer mreža sa 33 čvora bliže oslikava mreže koje imaju veće kapacitete i opterećenja (viši naponski nivoi), dok mreža sa 69 čvorova bolje odražava stvarne uslove u distribuciji električne energije (razgranate potrošačke mreže).

U Tabeli 4.1, prikazan je sažetak studija slučaja ovog master rada. Kao što je pokazano, razmatraće se slučajevi samo rekonfiguracije mreže, samo alokacije DIE i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE za obje mreže.

*Tabela 4.1 Sažetak studija slučaja*

| Mreža                   | Broj studije slučaja | Opis studije slučaja                        |
|-------------------------|----------------------|---------------------------------------------|
| <b><i>IEEE - 33</i></b> | 1                    | Rekonfiguracija                             |
|                         | 2                    | Alokacija DIE                               |
|                         | 3                    | Istovremena rekonfiguracija i alokacija DIE |
| <b><i>IEEE - 69</i></b> | 4                    | Rekonfiguracija                             |
|                         | 5                    | Alokacija DIE                               |
|                         | 6                    | Istovremena rekonfiguracija i alokacija DIE |

U Tabeli 4.2 su navedene dimenzije problema optimizacije za različite slučajeve proučavanja (vidi Tabelu 4.1), kao i primjenjeni parametri za *L-shade* algoritam. U nastavku je dato detaljnije objašnjenje.

*Tabela 4.2 Dimenzije problema optimizacije i primjenjeni parametri za L-shade algoritam*

| Parametar:                                                              | Broj studije slučaja: | Vrijednost: |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|
| <b>Dimenzija optimizacionog problema <i>d</i></b>                       | 1 & 4                 | 5           |
|                                                                         | 2 & 5                 | 6           |
|                                                                         | 3 & 6                 | 11          |
| <b>Početna veličina populacije <math>N_{p_{ini}}</math></b>             | 1, 2, 4 & 5           | 100         |
|                                                                         | 3 & 6                 | 120         |
| <b>Maksimalan broj evaluacija funkcije cilja <math>NFE_{max}</math></b> | 1, 2, 4 & 5           | 20 000      |
|                                                                         | 3 & 6                 | 25 000      |

U studijama slučaja 1 i 4 (sažetak studija slučaja dat u Tabeli 4.1) se vrši samo rekonfiguracija mreže od 33, odnosno 69 čvorova. Postoji 5 petlji za svaku mrežu, a jedinstveni prekidač za sekcionalizaciju treba da bude identifikovan u svakoj od petlji kako bi se otvorio i tako očuvaо radijalnost mreže. Ukupno 5 odlučujućih promjenljivih se optimizuje u ovim studijama slučaja, a to su brojevi grana koje se isključuju iz mreže (brojevi prekidača koji se otvaraju i tako simuliraju isključenje grana).

U studijama slučaja 2 i 5 (sažetak studija slučaja dat u Tabeli 4.1) se vrši samo alokacija odgovarajuće snage za 3 distribuirana generatora (DG) u mreži od 33, odnosno 69 čvorova. Potencijalno mjesto priključenja DG-a može biti bilo koji čvor u mreži. Ukupno 6 odlučujućih promjenljivih se optimizuje u ovim studijama slučaja - 3 promjenljive predstavljaju 3 lokacije (čvora) u mreži, dok preostale 3 promjenljive predstavljaju snage svakog generatora.

U studijama slučaja 3 i 4 (sažetak studija slučaja dat u Tabeli 4.1) se vrši istovremena rekonfiguracija mreže i alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a za mrežu od 33, odnosno 69 čvorova. Ukupno 11 odlučujućih promjenljivih se optimizuje u ovim studijama slučaja:

- brojevi grana koje se isključuju iz mreže (brojevi prekidača koji se otvaraju i tako simuliraju isključenje grana) a ima ih koliko i petlji, odnosno 5,
- 3 lokacije (čvora) u mreži, za priključenje DG-a i
- preostale 3 promjenljive predstavljaju instalisane snage svakog DG-a.

Zbog većeg broja promjenljivih koje se optimizuju, početna veličina populacije  $N_{p_{ini}}$  i maksimalan broj evaluacija funkcije cilja  $NFE_{max}$ , postavljene su na vrijednosti veće nego kod ostalih slučajeva, gdje imamo samo rekonfiguraciju ili samo alokacije odgovarajuće snage DIE.

U sekcijama koje slijede analizirani su rezultati simulacija primenom *L-shade* algoritma. Svaki slučaj proučavanja je pokrenut 5 puta, a rezultati su konzistentni sa zanemarljivim varijacijama među različitim pokretanjima. Grafički će biti prikazani rezultati za mrežu od 33 čvora i za mrežu od 69 čvorova, pri čemu je prvo dat izgled inicijalne mreže sa petljama, zatim izgled mreže za slučaj samo rekonfiguracije mreže i na kraju je dat izgled mreže nakon istovremene rekonfiguracije distributivne mreže i alokacije odgovarajuće snage DIE. Kako je slučaj samo alokacije odgovarajuće snage DIE isti za svaki scenario, jer se posmatra osnovna mreža bez dodatnih grana/petlji, on će na samom početku biti prikazan i analiziran kod obje distributivne mreže.

Za mrežu od 33 čvora predstavljeno je 27 različitih, mogućih scenarija, dok je za mrežu od 69 čvorova predstavljeno 16 scenarija, zbog većeg broja podataka za obradu. Ovi scenariji zavise od izbora putanje petlji u inicijalnoj mreži. Za neke scenarije, dobiće se bliski rezultati, dok će se pokazati da pojedini scenariji značajno odstupaju u vrijednostima gubitaka aktivne snage (primarni predmet istraživanja ovog master rada).

U dosadašnjim literaturama [53] proučavan je samo jedan scenario, koji će biti prikazan u početku analize mreže od 33, odnosno mreže od 69 čvorova, kao prvi mogući scenario. Nakon toga, dati su ostali scenariji koji će se porebiti sa pomenutim. Za svaku mrežu i za svaki slučaj, analiziraće se dešavanja i promjene u mreži za jedan unaprijeđeni i jedan pogoršani scenario od onog koji je obrađen u dosadašnjoj literaturi.

## 4.1. Testne distributivne IEEE mreže

Distributivna testna mreža IEEE sa 33 čvora prikazana je na slici 4.1.1, a na slici 4.1.2 je prikazana IEEE mreža sa 69 čvorova. Osnovni podaci o ovim mrežama, koji su uzeti u obzir u ovom master radu, su sljedeći:

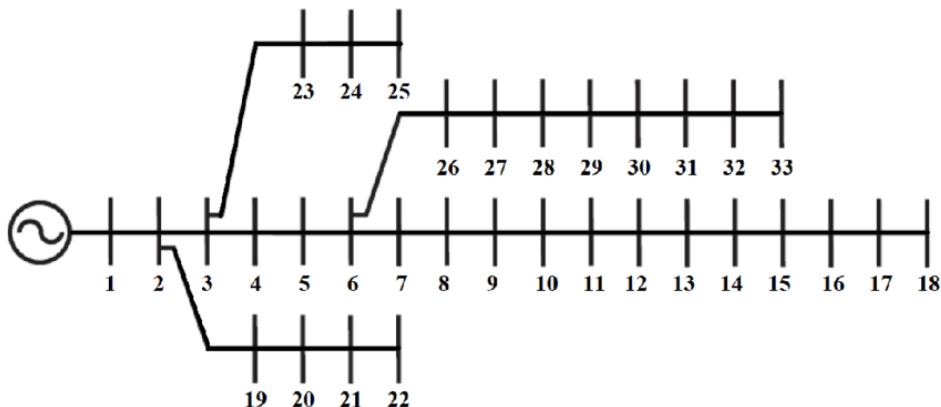
### 1. Mreža sa 33 čvora

- Ukupan broj grana u mreži je 32.
- Ukupno opterećenje ove mreže iznosi  $3,72 \text{ MW}$  i  $2,30 \text{ MVar}$ .
- Parametri vodova i detaljni podaci o opterećenjima u ovoj mreži su navedeni u istraživanju [32] i u prilogu ovog master rada.
- Broj DIE u ovoj mreži je ograničen na 3. Minimalna snaga DIE postavljena je na  $200 \text{ kW}$ , kako bi se olakšala primjena, a ukupna snaga svih DIE u mreži ne smije preći  $2,5 \text{ MW}$ .

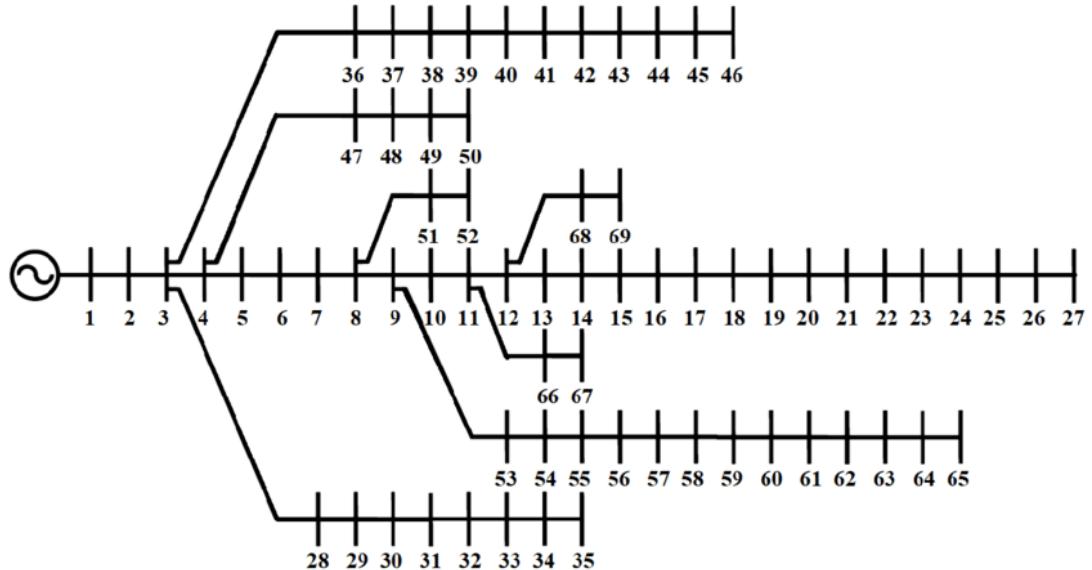
### 2. Mreža sa 69 čvorova

- Ukupan broj grana u mreži je 68.
- Ukupno opterećenje ove mreže iznosi  $3,80 \text{ MW}$  i  $2,69 \text{ MVar}$ .
- I kod ove mreže su parametri vodova i detaljni podaci o opterećenjima navedeni u okviru istraživanja [32] i u prilogu ovog master rada.
- Broj DIE je ograničen na 3. Minimalna snaga DIE postavljena je na  $200 \text{ kW}$ , a ukupna snaga svih DIE u mreži ne smije preći  $2,5 \text{ MW}$ .

U posmatranim mrežama nema dodatnih uređaja, transformatora, šant kondenzatora i sl., a čvor 1 se uzima kao balansni sa idealnim naponskim prilikama i proizvodnjom od  $3.92 \text{ MW}$  aktivne snage i  $2.44 \text{ MVar}$  reaktivne snage u mreži sa 33 čvora, odnosno sa proizvodnjom od  $4.03 \text{ MW}$  aktivne snage i  $2.80 \text{ MVar}$  reaktivne snage u mreži sa 69 čvorova.



Slika 4.1.1 Standardna distributivna IEEE mreža sa 33 čvora



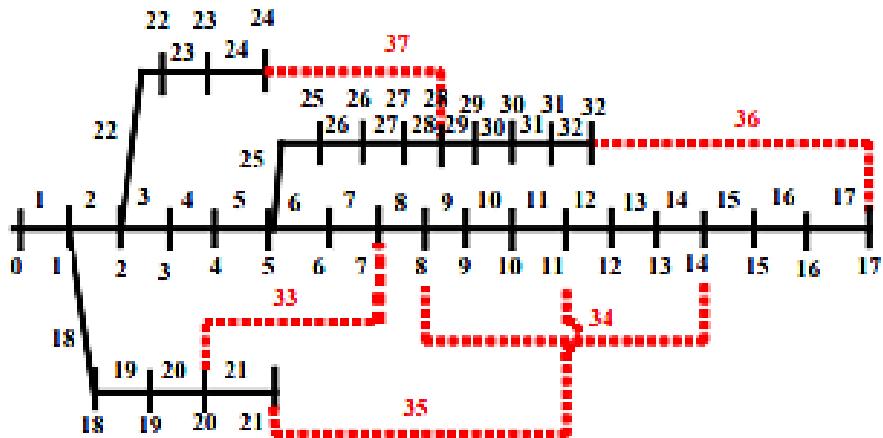
Slika 4.1.2 Standardna distributivna IEEE mreža sa 69 čvorova

## 4.2. Ideja rekonfiguracije distributivne mreže

Topologija distributivnog sistema može biti prikazana grafom koji ima **m** grana i **n** čvorova (sabirnica). Radijalna topologija distributivne mreže je postignuta ako su zadovoljena sljedeća dva uslova:

- konfiguracija mora da posjeduje **n-1** granu;
- konfiguracija mora biti povezana.

Rješenje problema rekonfiguracije i planiranja distributivne mreže smatra se prihvatljivim ukoliko ispunjava tehničke zahtjeve i osigurava povezanost sistema. Budući da se konfiguracija mreže mijenja tokom procesa optimizacije, neophodno je primijeniti efikasne metode analize tokova snaga i provjere povezanosti na sve programske generisane konfiguracije. Ukoliko rekonfiguracija rezultira nepovezanim granama ili formiranjem zatvorenih petlji, dobijena konfiguracija postaje neupotrebljiva i mora biti odbačena. Ova provjera je od posebnog značaja s obzirom na to da su distributivne mreže kompleksne, razgranate strukture, čija optimalna konfiguracija direktno utiče na efikasnost rada elektroenergetskog sistema. Energetski sistem je povezan ako postoji putanja između bilo koje njegove dvije sabirnice.

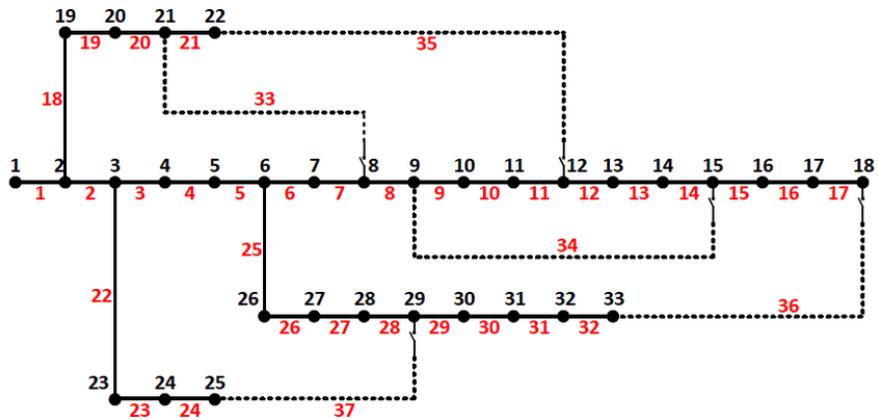


Slika 4.2.1 Provjera radijalnog karaktera distributivne mreže

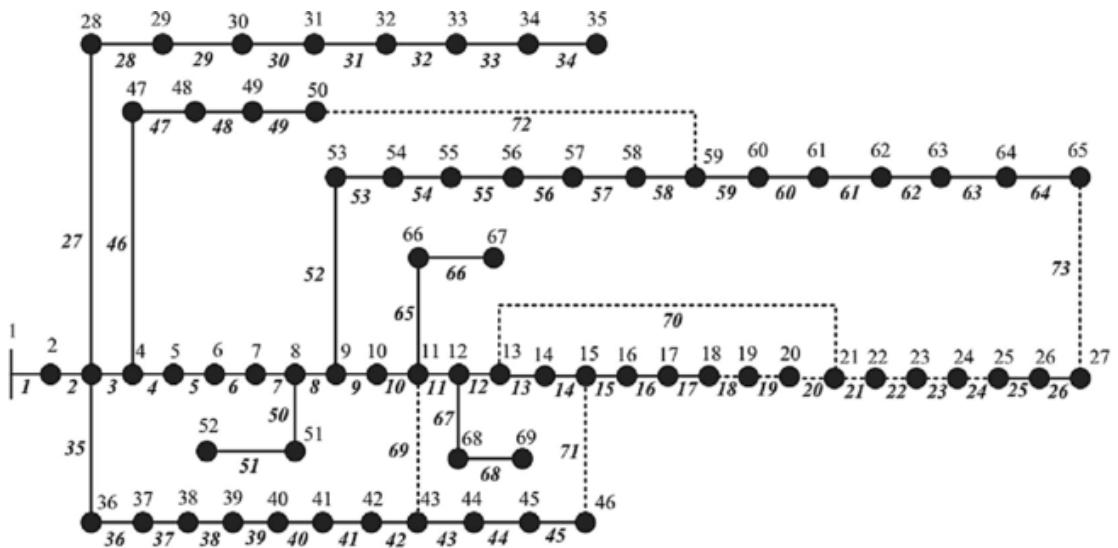
Mreža od interesa sa Slike 4.2.1 sastoji se od 33 čvora (označenih brojevima 0 i 1–32) i 37 grana. Grane su podijeljene u dvije kategorije: osnovne grane s običnim prekidačima (označene brojevima 1–32) i spojne grane (označene crvenom bojom, brojevima 33–37). Tokom procesa rekonfiguracije, moguće je otvoriti bilo koju granu mreže. Da bi se odabrale grane koje će biti isključene, koristi se generator slučajnih brojeva, koji formira niz od pet brojeva, uzimajući u obzir ukupan broj grana ( $37-(33-1)=5$ ). Program kao ulazne podatke prihvata ukupan broj čvorova i ukupan broj grana. Kako bi se ispunio osnovni uslov radijalnosti mreže, potrebno je da broj uključenih grana bude za jedan manji od broja čvorova. Iz ovog kriterijuma direktno proizlazi broj grana koje treba isključiti iz mreže kako bi rekonfiguracija bila valjana. Slična analiza važi i za mrežu sa 69 čvorova.

Na slikama 4.2.2 i 4.2.3 prikazane su osnovne konfiguracije distributivnih mreža sa 33 i 69 čvorova. U ovim konfiguracijama, pune linije predstavljaju normalno zatvorene prekidače za sekcionalizaciju, dok isprekidane linije označavaju normalno otvorene prekidače za povezivanje. Čvorovi (*buses*) su numerisani redom.

Prvi korak u primjeni algoritma podrazumijeva da svi prekidači za sekcionalizaciju i povezivanje u mreži budu zatvoreni, a detaljna analiza će biti data u nastavku ovog rada. Ovim postupkom formiraju se određene petlje u mreži. Nakon inicijalnog zatvaranja svih prekidača, radi očuvanja radijalne strukture mreže, potrebno je otvoriti tačno jedan prekidač u svakoj formiranoj petlji. Pri odabiru prekidača za isključenje, ključno je osigurati da nijedan čvor ne ostane izolovan (bez napajanja). Algoritam funkcioniše iterativno kako bi pronašao optimalne prekidače čijim otvaranjem će se zadovoljiti željeni kriterijum optimizacije (u ovom radu je to minimizacija gubitaka aktivne snage), uz ispunjavanje ograničenja radijalnosti i povezanosti mreže. Važno je naglasiti da se ovaj proces odvija istovremeno sa alokacijom DIE. Algoritam daje rezultate koji uključuju predložene prekidače za otvaranje, kao i optimalne lokacije i veličine DIE, a sve kako bi se postigli minimalni gubici aktivne snage.



Slika 4.2.2 Standardna distributivna IEEE mreža sa 33 čvora



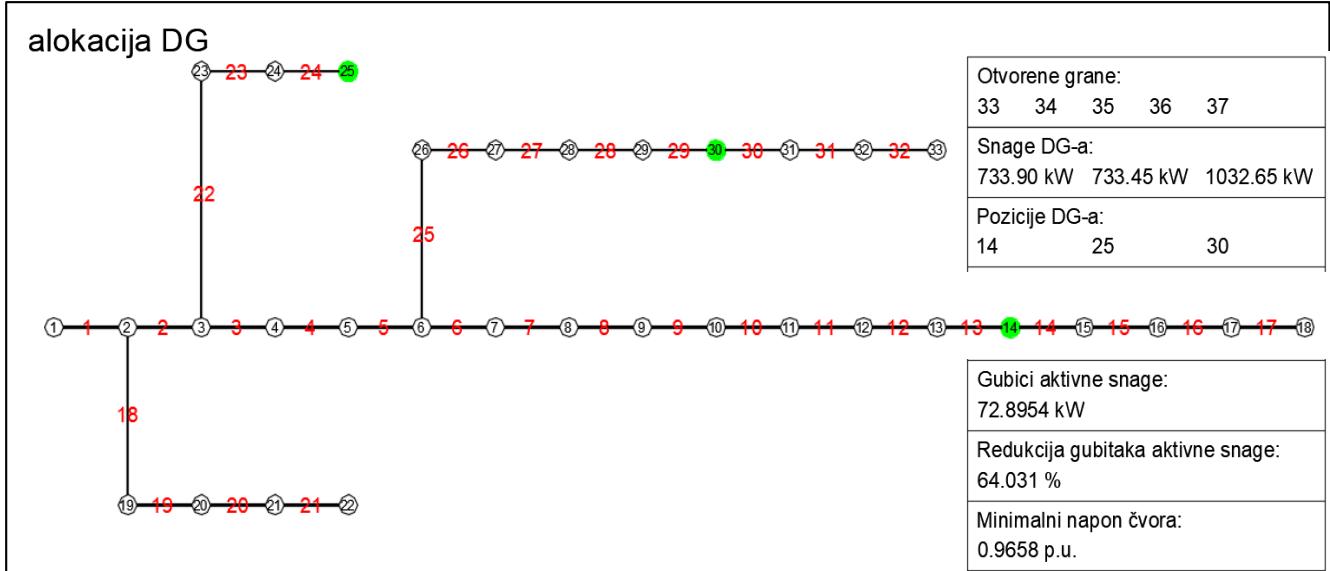
Slika 4.2.3 Standardna distributivna IEEE mreža sa 69 čvorova

### 4.3. Analiza rezultata za mrežu od 33 čvora

U ovom radu je izvršena detaljna analiza velikog broja kombinacija rekonfiguracije mreže i alokacije DIE odgovarajuće snage. Za mrežu od 33 čvora predstavljeno je čak 27 različitih, mogućih scenarija. Analiza će pokazati u kojoj mjeri je efikasna metoda rekonfiguracije mreže u smanjenju gubitaka u sistemu.

Kako je slučaj samo alokacije odgovarajuće snage DIE (studija slučaja 2, vidi Tabelu 4.1) isti za svaki scenario jer se posmatra osnovna mreža bez dodatnih grana/petlji, on će najprije biti prikazan i analiziran. U studiji slučaja 2 se vrši samo alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a u mreži od 33 čvora. Potencijalno mjesto priključenja DIE može biti bilo koji čvor u mreži.

Kod DG-a se često usvaja pretpostavka da je faktor snage  $\cos \varphi = 1$ . Ova pretpostavka podrazumijeva da je njihova reaktivna snaga jednaka nuli, dok je aktivna snaga jednaka prividnoj snazi. Ovakav pristup je opravdan, obzirom na to da je primarni cilj ovih generatora što veća proizvodnja aktivne snage, odnosno energije.



Slika 4.3.1 Studija slučaja 2 - alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a u mreži sa 33 čvora

U studiji slučaja 2 (vidi Tabelu 4.1), sa Slike 4.3.1, određena je lokacija i dimenzionisani su DG-i za mrežu sa 33 čvora (6 nepoznatih veličina), a primjenom *L-shade* algoritma postignuta je vrijednost gubitka aktivne snage od 72.8954 kW, što je neznatno manje od svih rezultata iz dostupne literature.

Tokom analize, sprovedena su i mjerena napona u čvorovima mreže. Uzimajući u obzir da je prema standardu neophodno održavati naponske prilike unutar strogo definisanih granica od 90% do 110% nominalne vrijednosti napona, to se može zaključiti da je ovaj zahtjev ispunjen u posmatranom slučaju. Optimalne pozicije za integraciju DIE u ovom slučaju su čvorovi 14, 25 i 30. Posmatrajući sliku, ovaj raspored DIE odgovarajuće snage je i opravdan obzirom na dužinu ogranka mreže i udaljenost od balansnog čvora 1.

Ako se ukupni gubici u sistemu nijesu značajno promjenili nakon integracije DIE, uprkos promjenama u profilu napona i gubicima po granama, to može biti posljedica neke od sljedećih situacija:

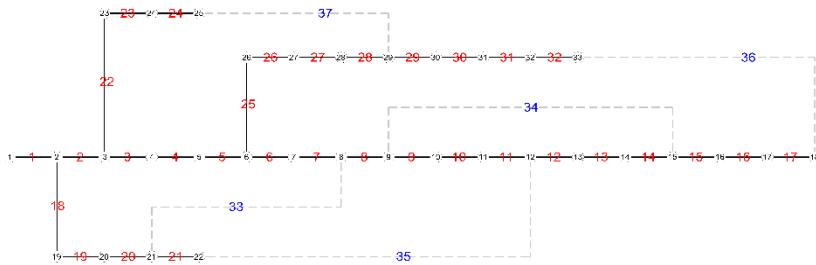
- Postoji mogućnost da je DIE primarno namijenjen za unapređenje lokalnih naponskih prilika i smanjenje opterećenja na određenim granama, tako se gubici mogu smanjiti na tim tačkama, a ostati nepromijenjeni na drugim djelovima sistema, čime se postiže ravnoteža.
- Moguće je da prisustvo DIE nema značajan uticaj na gubitke udaljenijih grana sistema. Zbog ograničenog dometa uticaja generatora, djelovi mreže koji su geografski udaljeni mogu zadržati slične nivoe gubitaka.
- Instalisana snaga DIE i njegova lokacija može uticati na promjenu u vrijednostima gubitaka. Potrebno je pažljivo optimizovati ove parametre kako bi se postigli globalni ciljevi sistema.
- Povećanje napona u određenim čvorovima može rezultirati smanjenjem strujnih opterećenja i gubitaka u blizini DG-a, ali ne mora nužno imati efekat na udaljenije djelove mreže.
- Sa aspekta blizine, najveći uticaj bi bio u čvorovima, koji su čvoru u kome je priključen DG, incidentni, tj. direktno su povezani sa njim.

U nastavku će biti prikazano 27 različitih mogućih scenarija rekonfiguracije mreže (studija slučaja 1, vidi Tabelu 4.1), kao i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE odgovarajuće snage (studija slučaja 3, vidi Tabelu 4.1). Gore izvršena analiza studije slučaja 2 samo alokacije DIE odgovarajuće snage ostaje ista za svaki mogući scenario. Osnovni podaci za svaki slučaj su dati u tabeli pored prikaza izgleda mreže: gubici aktivne snage, smanjenje gubitaka u odnosu na mrežu bez dodatih grana/petlji, broj grane koja je isključena iz mreže, snaga i pozicija DIE i minimalni napon koji se pojavljuje u mreži.

Isprekidane linije su normalno isključene grane/prekidači. Međutim, za potrebe rekonfiguracije mreže namjenski se stvaraju zatvorene petlje, kako bi algoritam identifikovao granu koja predstavlja optimalno mjesto za otvaranje njenih prekidača, a sve sa ciljem postizanja minimalnih gubitaka aktivne snage. Jasno se uočava da je za svaku studiju slučaja, svakog scenarioja, dobijena radikalna struktura mreže, kao i da je svim potrošačima u svakom trenutku obezbijeđeno napajanje električnom energijom.

## SCENARIO 1 - referentni scenario za poređenje

33 bus inicijalni sistem



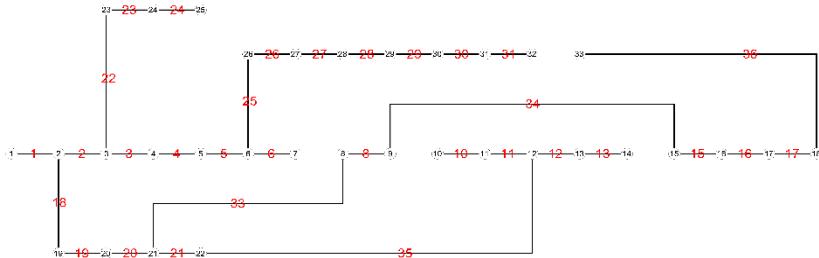
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37

Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_

Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

Rekonfiguracija



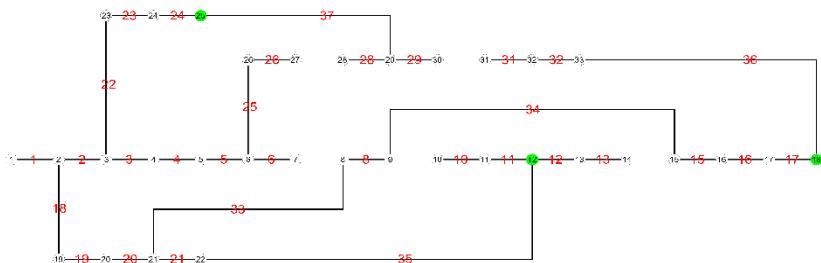
Otvorene grane:  
7 9 14 32 37

Gubici aktivne snage:  
139.5513 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 31.1407 %

Minimalni napon čvora:  
0.93782 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
7 9 14 27 30

Snage DG-a:  
523.78 kW 779.64 kW 1196.59 kW

Pozicije DG-a:  
12 18 25

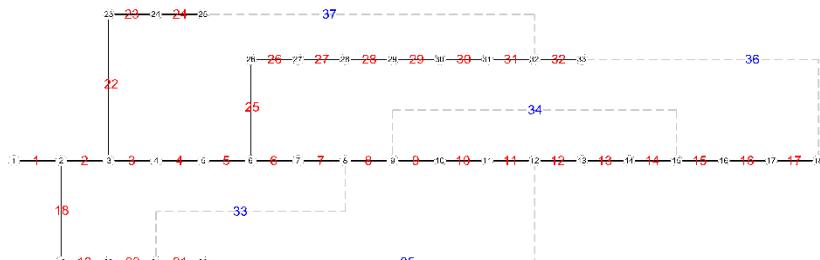
Gubici aktivne snage:  
53.1513 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
73.7734 %

Minimalni napon čvora:  
0.9688 p.u.

## SCENARIO 2

33 bus inicijalni sistem



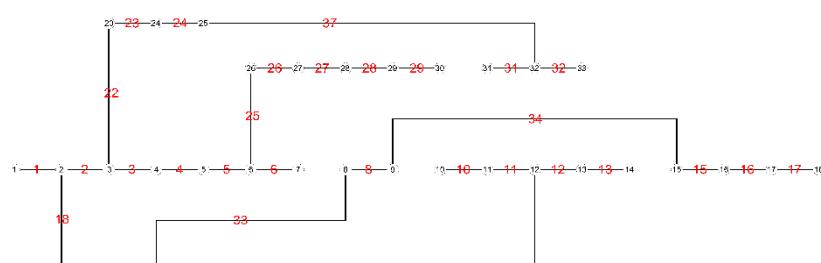
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37

Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_

Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

Rekonfiguracija



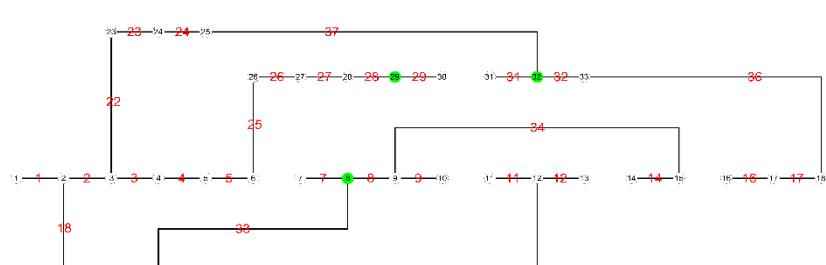
Otvorene grane:  
7 9 14 30 36

Gubici aktivne snage:  
123.8441 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 38.8912 %

Minimalni napon čvora:  
0.95412 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
6 10 13 15 30

Snage DG-a:  
826.29 kW 481.38 kW 1192.33 kW

Pozicije DG-a:  
8 29 32

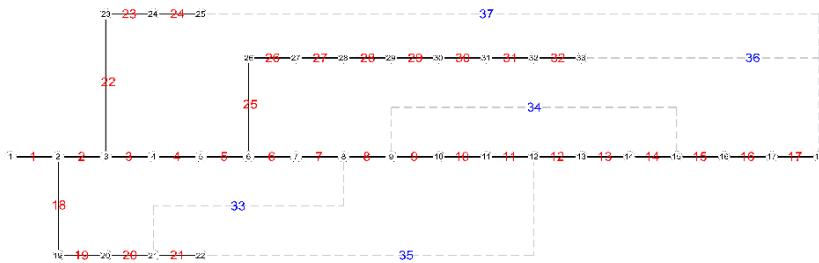
Gubici aktivne snage:  
47.8505 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.38896 %

Minimalni napon čvora:  
0.9784 p.u.

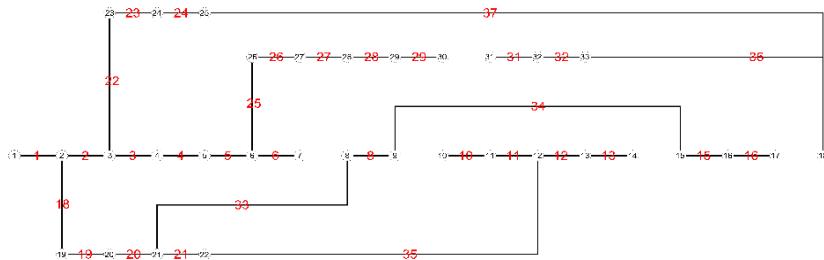
## SCENARIO 3

*33 bus inicijalni sistem*



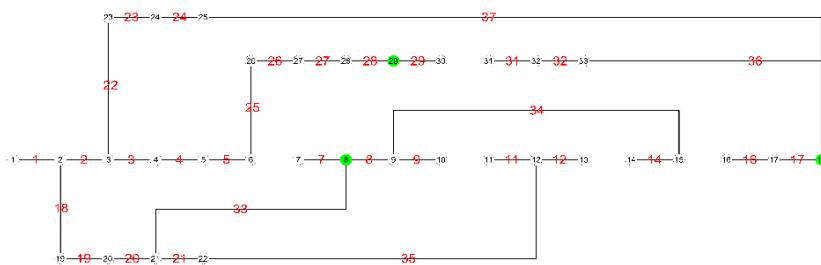
|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 33 34 35 36 37                    |
| Gubici aktivne snage:             |
| 202.6616 kW                       |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.91311 p.u.                      |

*Rekonfiguracija*



|                                              |
|----------------------------------------------|
| Otvorene grane:                              |
| 7 9 14 17 30                                 |
| Gubici aktivne snage:                        |
| 124.9734 kW                                  |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: 38.33395 % |
| Minimalni napon čvora:                       |
| 0.95595 p.u.                                 |

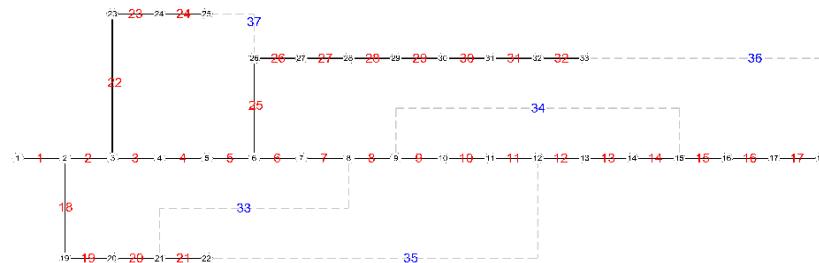
*Rekonfiguracija + alokacija DG*



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 6 10 13 15 30                     |
| Snage DG-a:                       |
| 825.40 kW 1193.01 kW 481.60 kW    |
| Pozicije DG-a:                    |
| 8 18 29                           |
| Gubici aktivne snage:             |
| 48.5891 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 76.0245 %                         |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9783 p.u.                       |

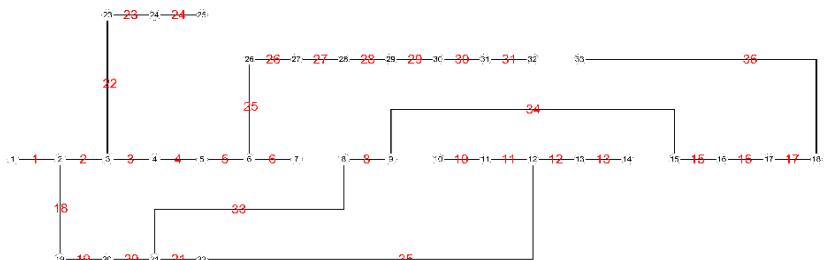
## SCENARIO 4

*33 bus inicijalni sistem*



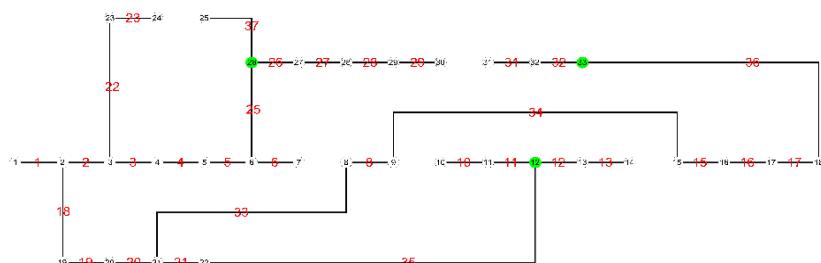
|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 33 34 35 36 37                    |
| Gubici aktivne snage:             |
| 202.6616 kW                       |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.91311 p.u.                      |

*Rekonfiguracija*



|                                             |
|---------------------------------------------|
| Otvorene grane:                             |
| 7 9 14 32 37                                |
| Gubici aktivne snage:                       |
| 139.5513 kW                                 |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: 31.1407 % |
| Minimalni napon čvora:                      |
| 0.93782 p.u.                                |

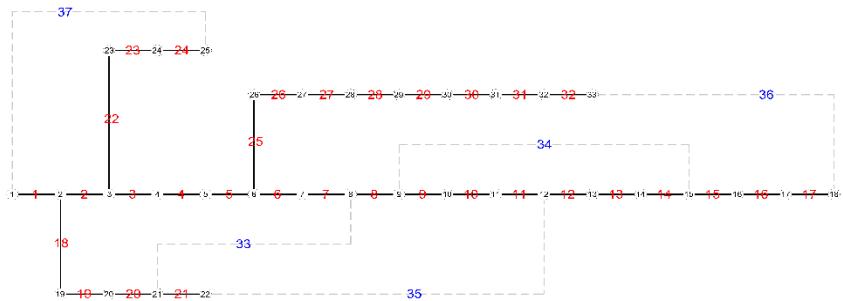
*Rekonfiguracija + alokacija DG*



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 7 9 14 24 30                      |
| Snage DG-a:                       |
| 498.41 kW 1253.05 kW 748.54 kW    |
| Pozicije DG-a:                    |
| 12 26 33                          |
| Gubici aktivne snage:             |
| 57.2184 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 71.76653 %                        |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9689 p.u.                       |

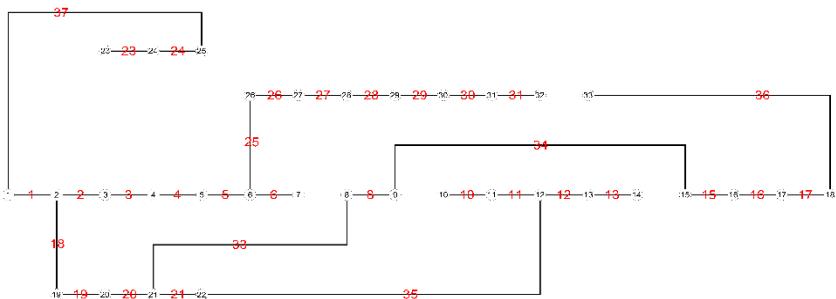
## SCENARIO 5

**33 bus inicijalni sistem**



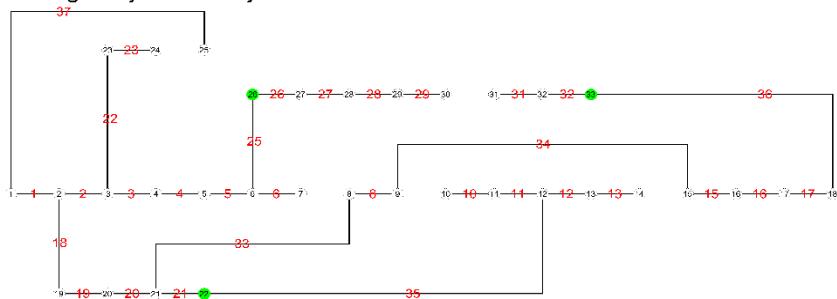
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
7 9 14 22 32  
Gubici aktivne snage:  
114.1875 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 43.6561 %  
Minimalni napon čvora:  
0.94243 p.u.

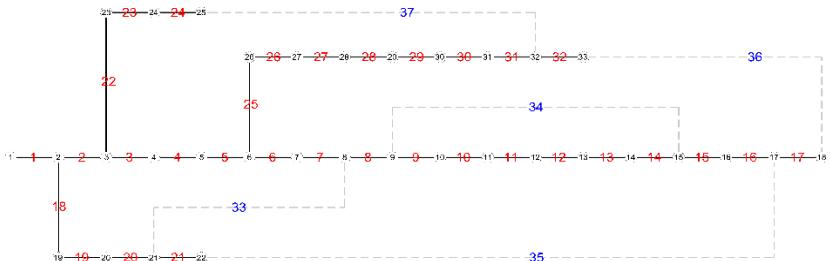
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
7 9 14 23 30  
Snage DG-a:  
801.89 kW 960.33 kW 737.78 kW  
Pozicije DG-a:  
22 26 33  
Gubici aktivne snage:  
47.6310 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.49727 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9729 p.u.

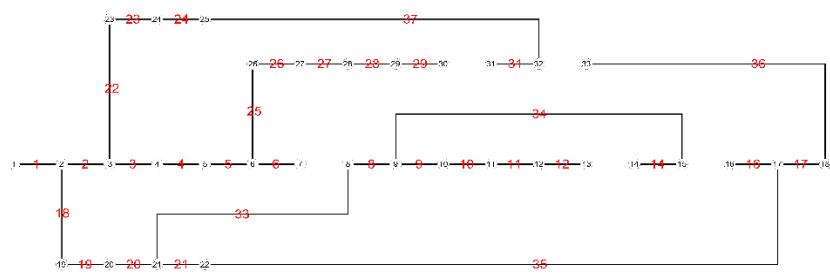
## SCENARIO 6

**33 bus inicijalni sistem**



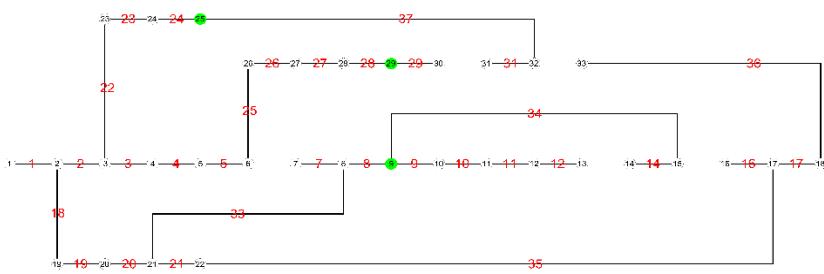
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
7 13 15 30 32  
Gubici aktivne snage:  
124.2387 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 38.6965 %  
Minimalni napon čvora:  
0.95212 p.u.

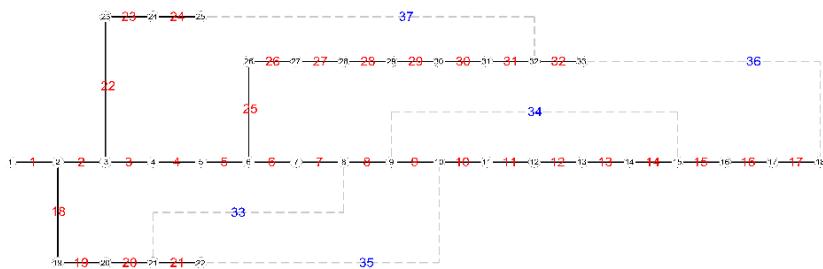
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
6 13 15 17 30  
Snage DG-a:  
865.10 kW 1169.58 kW 465.32 kW  
Pozicije DG-a:  
9 25 29  
Gubici aktivne snage:  
48.5115 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.06281 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9779 p.u.

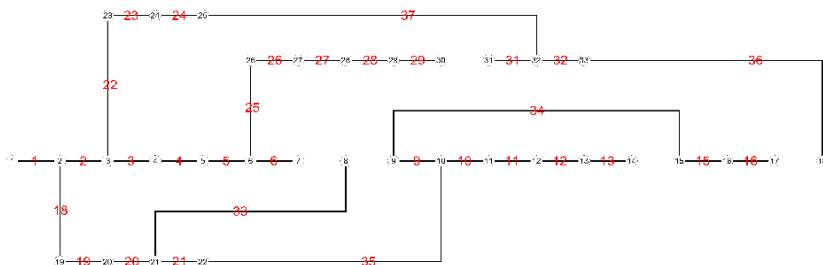
## SCENARIO 7

33 bus inicijalni sistem



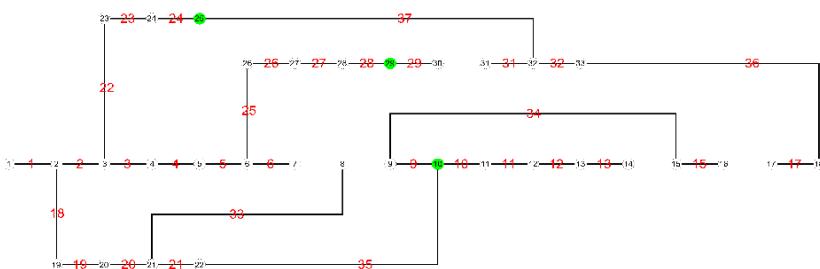
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
7 8 14 17 30  
Gubici aktivne snage:  
127.045 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 37.3118 %  
Minimalni napon čvora:  
0.95416 p.u.

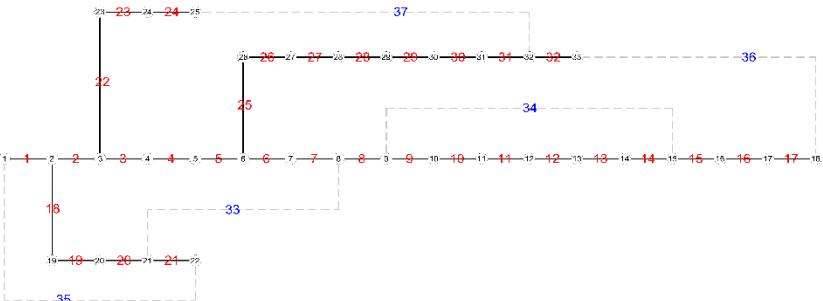
Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
7 8 14 16 30  
Snage DG-a:  
665.76 kW 1268.05 kW 566.19 kW  
Pozicije DG-a:  
10 25 29  
Gubici aktivne snage:  
48.7923 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
75.92425 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9777 p.u.

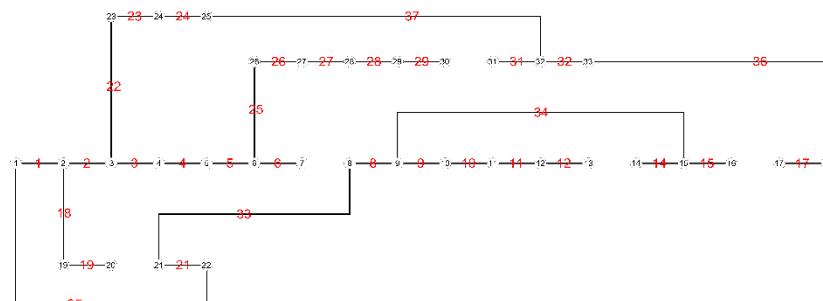
## SCENARIO 8

33 bus inicijalni sistem



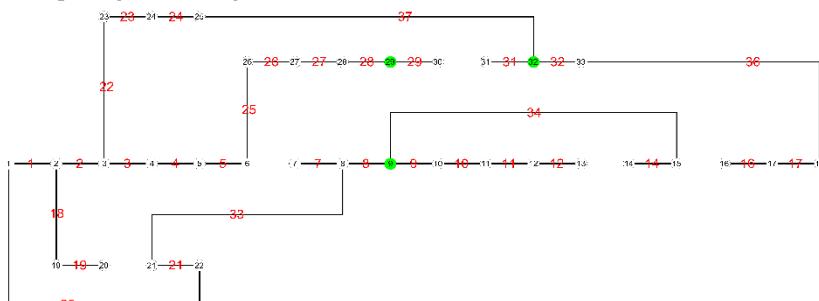
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
7 13 16 20 30  
Gubici aktivne snage:  
127.6652 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 37.0057 %  
Minimalni napon čvora:  
0.95231 p.u.

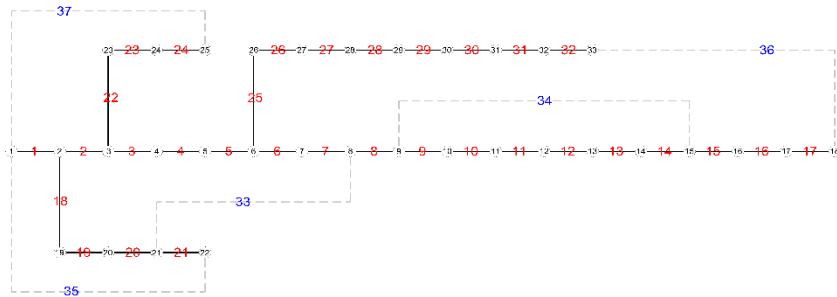
Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
6 13 15 20 30  
Snage DG-a:  
800.17 kW 492.10 kW 1207.74 kW  
Pozicije DG-a:  
9 29 32  
Gubici aktivne snage:  
47.2272 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.69652 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9774 p.u.

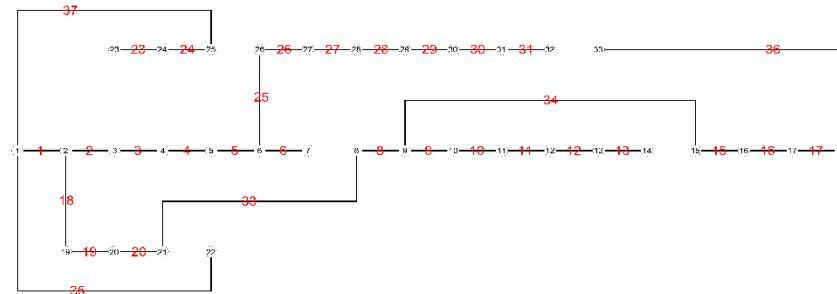
## SCENARIO 9

**33 bus inicijalni sistem**



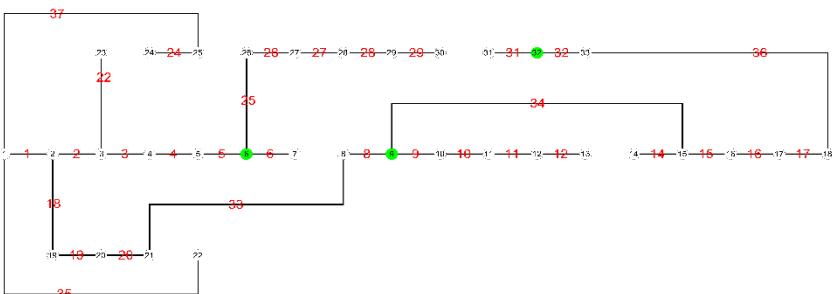
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
7 14 21 22 32  
Gubici aktivne snage:  
122.0736 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 39.7648 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93865 p.u.

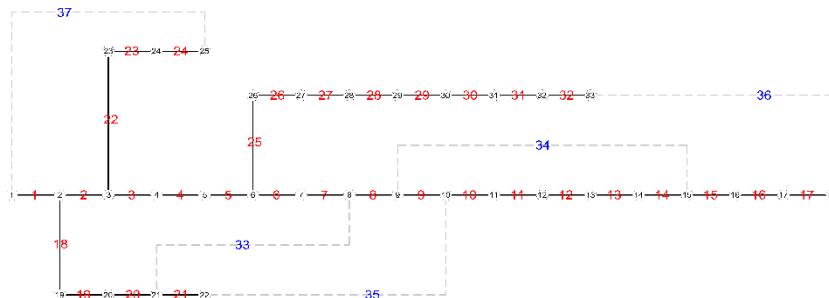
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
7 13 21 23 30  
Snage DG-a:  
1089.44 kW 779.76 kW 630.80 kW  
Pozicije DG-a:  
6 9 32  
Gubici aktivne snage:  
48.9778 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
75.83272 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9709 p.u.

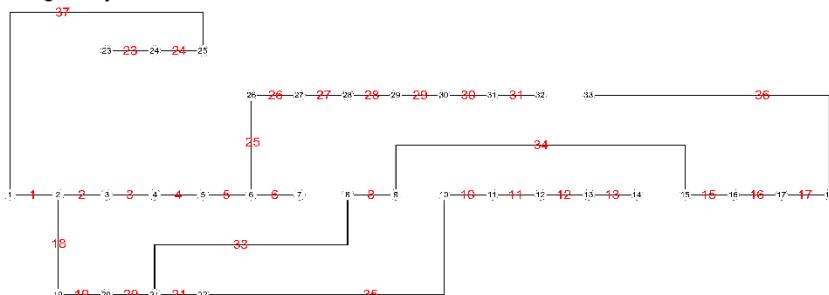
## SCENARIO 10

**33 bus inicijalni sistem**



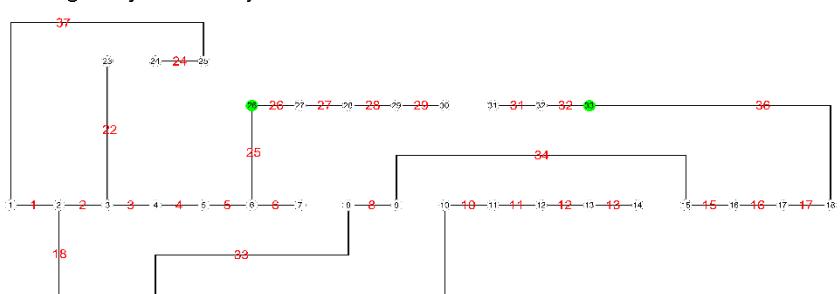
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
7 9 14 22 32  
Gubici aktivne snage:  
114.5227 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 43.4907 %  
Minimalni napon čvora:  
0.94243 p.u.

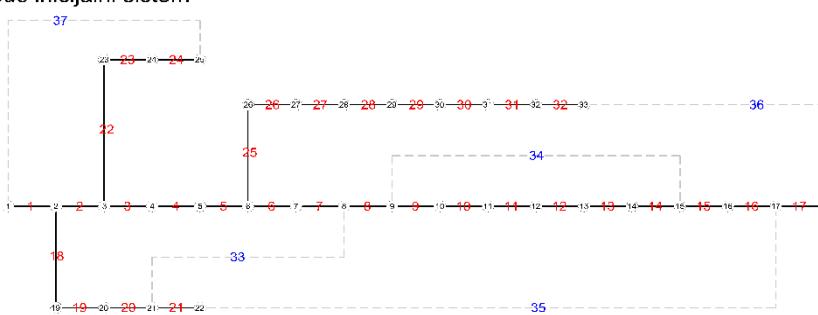
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
7 9 14 23 30  
Snage DG-a:  
802.09 kW 960.13 kW 737.79 kW  
Pozicije DG-a:  
22 26 33  
Gubici aktivne snage:  
47.9400 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.3448 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9729 p.u.

## SCENARIO 11

**33 bus inicijalni sistem**



Otvorene grane:

33 34 35 36 37

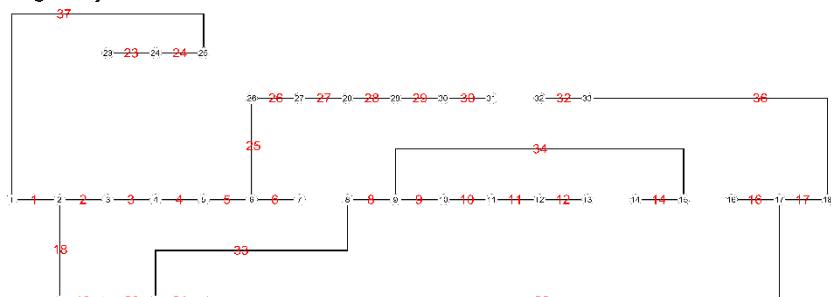
Gubici aktivne snage:

202.6616 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_

Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:

7 13 15 22 31

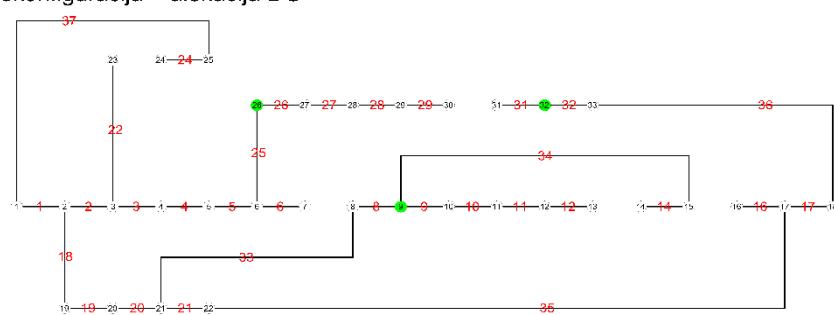
Gubici aktivne snage:

108.4733 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 46.4757 %

Minimalni napon čvora:  
0.9484 p.u.

**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:

7 13 15 23 30

Snage DG-a:  
772.65 kW 1027.17 kW 700.18 kW

Pozicije DG-a:  
9 26 32

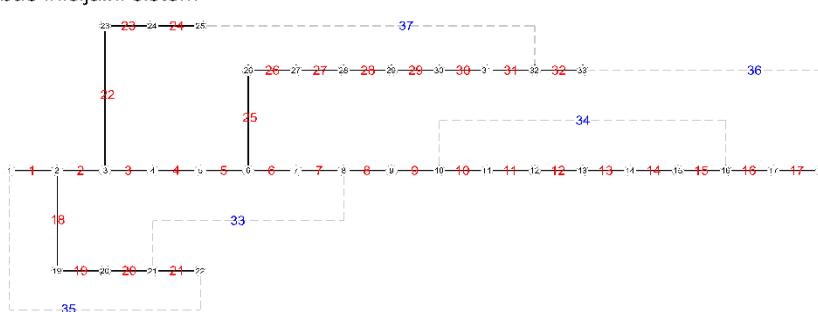
Gubici aktivne snage:  
43.3390 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
78.6151 %

Minimalni napon čvora:  
0.9787 p.u.

## SCENARIO 12

**33 bus inicijalni sistem**



Otvorene grane:

33 34 35 36 37

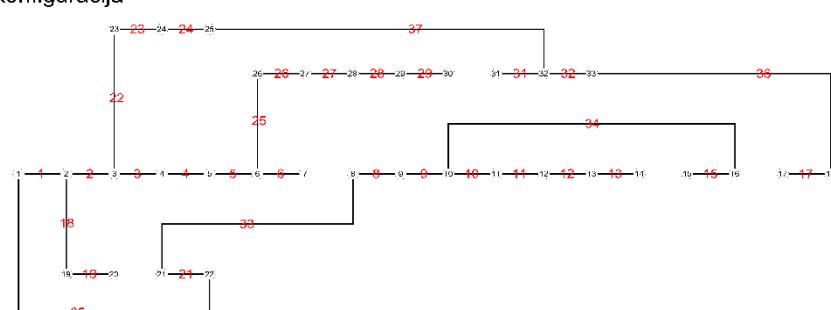
Gubici aktivne snage:

202.6616 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_

Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:

7 14 16 20 30

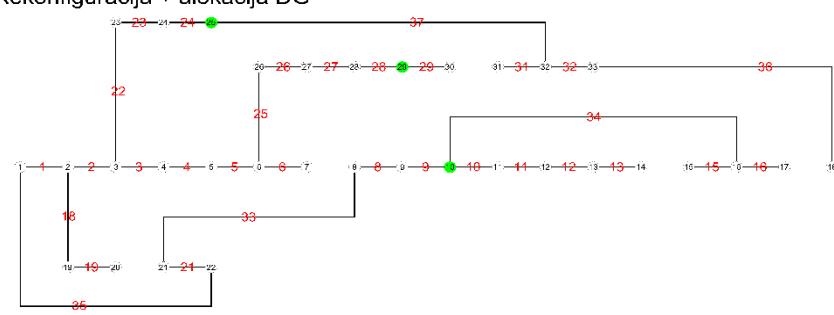
Gubici aktivne snage:

129.1652 kW

Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 36.2656 %

Minimalni napon čvora:  
0.9487 p.u.

**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:

7 14 17 20 30

Snage DG-a:  
718.58 kW 1212.27 kW 569.15 kW

Pozicije DG-a:  
10 25 29

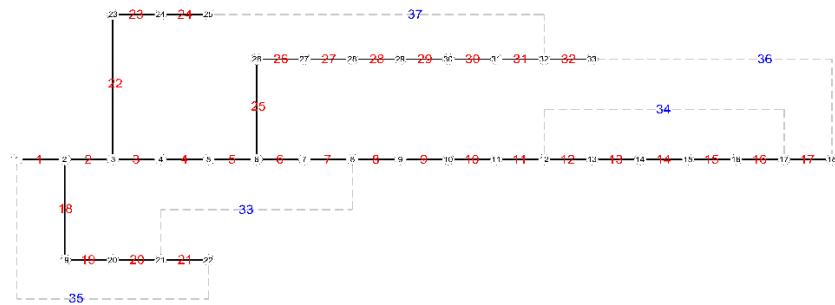
Gubici aktivne snage:  
47.5748 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.5250 %

Minimalni napon čvora:  
0.9775 p.u.

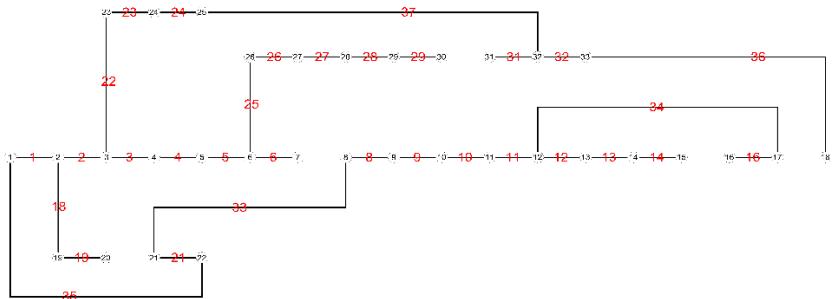
## SCENARIO 13

**33 bus inicijalni sistem**



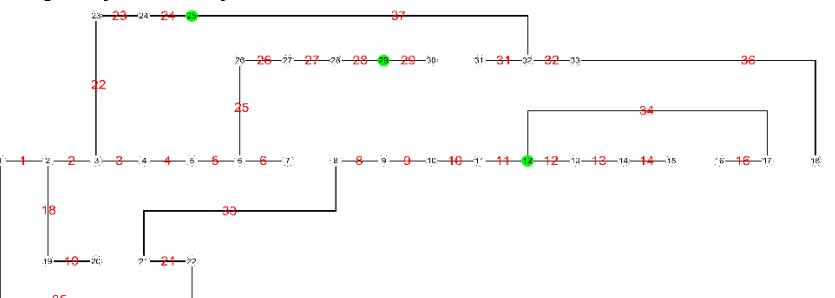
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
7 15 17 20 30  
Gubici aktivne snage:  
130.6585 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 35.5287 %  
Minimalni napon čvora:  
0.94297 p.u.

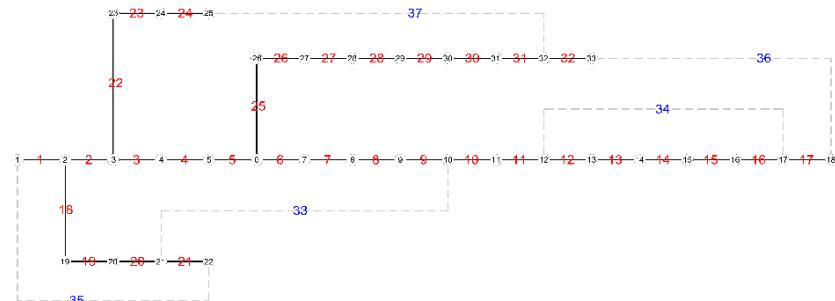
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
7 15 17 20 30  
Snage DG-a:  
701.55 kW 1223.15 kW 575.30 kW  
Pozicije DG-a:  
12 25 29  
Gubici aktivne snage:  
47.7627 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.43229 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9775 p.u.

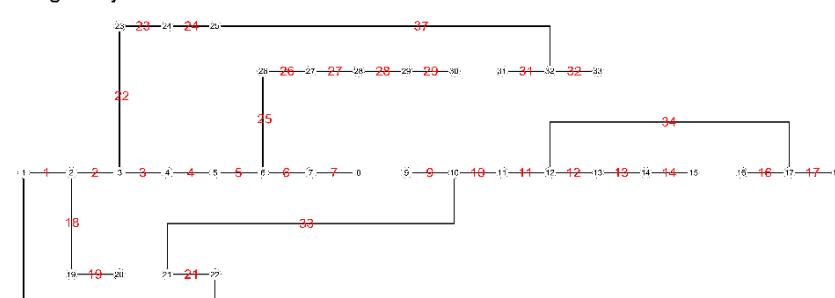
## SCENARIO 14

**33 bus inicijalni sistem**



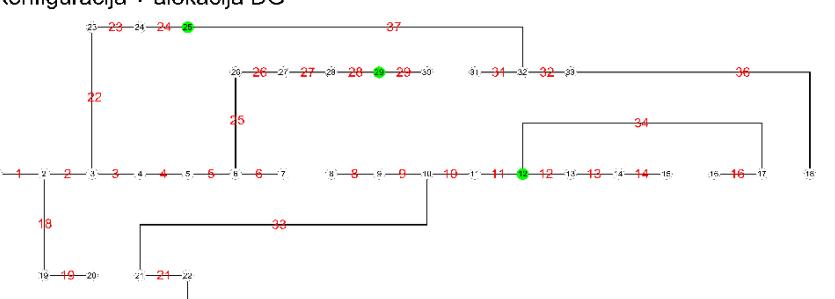
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
8 15 20 30 36  
Gubici aktivne snage:  
123.5144 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 39.0539 %  
Minimalni napon čvora:  
0.95333 p.u.

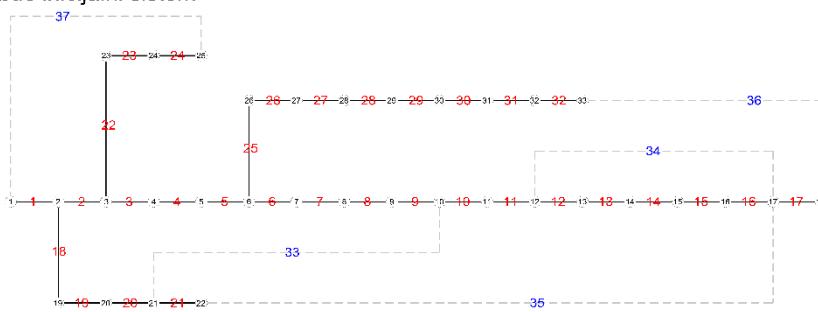
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
7 15 17 20 30  
Snage DG-a:  
742.50 kW 1196.98 kW 560.52 kW  
Pozicije DG-a:  
12 25 29  
Gubici aktivne snage:  
47.3529 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.6345 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9778 p.u.

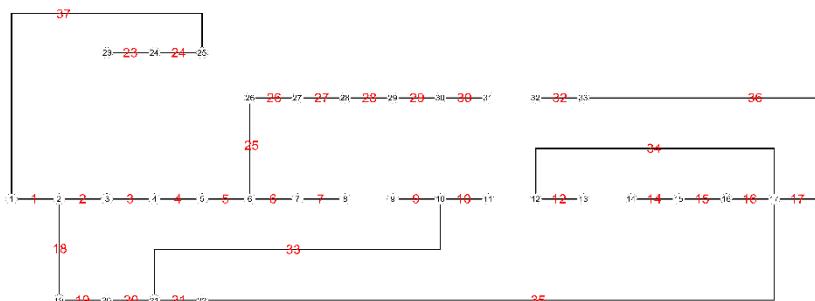
## SCENARIO 15

**33 bus inicijalni sistem**



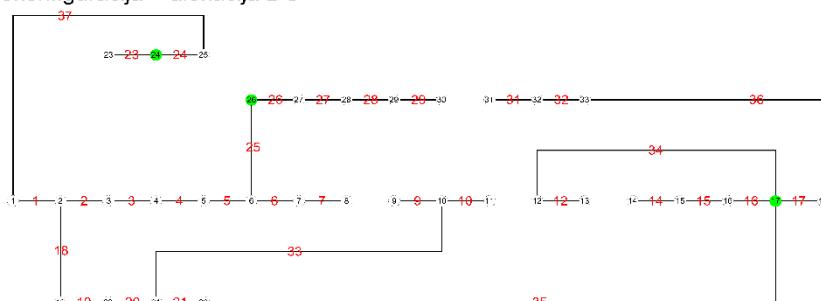
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
8 11 13 22 31  
Gubici aktivne snage:  
109.2701 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 46.0825 %  
Minimalni napon čvora:  
0.94687 p.u.

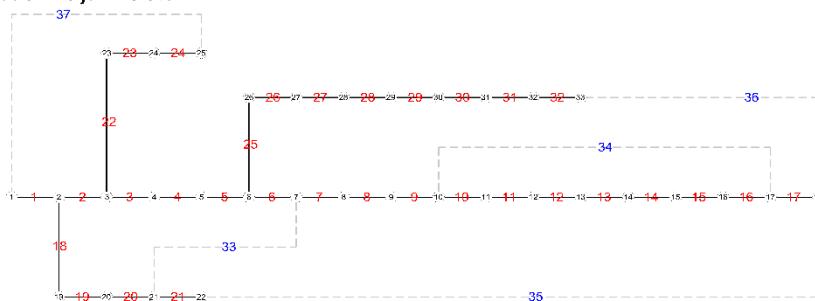
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
8 11 13 22 30  
Snage DG-a:  
1096.10 kW 449.57 kW 954.33 kW  
Pozicije DG-a:  
17 24 26  
Gubici aktivne snage:  
44.8261 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
77.8813 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9739 p.u.

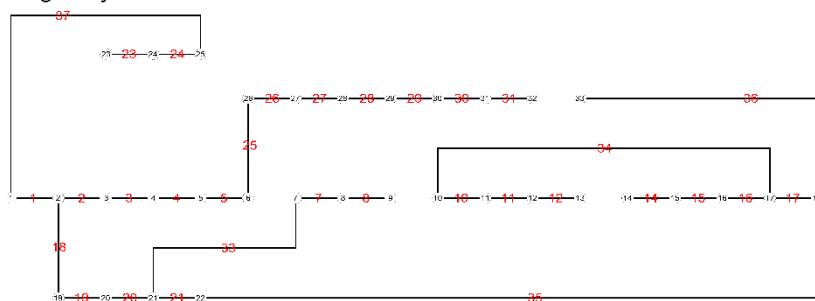
## SCENARIO 16

**33 bus inicijalni sistem**



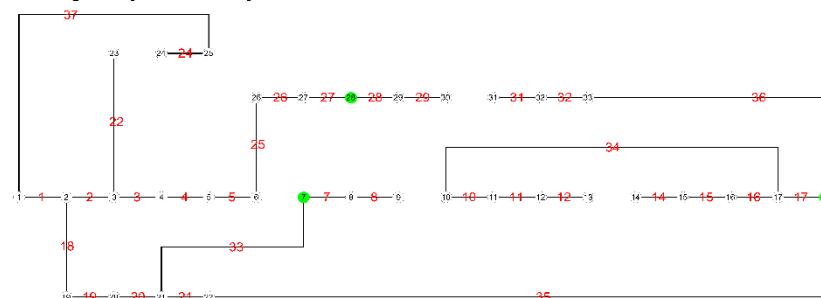
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
6 9 13 22 32  
Gubici aktivne snage:  
119.6395 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 40.9659 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9414 p.u.

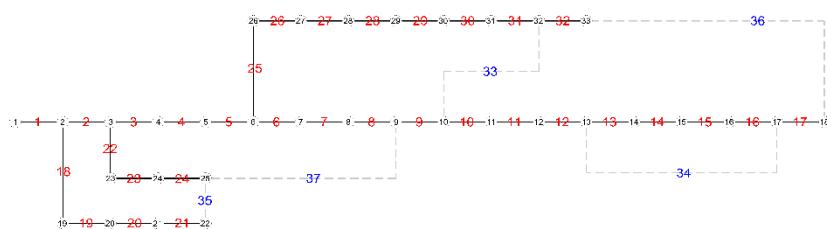
**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
6 9 13 23 30  
Snage DG-a:  
620.71 kW 1188.07 kW 691.22 kW  
Pozicije DG-a:  
7 18 28  
Gubici aktivne snage:  
46.1738 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
77.2163 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9723 p.u.

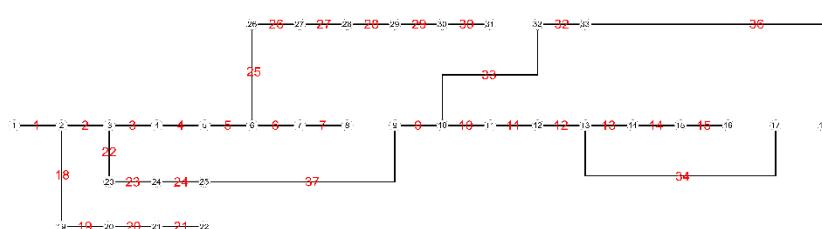
## SCENARIO 17

33 bus inicijalni sistem



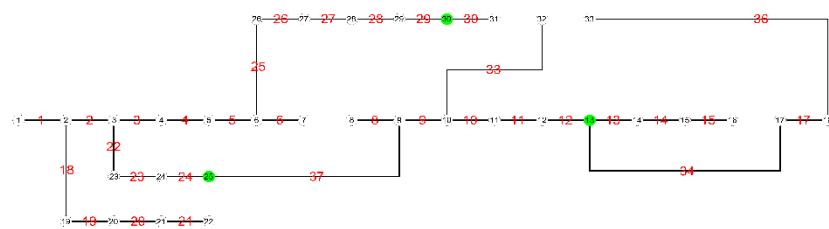
|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 33 34 35 36 37                    |
| Gubici aktivne snage:             |
| 202.6616 kW                       |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| _____                             |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.91311 p.u.                      |

Rekonfiguracija



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 8 16 17 31 35                     |
| Gubici aktivne snage:             |
| 177.6809 kW                       |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 12.3263 %                         |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.92769 p.u.                      |

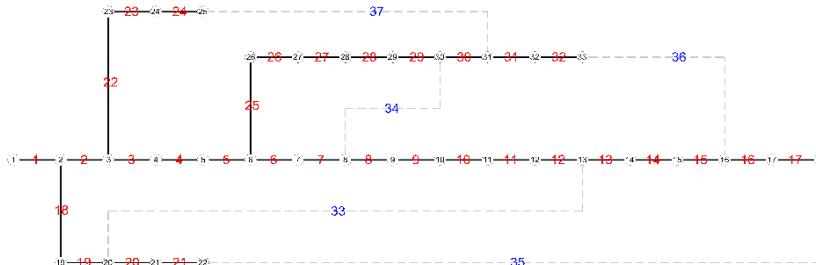
Rekonfiguracija + alokacija DG



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 7 16 31 32 35                     |
| Snage DG-a:                       |
| 725.34 kW 1109.34 kW 665.32 kW    |
| Pozicije DG-a:                    |
| 13 25 30                          |
| Gubici aktivne snage:             |
| 62.0552 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 69.37989 %                        |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9717 p.u.                       |

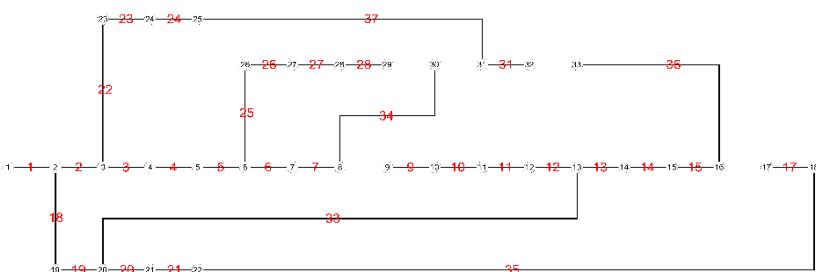
## SCENARIO 18

33 bus inicijalni sistem



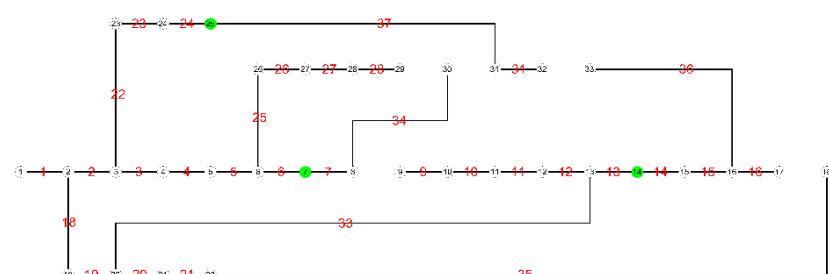
|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 33 34 35 36 37                    |
| Gubici aktivne snage:             |
| 202.6616 kW                       |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| _____                             |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.91311 p.u.                      |

Rekonfiguracija



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 8 16 29 30 32                     |
| Gubici aktivne snage:             |
| 118.535 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 41.5109 %                         |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9515 p.u.                       |

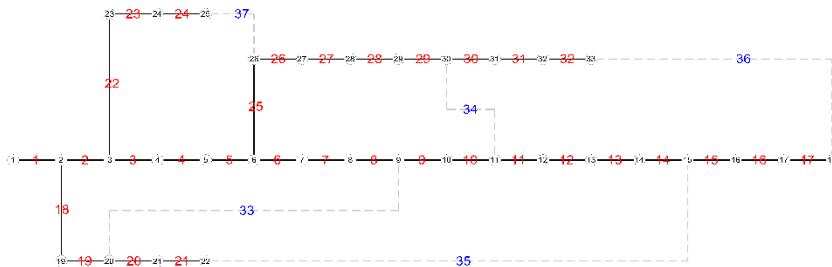
Rekonfiguracija + alokacija DG



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 8 17 29 30 32                     |
| Snage DG-a:                       |
| 893.86 kW 632.74 kW 973.40 kW     |
| Pozicije DG-a:                    |
| 7 14 25                           |
| Gubici aktivne snage:             |
| 47.8363 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 76.396 %                          |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9695 p.u.                       |

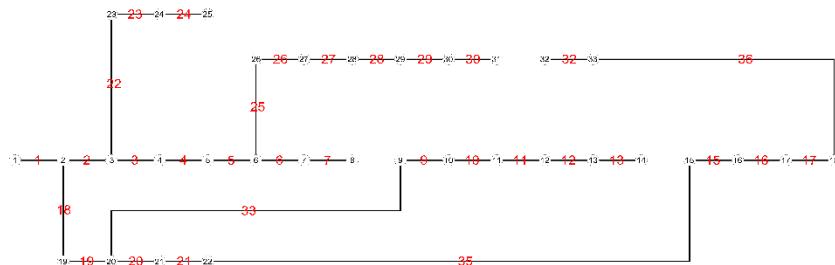
## SCENARIO 19

33 bus inicijalni sistem



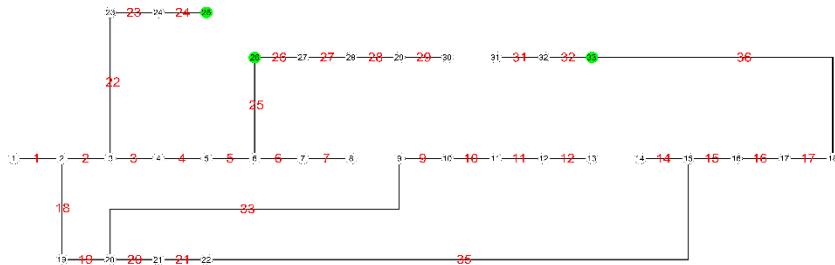
|                                         |
|-----------------------------------------|
| Otvorene grane:                         |
| 33 34 35 36 37                          |
| Gubici aktivne snage:                   |
| 202.6616 kW                             |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: _____ |
| Minimalni napon čvora: 0.91311 p.u.     |

Rekonfiguracija



|                                             |
|---------------------------------------------|
| Otvorene grane:                             |
| 8 14 31 34 37                               |
| Gubici aktivne snage:                       |
| 130.0651 kW                                 |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: 35.8215 % |
| Minimalni napon čvora: 0.94637 p.u.         |

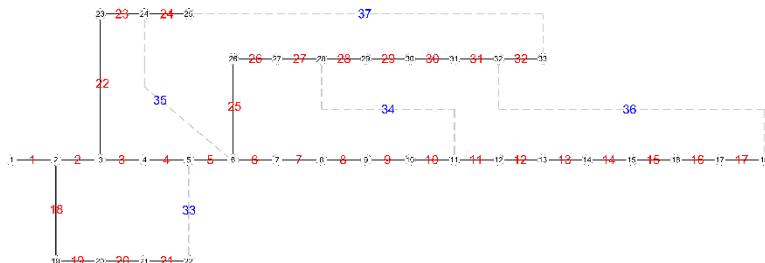
Rekonfiguracija + alokacija DG



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 8 13 30 34 37                     |
| Snage DG-a:                       |
| 696.61 kW 991.63 kW 811.76 kW     |
| Pozicije DG-a:                    |
| 25 26 33                          |
| Gubici aktivne snage:             |
| 53.5643 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 73.5696 %                         |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9730 p.u.                       |

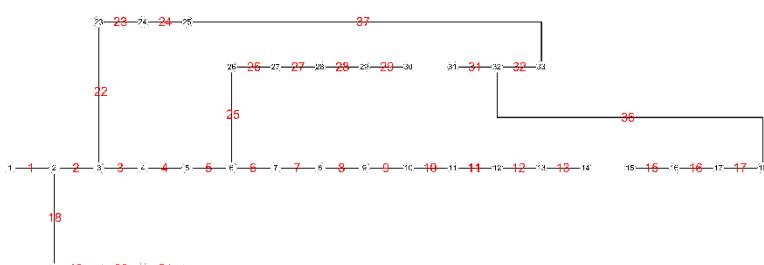
## SCENARIO 20

33 bus inicijalni sistem



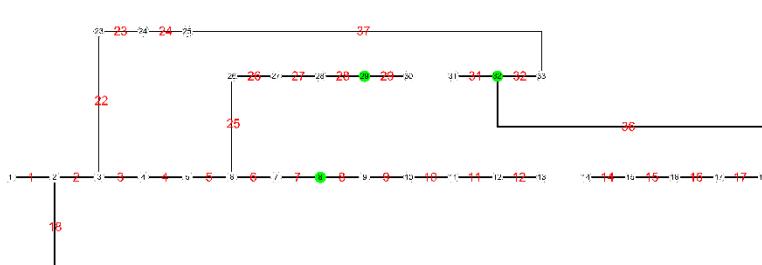
|                                         |
|-----------------------------------------|
| Otvorene grane:                         |
| 33 34 35 36 37                          |
| Gubici aktivne snage:                   |
| 202.6616 kW                             |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: _____ |
| Minimalni napon čvora: 0.91311 p.u.     |

Rekonfiguracija



|                                             |
|---------------------------------------------|
| Otvorene grane:                             |
| 14 30 33 34 35                              |
| Gubici aktivne snage:                       |
| 160.3694 kW                                 |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: 20.8684 % |
| Minimalni napon čvora: 0.94206 p.u.         |

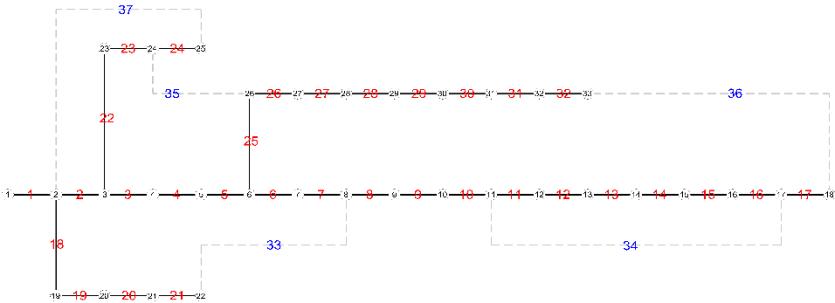
Rekonfiguracija + alokacija DG



|                                   |
|-----------------------------------|
| Otvorene grane:                   |
| 13 30 33 34 35                    |
| Snage DG-a:                       |
| 734.84 kW 462.65 kW 1302.51 kW    |
| Pozicije DG-a:                    |
| 8 29 32                           |
| Gubici aktivne snage:             |
| 58.3209 kW                        |
| Redukcija gubitaka aktivne snage: |
| 71.2225 %                         |
| Minimalni napon čvora:            |
| 0.9737 p.u.                       |

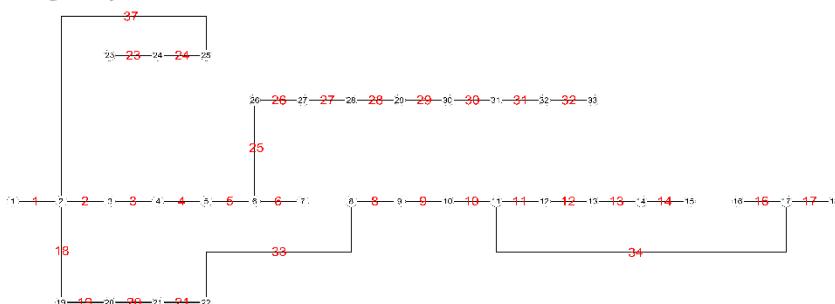
## SCENARIO 21

*33 bus inicijalni sistem*



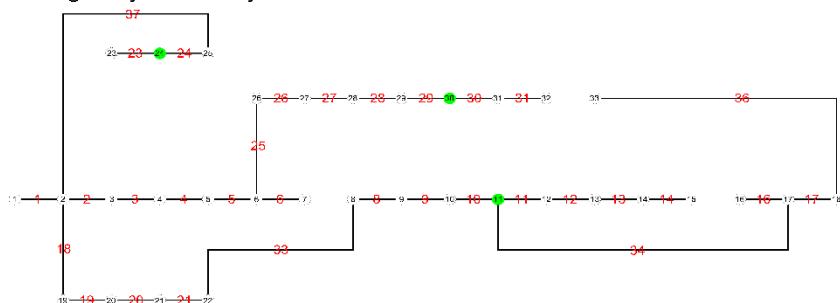
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

*Rekonfiguracija*



Otvorene grane:  
7 15 22 35 36  
Gubici aktivne snage:  
140.3718 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 30.7359 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93176 p.u.

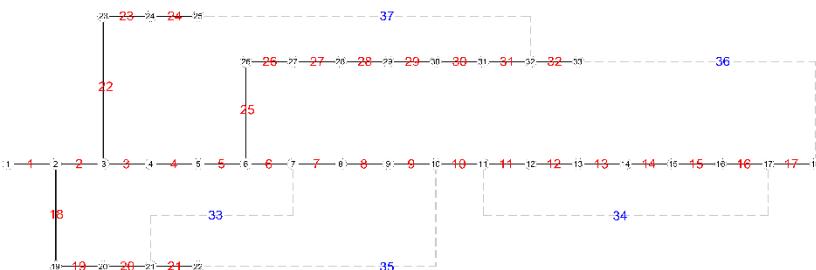
*Rekonfiguracija + alokacija DG*



Otvorene grane:  
7 15 22 32 35  
Snage DG-a:  
946.85 kW 618.0 kW 935.16 kW  
Pozicije DG-a:  
11 24 30  
Gubici aktivne snage:  
52.9867 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
73.8546 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9728 p.u.

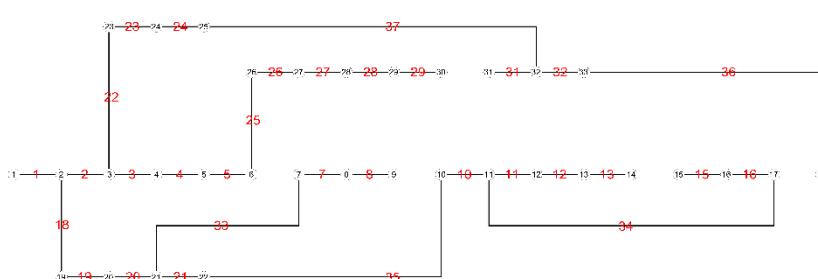
## SCENARIO 22

*33 bus inicijalni sistem*



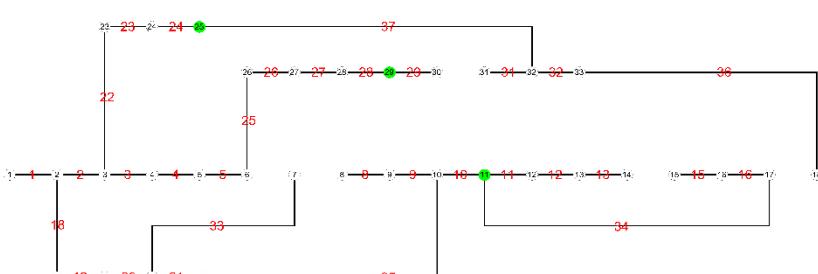
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

*Rekonfiguracija*



Otvorene grane:  
6 9 14 17 30  
Gubici aktivne snage:  
127.3892 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 37.1419 %  
Minimalni napon čvora:  
0.952542 p.u.

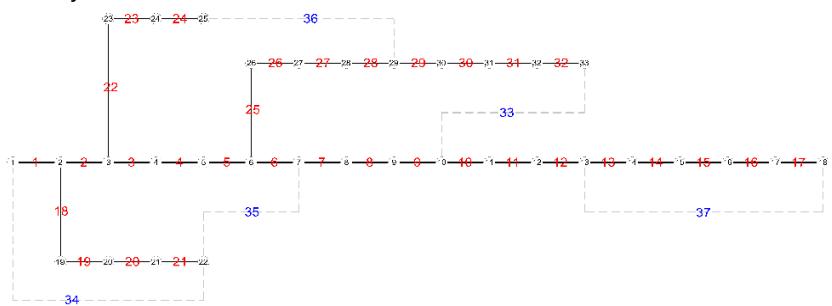
*Rekonfiguracija + alokacija DG*



Otvorene grane:  
6 7 14 17 30  
Snage DG-a:  
891.92 kW 1152.44 kW 455.64 kW  
Pozicije DG-a:  
11 25 29  
Gubici aktivne snage:  
48.5418 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
76.0478 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9765 p.u.

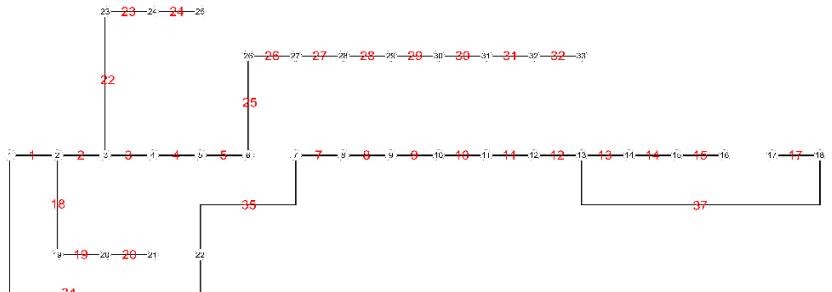
## SCENARIO 23

*33 bus inicijalni sistem*



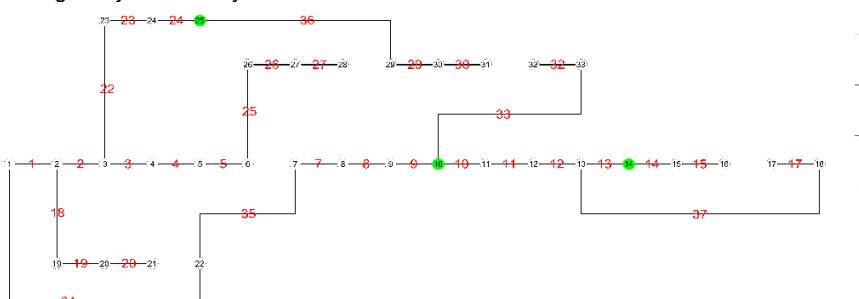
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

*Rekonfiguracija*



Otvorene grane:  
6 16 21 33 36  
Gubici aktivne snage:  
151.9785 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 25.0088 %  
Minimalni napon čvora:  
0.92876 p.u.

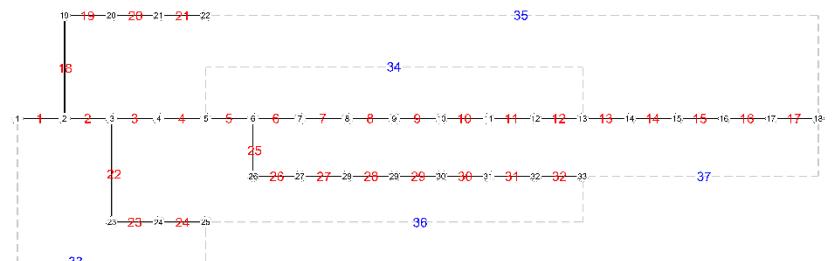
*Rekonfiguracija + alokacija DG*



Otvorene grane:  
6 16 21 28 31  
Snage DG-a:  
788.01 kW 421.75 kW 1290.24 kW  
Pozicije DG-a:  
10 14 25  
Gubici aktivne snage:  
54.5631 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
73.0767 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9709 p.u.

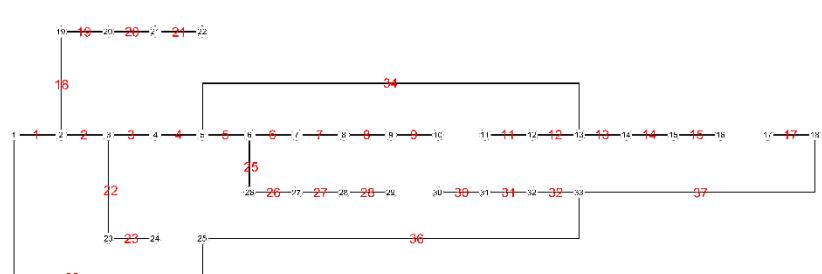
## SCENARIO 24

*33 bus inicijalni sistem*



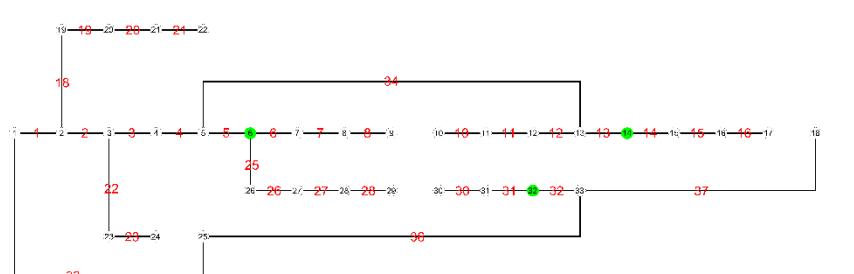
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

*Rekonfiguracija*



Otvorene grane:  
10 16 24 29 35  
Gubici aktivne snage:  
92.3934 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 54.41 %  
Minimalni napon čvora:  
0.95404 p.u.

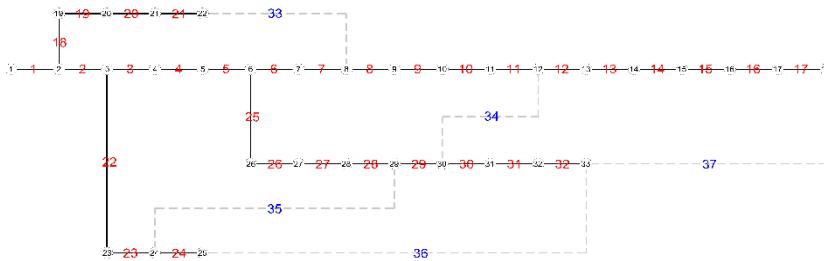
*Rekonfiguracija + alokacija DG*



Otvorene grane:  
9 17 24 29 35  
Snage DG-a:  
1012.38 kW 538.99 kW 948.63 kW  
Pozicije DG-a:  
6 14 32  
Gubici aktivne snage:  
38.4474 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
81.02877 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9731 p.u.

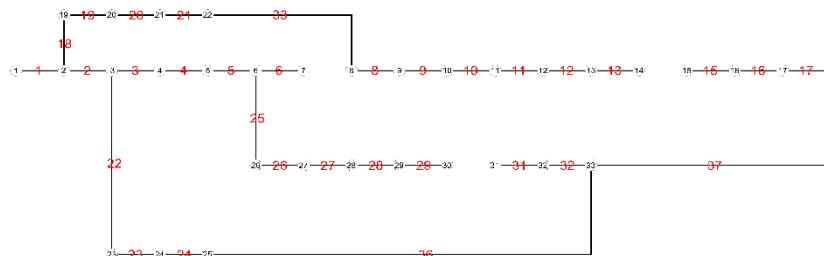
## SCENARIO 25

33 bus inicijalni sistem



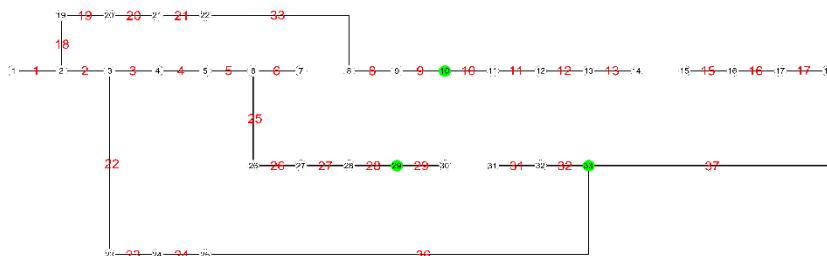
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
7 14 30 34 35  
Gubici aktivne snage:  
137.6666 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 32.0707 %  
Minimalni napon čvora:  
0.95064 p.u.

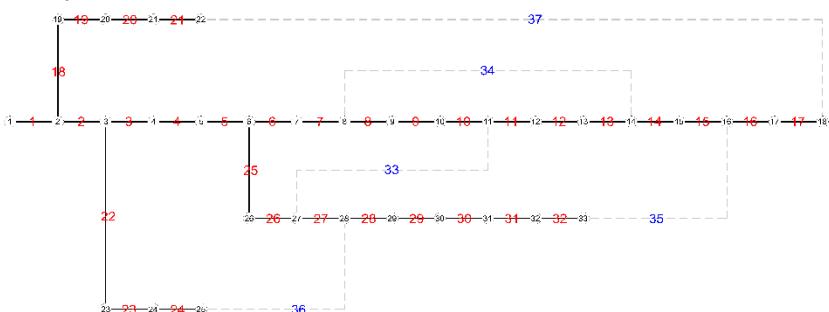
Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
7 14 30 34 35  
Snage DG-a:  
590.71 kW 599.93 kW 1309.37 kW  
Pozicije DG-a:  
10 29 33  
Gubici aktivne snage:  
50.9333 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
74.86781 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9783 p.u.

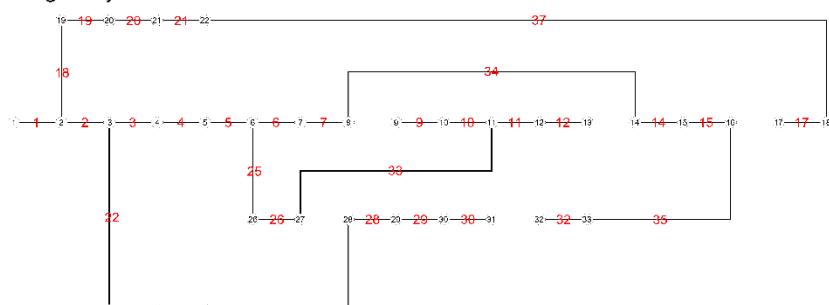
## SCENARIO 26

33 bus inicijalni sistem



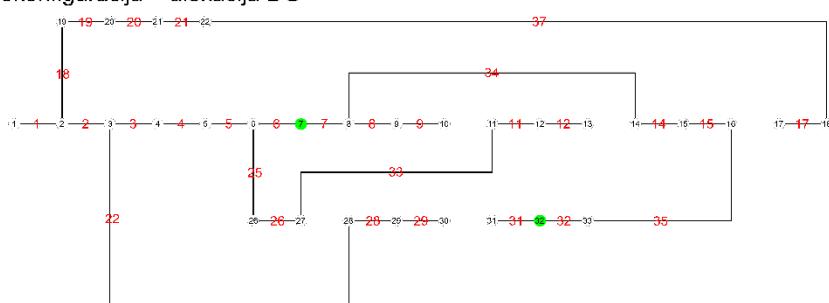
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
8 13 16 27 31  
Gubici aktivne snage:  
155.0167 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 23.5096 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9366 p.u.

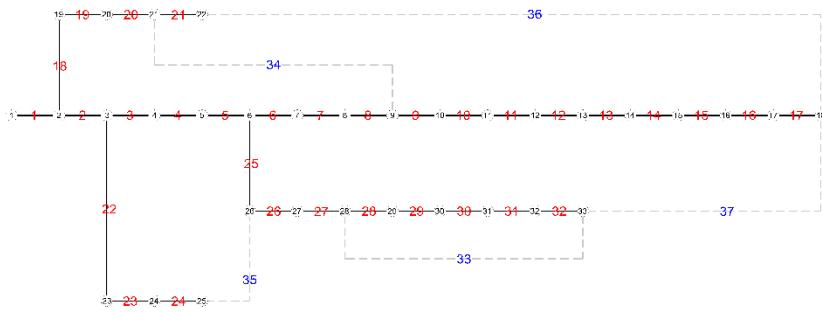
Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
10 13 16 27 30  
Snage DG-a:  
896.77 kW 1030.69 kW 572.54 kW  
Pozicije DG-a:  
7 25 32  
Gubici aktivne snage:  
56.5072 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
72.11746 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9717 p.u.

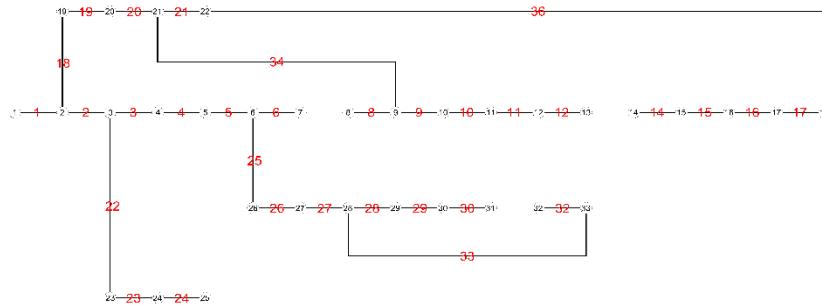
## SCENARIO 27

**33 bus inicijalni sistem**



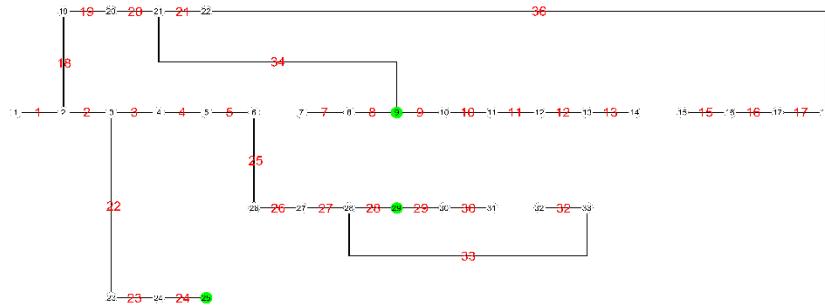
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
7 13 31 35 37  
Gubici aktivne snage:  
133.8064 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage: 33.9755 %  
Minimalni napon čvora:  
0.94093 p.u.

**Rekonfiguracija + alokacija DG**



Otvorene grane:  
6 14 31 35 37  
Snage DG-a:  
986.82 kW 667.14 kW 846.04 kW  
Pozicije DG-a:  
9 25 29  
Gubici aktivne snage:  
56.8653 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
72.94076 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9720 p.u.

*Slika 4.3.2 Različiti scenariji rekonfiguracije mreže i istovremene rekonfiguracije i alokacije odgovarajuće snage DIE za mrežu sa 33 čvora*

Prvi scenario koji je prikazan (boldovan u Tabeli 4.3.1), jedini je analiziran u dosadašnjoj literaturi [53] i uzimaće se kao referenti u ovom istraživanju. Svi ostali scenariji će se porebiti sa pomenutim, pri čemu se jasno može uočiti da se javljaju različiti rezultati.

U slučaju samo rekonfiguracije mreže za bazni scenario, gubici aktivne snage iznose 139.5513 kW, odnosno redukcija gubitaka aktivne snage u odnosu na inicijalnu mrežu iznosi 31.1407 %. Za slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacije DIE vrijednost ovih gubitaka 53.1513 kW, tj. redukcija gubitaka aktivne snage u odnosu na inicijalnu mrežu iznosi 73.7734 %. Primjena samo strategije rekonfiguracije mreže, vidno je poboljšala naponske prilike u čvorovima i smanjila gubitke, ali u kombinaciji sa planskom alokacijom DIE odgovarajućih kapaciteta, dobija se sistem sa još boljim performansama. Drugim riječima, raspored DG-a koji je optimalan za jednu topologiju, možda neće biti optimalan za drugu – zato se ove dvije strategije sprovode istovremeno. Takođe, oni se ne smiju grupisati preblizu, jer bi to stvorilo lokalne viškove snage i probleme sa naponima, zato algoritam nastoji da ih rasporedi tako da proizvodnja najbolje odgovara opterećenju.

Kako je kriterijum optimizacije u ovom master radu minimizacija gubitaka aktivne snage, to su u Tabeli 4.3.1 dati sumarni rezultati prethodno sprovedene analize. Za scenario 17 (crvenom bojom u Tabeli 4.3.1), dobijeni su značajno veći rezultati gubitaka aktivne snage u

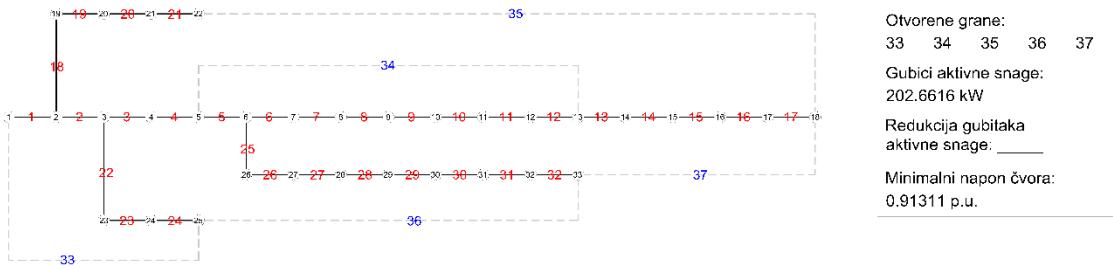
odnosu na bazni scenario, dok scenario 24 (zelenom bojom u Tabeli 4.3.1) predstavlja potencijalno najbolje rješenje za ovu distributivnu mrežu. Razlog tome je izbor petlji u inicijalnoj mreži, što zapravo oslikava infrastrukturu realne mreže sa kojom se raspolaže, a broj kombinacija je enorman. Svaka rekonfiguracija mijenja raspored tokova snage, što može smanjiti ukupne gubitke jer se “skratio” put od izvora do opterećenja ili povećati gubitke jer snaga do potrošača teče kroz veći broj grana ili duže vodove sa većim otporom.

*Tabela 4.3.1 Gubici aktivne snage za različite scenarije za mrežu sa 33 čvora*

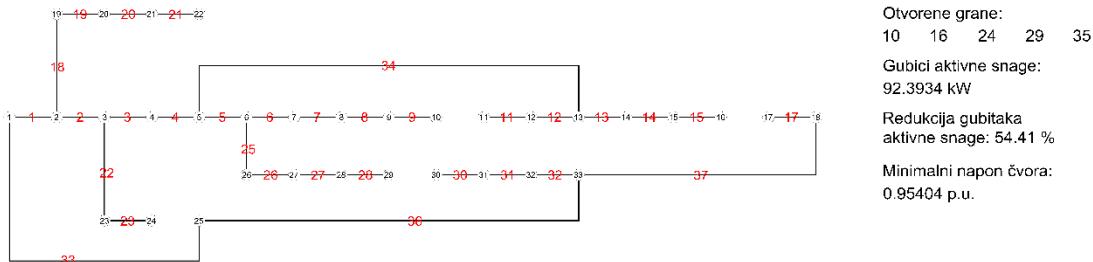
| Gubici aktivne snage [kW] |                                    |                                                           |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Scenario:                 | Slučaj samo rekonfiguracije mreže: | Slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacija DIE: |
| 1                         | <b>139.5513</b>                    | <b>53.1513</b>                                            |
| 2                         | 123.8441                           | 47.8505                                                   |
| 3                         | 124.9734                           | 48.5891                                                   |
| 4                         | 139.5513                           | 57.2184                                                   |
| 5                         | 114.1875                           | 47.6310                                                   |
| 6                         | 124.2387                           | 48.5115                                                   |
| 7                         | 127.045                            | 48.7923                                                   |
| 8                         | 127.6652                           | 47.2272                                                   |
| 9                         | 122.0736                           | 48.9778                                                   |
| 10                        | 114.5227                           | 47.9400                                                   |
| 11                        | 108.4733                           | 43.3390                                                   |
| 12                        | 129.1652                           | 47.5748                                                   |
| 13                        | 130.6585                           | 47.7627                                                   |
| 14                        | 123.5144                           | 47.3529                                                   |
| 15                        | 109.2701                           | 44.8261                                                   |
| 16                        | 119.6395                           | 46.1738                                                   |
| 17                        | <b>177.6809</b>                    | <b>62.0552</b>                                            |
| 18                        | 118.535                            | 47.8363                                                   |
| 19                        | 130.0651                           | 53.5643                                                   |
| 20                        | 160.3694                           | 58.3209                                                   |
| 21                        | 140.3718                           | 52.9867                                                   |
| 22                        | 127.3892                           | 48.5418                                                   |
| 23                        | 151.9785                           | 54.5631                                                   |
| 24                        | <b>92.3934</b>                     | <b>38.4474</b>                                            |
| 25                        | 137.6666                           | 50.9333                                                   |
| 26                        | 155.0167                           | 56.5072                                                   |
| 27                        | 133.8064                           | 56.8653                                                   |

U nastavku se detaljnije analizira scenario 24, prikazan na Slici 4.3.3.

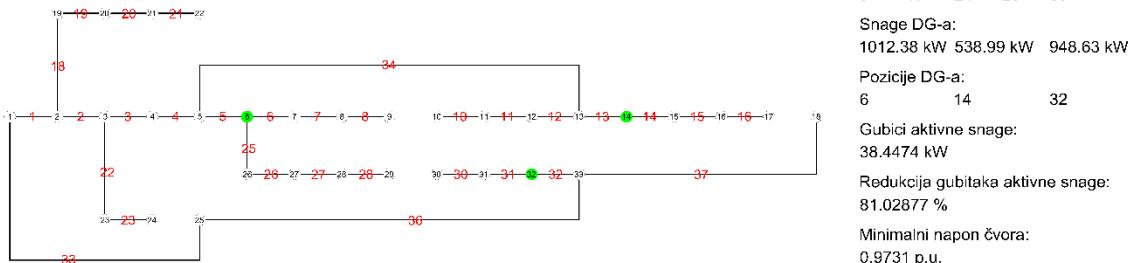
33 bus inicijalni sistem



## Rekonfiguracija



## Rekonfiguracija + alokacija DG

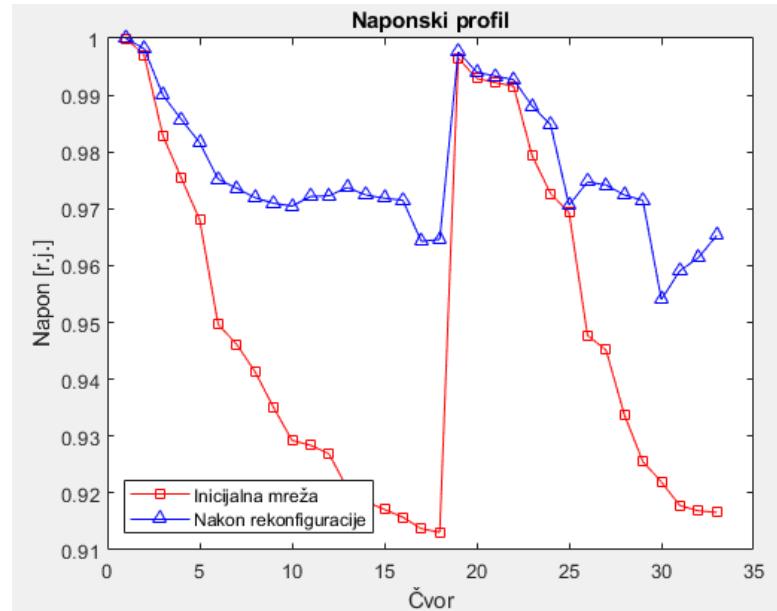


Slika 4.3.3 Scenario 24 (mreža sa 33 čvora)

Sa Slike 4.3.3 uočava se da je primjenom rekonfiguracije mreže moguće smanjiti gubitke za čak 54.41 % u odnosu na inicijalnu mrežu, tj. gubici aktivne snage iznose 92.3934 kW. Grane koje su isključene iz mreže nakon rekonfiguracije su 10, 16, 24, 29 i 35, a radijalan karakter mreže je ostao očuvan. U odnosu na referentni scenario, gdje je smanjenje gubitaka aktivne snage iznosilo 31.1407 %, ovaj rezultat je daleko bolji. Treba naglasiti da je jedini faktor koji pravi razliku upravo raspored grana u inicijalnoj mreži, odnosno način formiranja petlji u mreži, jer se time direktno utiče na tokove snaga. Ovo potvrđuje moć rekonfiguracije mreže kao sredstva za značajno poboljšanje performansi cijelokupnog sistema. To poboljšanje uključuje smanjenje gubitaka aktivne snage, ali i popravke profila napona. U odnosu na minimlani napon čvora u inicijalnoj mreži od 0.91311 r.j., nakon rekonfiguracije mreže, minimalni napon iznosi 0.95404 r.j. i zadovoljava ograničenje za dozvoljeni opseg vrijednosti napona u distributivnoj mreži.

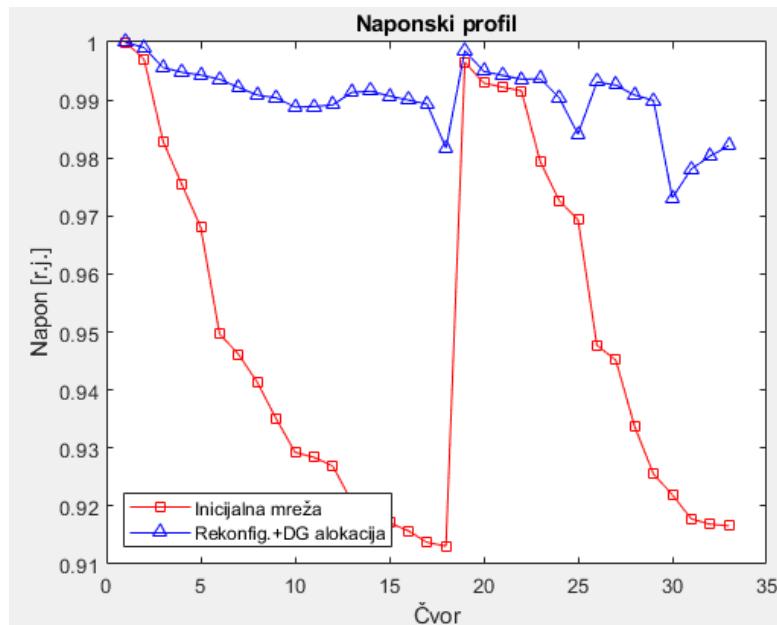
Za slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacije DIE, gubici aktivne snage su redukovani za 81.02877 % u odnosu na inicijalnu mrežu, što je za oko 7.2 % bolje u odnosu na rezultate dobijene u referentnom scenaru. Naime, gubici aktivne snage u referentnom scenaru iznose 53.1513 kW, odnosno redukovani su za 73.7734 %, dok je u ovom slučaju vrijednost gubitaka 38.4474 kW, odnosno redukovani su za 81.02877 %. Isključene grane iz mreže za ovaj slučaj su 9, 17, 24, 29 i 35, a pozicije u kojima su smješteni generatori su 6, 14 i 32. DIE sa najvećom instalisanom snagom je u čvoru 6, što je i prirodno, obzirom da se nalazi na račvi dva ogranka. Napon se u ovom slučaju dodatno popravio i iznosi 0.9731 r.j., što je mnogo bliže nominalnoj vrijednosti.

Na Slikama 4.3.4 i 4.3.5, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže, odnosno naponi u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije D<sub>I</sub>E, za posmatrani scenario.



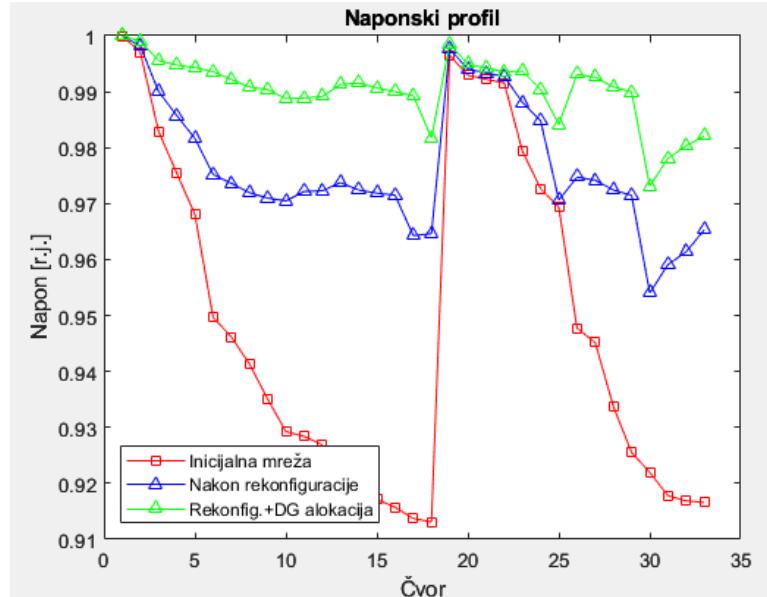
Slika 4.3.4 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 33 čvora

Jasno se uočava poboljšanje naponskih prilik nakon rekonfiguracije mreže, pogotovo u čvorovima od 5 do 17, kao i od 30 do 33, obzirom na njihovu udaljenost od balansnog čvora 1. Usljed rekonfiguracije došlo je do promjene tokova snaga, odnosno putanje energije do potrošača, smanjuju se padovi napona (time i gubici) po granama mreže što rezultira boljim naponskim prilikama u cijeloj mreži.



Slika 4.3.5 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije D<sub>I</sub>E u mreži sa 33 čvora

U ovom slučaju se vidi značaj pravilne istovremene upotrebe ove dvije strategije za poboljšanje performansi mreže. Naime, rekonfiguracija poboljšava napone u čvorovima, ali sa dodatim DIE odgovarajuće snage na odgovarajućim pozicijama, dobija se bolji efekat u cijelini, kako sa aspekta gubitaka aktivne snage, tako i sa aspekta napona. Kombinacijom rekonfiguracije i alokacije DIE, mreža postaje stabilnija, pouzdanija, gubici manji, a naponske prilike poboljšane.

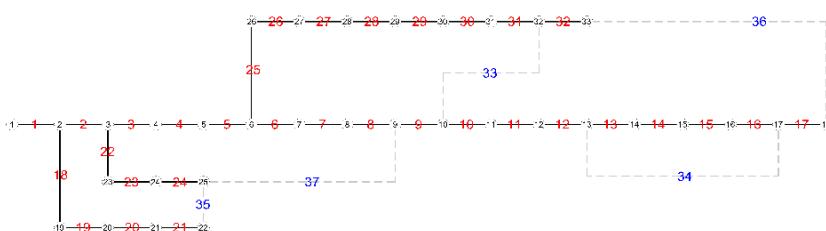


*Slika 4.3.6 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora*

Na Slici 4.3.6, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE, radi preglednosti i poređenja. Najpovoljnije naponske prilike su dobijene za slučaj istovremene primjene obje strategije. Rekonfiguracija mreže optimizuje topologiju sistema kako bi se smanjili gubici i poboljšao naponski profil, dok integracija DIE dodatno doprinosi stabilizaciji napona, smanjenju opterećenja kritičnih grana i povećanju efikasnosti prenosa snage. Kombinovani pristup omogućava bolju iskorišćenost raspoloživih resursa, smanjuje oslanjanje na centralizovane izvore napajanja i poboljšava ukupne performanse sistema.

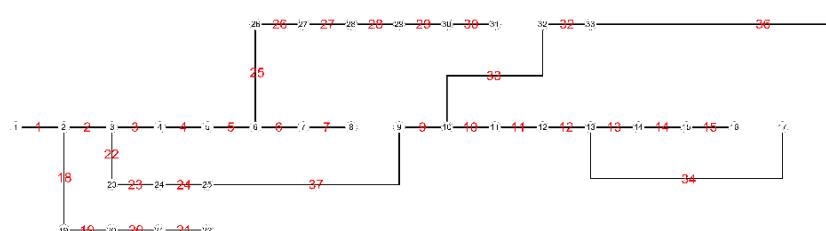
Slična analiza će se primjeniti i za scenario 17, prikazan na slici 4.3.7.

## 33 bus inicijalni sistem



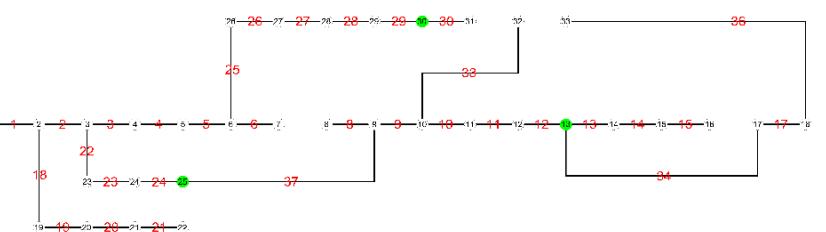
Otvorene grane:  
33 34 35 36 37  
Gubici aktivne snage:  
202.6616 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: \_\_\_\_\_  
Minimalni napon čvora:  
0.91311 p.u.

## Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
8 16 17 31 35  
Gubici aktivne snage:  
177.6809 kW  
Redukcija gubitaka  
aktivne snage: 12.3263 %  
Minimalni napon čvora:  
0.92769 p.u.

## Rekonfiguracija + alokacija DG



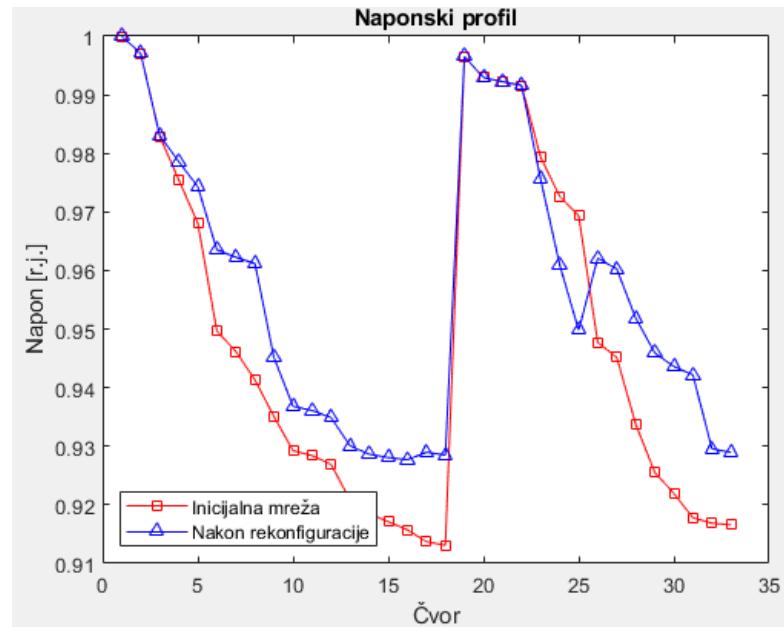
Otvorene grane:  
7 16 31 32 35  
Snage DG-a:  
725.34 kW 1109.34 kW 665.32 kW  
Pozicije DG-a:  
13 25 30  
Gubici aktivne snage:  
62.0552 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
69.37989 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9717 p.u.

Slika 4.3.7 Scenario 17 (mrežu sa 33 čvora)

Sa Slike 4.3.7 uočava se da je primjenom rekonfiguracije mreže moguće redukovati gubitke za samo 12.3263 % u odnosu na inicijalnu mrežu, tj. gubici aktivne snage iznose 177.6809 kW. Grane koje su isključene iz mreže nakon rekonfiguracije su 8, 16, 17, 31 i 35, a radikalnost mreže je očuvana. U odnosu na bazni scenario, gdje je smanjenje gubitaka aktivne snage iznosilo 31.1407 % (prvi od 27 scenarija), ovdje se pokazuje da neplanska i haotična rekonfiguracija ne može poboljšati performanse mreže. Raspored grana u inicijalnoj mreži, odnosno način formiranja petlji u mreži određuje u kojoj mjeri će rekonfiguracija biti efikasna. Usljed malog poboljšanja od samo 12.3263 % u gubicima aktivne snage, naponske prilike će takođe biti neznatno bolje. U odnosu na minimalni napon čvora u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije minimalni napon iznosi 0.92769 r.j. što je blisko donjoj granici dozvoljenog opsega napona. Ovim se pokazuje da samo pravilna rekonfiguracija i izbor veza (petlji) između čvorova u inicijalnoj mreži može donijeti zadovoljavajuće rezultate.

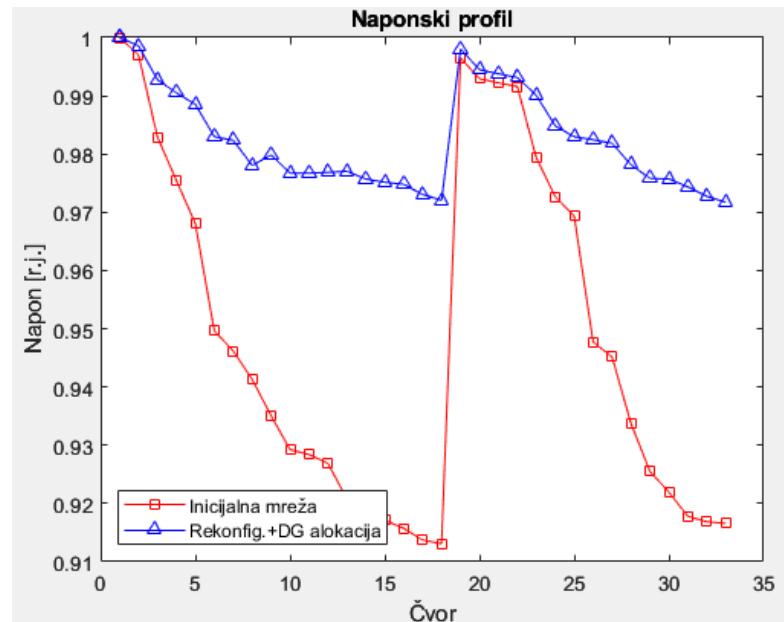
Za slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacije DIE za ovaj scenario, gubici aktivne snage su redukovani za 69.37989 % u odnosu na inicijalnu mrežu, što je za oko 3.8 % niže u odnosu na rezultate dobijene u baznom scenariju. Naime, gubici aktivne snage u baznom scenariju iznose 53.1513 kW, odnosno redukovani su za 73.7734 %, dok je u ovom slučaju vrijednost gubitaka 62.0552 kW, odnosno redukovani su za 69.97989 %. Isključene grane iz mreže za ovaj slučaj su 7, 16, 31, 32 i 35, što je vrlo blisko prethodnom slučaju samo rekonfiguracije mreže, a pozicije u kojima su smješteni generatori su 13, 25 i 30. Naslućuje se da je DIE sa najvećom instalisanom snagom u čvoru 25, obzirom da se najveći broj potrošača dalje nastavlja tim ogrankom. Napon se u ovom slučaju dodatno popravio i iznosi 0.9717 r.j., što je mnogo bliže nominalnoj vrijednosti.

Na slikama 4.3.8 i 4.3.9, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže, odnosno naponi u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE, za posmatrani scenario.



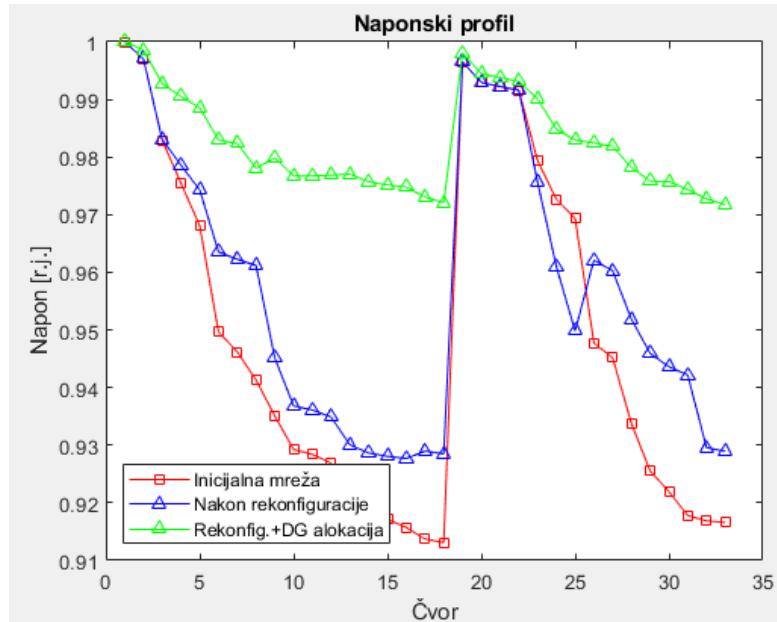
Slika 4.3.8 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 33 čvora

Uočava se neznatno poboljšanje naponskih prilika nakon rekonfiguracije mreže, najviše u čvorovima koji su udaljeniji od balansnog čvora 1, a kod čvorova 23, 24 i 25 imamo i pogoršanje. Razlog tome su promjene u tokovima snaga, jer ovim ogrankom je broj potrošača kojima treba obezbijediti napajanje najveći, a samim tim i najveći dio energije potrebno je “proslijediti” upravo njima. To rezultira većim protokom i opterećenjem u početnim vodovima ovog ogranka, te i većim padovima napona.



Slika 4.3.9 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Sa Slike 4.3.9 se zaključuje da istovremena primjena ove dvije strategije može znatno poboljšati performanse mreže, čak i ukoliko početni raspored grana/petlji nije optimalan. Rekonfiguracija u kombinaciji sa dodatim DIE odgovarajuće snage na odgovarajućim pozicijama, daju bolji efekat u cjelini, jer mreža postaje stabilnija, pouzdanija, gubici manji, a naponske prilike poboljšane.



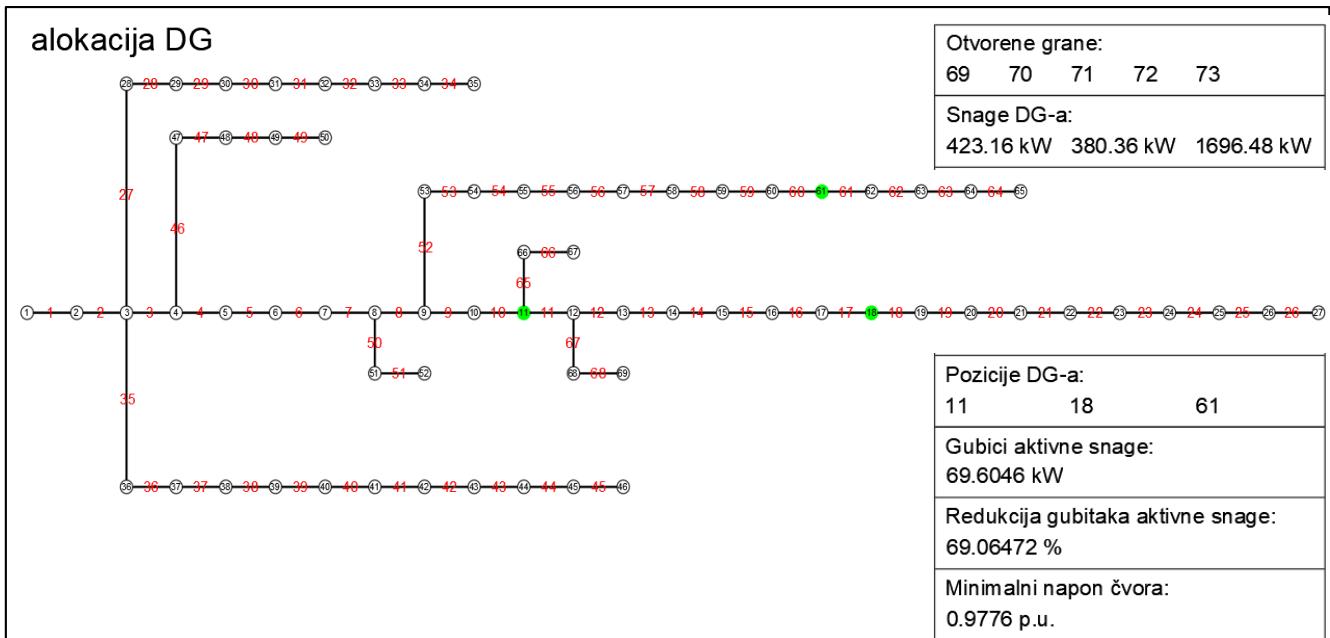
Slika 4.3.10 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 33 čvora

Radi preglednosti i poređenja, na Slici 4.3.10 prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE. Istovremena primjena alokacije DIE i rekonfiguracije mreže ima smisla samo ako su one koordinisane.

#### 4.4. Analiza rezultata za mrežu od 69 čvorova

Za mrežu od 69 čvorova predstavljeno je 16 različitih, mogućih scenarija.

Slična konstatacija kao i za mrežu sa 33 čvora, i kod ove mreže slučaj samo alokacije odgovarajuće snage DIE isti je za svaki scenario jer se posmatra osnovna mreža bez dodatnih grana/petlji. Zato će najprije biti prikazan i analiziran upravo ovaj slučaj, gdje se vrši samo alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a, a potencijalno mjesto priključenja DIE može biti bilo koji čvor u mreži. I u ovom slučaju se uvažava pretpostavka da je faktor snage  $\cos \varphi = 1$ .



Slika 4.4.1 Studija slučaja 5 - alokacija odgovarajuće snage za 3 DG-a u mreži sa 69 čvorova

U studiji slučaja 5 (vidi Tabelu 4.1), sa Slike 4.4.1, određena je lokacija i dimenzionisani su DG-i za mrežu sa 69 čvorova (6 nepoznatih veličina), a primjenom *L-shade* algoritma postignuta je vrijednost gubitka aktivne snage od 69.6046 kW, što je jednako najboljem rezultatu u dosadašnjim istraživanjima [53].

Tokom analize, sprovedena su i mjerena napona u čvorovima mreže. Uzimajući u obzir da je prema standardu neophodno održavati naponske prilike unutar strogo definisanih granica od 90% do 110% nominalne vrijednosti napona, to se može zaključiti da je ovaj zahtjev ispunjen u posmatranom slučaju. Optimalne pozicije za integraciju DIE u ovom slučaju su čvorovi 11, 18 i 61. Posmatrajući sliku, ovaj raspored DIE odgovarajuće snage je i opravdan obzirom na dužinu ogranka mreže i udaljenost od balansnog čvora 1.

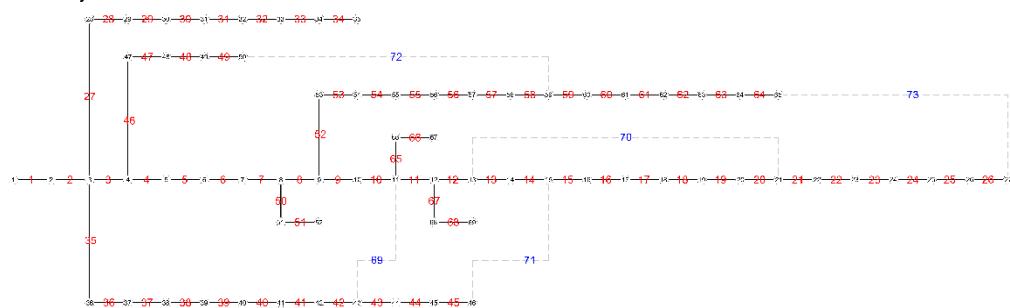
Uzroci malih promjena u ukupnim gubicima u sistemu nakon integracije DIE, uprkos promjenama u profilu napona i gubicima po granama, isti su kao i kod prethodno analizirane mreže sa 33 čvora.

U nastavku će biti prikazano 16 različitih mogućih scenarija rekonfiguracije mreže (studija slučaja 4, vidi Tabelu 4.1), kao i istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE odgovarajuće snage (studija slučaja 6, vidi Tabelu 4.1). Gore izvršena analiza slučaja samo alokacije DIE odgovarajuće snage, ostaje ista za svaki mogući scenario, a osnovni podaci za svaki slučaj su dati u tabeli pored prikaza izgleda mreže.

Isprekidane linije su normalno isključene grane/prekidači. Međutim, za potrebe rekonfiguracije mreže namjenski se stvaraju zatvorene petlje, kako bi algoritam identifikovao granu koja predstavlja optimalno mjesto za otvaranje njenih prekidača, a sve sa ciljem postizanja minimalnih gubitaka aktivne snage. Jasno se uočava da su za svaku studiju slučaja, svakog scenarioja, zadovoljeni kriterijumi radikalnosti i povezanosti mreže.

## SCENARIO 1 - referentni scenario za poređenje

69 bus inicijalni sistem



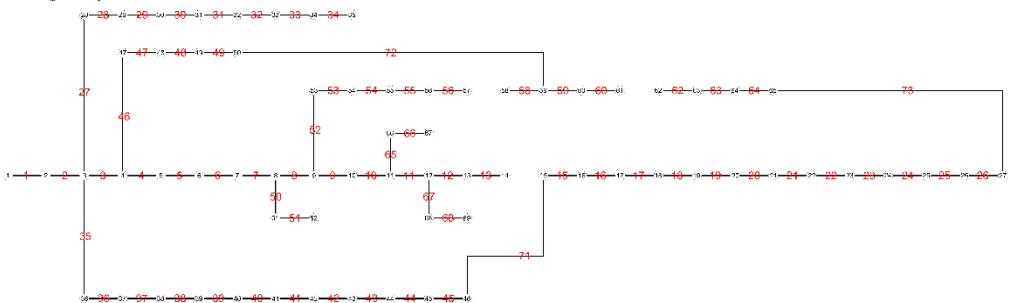
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
14 57 61 69 70

Gubici aktivne snage:  
98.6056 kW

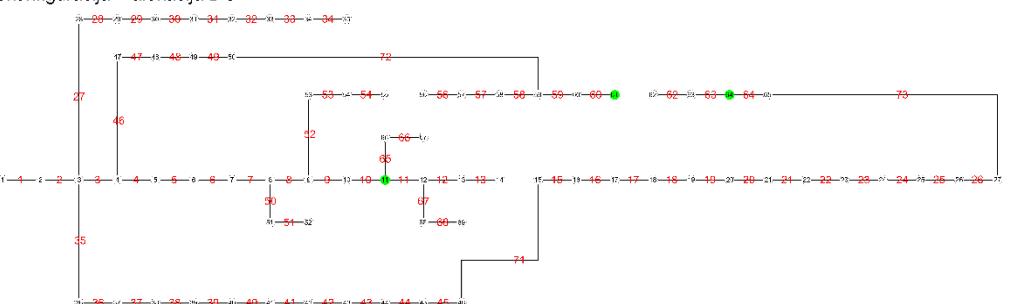
Redukcija gubitaka aktivne snage:

56.1754 %

Minimalni napon čvora:

0.94947 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
14 58 61 69 70

Snage DG-a:  
558.69 kW 1445.70 kW 495.61 kW

Pozicije DG-a:

11 61 64

Gubici aktivne snage:

35.1718 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

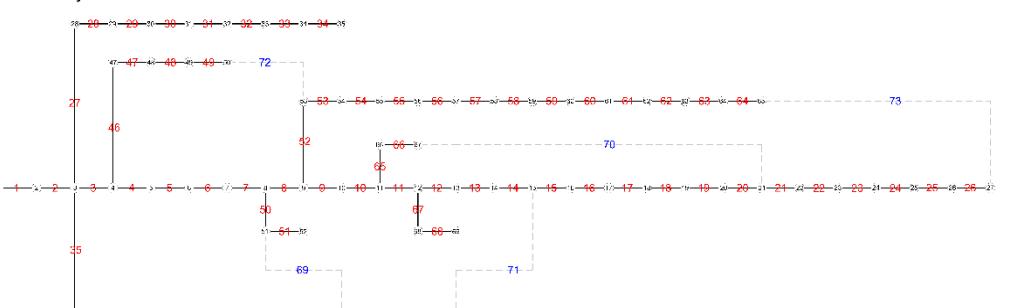
84.36814 %

Minimalni napon čvora:

0.9816 p.u.

## SCENARIO 2

69 bus inicijalni sistem



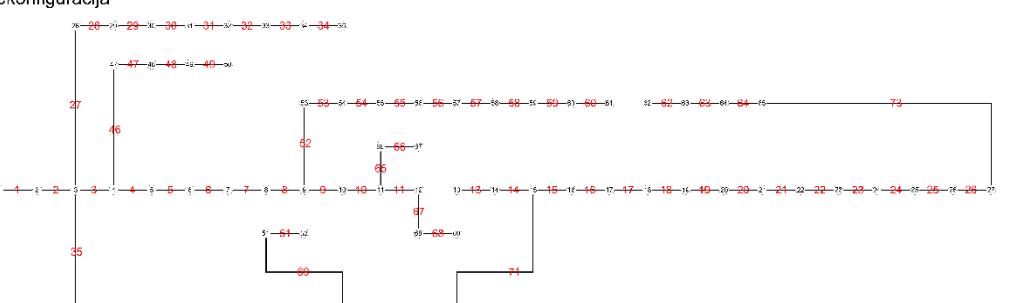
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
12 50 61 70 72

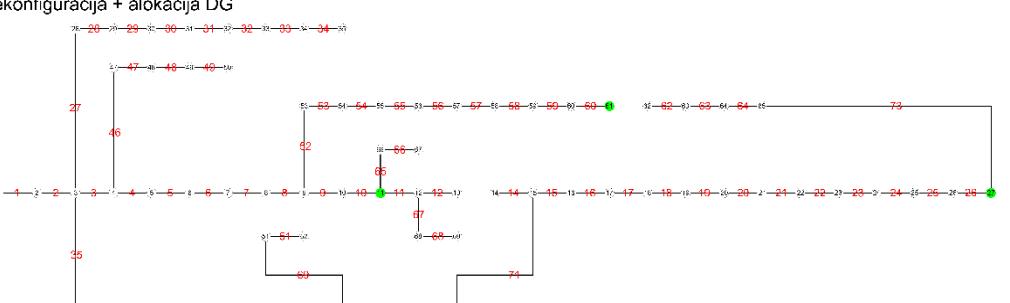
Gubici aktivne snage:  
149.1509 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:

0.93235 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
13 50 61 70 72

Snage DG-a:  
534.40 kW 584.13 kW 1381.47 kW

Pozicije DG-a:

11 27 61

Gubici aktivne snage:

50.2319 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

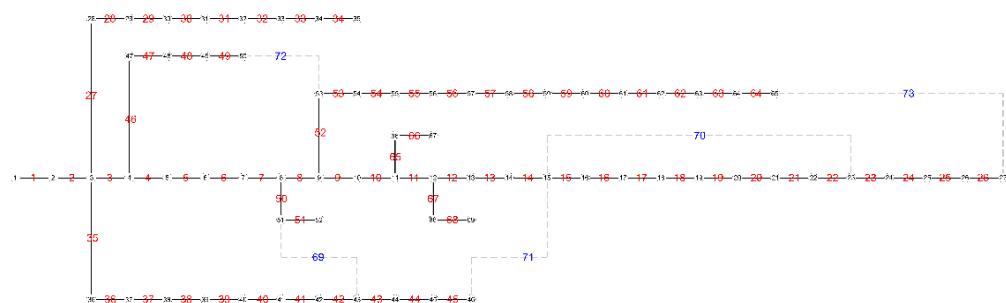
77.67478 %

Minimalni napon čvora:

0.9854 p.u.

### SCENARIO 3

**69 bus inicijalni sistem**

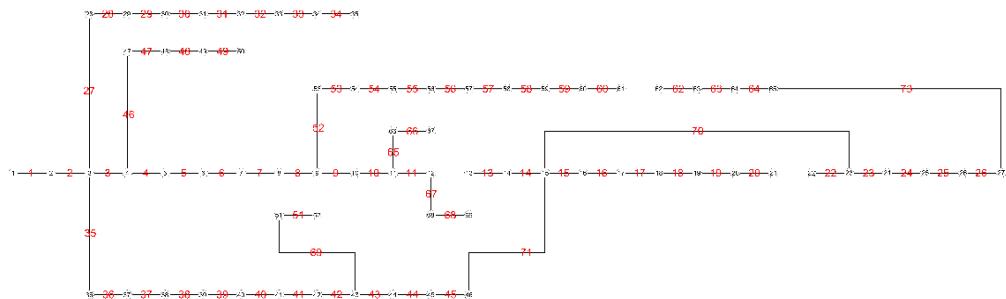


Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

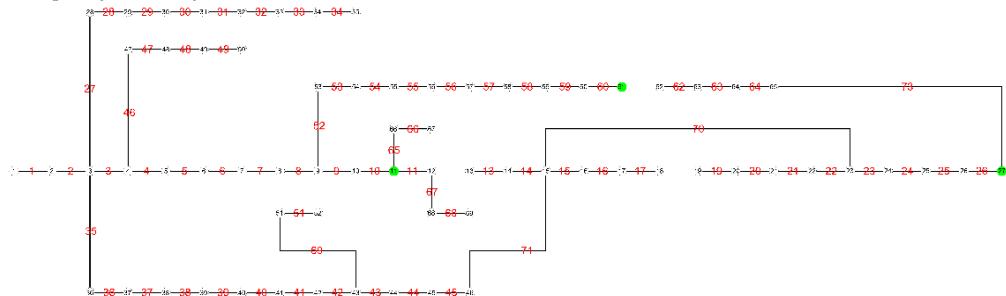
**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
12 21 50 61 72

Gubici aktivne snage:  
145.555 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
35.3091 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93235 p.u.

**Rekonfiguracija + alokacija DG**

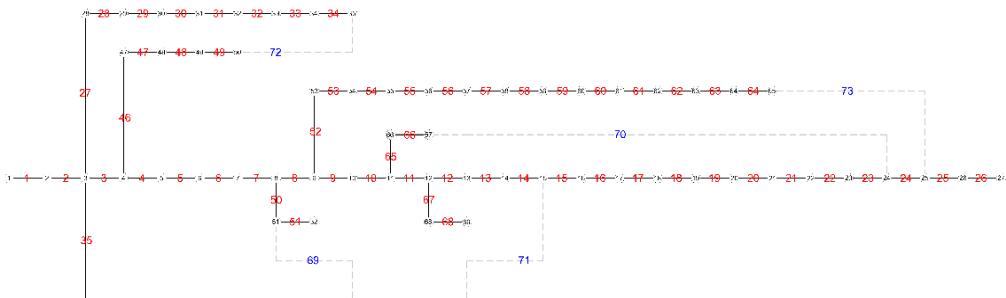


Otvorene grane:  
12 18 50 61 72

Snage DG-a:  
524.29 kW 594.69 kW 1381.02 kW  
Pozicije DG-a:  
11 27 61  
Gubici aktivne snage:  
49.1933 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
78.13638 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9854 p.u.

### SCENARIO 4

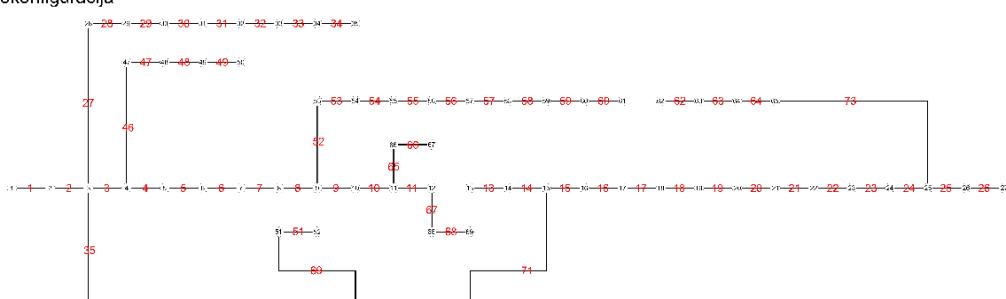
**69 bus inicijalni sistem**



Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

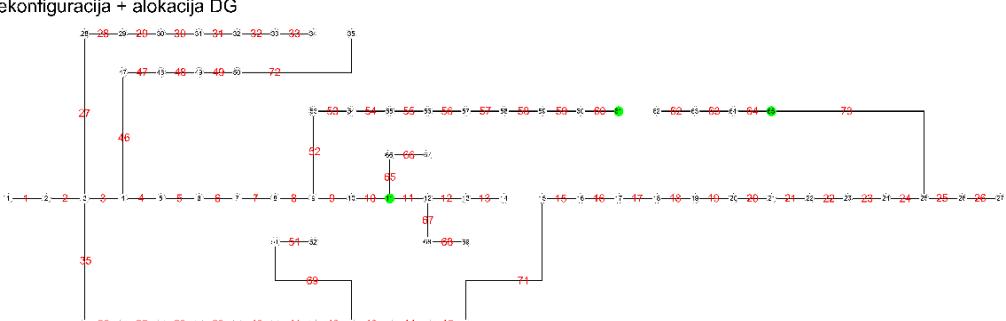
**Rekonfiguracija**



Otvorene grane:  
12 50 61 70 72

Gubici aktivne snage:  
148.5524 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
33.9769 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93235 p.u.

**Rekonfiguracija + alokacija DG**

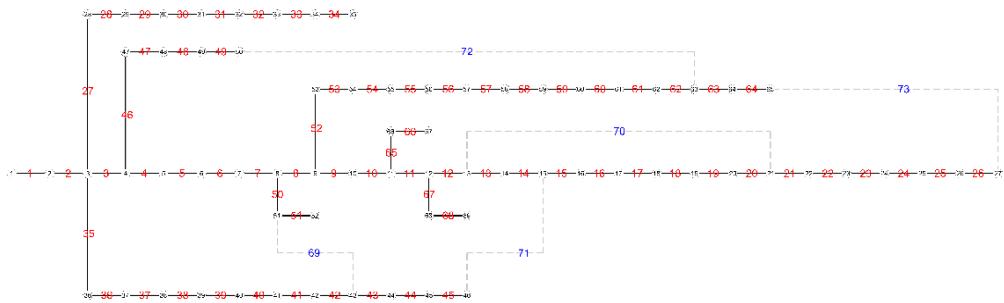


Otvorene grane:  
14 34 50 61 70

Snage DG-a:  
555.69 kW 1384.36 kW 559.73 kW  
Pozicije DG-a:  
11 61 65  
Gubici aktivne snage:  
49.6607 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
77.92865 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9860 p.u.

## SCENARIO 5

69 bus inicijalni sistem



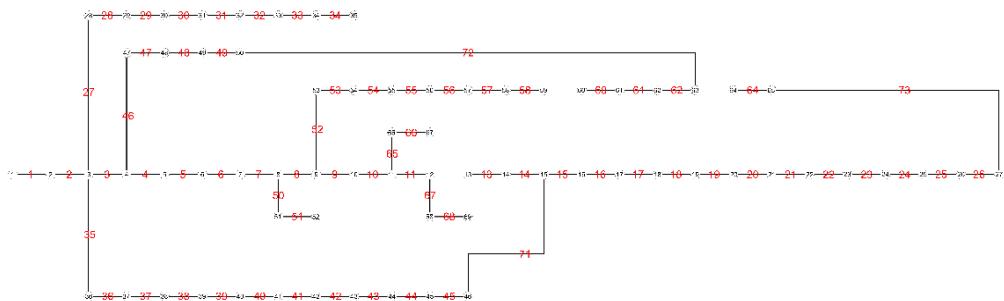
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



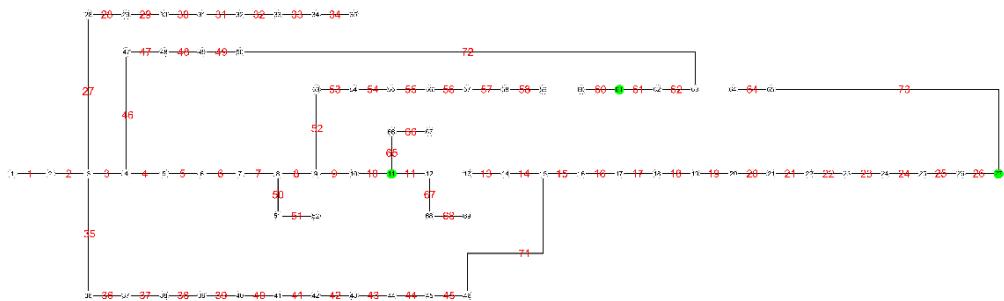
Otvorene grane:  
12 59 63 69 70

Gubici aktivne snage:  
81.7154 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
63.6822 %

Minimalni napon čvora:  
0.95832 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
12 59 63 69 70

Snage DG-a:  
559.31 kW 536.43 kW 1404.25 kW

Pozicije DG-a:  
11 27 61

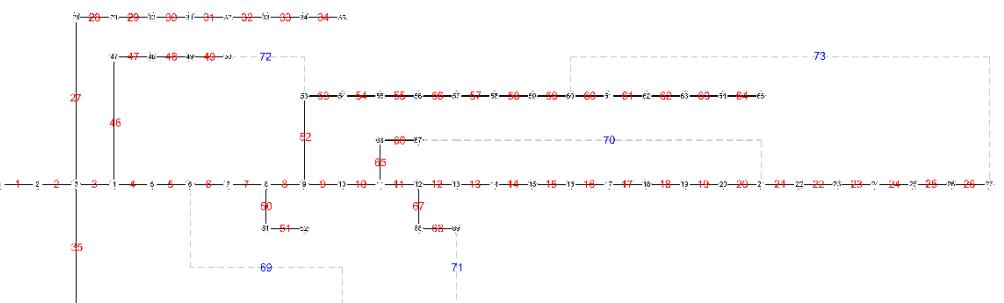
Gubici aktivne snage:  
30.4251 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
86.4778 %

Minimalni napon čvora:  
0.9833 p.u.

## SCENARIO 6

69 bus inicijalni sistem



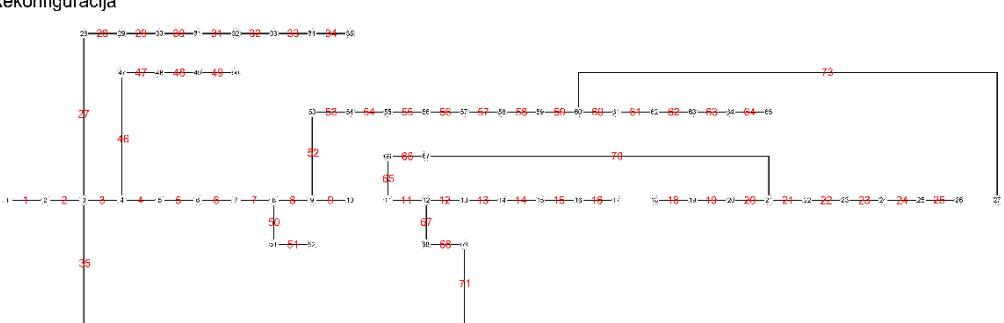
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



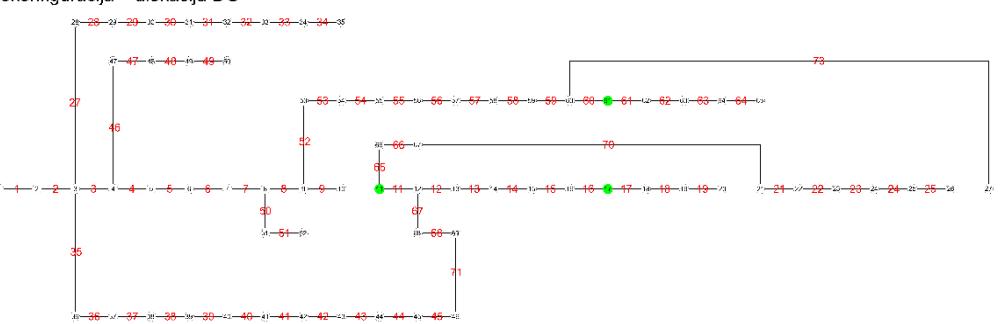
Otvorene grane:  
10 17 26 69 72

Gubici aktivne snage:  
199.6982 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
11.2455 %

Minimalni napon čvora:  
0.91512 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
10 20 26 69 72

Snage DG-a:  
529.57 kW 204.65 kW 1765.77 kW

Pozicije DG-a:  
11 17 61

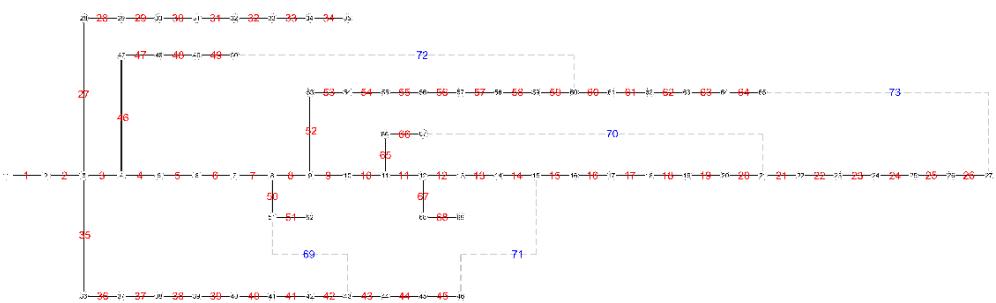
Gubici aktivne snage:  
62.8016 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
72.08826 %

Minimalni napon čvora:  
0.9807 p.u.

## SCENARIO 7

69 bus inicijalni sistem



Otvorene grane:

69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:

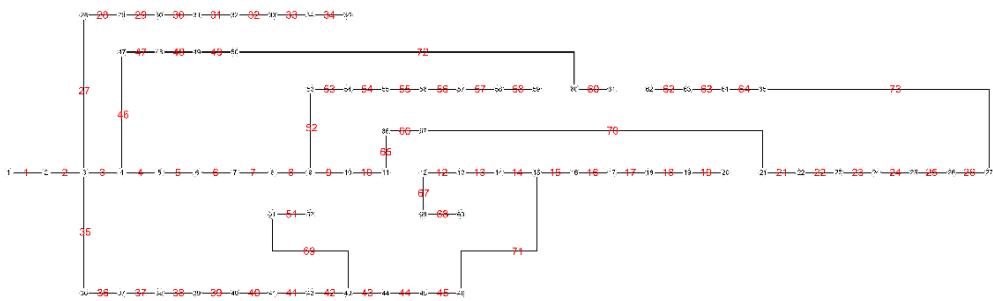
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:

0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:

11 20 50 59 61

Gubici aktivne snage:

84.2479 kW

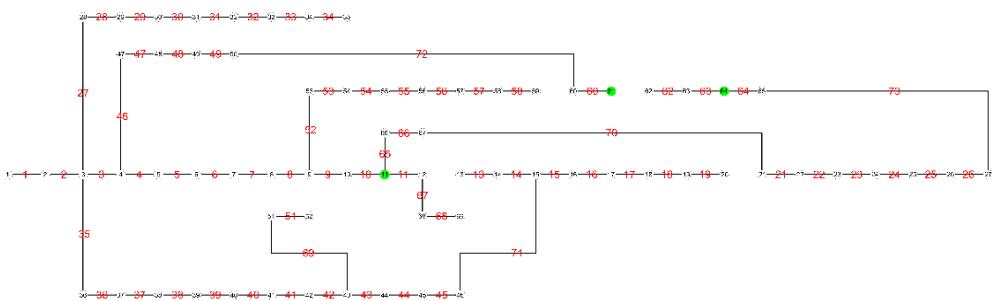
Redukcija gubitaka aktivne snage:

62.5586 %

Minimalni napon čvora:

0.95618 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:

12 20 50 59 61

Snage DG-a:

750.83 kW 1400.59 kW 348.47 kW

Pozicije DG-a:

11 61 64

Gubici aktivne snage:

31.7053 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

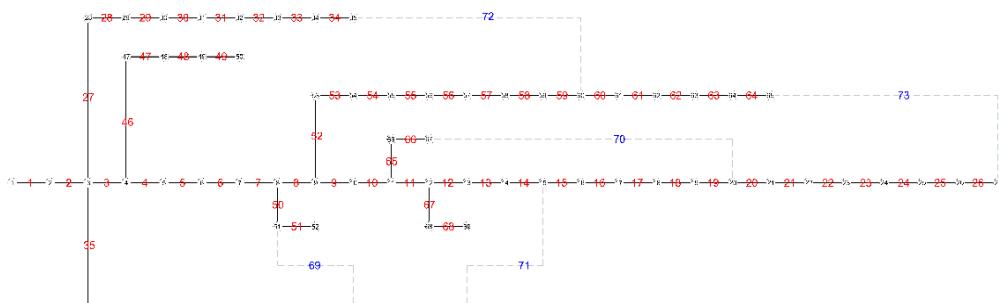
85.9088 %

Minimalni napon čvora:

0.9835 p.u.

## SCENARIO 8

69 bus inicijalni sistem



Otvorene grane:

69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:

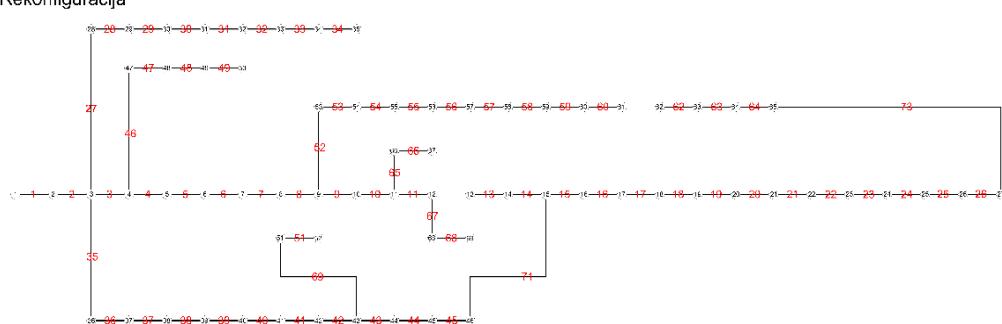
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:

0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:

12 50 61 70 72

Gubici aktivne snage:

149.1509 kW

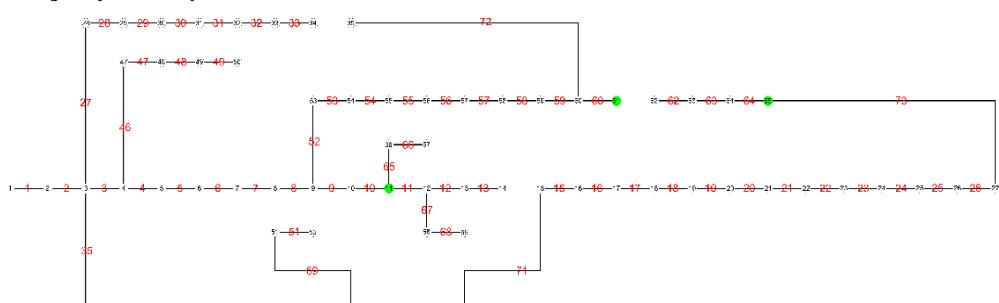
Redukcija gubitaka aktivne snage:

33.7109 %

Minimalni napon čvora:

0.93235 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:

14 34 50 61 70

Snage DG-a:

562.48 kW 1391.32 kW 546.20 kW

Pozicije DG-a:

11 61 65

Gubici aktivne snage:

50.2110 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

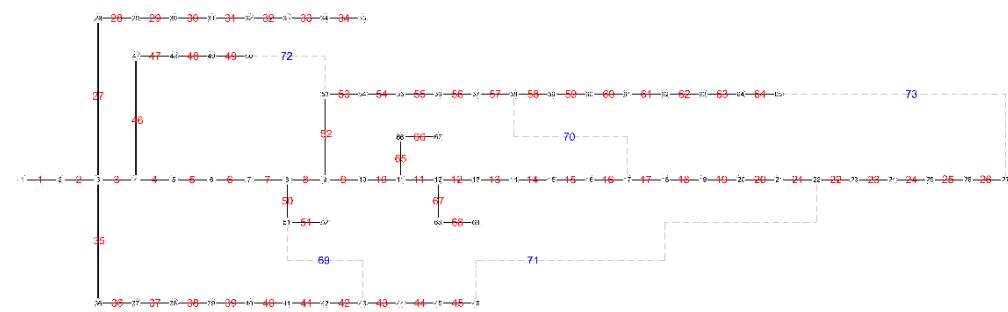
77.68407 %

Minimalni napon čvora:

0.9860 p.u.

## SCENARIO 9

69 bus inicijalni sistem



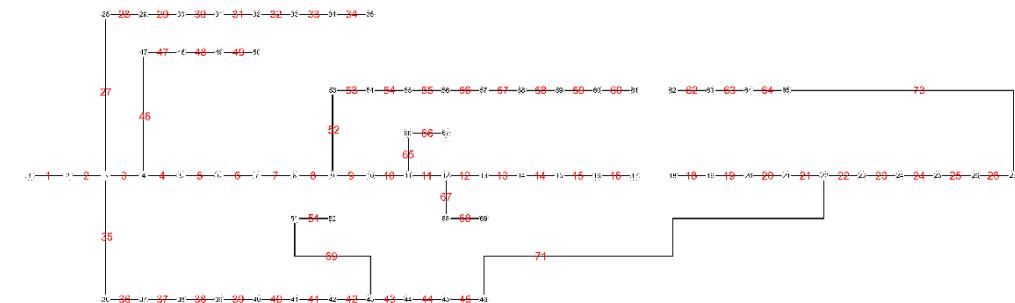
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



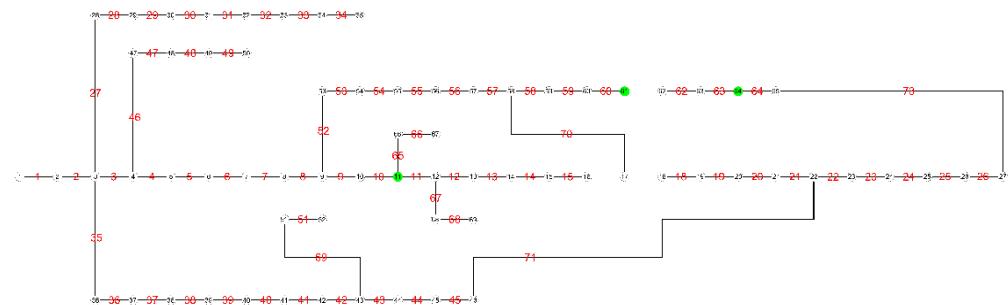
Otvorene grane:  
17 50 61 70 72

Gubici aktivne snage:  
147.3009 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

34.5331 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93132 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
16 17 50 61 72

Snage DG-a:  
614.84 kW 1432.28 kW 452.88 kW  
Pozicije DG-a:  
11 61 64

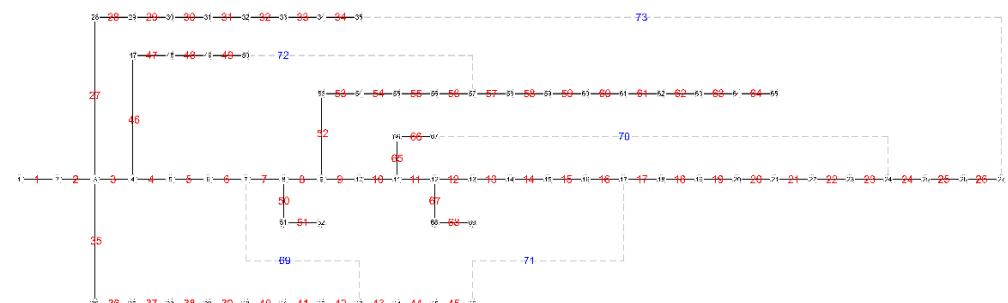
Gubici aktivne snage:  
49.8545 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
77.8425134 %

Minimalni napon čvora:  
0.9855 p.u.

## SCENARIO 10

69 bus inicijalni sistem



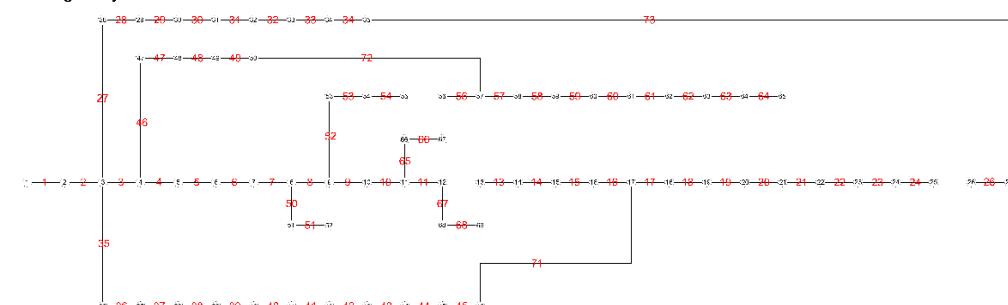
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73

Gubici aktivne snage:  
225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



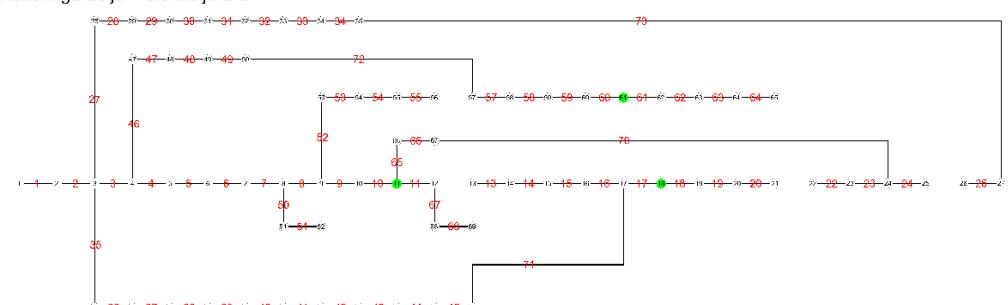
Otvorene grane:  
12 25 55 69 70

Gubici aktivne snage:  
157.0235 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

30.212 %  
Minimalni napon čvora:  
0.91874 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
12 21 25 56 69

Snage DG-a:  
500.0 kW 280.75 kW 1719.25 kW  
Pozicije DG-a:  
11 18 61

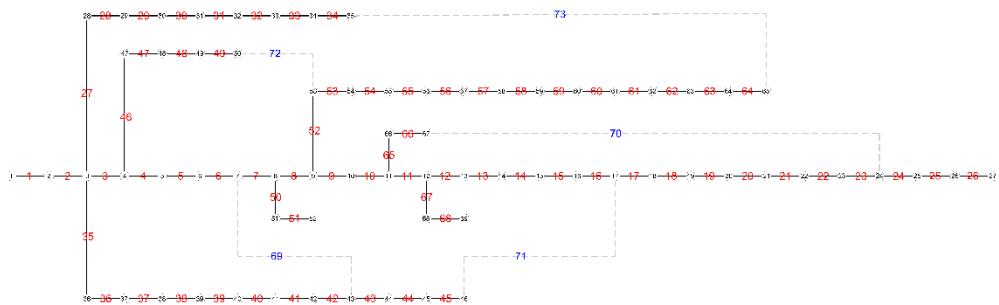
Gubici aktivne snage:  
51.0534 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:  
77.30967 %

Minimalni napon čvora:  
0.9712 p.u.

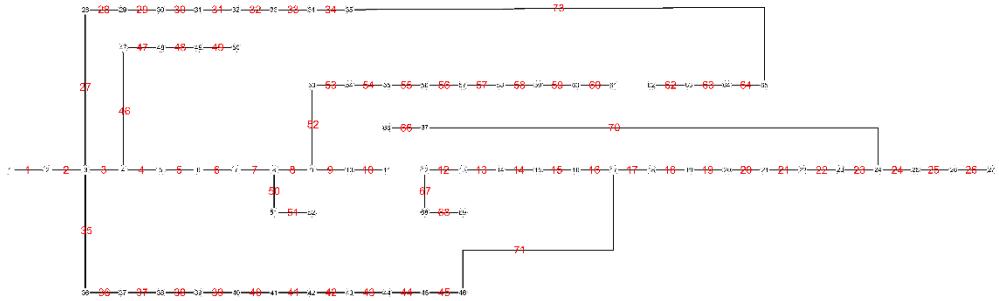
## SCENARIO 11

69 bus inicijalni sistem



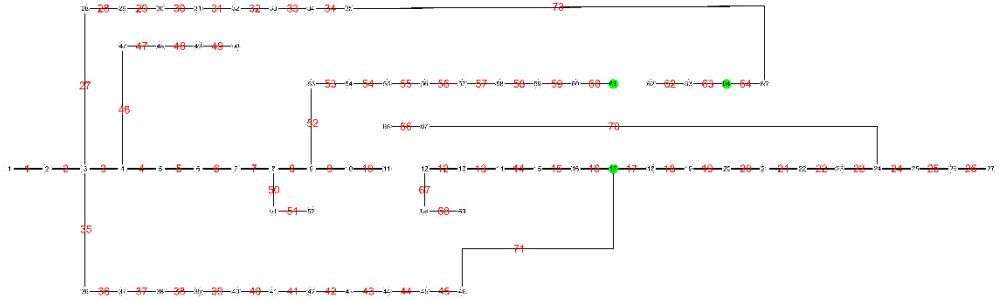
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73  
Gubici aktivne snage:  
225.007 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
—  
Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
11 61 65 69 72  
Gubici aktivne snage:  
137.7428 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
38.7812 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93405 p.u.

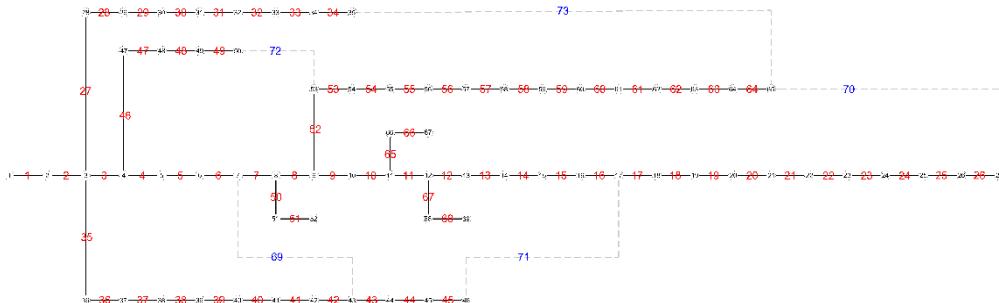
Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
11 61 65 69 72  
Snage DG-a:  
703.02 kW 1451.76 kW 345.22 kW  
Pozicije DG-a:  
17 61 64  
Gubici aktivne snage:  
46.8597 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
79.1753 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9867 p.u.

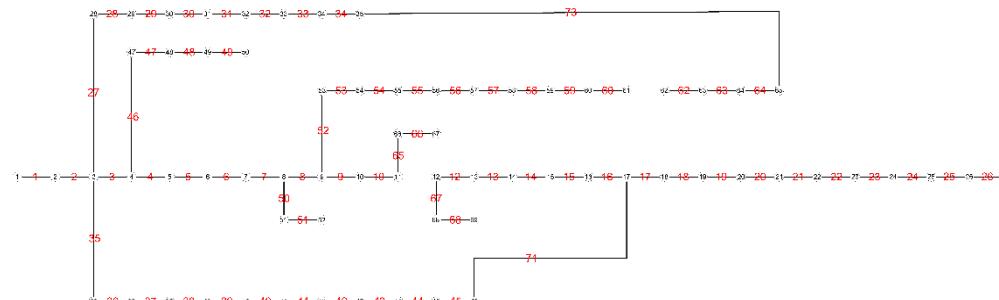
## SCENARIO 12

69 bus inicijalni sistem



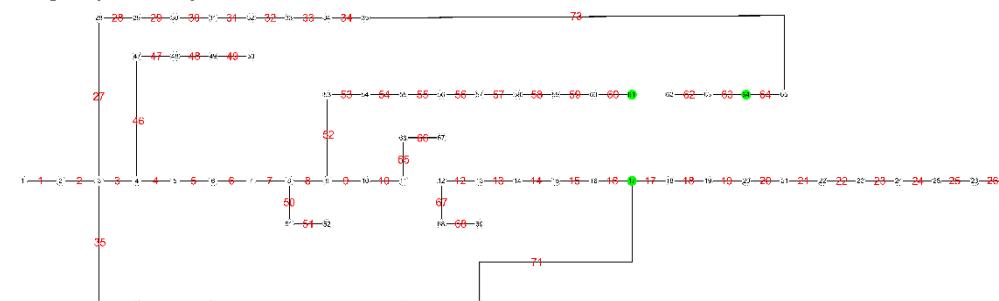
Otvorene grane:  
69 70 71 72 73  
Gubici aktivne snage:  
225.007 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
—  
Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:  
11 61 69 70 72  
Gubici aktivne snage:  
137.9087 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
38.7075 %  
Minimalni napon čvora:  
0.93373 p.u.

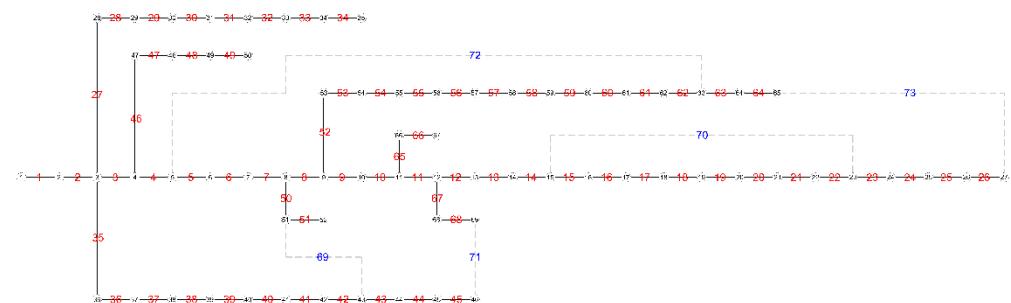
Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:  
11 61 69 70 72  
Snage DG-a:  
683.51 kW 1465.33 kW 351.16 kW  
Pozicije DG-a:  
17 61 64  
Gubici aktivne snage:  
47.1035 kW  
Redukcija gubitaka aktivne snage:  
79.06517 %  
Minimalni napon čvora:  
0.9869 p.u.

## SCENARIO 13

69 bus inicijalni sistem



Otvorene grane:

69 70 71 72 73

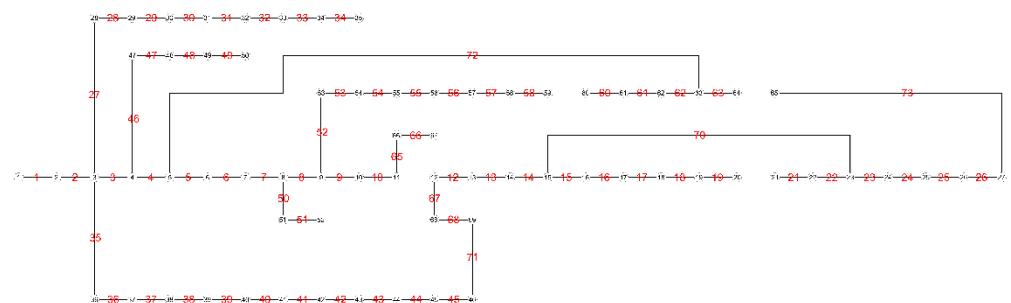
Gubici aktivne snage:

225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:

11 20 59 64 69

Gubici aktivne snage:

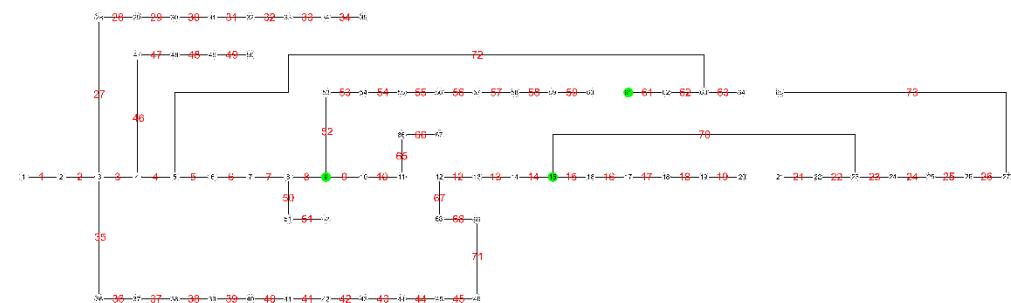
74.8539 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

86.7317 %

Minimalni napon čvora:  
0.96647 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:

11 20 60 64 69

Snage DG-a:

498.90 kW 525.72 kW 1475.38 kW

Pozicije DG-a:

9 15 61

Gubici aktivne snage:

27.4432 kW

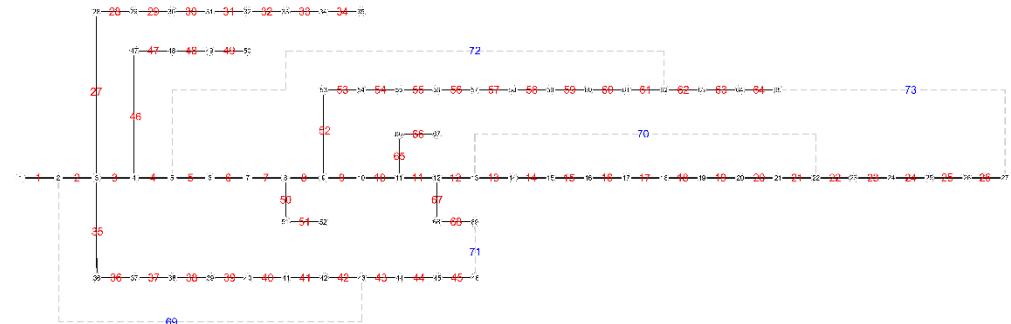
Redukcija gubitaka aktivne snage:

87.80306 %

Minimalni napon čvora:  
0.9878 p.u.

## SCENARIO 14

69 bus inicijalni sistem



Otvorene grane:

69 70 71 72 73

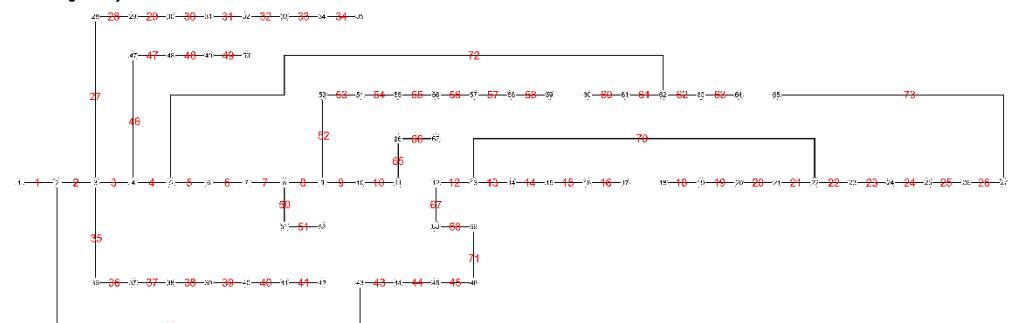
Gubici aktivne snage:

225.0007 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

Minimalni napon čvora:  
0.90919 p.u.

Rekonfiguracija



Otvorene grane:

11 17 42 59 64

Gubici aktivne snage:

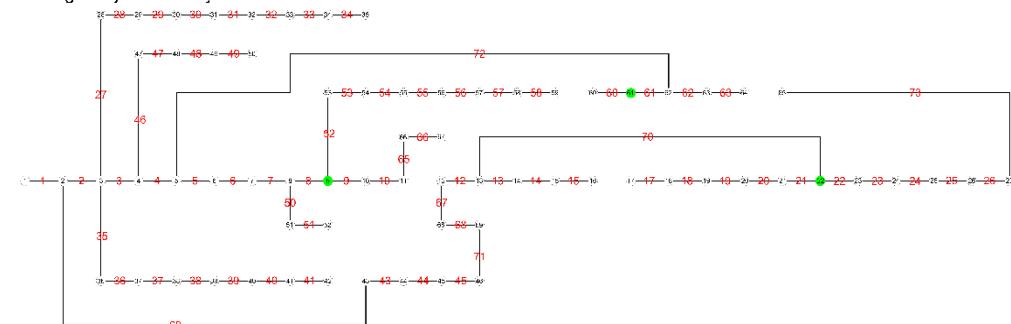
65.2696 kW

Redukcija gubitaka aktivne snage:

70.9914 %

Minimalni napon čvora:  
0.97137 p.u.

Rekonfiguracija + alokacija DG



Otvorene grane:

11 16 42 59 64

Snage DG-a:

491.64 kW 523.47 kW 1484.89 kW

Pozicije DG-a:

9 22 61

Gubici aktivne snage:

24.1605 kW

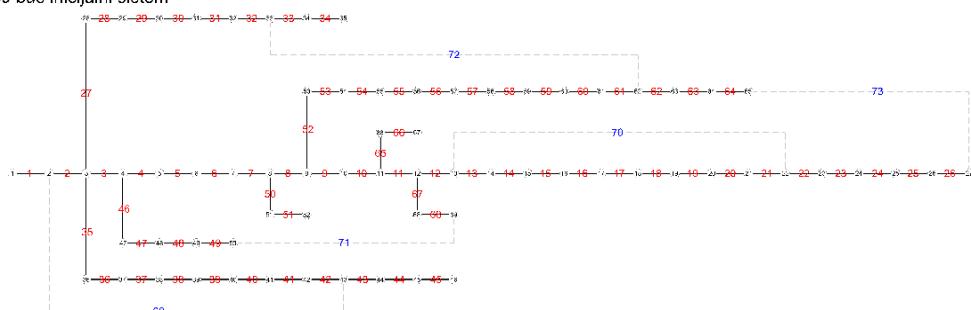
Redukcija gubitaka aktivne snage:

89.26203 %

Minimalni napon čvora:  
0.9909 p.u.

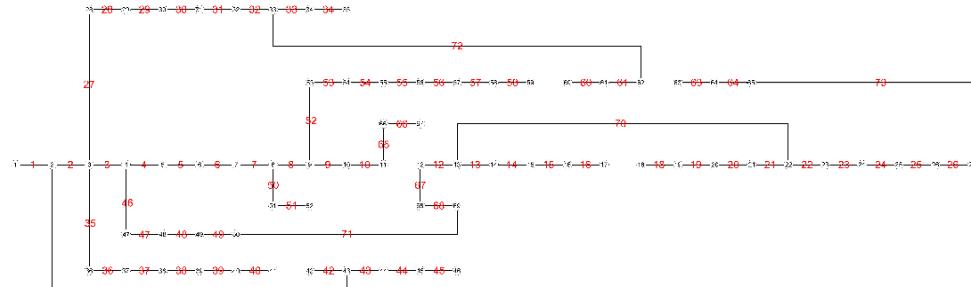
## SCENARIO 15

69 bus inicijalni sistem



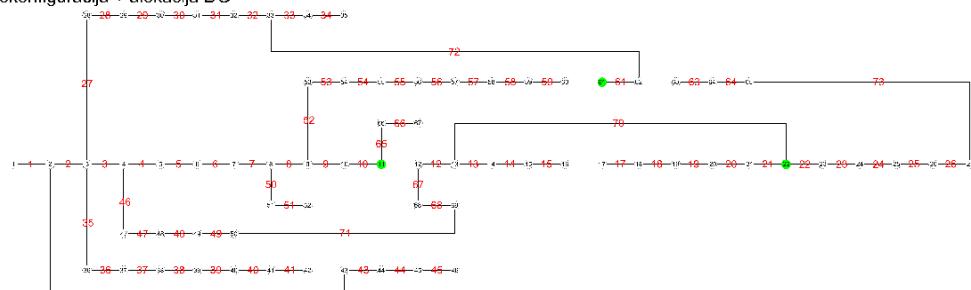
|                                    |
|------------------------------------|
| Otvorene grane:                    |
| 69 70 71 72 73                     |
| Gubici aktivne snage:              |
| 225.0007 kW                        |
| Reducacija gubitaka aktivne snage: |
| —                                  |
| Minimalni napon čvora:             |
| 0.90919 p.u.                       |

Rekonfiguracija



|                                    |
|------------------------------------|
| Otvorene grane:                    |
| 11 17 41 59 62                     |
| Gubici aktivne snage:              |
| 101.2085 kW                        |
| Reducacija gubitaka aktivne snage: |
| 55.0186 %                          |
| Minimalni napon čvora:             |
| 0.95702 p.u.                       |

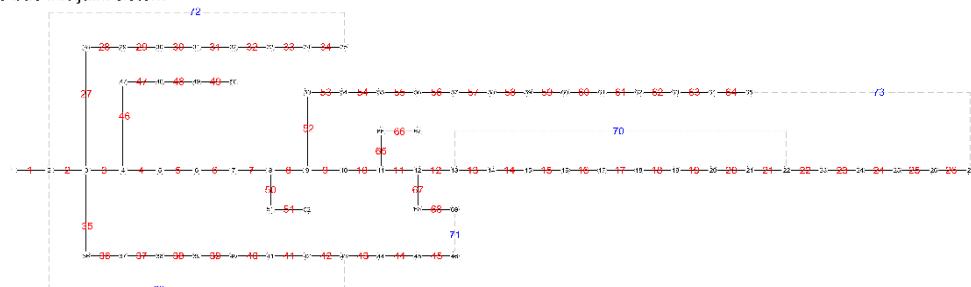
Rekonfiguracija + alokacija DG



|                                    |
|------------------------------------|
| Otvorene grane:                    |
| 11 16 42 60 62                     |
| Snage DG-a:                        |
| 354.55 kW 837.19 kW 1307.96 kW     |
| Pozicije DG-a:                     |
| 11 22 61                           |
| Gubici aktivne snage:              |
| 37.0720 kW                         |
| Reducacija gubitaka aktivne snage: |
| 83.52361 %                         |
| Minimalni napon čvora:             |
| 0.9783 p.u.                        |

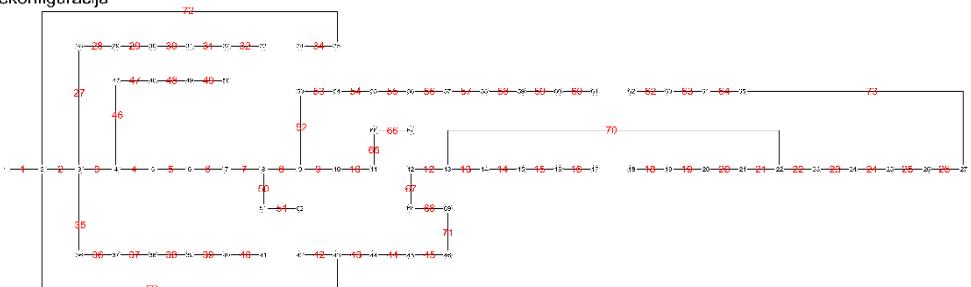
## SCENARIO 16

69 bus inicijalni sistem



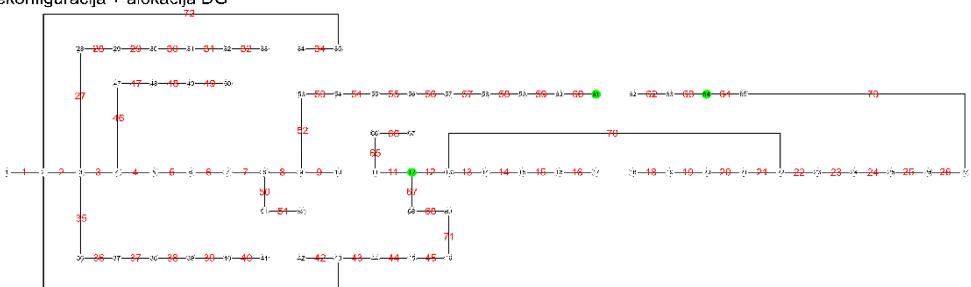
|                                    |
|------------------------------------|
| Otvorene grane:                    |
| 69 70 71 72 73                     |
| Gubici aktivne snage:              |
| 225.0007 kW                        |
| Reducacija gubitaka aktivne snage: |
| —                                  |
| Minimalni napon čvora:             |
| 0.90919 p.u.                       |

Rekonfiguracija



|                                    |
|------------------------------------|
| Otvorene grane:                    |
| 11 17 33 41 61                     |
| Gubici aktivne snage:              |
| 148.3373 kW                        |
| Reducacija gubitaka aktivne snage: |
| 34.0725 %                          |
| Minimalni napon čvora:             |
| 0.93374 p.u.                       |

Rekonfiguracija + alokacija DG



|                                    |
|------------------------------------|
| Otvorene grane:                    |
| 10 17 33 41 61                     |
| Snage DG-a:                        |
| 677.31 kW 1411.22 kW 411.47 kW     |
| Pozicije DG-a:                     |
| 12 61 64                           |
| Gubici aktivne snage:              |
| 49.6418 kW                         |
| Reducacija gubitaka aktivne snage: |
| 77.93705 %                         |
| Minimalni napon čvora:             |
| 0.9865 p.u.                        |

Slika 4.4.2 Različiti scenariji rekonfiguracije mreže i istovremene rekonfiguracije i alokacije odgovarajuće snage DIE za mrežu od 69 čvorova

Prvi scenario koji je prikazan (boldovan u Tabeli 4.4.1), jedini je analiziran u dosadašnjoj literaturi [53] i uzimaće se kao referentni u ovom istraživanju. Svi ostali scenariji će se porediti sa pomenutim, pri čemu se jasno može uočiti da se javljaju različiti rezultati.

U slučaju samo rekonfiguracije mreže za referentni scenario, gubici aktivne snage iznose **98.6056 kW**, odnosno redukcija gubitaka aktivne snage u odnosu na inicijalnu mrežu iznosi 56.1754 %. Za slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacije DIE vrijednost ovih gubitaka **35.1718 kW**, tj. redukcija gubitaka aktivne snage u odnosu na inicijalnu mrežu iznosi 84.36814 %. Primjena samo strategije rekonfiguracije mreže, vidno je poboljšala naponske prilike u čvorovima i smanjila gubitke, ali u kombinaciji sa planskom alokacijom DIE odgovarajućih kapaciteta, dobija se sistem sa još boljim performansama. Drugim riječima, raspored DG-a koji je optimalan za jednu topologiju, možda neće biti optimalan za drugu - zato se ove dvije strategije sprovode istovremeno. Takođe, oni se ne smiju raspoređivati preblizu, jer bi to stvorilo lokalne viškove snage i probleme sa naponima, zato algoritam nastoji da ih rasporedi tako da proizvodnja najbolje odgovara opterećenju.

Kako je kriterijum optimizacije u ovom master radu minimizacija gubitaka aktivne snage, to su u Tabeli 4.3.1 dati sumarni rezultati prethodno sprovedene analize. Za scenario 6 (crvenom bojom u Tabeli 4.4.1), dobijeni su značajno veći rezultati gubitaka aktivne snage u odnosu na bazni scenario, dok scenario 14 (zelenom bojom u Tabeli 4.4.1) može potencijalno da bude najbolje rješenje za posmatranu distributivnu mrežu. Razlog tome je izbor petlji u inicijalnoj mreži, što zapravo oslikava infrastrukturu realne mreže sa kojom se raspolaze, a broj kombinacija je enorman. Svaka rekonfiguracija mijenja raspored tokova snage, što može smanjiti ukupne gubitke jer se "skratio" put od izvora do opterećenja ili povećati gubitke jer snaga do potrošača teče kroz veći broj grana ili duže vodove sa većim otporom.

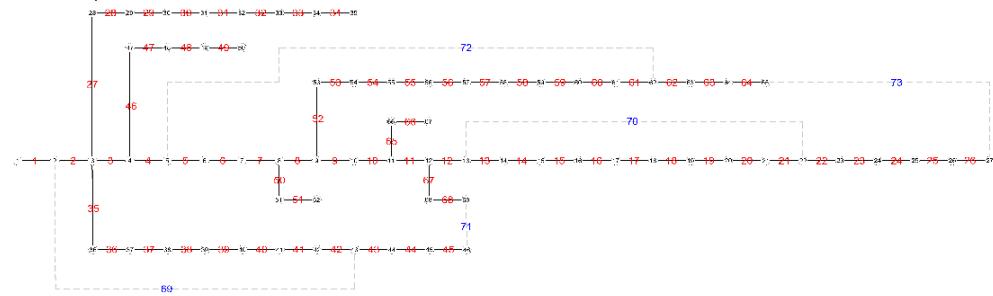
*Tabela 4.4.1 Gubici aktivne snage za različite scenarije za mrežu sa 69 čvorova*

#### Gubici aktivne snage [kW]

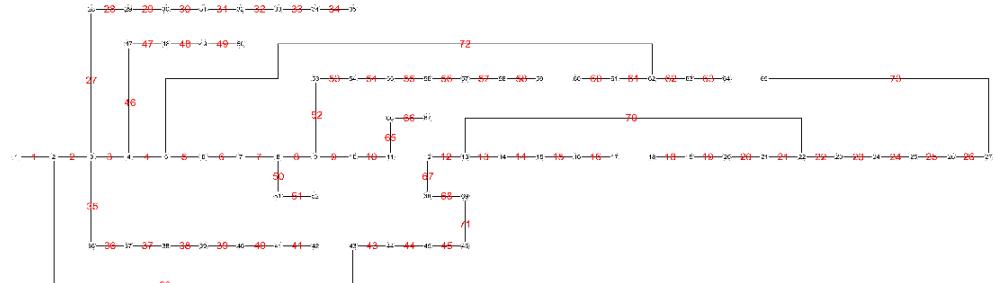
| Scenario: | Rekonfiguracija mreže: | Istovremena rekonfiguracija mreže i alokacija DIE: |
|-----------|------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>1</b>  | <b>98.6056</b>         | <b>35.1718</b>                                     |
| 2         | 149.1509               | 50.2319                                            |
| 3         | 145.555                | 49.1933                                            |
| 4         | 148.5524               | 49.6607                                            |
| 5         | 81.7154                | 30.4251                                            |
| <b>6</b>  | <b>199.6982</b>        | <b>62.8016</b>                                     |
| 7         | 84.2479                | 31.7053                                            |
| 8         | 149.1509               | 50.2110                                            |
| 9         | 147.3009               | 49.8545                                            |
| 10        | 157.0235               | 51.0534                                            |
| 11        | 137.7426               | 46.8597                                            |
| 12        | 137.9087               | 47.1035                                            |
| 13        | 74.8539                | 27.4432                                            |
| <b>14</b> | <b>65.2696</b>         | <b>24.1605</b>                                     |
| 15        | 101.2085               | 37.0720                                            |
| 16        | 148.3373               | 49.6418                                            |

U nastavku se detaljnije analizira scenario 14, prikazan na Slici 4.4.3.

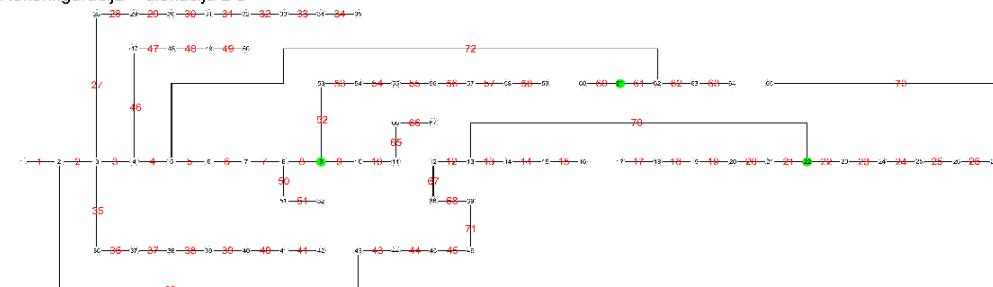
69 bus inicijalni sistem



Rekonfiguracija



Rekonfiguracija + alokacija DG

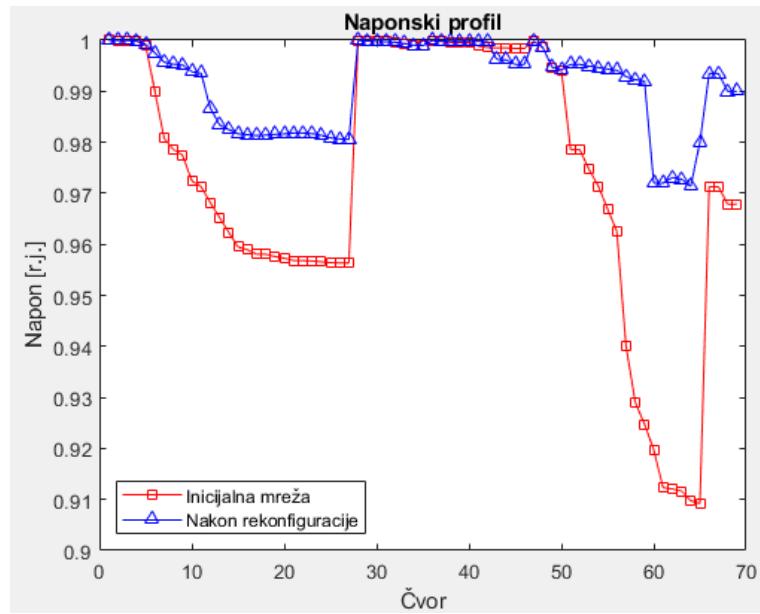


Slika 4.4.3 Scenario 14 (mreža sa 69 čvorova)

Sa Slike 4.4.3 uočava se da je primjenom rekonfiguracije mreže moguće smanjiti gubitke za čak 70.9914 % u odnosu na inicijalnu mrežu, tj. gubici aktivne snage iznose 65.2696 kW. Grane koje su isključene iz mreže nakon rekonfiguracije su 11, 17, 42, 59 i 64, a radijalan karakter mreže je ostao očuvan. U odnosu na bazni scenario, gdje je smanjenje gubitaka aktivne snage iznosilo 56.1754 %, ovaj rezultat je daleko kvalitetniji. Uzrok ovome je upravo raspored grana u inicijalnoj mreži, odnosno način formiranja petlji u mreži, čime se još jednom potvrđuje moć rekonfiguracije mreže kao strategije za značajno poboljšanje performansi cijelokupnog sistema. To poboljšanje uključuje smanjenje gubitaka aktivne snage, ali i popravke profila napona. U odnosu na minimlani napon čvora u inicijalnoj mreži od 0.90919 r.j., nakon rekonfiguracije mreže, minimalni napon iznosi 0.97137 r.j. i zadovoljava ograničenje za dozvoljeni opseg vrijednosti napona u distributivnoj mreži.

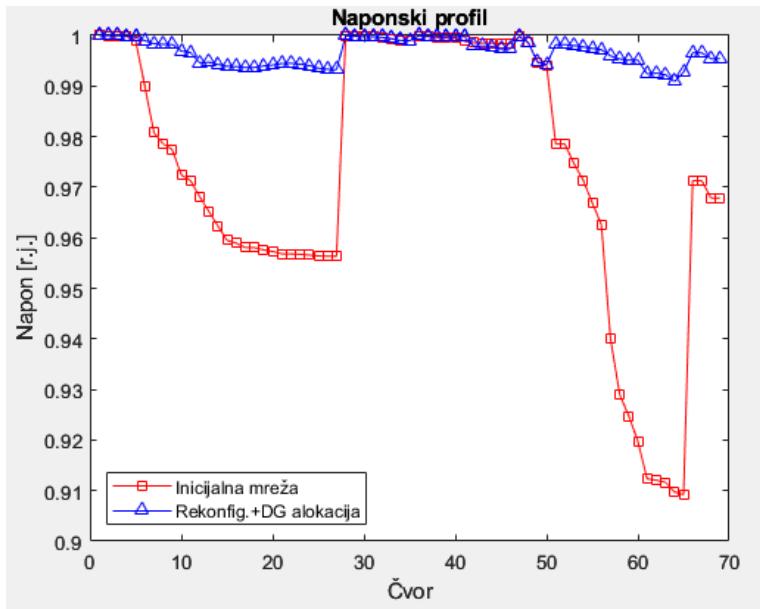
Za slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacije DIE, gubici aktivne snage su redukovani za 89.26203 % u odnosu na inicijalnu mrežu, što je za 5 % bolje u odnosu na rezultate dobijene u baznom scenariju. Naime, gubici aktivne snage u baznom scenariju iznose 35.1718 kW, odnosno redukovani su za 84.36814 %, dok je u ovom slučaju vrijednost gubitaka 24.1605 kW, odnosno redukovani su za 89.26203 %. Isključene grane iz mreže za ovaj slučaj su 11, 16, 42, 59 i 64, identično kao i u prethodnom slučaju samo rekonfiguracije mreže, a pozicije u kojima su smješteni generatori su 9, 22 i 61. DIE sa najvećom instalisanom snagom je u čvoru 61 jer su u tom dijelu najveće potrebe za električnom energijom. Napon se u ovom slučaju dodatno popravio i iznosi 0.9909 r.j., što je gotovo jednako nominalnoj vrijednosti.

Na Slikama 4.4.4 i 4.4.5, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže, odnosno naponi u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE, za posmatrani scenario.



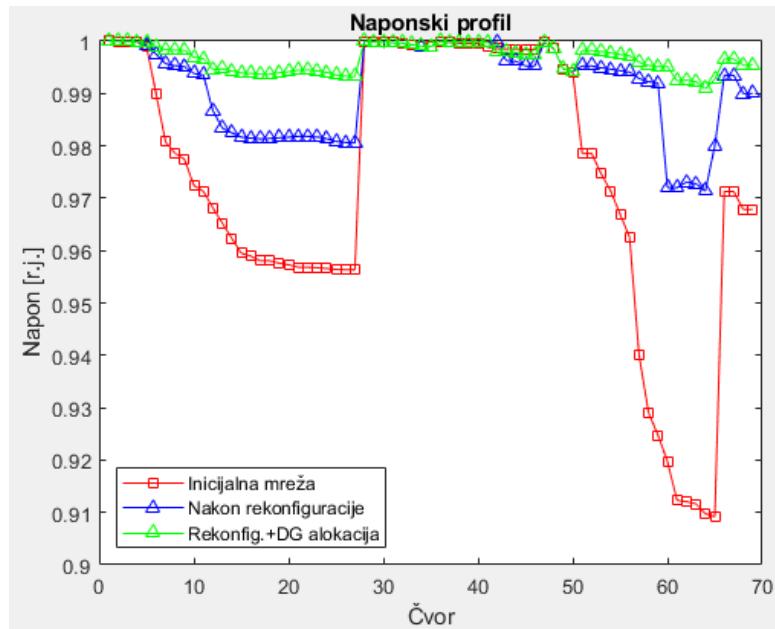
*Slika 4.4.4 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 69 čvora*

Jasno se uočava poboljšanje naponskih prilikama nakon rekonfiguracije mreže, u svim čvorovima. Usljed rekonfiguracije došlo je do promjene tokova snaga, odnosno putanje energije do potrošača, smanjuju se padovi napona (time i gubici) po granama mreže što rezultira boljim naponskim prilikama u cijeloj mreži.



*Slika 4.4.5 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova*

Kao i pri analizi mreže sa 33 čvora, i u ovom slučaju se vidi značaj istovremene upotrebe ove dvije strategije za poboljšanje performansi mreže. Istovremena primjena alokacije DG-a i rekonfiguracije mreže ima smisla samo ako su koordinisane.

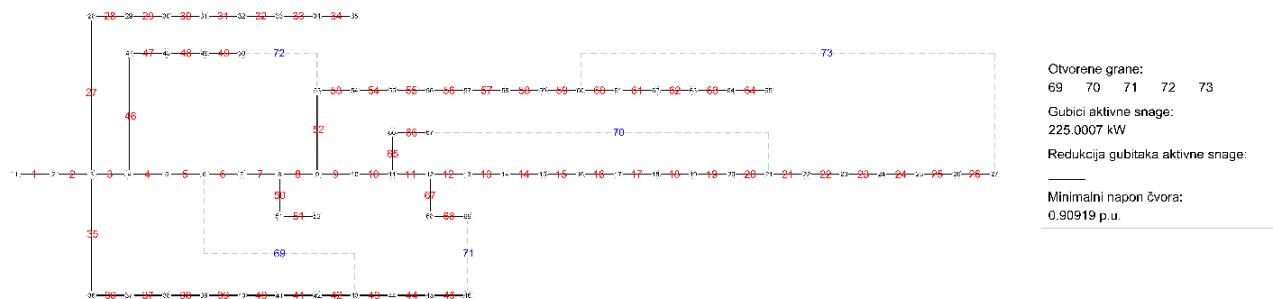


*Slika 4.4.6 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova*

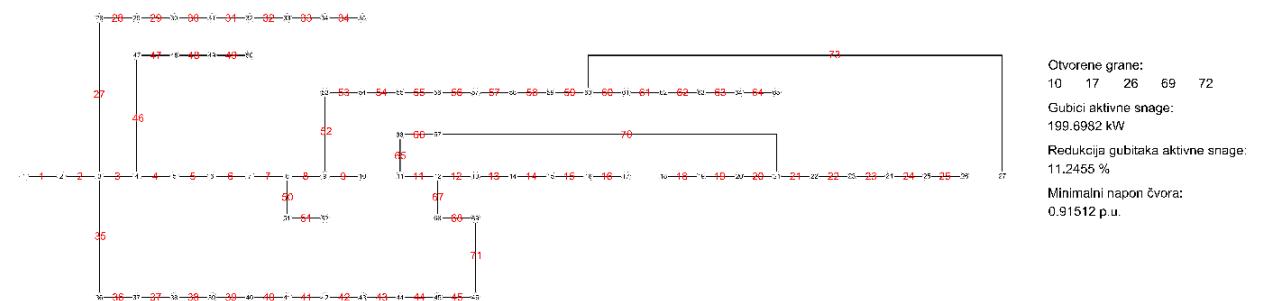
Radi preglednosti i poređenja, na Slici 4.4.6, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE. Najpovoljniji rezultati, kada su u pitanju naponske prilike, postignuti su istovremenom primjenom strategije rekonfiguracije mreže i integracije DIE. Rekonfiguracija mreže prilagodjava tokove snage i strukturu mreže, tako da se DG-i optimalno iskoriste, a opterećenje ravnomjerno raspodijeli. Na taj način se smanjuju gubici u mreži, povećava efikasnost i sigurnost u cjelini.

Slična analiza će se primijeniti i za scenario 6, prikazan na slici 4.4.7.

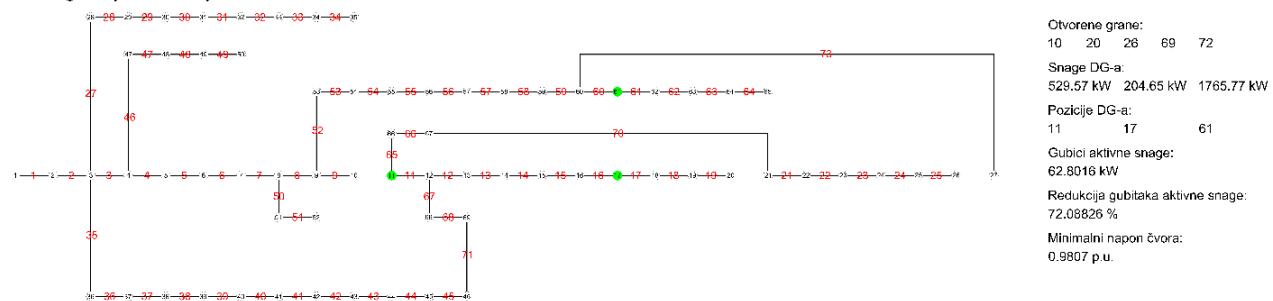
69 bus inicijalni sistem



Rekonfiguracija



Rekonfiguracija + alokacija DG

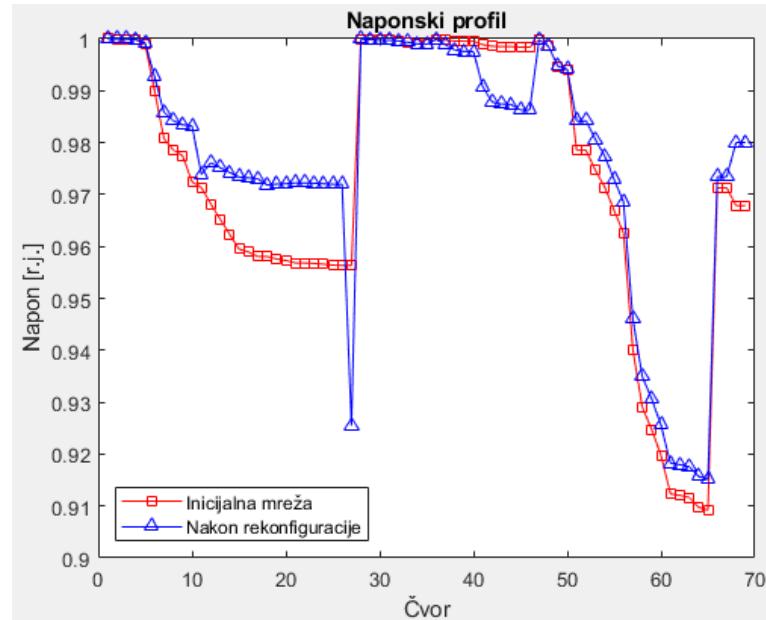


Slika 4.4.7 Scenario 6 (mreža sa 69 čvorova)

Sa Slike 4.3.7 uočava se da je primjenom rekonfiguracije mreže moguće redukovati gubitke za samo 11.2455 % u odnosu na inicijalnu mrežu, tj. gubici aktivne snage iznose 199.6982 kW. Grane koje su isključene iz mreže nakon rekonfiguracije su 10, 17, 26, 69 i 72, a radikalnost mreže je očuvana. U odnosu na bazni scenario, gdje je smanjenje gubitaka aktivne snage iznosilo 56.1754 % (prvi od 16 scenarija), ovdje se pokazuje da neplanska i haotična rekonfiguracija ne može značajno poboljšati performanse mreže. Naime, još jednom se potvrđuje da raspored grana u inicijalnoj mreži, odnosno način formiranja petlji u mreži određuje u kojoj mjeri će rekonfiguracija biti efikasna. Usljed malog poboljšanja od samo 11.2455 % u gubicima aktivne snage, naponske prilike će takođe biti neznatno bolje. U odnosu na minimlani napon čvora u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije minimalni napon iznosi 0.91512 r.j. što je blisko donjoj granici dozvoljenog opsega napona. Može se zaključiti da samo pravilna rekonfiguracija i izbor veza (petlji) između čvorova u inicijalnoj mreži može donijeti zadovoljavajuće rezultate.

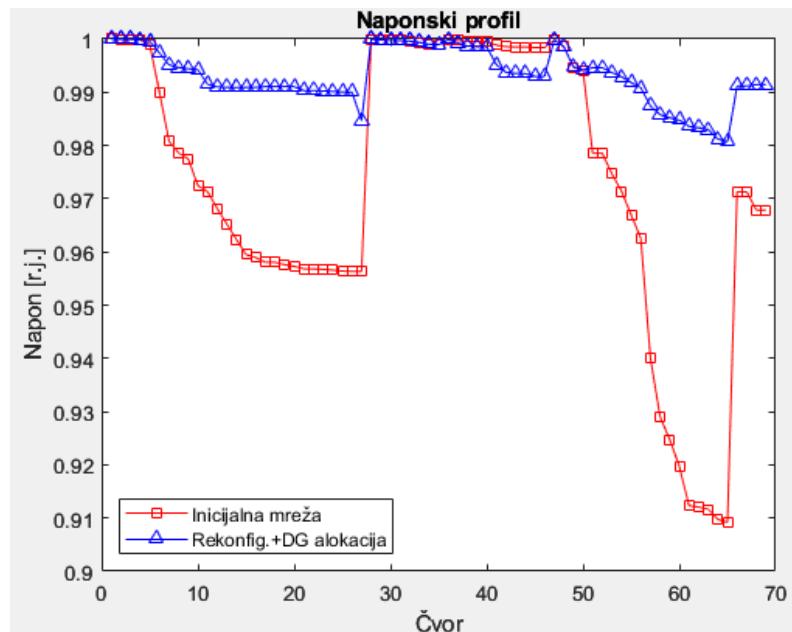
Za slučaj istovremene rekonfiguracije mreže i alokacije DIE za ovaj scenario, gubici aktivne snage su redukovani za 72.08826 % u odnosu na inicijalnu mrežu, što je za oko 12.3 % niže u odnosu na rezultate dobijene u baznom scenariju. Naime, gubici aktivne snage u baznom scenariju iznose 35.1718 kW, odnosno redukovani su za 84.36184 %, dok je u ovom slučaju vrijednost gubitaka 62.8016 kW, odnosno redukovani su za 72.08826 %. Isključene grane iz mreže za ovaj slučaj su 10, 20, 26, 69 i 72, što je blisko prethodnom slučaju samo rekonfiguracije mreže, a pozicije u kojima su smješteni generatori su 11, 17 i 61. Naslućuje se da je DIE sa najvećom instalisanom snagom u čvoru 61, obzirom na broj potrošača, dužinu i zahtjeve za energijom na tom ogranku. Napon se u ovom slučaju dodatno popravio i iznosi 0.9807 r.j., što je mnogo bliže nominalnoj vrijednosti.

Na slikama 4.4.8 i 4.4.9, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže, odnosno naponi u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE, za posmatrani scenario.



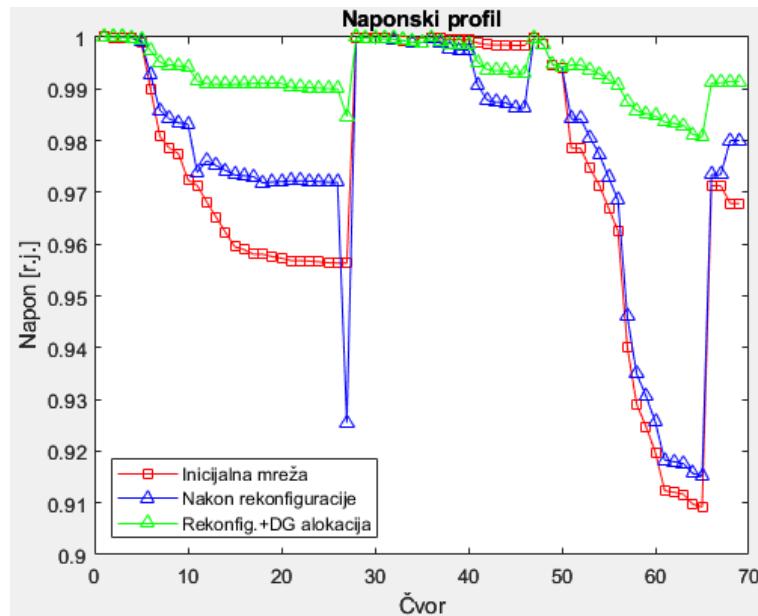
Slika 4.4.8 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon rekonfiguracije mreže sa 69 čvora

Uočava se neznatno poboljšanje naponskih prilika nakon rekonfiguracije mreže, najviše u čvorovima koji su udaljeniji od balansnog čvora 1, a kod čvora 27 primjetno je i pogoršanje. Razlog tome su promjene u tokovima snaga, jer ovim ogrankom pozicioniran najveći broj potrošača kojima treba obezbijediti napajanje, samim tim i najveći dio energije se prosleđuje upravo njima. To uzrokuje veći protok i opterećenje vodova ogranka, te i veće padove napona, a uzimajući u obzir da je ovaj čvor poslednji na tom putu, ovo pogoršanje napona je očekivano.



Slika 4.4.9 Profili napona u inicijalnoj mreži i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova

Kao što je ranije rečeno, istovremena primjena ove dvije strategije može znatno poboljšati performanse mreže, čak i ukoliko početni raspored grana/petlji nije optimalan. Zato su u ovom slučaju naponi bolji u odnosu na prethodni slučaj primjene samo jedne strategije.



*Slika 4.4.10 Profili napona u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE u mreži sa 69 čvorova*

Na Slici 4.4.10, prikazani su naponski profili u inicijalnoj mreži, nakon rekonfiguracije mreže i nakon istovremene rekonfiguracije i alokacije DIE.

U slučaju samo rekonfiguracije, dolazi do preusmjeravanja tokova snage i smanjenja gubitaka, ali opterećenje mreže i dalje zavisi isključivo od centralnog izvora napajanja. Kada se doda DIE na optimalnim lokacijama, dio potrošnje se nadoknađuje lokalno, što smanjuje ukupni protok snage kroz sistem i dodatno redukuje gubitke. Rekonfiguracija može poboljšati napon u određenim čvorovima, ali u nekim djelovima mreže može doći do neznatnih ili čak nepovoljnih promjena, koje su posljedica upravo preraspodjele snage. DIE, kada su optimalno raspoređeni, direktno poboljšavaju naponske prilike u kritičnim čvorovima, smanjujući padove napona i stabilizujući mrežu. Istovremenom primjenom strategija, mreža postaje otpornija na varijacije u opterećenju i može bolje reagovati na promjene, što dodatno doprinosi poboljšanju performansi mreže. Ovo govori u prilog činjenici da savremene mreže zahtijevaju sveobuhvatan pristup i upravljanje postojećim resursima, čime se mogu smanjiti potrebe za izgradnjom novih kapaciteta.

## 5. ZAKLJUČAK

Tradicionalne distributivne elektroenergetske mreže zasnovane su na jednosmjernom prenosu električne energije - od centralizovanih izvora ka krajnjim korisnicima. S obzirom na ograničenost fosilnih goriva i potrebu za smanjenjem emisije štetnih gasova, sve više se ukazuje na značaj OIE, posebno hidroenergije, kao održive i ekološki prihvatljive alternative.

Ipak, savremeni izazovi, poput zastarjele infrastrukture, stalnog rasta potrošnje, čestih kvarova i osjetljivosti na klimatske prilike, dovode u pitanje stabilnost i efikasnost postojećih sistema. Zbog toga je imperativ današnjice upravo tranzicija ka naprednijoj, zelenoj i održivoj distributivnoj mreži.

U tom kontekstu, integracija DIE, naročito obnovljivih, igra ključnu ulogu. Lokalna proizvodnja smanjuje gubitke u mreži i povećava njenu efikasnost, ali zahtijeva i razvoj naprednih sistema upravljanja, skladištenja i automatizacije. Ove tehnologije čine osnovu budućih pametnih mreža, sposobnih da održe ravnotežu između proizvodnje i potrošnje i obezbijede stabilno i pouzdano napajanje električnom energijom svim potrošačima.

Konstantan rast opterećenja, uz nekontrolisanu integraciju DIE, narušava pouzdanost i stabilnost distributivnih mreža. Posljedice se ogledaju u pogoršanju naponskog profila, preopterećenju elemenata sistema, povećanim gubicima i rastu operativnih troškova, što direktno narušava efikasnost i sigurnost snabdijevanja. Kako tradicionalne metode nijesu uspijevale da odgovore na kompleksnost i dinamičnost savremenih mreža, uslijedio je razvoj naprednih optimizacionih tehnika i inteligentnih algoritama za rješavanje ovih izazova.

Podstaknuti rastućom primjenom i superiornim performansama L-shade algoritma, u ovom master radu je istražena njegova primjena u rješavanju optimizacionog problema minimizacije gubitaka aktivne snage. Fokus je na simultanom optimalnom dimenzionisanju i lociranju DIEE uz različite scenarije rekonfiguracije distributivne mreže, što prethodna istraživanja nijesu obuhvatila. Iako integracija DIEE donosi brojne prednosti, ona može uzrokovati smanjenje pouzdanosti i stabilnosti mreže, napomske devijacije, preopterećenje komponenti, narušavanje kvaliteta električne energije, povećane gubitke. Stoga, optimalna alokacija i dimenzionisanje DIEE, u kombinaciji s rekonfiguracijom mreže, predstavljaju ključne strategije za unapređenje tehničkih performansi distributivnih sistema.

Prvo poglavlje pruža uvod u obrađenu problematiku, motive istraživanja i pregled relevantne literature, a takođe prikazuje različite pristupe i aktuelnost teme. Drugo poglavlje analizira izazove savremenih distributivnih mreža, rekonfiguraciju sistema te prednosti i nedostatke DIEE. Opisan je princip rada ključnih DIEE i njihov uticaj na performanse mreže. Zatim se detaljno opisuje *L-shade* algoritam, njegove karakteristike i primjena u optimizaciji, uključujući matematičku formulaciju problema i metodologiju određivanja ekstremnih vrijednosti kriterijumske funkcije. Četvrto poglavlje sprovodi analizu primjene *L-shade* algoritma na IEEE-33 i IEEE-69 mrežama kroz različite scenarije. Rezultati, uključujući i gubitke aktivne snage i napomske prilike, predstavljeni su tabelarno i grafički, uz poređenje sa prethodnim istraživanjima i evaluaciju konkurentnosti metoda.

Ovo istraživanje potvrdilo je efikasnost i primjenjivost *L-shade* algoritma u optimizaciji istovremenih diskretnih i kontinuiranih promjenljivih unutar distributivne mreže. Kroz optimalan odabir prekidača za rekonfiguraciju mreže i precizno određivanje lokacija i kapaciteta DIEE, algoritam postiže minimalne gubitke aktivne snage u poređenju sa ekvivalentnim optimizacionim metodama.

Već pomenuto, potencijalno rješenje za navedene izazove, jeste koordinisano, optimalno dimenzionisanje i određivanje mjesta priključenja DIEE uz adekvatnu rekonfiguraciju distributivne mreže. Usaglašenim djelovanjem ovih strategija, mreža postaje otpornija na dinamičke promjene u potrošnji i proizvodnji - ne samo da doprinosi smanjenju gubitaka i uravnovešenju opterećenja, već i unapređuje stabilnost i pouzdanost isporuke električne energije. Ovakav pristup igra ključnu ulogu u stvaranju fleksibilnog i održivog EES-a, sposobnog da odgovori na savremene energetske zahtjeve.

Analizom različitih scenarija pokazano je da sama rekonfiguracija može preusmjeriti tokove snage i smanjiti gubitke. Razlog tome je izbor petlji u početnoj mreži, što zapravo oslikava infrastrukturu realne mreže sa kojom se raspolaže. Rekonfiguracija može pozitivno uticati na naponske prilike u određenim čvorovima, ali istovremeno može izazvati i nepovoljne promjene u drugim dijelovima mreže uslijed preraspodjele snage. Uvođenjem DIE na optimalnim lokacijama smanjuje se potreba za prenosom velike količine aktivne snage kroz sistem, čime se dodatno mogu redukovati gubici i poboljšati ukupna efikasnost mreže. Nasumična integracija pretjerano mnogo DIE, bez preciznog određivanja lokacije i kapaciteta, kao i haotična, neplanska rekonfiguracija mreže, ne mogu dovesti do zadovoljavajućih rezultata. Drugim riječima, raspored DIE koji je optimalan za jednu topologiju, možda neće biti optimalan za drugu, zato se ove dvije strategije sprovode istovremeno.

S druge strane, DIEE, kada su optimalno locirani i dimenzionisani, direktno poboljšavaju naponski profil u kritičnim čvorovima, smanjuju padove napona i povećavaju stabilnost sistema. Kombinovana, planska primjena ovih strategija omogućava distributivnim mrežama veću otpornost na promjene opterećenja i bolju adaptaciju dinamičkim zahtjevima sistema. Ovo može značajno poboljšati rad mreže, čak i kada početna struktura sistema nije optimalna. Sve navedeno potvrđuje činjenicu da se samo sveobuhvatnim planiranjem i inteligentnim upravljanjem raspoloživim resursima može smanjiti potreba za izgradnjom novih kapaciteta i postići dugoročna održivost EES-a.

Dobijeni zaključci su opštег karaktera i mogu se primijeniti na složenije sisteme, uz proporcionalno veći obim podataka i računske složenosti. Upravo zbog toga, jedno od ključnih izazova savremene optimizacije jeste postizanje ravnoteže između konvergencije algoritama i njihove relevantnosti u stvarnim uslovima rada mreže.

U realnim sistemima, snage potrošnje, kao i proizvodnje, se mijenjaju u vremenu, što značajno usložnjava analizu problema. Ovo istraživanje se temeljilo na jednovremenoj analizi koordinisane alokacije DIEE i rekonfiguracije distributivne mreže, tj. na posmatranju jednog vremenskog trenutka. Navedeno predstavlja najvažnije, iako u literaturi prepoznato, ograničenje. Dalja ograničenja u ovom istraživanju su uzrokovana primjenom *L-shade* algoritma kao alata za optimizaciju. Algoritam ima stohastičku prirodu, što znači da postoji rizik da algoritam konvergira ka lokalnim optimalnim rješenjima, umjesto da postigne globalno najbolje rješenje. Dodatno, kvalitet rezultata zavisi od podešavanja ulaznih podataka, modela koji se koristi u analizi i od broja pokretanja algoritma. Istraživanje je sprovedeno na standardnim IEEE-33 i IEEE-69 distributivnim mrežama, sa koncentrisanim parametrima, dok se u stvarnosti sistemi obično opisuju raspodijeljenim parametrima. Za nesmetano funkcionisanje distributivne mreže, neophodno je održavati naponske nivoje unutar strogo definisanih granica, tj. napon u mreži treba da bude u opsegu od 90% do 110% nominalne vrijednosti napona. Takođe, kako se profil napona poboljšava tokom rekonfiguracije mreže i alokacije DIE, struje u granama se smanjuju u odnosu na struje u osnovnom slučaju. Zato nije neophodno provjeravati ovo ograničenje tokom optimizacije.

Buduća istraživanja mogu se usmjeriti na primjenu *L-shade* algoritma u realnim mrežama većih dimenzija, uključujući dodatne kompenzacione uređaje za reaktivnu snagu, što bi omogućilo još preciznije analize i dalju optimizaciju rada distributivnih mreža. Ukupni uticaj DIEE na EES ostaje dinamično istraživačko područje koje zahtijeva pažljivo upravljanje kako bi se osigurala dugoročna stabilnost, efikasnost i pouzdanost sistema u cjelini.

## PRILOG

Podaci o testnim, distributivnim IEEE mrežama sa 33 i 69 čvorova.

*Tabela P.1 Opšti podaci o mreži sa 33 čvora*

|                               | <b>Broj:</b> |                                            | <b>P[MW]</b> | <b>Q[MVAr]</b> |
|-------------------------------|--------------|--------------------------------------------|--------------|----------------|
| <b>Čvorovi</b>                | 33           | <b>Proizvodni kapaciteti</b>               | 0.0          | od 0.0 do 0.0  |
| <b>Generatori</b>             | 1            | <b>Proizvodni kapaciteti u pogonu</b>      | 0.0          | od 0.0 do 0.0  |
| <b>Angažovani generatori</b>  | 1            | <b>Stvarna proizvodnja</b>                 | 3.9          | 2.4            |
| <b>Potrošači (ukupno)</b>     | 32           | <b>Potrošnja (ukupna)</b>                  | 3.7          | 2.3            |
| <b>Potrošači (fiksni)</b>     | 32           | <b>Potrošnja (fiksna)</b>                  | 3.7          | 2.3            |
| <b>Potrošači (upravljeni)</b> | 0            | <b>Potrošnja (upravljava)</b>              | -0.0         | -0.0           |
| <b>Šantovi</b>                | 0            | <b>Injectiranje šant elemenata</b>         | -0.0         | 0.0            |
| <b>Grane</b>                  | 32           | <b>Gubici (<math>I^2 \cdot Z</math>)</b>   | 0.20         | 0.14           |
| <b>Transformatori</b>         | 0            | <b>Injectiranje (kapacitivnost vodova)</b> | 0.0          | 0.0            |
| <b>Interkonekcije</b>         | 0            | <b>Tokovi snaga u interkonekcijama</b>     | 0.0          | 0.0            |
| <b>Oblasti</b>                | 1            |                                            |              |                |

*Tabela P.2 Opšti podaci o mreži sa 69 čvora*

|                               | <b>Broj</b> |                                            | <b>P[MW]</b> | <b>Q[MVAr]</b> |
|-------------------------------|-------------|--------------------------------------------|--------------|----------------|
| <b>Čvorovi</b>                | 69          | <b>Proizvodni kapaciteti</b>               | 0.0          | od 0.0 do 0.0  |
| <b>Generatori</b>             | 1           | <b>Proizvodni kapaciteti u pogonu</b>      | 0.0          | od 0.0 do 0.0  |
| <b>Angažovani generatori</b>  | 1           | <b>Stvarna proizvodnja</b>                 | 4.0          | 2.8            |
| <b>Potrošači (ukupno)</b>     | 48          | <b>Potrošnja (ukupna)</b>                  | 3.8          | 2.7            |
| <b>Potrošači (fiksni)</b>     | 48          | <b>Potrošnja (fiksna)</b>                  | 3.8          | 2.7            |
| <b>Potrošači (upravljeni)</b> | 0           | <b>Potrošnja (upravljava)</b>              | -0.0         | -0.0           |
| <b>Šantovi</b>                | 0           | <b>Injectiranje šant elemenata</b>         | -0.0         | 0.0            |
| <b>Grane</b>                  | 68          | <b>Gubici (<math>I^2 \cdot Z</math>)</b>   | 0.23         | 0.10           |
| <b>Transformatori</b>         | 0           | <b>Injectiranje (kapacitivnost vodova)</b> | 0.0          | 0.0            |
| <b>Interkonekcije</b>         | 0           | <b>Tokovi snaga u interkonekcijama</b>     | 0.0          | 0.0            |
| <b>Oblasti</b>                | 1           |                                            |              |                |

*Tabela P.3 Podaci o čvorovima za mrežu sa 33 čvora*

| <b>Čvor</b> | <b>Napon</b>       |                      | <b>Proizvodnja</b> |                | <b>Potrošnja</b> |                |
|-------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------|------------------|----------------|
|             | <b>Moduo [p.u]</b> | <b>Faz. stav [°]</b> | <b>P[MW]</b>       | <b>Q[MVAr]</b> | <b>P[MW]</b>     | <b>Q[MVAr]</b> |
| 1           | 1.000              | 0.000                | 3.92               | 2.44           | -                | -              |
| 2           | 0.997              | 0.014                | -                  | -              | 0.10             | 0.06           |
| 3           | 0.983              | 0.096                | -                  | -              | 0.09             | 0.04           |
| 4           | 0.975              | 0.162                | -                  | -              | 0.12             | 0.08           |
| 5           | 0.968              | 0.228                | -                  | -              | 0.06             | 0.03           |
| 6           | 0.950              | 0.134                | -                  | -              | 0.06             | 0.02           |
| 7           | 0.946              | -0.096               | -                  | -              | 0.20             | 0.10           |

| Čvor    | Napon       |               | Proizvodnja |         | Potrošnja |         |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|-----------|---------|
|         | Moduo [p.u] | Faz. stav [°] | P[MW]       | Q[MVar] | P[MW]     | Q[MVar] |
| 8       | 0.941       | -0.060        | -           | -       | 0.20      | 0.10    |
| 9       | 0.935       | -0.133        | -           | -       | 0.06      | 0.02    |
| 10      | 0.929       | -0.196        | -           | -       | 0.06      | 0.02    |
| 11      | 0.928       | -0.189        | -           | -       | 0.04      | 0.03    |
| 12      | 0.927       | -0.178        | -           | -       | 0.06      | 0.04    |
| 13      | 0.921       | -0.269        | -           | -       | 0.06      | 0.04    |
| 14      | 0.919       | -0.348        | -           | -       | 0.12      | 0.08    |
| 15      | 0.917       | -0.385        | -           | -       | 0.06      | 0.01    |
| 16      | 0.916       | -0.409        | -           | -       | 0.06      | 0.02    |
| 17      | 0.914       | -0.486        | -           | -       | 0.06      | 0.02    |
| 18      | 0.913       | -0.496        | -           | -       | 0.09      | 0.04    |
| 19      | 0.997       | 0.004         | -           | -       | 0.09      | 0.04    |
| 20      | 0.993       | -0.063        | -           | -       | 0.09      | 0.04    |
| 21      | 0.992       | -0.083        | -           | -       | 0.09      | 0.04    |
| 22      | 0.992       | -0.103        | -           | -       | 0.09      | 0.04    |
| 23      | 0.979       | 0.065         | -           | -       | 0.09      | 0.05    |
| 24      | 0.973       | -0.024        | -           | -       | 0.42      | 0.20    |
| 25      | 0.969       | -0.067        | -           | -       | 0.42      | 0.20    |
| 26      | 0.948       | 0.173         | -           | -       | 0.06      | 0.03    |
| 27      | 0.945       | 0.229         | -           | -       | 0.06      | 0.03    |
| 28      | 0.934       | 0.312         | -           | -       | 0.06      | 0.02    |
| 29      | 0.926       | 0.390         | -           | -       | 0.12      | 0.07    |
| 30      | 0.922       | 0.496         | -           | -       | 0.20      | 0.60    |
| 31      | 0.918       | 0.411         | -           | -       | 0.15      | 0.07    |
| 32      | 0.917       | 0.388         | -           | -       | 0.21      | 0.10    |
| 33      | 0.917       | 0.380         | -           | -       | 0.06      | 0.04    |
| UKUPNO: |             | 3.92          | 2.44        | 3.72    | 2.30      |         |

Tabela P.4 Podaci o čvorovima za mrežu sa 69 čvorova

| Čvor | Napon       |               | Proizvodnja |         | Potrošnja |         |
|------|-------------|---------------|-------------|---------|-----------|---------|
|      | Moduo [p.u] | Faz. stav [°] | P[MW]       | Q[MVar] | P[MW]     | Q[MVar] |
| 1    | 1.000       | 0.000         | 4.03        | 2.80    | -         | -       |
| 2    | 1.000       | -0.001        | -           | -       | -         | -       |
| 3    | 1.000       | -0.002        | -           | -       | -         | -       |
| 4    | 1.000       | -0.006        | -           | -       | -         | -       |
| 5    | 0.999       | -0.019        | -           | -       | -         | -       |
| 6    | 0.990       | 0.049         | -           | -       | 0.00      | 0.00    |
| 7    | 0.981       | 0.121         | -           | -       | 0.04      | 0.03    |
| 8    | 0.979       | 0.138         | -           | -       | 0.07      | 0.05    |
| 9    | 0.977       | 0.147         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 10   | 0.972       | 0.232         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 11   | 0.971       | 0.251         | -           | -       | 0.14      | 0.10    |
| 12   | 0.968       | 0.304         | -           | -       | 0.14      | 0.10    |
| 13   | 0.965       | 0.350         | -           | -       | 0.01      | 0.01    |
| 14   | 0.962       | 0.396         | -           | -       | 0.01      | 0.01    |
| 15   | 0.959       | 0.442         | -           | -       | -         | -       |

| Čvor | Napon       |               | Proizvodnja |         | Potrošnja |         |
|------|-------------|---------------|-------------|---------|-----------|---------|
|      | Moduo [p.u] | Faz. stav [°] | P[MW]       | Q[MVAr] | P[MW]     | Q[MVAr] |
| 16   | 0.959       | 0.451         | -           | -       | 0.05      | 0.03    |
| 17   | 0.958       | 0.465         | -           | -       | 0.06      | 0.04    |
| 18   | 0.958       | 0.465         | -           | -       | 0.06      | 0.04    |
| 19   | 0.958       | 0.474         | -           | -       | -         | -       |
| 20   | 0.957       | 0.479         | -           | -       | 0.00      | 0.00    |
| 21   | 0.957       | 0.488         | -           | -       | 0.11      | 0.08    |
| 22   | 0.957       | 0.488         | -           | -       | 0.01      | 0.00    |
| 23   | 0.957       | 0.489         | -           | -       | -         | -       |
| 24   | 0.957       | 0.492         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 25   | 0.956       | 0.496         | -           | -       | -         | -       |
| 26   | 0.956       | 0.497         | -           | -       | 0.01      | 0.01    |
| 27   | 0.956       | 0.497         | -           | -       | 0.01      | 0.01    |
| 28   | 1.000       | -0.003        | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 29   | 1.000       | -0.005        | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 30   | 1.000       | -0.003        | -           | -       | -         | -       |
| 31   | 1.000       | -0.003        | -           | -       | -         | -       |
| 32   | 1.000       | -0.001        | -           | -       | -         | -       |
| 33   | 0.999       | 0.003         | -           | -       | 0.01      | 0.01    |
| 34   | 0.999       | 0.009         | -           | -       | 0.02      | 0.01    |
| 35   | 0.999       | 0.010         | -           | -       | 0.01      | 0.00    |
| 36   | 1.000       | -0.003        | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 37   | 1.000       | -0.009        | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 38   | 1.000       | -0.012        | -           | -       | -         | -       |
| 39   | 1.000       | -0.012        | -           | -       | 0.02      | 0.02    |
| 40   | 1.000       | -0.013        | -           | -       | 0.02      | 0.02    |
| 41   | 0.999       | -0.024        | -           | -       | 0.00      | 0.00    |
| 42   | 0.999       | -0.028        | -           | -       | -         | -       |
| 43   | 0.999       | -0.029        | -           | -       | 0.01      | 0.00    |
| 44   | 0.999       | -0.029        | -           | -       | -         | -       |
| 45   | 0.998       | -0.031        | -           | -       | 0.04      | 0.03    |
| 46   | 0.998       | -0.031        | -           | -       | 0.04      | 0.03    |
| 47   | 1.000       | -0.008        | -           | -       | -         | -       |
| 48   | 0.999       | -0.053        | -           | -       | 0.08      | 0.06    |
| 49   | 0.995       | -0.192        | -           | -       | 0.38      | 0.27    |
| 50   | 0.994       | -0.211        | -           | -       | 0.38      | 0.27    |
| 51   | 0.979       | 0.139         | -           | -       | 0.04      | 0.03    |
| 52   | 0.979       | 0.139         | -           | -       | 0.00      | 0.00    |
| 53   | 0.975       | 0.169         | -           | -       | 0.00      | 0.00    |
| 54   | 0.971       | 0.195         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 55   | 0.967       | 0.230         | -           | -       | 0.02      | 0.02    |
| 56   | 0.963       | 0.265         | -           | -       | -         | -       |
| 57   | 0.940       | 0.662         | -           | -       | -         | -       |
| 58   | 0.929       | 0.864         | -           | -       | -         | -       |
| 59   | 0.925       | 0.945         | -           | -       | 0.10      | 0.07    |
| 60   | 0.920       | 1.050         | -           | -       | -         | -       |
| 61   | 0.912       | 1.119         | -           | -       | 1.24      | 0.89    |
| 62   | 0.912       | 1.122         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 63   | 0.912       | 1.125         | -           | -       | -         | -       |

| Čvor    | Napon       |               | Proizvodnja |         | Potrošnja |         |
|---------|-------------|---------------|-------------|---------|-----------|---------|
|         | Moduo [p.u] | Faz. stav [°] | P[MW]       | Q[MVAr] | P[MW]     | Q[MVAr] |
| 64      | 0.910       | 1.143         | -           | -       | 0.23      | 0.16    |
| 65      | 0.909       | 1.149         | -           | -       | 0.06      | 0.04    |
| 66      | 0.971       | 0.252         | -           | -       | 0.02      | 0.01    |
| 67      | 0.971       | 0.252         | -           | -       | 0.02      | 0.01    |
| 68      | 0.968       | 0.310         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| 69      | 0.968       | 0.310         | -           | -       | 0.03      | 0.02    |
| UKUPNO: |             | 4.03          | 2.80        | 3.80    | 2.69      |         |

Tabela P.5 Podaci o granama za mrežu sa 33 čvora

| Grana   | Od<br>čvora | Do<br>čvora | Injektiranje od čvora |         | Injektiranje do čvora |         | Gubici ( $I^2Z$ ) |         |
|---------|-------------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-------------------|---------|
|         |             |             | P[MW]                 | Q[MVAr] | P[MW]                 | Q[MVAr] | P[MW]             | Q[MVAr] |
| 1       | 1           | 2           | 3.92                  | 2.44    | -3.91                 | -2.43   | 0.012             | 0.01    |
| 2       | 2           | 3           | 3.44                  | 2.21    | -3.39                 | -2.18   | 0.052             | 0.03    |
| 3       | 3           | 4           | 2.36                  | 1.68    | -2.34                 | -1.67   | 0.020             | 0.01    |
| 4       | 4           | 5           | 2.22                  | 1.59    | -2.20                 | -1.58   | 0.019             | 0.01    |
| 5       | 5           | 6           | 2.14                  | 1.55    | -2.11                 | -1.52   | 0.038             | 0.03    |
| 6       | 6           | 7           | 1.10                  | 0.53    | -1.09                 | -0.52   | 0.002             | 0.01    |
| 7       | 7           | 8           | 0.89                  | 0.42    | -0.89                 | -0.42   | 0.005             | 0.00    |
| 8       | 8           | 9           | 0.69                  | 0.32    | -0.68                 | -0.32   | 0.004             | 0.00    |
| 9       | 9           | 10          | 0.62                  | 0.30    | -0.62                 | -0.29   | 0.004             | 0.00    |
| 10      | 10          | 11          | 0.56                  | 0.27    | -0.56                 | -0.27   | 0.001             | 0.00    |
| 11      | 11          | 12          | 0.52                  | 0.24    | -0.51                 | -0.24   | 0.001             | 0.00    |
| 12      | 12          | 13          | 0.45                  | 0.21    | -0.45                 | -0.21   | 0.003             | 0.00    |
| 13      | 13          | 14          | 0.39                  | 0.17    | -0.39                 | -0.17   | 0.001             | 0.00    |
| 14      | 14          | 15          | 0.27                  | 0.09    | -0.27                 | -0.09   | 0.000             | 0.00    |
| 15      | 15          | 16          | 0.21                  | 0.08    | -0.21                 | -0.08   | 0.000             | 0.00    |
| 16      | 16          | 17          | 0.15                  | 0.06    | -0.15                 | -0.06   | 0.000             | 0.00    |
| 17      | 17          | 18          | 0.09                  | 0.04    | -0.09                 | -0.04   | 0.000             | 0.00    |
| 18      | 2           | 19          | 0.36                  | 0.16    | -0.36                 | -0.16   | 0.000             | 0.00    |
| 19      | 19          | 20          | 0.27                  | 0.12    | -0.27                 | -0.12   | 0.001             | 0.00    |
| 20      | 20          | 21          | 0.18                  | 0.08    | -0.18                 | -0.08   | 0.000             | 0.00    |
| 21      | 21          | 22          | 0.09                  | 0.04    | -0.09                 | -0.04   | 0.000             | 0.00    |
| 22      | 3           | 23          | 0.94                  | 0.46    | -0.94                 | -0.46   | 0.003             | 0.00    |
| 23      | 23          | 24          | 0.85                  | 0.41    | -0.84                 | -0.40   | 0.005             | 0.00    |
| 24      | 24          | 25          | 0.42                  | 0.20    | -0.42                 | -0.20   | 0.001             | 0.00    |
| 25      | 6           | 26          | 0.95                  | 0.97    | -0.95                 | -0.97   | 0.003             | 0.00    |
| 26      | 26          | 27          | 0.89                  | 0.95    | -0.88                 | -0.95   | 0.003             | 0.00    |
| 27      | 27          | 28          | 0.82                  | 0.92    | -0.81                 | -0.91   | 0.011             | 0.01    |
| 28      | 28          | 29          | 0.75                  | 0.89    | -0.75                 | -0.88   | 0.008             | 0.01    |
| 29      | 29          | 30          | 0.63                  | 0.81    | -0.62                 | -0.81   | 0.004             | 0.00    |
| 30      | 30          | 31          | 0.42                  | 0.21    | -0.42                 | -0.21   | 0.002             | 0.00    |
| 31      | 31          | 32          | 0.27                  | 0.14    | -0.27                 | -0.14   | 0.000             | 0.00    |
| 32      | 32          | 33          | 0.06                  | 0.04    | -0.06                 | -0.04   | 0.000             | 0.00    |
| UKUPNO: |             |             | 0.203                 |         |                       |         | 0.14              |         |

Tabela P.6 Podaci o granama za mrežu sa 69 čvorova

| Grana |             |             | Injektiranje od čvora |         | Injektiranje do čvora |         | Gubici ( $I^2Z$ ) |         |
|-------|-------------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-------------------|---------|
|       | Od<br>čvora | Do<br>čvora | P[MW]                 | Q[MVar] | P[MW]                 | Q[MVar] | P[MW]             | Q[MVar] |
| 1     | 1           | 2           | 4.03                  | 2.80    | -4.03                 | -2.80   | 0.000             | 0.00    |
| 2     | 2           | 3           | 4.03                  | 2.80    | -4.03                 | -2.80   | 0.000             | 0.00    |
| 3     | 3           | 4           | 3.75                  | 2.60    | -3.75                 | -2.60   | 0.000             | 0.00    |
| 4     | 4           | 5           | 2.90                  | 1.99    | -2.90                 | -1.99   | 0.002             | 0.00    |
| 5     | 5           | 6           | 2.90                  | 1.99    | -2.87                 | -1.97   | 0.028             | 0.01    |
| 6     | 6           | 7           | 2.87                  | 1.97    | -2.84                 | -1.96   | 0.029             | 0.01    |
| 7     | 7           | 8           | 2.80                  | 1.93    | -2.79                 | -1.92   | 0.007             | 0.00    |
| 8     | 8           | 9           | 2.67                  | 1.84    | -2.67                 | -1.84   | 0.003             | 0.00    |
| 9     | 9           | 10          | 0.78                  | 0.53    | -0.78                 | -0.53   | 0.005             | 0.00    |
| 10    | 10          | 11          | 0.75                  | 0.51    | -0.75                 | -0.51   | 0.001             | 0.00    |
| 11    | 11          | 12          | 0.57                  | 0.38    | -0.56                 | -0.38   | 0.002             | 0.00    |
| 12    | 12          | 13          | 0.36                  | 0.24    | -0.36                 | -0.24   | 0.001             | 0.00    |
| 13    | 13          | 14          | 0.35                  | 0.23    | -0.35                 | -0.23   | 0.001             | 0.00    |
| 14    | 14          | 15          | 0.34                  | 0.23    | -0.34                 | -0.23   | 0.001             | 0.00    |
| 15    | 15          | 16          | 0.34                  | 0.23    | -0.34                 | -0.23   | 0.000             | 0.00    |
| 16    | 16          | 17          | 0.30                  | 0.20    | -0.30                 | -0.20   | 0.000             | 0.00    |
| 17    | 17          | 18          | 0.24                  | 0.16    | -0.24                 | -0.16   | 0.000             | 0.00    |
| 18    | 18          | 19          | 0.18                  | 0.13    | -0.18                 | -0.13   | 0.000             | 0.00    |
| 19    | 19          | 20          | 0.18                  | 0.13    | -0.18                 | -0.13   | 0.000             | 0.00    |
| 20    | 20          | 21          | 0.18                  | 0.12    | -0.18                 | -0.12   | 0.000             | 0.00    |
| 21    | 21          | 22          | 0.06                  | 0.04    | -0.06                 | -0.04   | 0.000             | 0.00    |
| 22    | 22          | 23          | 0.06                  | 0.04    | -0.06                 | -0.04   | 0.000             | 0.00    |
| 23    | 23          | 24          | 0.06                  | 0.04    | -0.06                 | -0.04   | 0.000             | 0.00    |
| 24    | 24          | 25          | 0.03                  | 0.02    | -0.03                 | -0.02   | 0.000             | 0.00    |
| 25    | 25          | 26          | 0.03                  | 0.02    | -0.03                 | -0.02   | 0.000             | 0.00    |
| 26    | 26          | 27          | 0.01                  | 0.01    | -0.01                 | -0.01   | 0.000             | 0.00    |
| 27    | 3           | 28          | 0.09                  | 0.07    | -0.09                 | -0.07   | 0.000             | 0.00    |
| 28    | 28          | 29          | 0.07                  | 0.05    | -0.07                 | -0.05   | 0.000             | 0.00    |
| 29    | 29          | 30          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03   | 0.000             | 0.00    |
| 30    | 30          | 31          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03   | 0.000             | 0.00    |
| 31    | 31          | 32          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03   | 0.000             | 0.00    |
| 32    | 32          | 33          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03   | 0.000             | 0.00    |
| 33    | 33          | 34          | 0.03                  | 0.02    | -0.03                 | -0.02   | 0.000             | 0.00    |
| 34    | 34          | 35          | 0.01                  | 0.00    | -0.01                 | -0.00   | 0.000             | 0.00    |
| 35    | 3           | 36          | 0.19                  | 0.13    | -0.19                 | -0.13   | 0.000             | 0.00    |
| 36    | 36          | 37          | 0.16                  | 0.11    | -0.16                 | -0.11   | 0.000             | 0.00    |
| 37    | 37          | 38          | 0.13                  | 0.09    | -0.13                 | -0.09   | 0.000             | 0.00    |
| 38    | 38          | 39          | 0.13                  | 0.09    | -0.13                 | -0.09   | 0.000             | 0.00    |
| 39    | 39          | 40          | 0.11                  | 0.07    | -0.11                 | -0.07   | 0.000             | 0.00    |
| 40    | 40          | 41          | 0.09                  | 0.06    | -0.09                 | -0.06   | 0.000             | 0.00    |
| 41    | 41          | 42          | 0.08                  | 0.06    | -0.08                 | -0.06   | 0.000             | 0.00    |
| 42    | 42          | 43          | 0.08                  | 0.06    | -0.08                 | -0.06   | 0.000             | 0.00    |
| 43    | 43          | 44          | 0.08                  | 0.05    | -0.08                 | -0.05   | 0.000             | 0.00    |
| 44    | 44          | 45          | 0.08                  | 0.05    | -0.08                 | -0.05   | 0.000             | 0.00    |
| 45    | 45          | 46          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03   | 0.000             | 0.00    |
| 46    | 4           | 47          | 0.85                  | 0.61    | -0.85                 | -0.61   | 0.000             | 0.00    |

| Grana |             |             | Injektiranje od čvora |         | Injektiranje do čvora |                | Gubici ( $I^2Z$ ) |             |
|-------|-------------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------|----------------|-------------------|-------------|
|       | Od<br>čvora | Do<br>čvora | P[MW]                 | Q[MVar] | P[MW]                 | Q[MVar]        | P[MW]             | Q[MVar]     |
| 47    | 47          | 48          | 0.85                  | 0.61    | -0.85                 | -0.61          | 0.001             | 0.00        |
| 48    | 48          | 49          | 0.77                  | 0.55    | -0.77                 | -0.55          | 0.002             | 0.00        |
| 49    | 49          | 50          | 0.38                  | 0.27    | -0.38                 | -0.27          | 0.000             | 0.00        |
| 50    | 8           | 51          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03          | 0.000             | 0.00        |
| 51    | 51          | 52          | 0.00                  | 0.00    | -0.00                 | -0.00          | 0.000             | 0.00        |
| 52    | 9           | 53          | 1.86                  | 1.28    | -1.85                 | -1.28          | 0.006             | 0.00        |
| 53    | 53          | 54          | 1.85                  | 1.27    | -1.84                 | -1.27          | 0.007             | 0.00        |
| 54    | 54          | 55          | 1.81                  | 1.25    | -1.80                 | -1.25          | 0.009             | 0.00        |
| 55    | 55          | 56          | 1.78                  | 1.23    | -1.77                 | -1.23          | 0.009             | 0.00        |
| 56    | 56          | 57          | 1.77                  | 1.23    | -1.72                 | -1.21          | 0.050             | 0.02        |
| 57    | 57          | 58          | 1.72                  | 1.21    | -1.70                 | -1.20          | 0.024             | 0.01        |
| 58    | 58          | 59          | 1.70                  | 1.20    | -1.69                 | -1.20          | 0.010             | 0.00        |
| 59    | 59          | 60          | 1.59                  | 1.13    | -1.58                 | -1.12          | 0.011             | 0.00        |
| 60    | 60          | 61          | 1.58                  | 1.12    | -1.56                 | -1.12          | 0.014             | 0.01        |
| 61    | 61          | 62          | 0.32                  | 0.23    | -0.32                 | -0.23          | 0.000             | 0.00        |
| 62    | 62          | 63          | 0.29                  | 0.20    | -0.29                 | -0.20          | 0.000             | 0.00        |
| 63    | 63          | 64          | 0.29                  | 0.20    | -0.29                 | -0.20          | 0.001             | 0.00        |
| 64    | 64          | 65          | 0.06                  | 0.04    | -0.06                 | -0.04          | 0.000             | 0.00        |
| 65    | 11          | 66          | 0.04                  | 0.03    | -0.04                 | -0.03          | 0.000             | 0.00        |
| 66    | 66          | 67          | 0.02                  | 0.01    | -0.02                 | -0.01          | 0.000             | 0.00        |
| 67    | 12          | 68          | 0.06                  | 0.04    | -0.06                 | -0.04          | 0.000             | 0.00        |
| 68    | 68          | 69          | 0.03                  | 0.02    | -0.03                 | -0.02          | 0.000             | 0.00        |
|       |             |             |                       |         |                       | <b>UKUPNO:</b> | <b>0.225</b>      | <b>0.10</b> |

## LITERATURA

- [1] Souifi, H., Kahouli, O., & Hadj Abdallah, H., "Multi-objective distribution network reconfiguration optimization problem", Electrical Engineering, 101, 45–55., 2019
- [2] Katanchi, B., Shojaei, A.A., & Yaghoobi, M., "Distribution Network Reconfiguration in Effective Presence of DGs, EVCSS and DRP: A Novel Multi-Objective Approach.", Electric Power Components and Systems., 2024
- [3] Azghandi, M.N., Shojaei, A.A., Toosi, S., & Lotfi, H., "Optimal reconfiguration of distribution network feeders considering electrical vehicles and distributed generators.", Evolutionary Intelligence, 16, 49–66., 2023
- [4] Danishmal, M., Rasoly, A., Zeerak, H., & Fatemi, S. A. Z. "Analyzing Power Losses in Ghazni City's Electricity Distribution Network and Strategies for Minimizing Them", International Journal of Electrical Components and Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, 2023, str. 1–8., 2023
- [5] G. Fandi, F.O. Igbinovia, J. Tlusty, R. Mahmoud, "Voltage regulation and power losses reduction in a wind farm integrated MV distribution network", J. Electr. Eng., 69 (1), 2018
- [6] M.A. Abdelkader, Z.H. Osman, M.A. Elshahed, "New analytical approach for simultaneous feeder reconfiguration and DG hosting allocation in radial distribution networks" Ain Shams Eng. J., 12 (2), 2021
- [7] A.A.A. El-Ela, R.A. El-Sehiemy, A.M. Shaheen, N.K. El-Ayaa, "Optimal allocation of DGs with network reconfiguration using improved spotted hyena algorithm", WSEAS Trans. Power Syst., 15 (2020) 60–67
- [8] A. Nuhanović, J. Hivziefendić, A. Hadžimehmedović, "Distribution network reconfiguration considering power losses and outages costs using genetic algorithm", J. Electr. Eng., 64(5), 2013
- [9] D. Šošić, P. Stefanov, "Multi-objective optimal reconfiguration of distribution network", J. Electr. Eng., 69(2), 2018
- [10] Rajwar, K., Deep, K., & Das, S. (2023). An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges. Artificial Intelligence Review, 56 (13187–13257).
- [11] Imran, A. Mohamed, and M. Kowsalya. "A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 62 (2014): 312-322.
- [12] Nguyen, Thuan Thanh, and Anh Viet Truong. "Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 68 (2015): 233-242.
- [13] Naveen, S., K. Sathish Kumar, and K. Rajalakshmi. "Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 69 (2015): 90-97.
- [14] Flaih, F. M., Xiangning, L., Dawoud, S. M., & Mohammed, M. A. (2016, October). "Distribution system reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using Modified particle swarm optimization". In Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016 IEEE PES Asia-Pacific (pp. 120-124). IEEE.
- [15] L. Luo, J. Ma, H. Wang, S. Luo, "Optimal network reconfiguration using beetle antennae search based on the prim algorithm", in: Proceedings - 2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, YAC 2020, 2020

- [16] A.M. Shaheen, E.E. Elattar, R.A. El Sehiemy, A.M. Elsayed, "An improved sunflower optimization algorithm based-Monte Carlo simulation for efficiency improvement of radial distribution systems considering wind power uncertainty", IEEE Access, 9 (2020), pp. 2332-2344
- [17] A.M. Shaheen, A.M. Elsayed, A.R. Ginidi, E.E. Elattar, R.A. El-Sehiemy, "Effective automation of distribution systems with joint integration of DGs/ SVCs considering reconfiguration capability by jellyfish search algorithm", IEEE Access, 9 (2021), pp. 92053-92069
- [18] E.E. Elattar, A.M. Shaheen, A.M. El-Sayed, R.A. El-Sehiemy, A.R. Ginidi, "Optimal operation of automated distribution networks based-MRFO algorithm", IEEE Access, 9 (2021), pp. 19586-19601
- [19] Mozafari, H. (2020). Sizing and Allocation of Distributed Energy Resources for Loss Reduction Using Heuristic Algorithms. 2020 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI).
- [20] Ferraz, R. S. F., & Rueda-Medina, A. C. (2023). Multi-objective Optimization Approach for Allocation and Sizing of Distributed Energy Resources Preserving the Protection Scheme in Distribution Networks. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 34(1080–1092)
- [21] Viral, Rajkumar, and D. K. Khatod. "An analytical approach for sizing and siting of DGs in balanced radial distribution networks for loss minimization." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 67 (2015): 191-201.
- [22] Ayodele, T. R., A. S. O. Ogunjuyigbe, and O. O. Akinola. "Optimal Location, Sizing, and Appropriate Technology Selection of Distributed Generators for Minimizing Power Loss Using Genetic Algorithm." Journal of Renewable Energy 2015 (2015).
- [23] Kefayat, M., A. Lashkar Ara, and SA Nabavi Niaki. "A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources." Energy Conversion and Management 92 (2015):149-161.
- [24] S. Sharma, S. Bhattacharjee, A. Bhattacharya, "Quasi-oppositional swine influenza model based optimization with quarantine for optimal allocation of DG in radial distribution network", Int. J. Electr. Power Energy Syst., 74 (Jan. 2016), pp. 348-373
- [25] M. Esmaeili, M. Sedighizadeh, M. Esmaili, "Multi-objective optimal reconfiguration and DG (Distributed Generation) power allocation in distribution networks using Big Bang-Big Crunch algorithm considering load uncertainty", Energy, 103 (May 2016), pp. 86-99
- [26] M.G. Hemeida, A.A. Ibrahim, A.A.A. Mohamed, S. Alkhalfaf, A.M.B. El-Dine, "Optimal allocation of distributed generators DG based Manta Ray Foraging Optimization algorithm (MRFO)", Ain Shams Eng. J., 12 (1) (Mar. 2021), pp. 609-619
- [27] A.M. Shaheen, A.M. Elsayed, R.A. El-Sehiemy, A.Y. Abdelaziz, "Equilibrium optimization algorithm for network reconfiguration and distributed generation allocation in power systems", Appl. Soft Comput., 98 (2021), p. 106867
- [28] Imran, A. Mohamed, M. Kowsalya, and D. P. Kothari. "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 63 (2014): 461-472.
- [29] Nguyen, Thuan Thanh, Anh Viet Truong, and Tuan Anh Phung. "A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 78 (2016): 801-815.

- [30] Bayat, A., A. Bagheri, and R. Noroozian. "Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 77 (2016): 360-371.
- [31] E.A. Al-Ammar, K. Farzana, A. Waqar, M. Aamir, Saifullah, A. Ul Haq, M. Zahid, M. Batool, "ABC algorithm based optimal sizing and placement of DGs in distribution networks considering multiple objectives", Ain Shams Eng. J., 12 (1) (2021), pp. 697-708
- [32] A. Uniyal, S. Sarangi, "Optimal network reconfiguration and DG allocation using adaptive modified whale optimization algorithm considering probabilistic load flow", Electr. Power Syst. Res., 192, 2021
- [33] Tanabe, R., & Fukunaga, A. (2014). Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction. 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 1658–1665.
- [34] A. Shukla, N.Kharat, R.Sakhare, "A Study on Power System: Smart Grid" International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol. 4, pp. 7732–7737, sepmbar 2015.
- [35] G. Horst, M. McGranaghan, P. Myrda, „Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid - A Preliminary Estimate of the Investment - 713 - Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid“, Electric Power Research Institute (EPRI), mart 2011.
- [36] Chu Y., Meisen P. (2011) Review and Comparison of Different Solar Energy Technologie,,s.l.: GENI (Global Energy Network Institute).
- [37] Friedrich, K., & Müller, L. (2017). “History of Wind Energy and an Outlook for the Future”. In T. S. Uyar (Ed.), Towards 100% Renewable Energy (pp. 401–418). Springer, Cham.
- [38] Orešković, S. (2017). Dinamički model stupa vjetroagregata (Završni rad). Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [39] Tehnička preporuka za priključenje distribuiranih izvora u Crnoj Gori: Studija o priključivanju i radu distribuiranih izvora energije u elektroenergetskom sistemu Crne Gore. Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana, sepmbar 2012
- [40] Čađenović, R., Jakus, D., Sarajčev, P., & Vasilj, J. (2018). Optimal Distribution Network Reconfiguration through Integration of Cycle-Break and Genetic Algorithms. Energies, 11(5), 1278.
- [41] Jakus, D., Čađenović, R., Vasilj, J., & Sarajčev, P. (2020). Optimal Reconfiguration of Distribution Networks Using Hybrid Heuristic-Genetic Algorithm. Energies, 13(7), 1544.
- [42] Santos, J. D., Marques, F., Garcés Negrete, L. P., Brigatto, G. A. A., López-Lezama, J. M., & Muñoz-Galeano, N. (2022). A Novel Solution Method for the Distribution Network Reconfiguration Problem Based on a Search Mechanism Enhancement of the Improved Harmony Search Algorithm. Energies, 15(6), 2083.
- [43] Gautam, M., Bhushal, N., Benidris, M., & Louis, S. J. (2020). A Spanning Tree-based Genetic Algorithm for Distribution Network Reconfiguration. arXiv.
- [44] Li, Y., Han, T., Zhou, H., Tang, S., & Zhao, H. (2022). A novel adaptive L-SHADE algorithm and its application in UAV swarm resource configuration problem. Information Sciences, 606, 350–367.
- [45] S. Das and P. N. Suganthan, “Differential evolution: A survey of the state-of-theart,” IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2010.
- [46] E.-N. Dragoi and V. Dafinescu, “Parameter control and hybridization techniques in differential evolution: a survey,” Artificial Intelligence Review, vol. 45, no. 4, pp. 447– 470, 2016.

- [47] R. Mallipeddi, P. N. Suganthan, Q.-K. Pan, and M. F. Tasgetiren, "Differential evolution algorithm with ensemble of parameters and mutation strategies," *Applied soft computing*, vol. 11, no. 2, pp. 1679–1696, 2011.
- [48] A. W. Mohamed and P. N. Suganthan, "Real-parameter unconstrained optimization based on enhanced fitness-adaptive differential evolution algorithm with novel mutation," *Soft Computing*, vol. 22, no. 10, pp. 3215–3235, 2018.
- [49] G. Wu, R. Mallipeddi, P. N. Suganthan, R. Wang, and H. Chen, "Differential evolution with multi-population based ensemble of mutation strategies," *Information Sciences*, vol. 329, pp. 329–345, 2016.
- [50] Tanabe, Ryoji, and Alex S. Fukunaga. "Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction." 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, 2014.
- [51] K. R. Opara and J. Arabas, "Differential evolution: A survey of theoretical analyses," *Swarm and evolutionary computation*, vol. 44, pp. 546–558, 2019.
- [52] Coello C. A. C., *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*.
- [53] Biswas, P. P., Mallipeddi, R., Suganthan, P. N., & Amaratunga, G. A. J. (2017). Optimal reconfiguration and distributed generator allocation in distribution network using an advanced adaptive differential evolution. In 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) (pp. 1–7). IEEE.

## **Prilog 2.**

### **Izjava o autorstvu**

Potpisani-a: Irena Laković

Broj indeksa/upisa: 5/22

#### **Izjavljujem**

da je master rad pod naslovom: "OPTIMALNA ALOKACIJA DISTRIBUIRANIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE I REKONFIGURACIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE PRIMJENOM L-SHADE ALGORITMA"

---

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cijelini ni u djelovima nije bio predložen za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio/la autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

Potpis magistranda

U Podgorici, 09.05.2025.

---

### **Prilog 3.**

#### **Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada**

Ime i prezime autora: Irena Laković

Broj indeksa/upisa: 5/22

Studijski program: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: Optimalna alokacija distribuiranih izvora električne energije i  
rekonfiguracija distributivne mreže primjenom L-shade algoritma

Mentor: prof. dr Martin Čalasan

Potpisani/a

Izjavljujem da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva master nauka, odnosno zvanja master umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

Potpis magistranda

U Podgorici, 09.05.2025.

## Prilog 4.

### IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

Optimalna alokacija distribuiranih izvora električne energije i rekonfiguracija distributivne mreže primjenom L-shade algoritma

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim prilozima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

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

*(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).*

Potpis magistranda

U Podgorici, 09.05.2025.

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 korišćenja 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 i prerade.
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.

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