



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Lidija Ćorić

**OPTIMALNA ALOKACIJA I DIMENZIONISANJE ŠANT
REAKTORA U PRENOSNOJ MREŽI PRIMJENOM
VIŠEKRITERIJUMSKE OPTIMIZACIJE**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Lidija Ćorić

**OPTIMALNA ALOKACIJA I DIMENZIONISANJE ŠANT
REAKTORA U PRENOSNOJ MREŽI PRIMJENOM
VIŠEKRITERIJUMSKE OPTIMIZACIJE**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Lidija Ćorić

Datum i mjesto rođenja: 10.02.2000. godine, Nikšić, 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 i dimenzionisanje šant reaktora u prenosnoj mreži primjenom višekriterijumske optimizacije

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

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave master rada: 16. 06. 2025. god.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 03. 07. 2025.god.

Komisija za ocjenu / odbranu rada:

1. Prof. dr Vladan Radulović, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, predsjednik
2. Prof. dr Vladan Radulović, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, mentor
3. Doc. dr Vladan Durković, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, član

Datum odbrane: 24.12.2025.god.

Datum promocije:

Izjava o autorstvu

Potpisana: Lidija Ćorić
Broj indeksa/upisa: 16/22

Izjavljujem

da je master rad pod nazivom

"Optimalna alokacija i dimenzionisanje šant reaktora u prenosnoj mreži primjenom višekriterijumske optimizacije"

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cjelini 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.

U Podgorici, 04.11.2025.god.

Potpis studenta

Lidija Ćorić

Predgovor

Kao posljedica modernizacije elektroenergetskih sistema i sve veće integracije obnovljivih izvora energije, prenosni sistemi širom svijeta suočavaju se sa različitim izazovima povezanim sa regulacijom napona i reaktivnih snaga. Pored toga, iznenadni kvarovi i promjene pogonskih stanja, značajno mogu narušiti stabilnost elektroprenosne mreže i dovesti do pojave neželjenih radnih režima. Naime, u savremenim prenosnim mrežama, usljed izraženih kapacitivnih efekata kablovskih vodova i viška reaktivne snage, danas često dolazi do povišenih naponskih vrijednosti u čvorovima sistema. Jedan od potencijalnih načina da se prevaziđu takva pogonska stanja i nepovoljni radni režimi je upravo integracija šant reaktora. Kao induktivni element koji apsorbuje višak reaktivne snage iz sistema, šant reaktor je pokazao značajne efekte u normalizaciji naponskog profila i poboljšanju stabilnosti mreže.

Shodno tome, ovaj master rad predstavlja metodologiju koja omogućava određivanje optimalne lokacije i snage šant reaktora, koja pored tehničkih aspekata uključuje i ekonomske kriterijume optimizacije. Ovakav pristup optimizacije doprinosi racionalnom korišćenju kompenzacionih uređaja i povećanoj efikasnosti i stabilnosti prenosnih sistema.

„ Sreća prati one, koji vjeruju u ljepotu svojih snova“

Eleanor Roosevelt

Prije svega, veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, Prof. dr Vladanu Raduloviću na stručnoj pomoći i neizmjerne podršci tokom procesa izrade mog master rada.

Posebno se zahvaljujem dr Lazaru Šćekiću, čije znanje, strpljenje, korisni savjeti i posvećenost su bili od presudnog značaja za kvalitet i uspješan završetak ovog istraživanja.

Ovaj rad posvećujem svojoj porodici i prijateljima, koji su svojim razumijevanjem, ljubavlju i vjerom učinili da istrajem i onda kad je bilo najteže. Svaki moj uspjeh odraz je njihove topline, žrtve i nesebične podrške.

Sažetak

U savremenim elektroprenosnim sistemima upravljanje naponskim profilom i reaktivnim snagama predstavlja jedan od najznačajnijih aspekata sigurnog i pouzdanog rada mreže. Česta pojava povišenih naponskih vrijednosti, uzrokovana kapacitivnim efektom dugih, nadzemnih vodova i sve veća integracija obnovljivih izvora energije uslovlila je potrebu za uvođenjem naponsko reaktivnih regulacionih resursa. Pored toga, specifična pogonska stanja koja obuhvataju iznenadne pojave kvarova, ispade grana ili generatora, kao i neočekivane promjene u opterećenju, često mogu dovesti do pojave visokih vrijednosti napona u pojedinim potrošačkim čvorovima sistema. Kao efikasno sredstvo za apsorpciju viškova reaktivnih snaga i normalizaciju naponskog profila, šant reaktori danas sve više nalaze primjenu u savremenim elektroprenosnim sistemima. Efikasnost pomenutog uređaja posebno dolazi do izražaja u slučaju kada je isti optimalno dimenzionisan i pravilno pozicioniran.

U ovom radu problem određivanja lokacije i dimenzije šant reaktora definisan je kao višekriterijumski optimizacioni problem, koji pored tehničkih ciljeva, orjentisanih ka minimizaciji naponskih odstupanja, teži i ostvarenju ekonomskih kriterijuma čija je primarna funkcija minimizacija investicionih ulaganja. Shodno tome, kao adekvatan višekriterijumski optimizacioni algoritam, za rješavanje ovako definisanog problema, korišćen je algoritam zasnovan na principu nedominacije (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*, NSGA II). Pored generisanja Pareto fronta i očuvanja najboljih rješenja kroz elitizam, predloženi algoritam se odlikuje i niskom računarskom složenosti što dodatno doprinosi njegovoj širokoj i sve intezivnijom primjenom. Dodatno, u radu je predstavljena i *Kalai – Smorodinsky* metod kojim se, na osnovu formiranog Pareto fronta određuje kompromisno rješenje koje obezbeđuje proporcionalan napredak u oba cilja.

Primjena predložene metodologije sprovedena je na testnim IEEE – 14 čvornim, IEEE – 30 čvornim i IEEE - 118 čvornim sistemima, gdje je izvršeno optimalno lociranje i dimenzionisanje jednog, dva i tri šant reaktora, respektivno. Uzimajući u obzir skup karakterističnih operativnih scenarija, koji na efikasan način prikazuju moguća pogonska stanja realnih prenosnih sistema tokom ispada ili kvarova, algoritam je pokazao zadovoljavajuće performanse u pogledu određivanja optimalnih lokacija i veličina regulacionih uređaja.

Integracijom tako definisanih šant reaktora, sistem je uspio da očuva globalnu naponsku stabilnost i smanji ukupne aktivne gubitke, što uspješno potvrđuje njegovu efikasnost u planiranju i upravljanu reaktivnom kompenzacijom.

Ključne riječi : šant reaktor, prenosna mreža, višekriterijumska optimizacija, NSGA – II algoritam

Abstract

In modern power transmission systems, voltage profile and reactive power management is one of the most important aspects of safe and reliable network operation. The frequent occurrence of overvoltage conditions, caused by capacitive effects of long, overhead lines, and the increasing integration of renewable energy sources have necessitated the introduction of voltage-reactive regulation resources. In addition, specific operating conditions that include sudden failures, branch or generator outages, and unexpected changes in load can often lead to the appearance of high voltages in individual consumer nodes of the system. As an effective means of absorbing excess reactive power and normalizing the voltage profile, shunt reactors are increasingly being used in modern power transmission systems. The efficiency of the aforementioned device is especially evident when it is optimally dimensioned and correctly positioned in the system.

In this paper, the problem of determining the location and dimensions of reactors is defined as a multi-criteria optimization problem, which, in addition to technical goals, oriented towards minimizing voltage deviations, also strives to achieve economic criteria whose primary function is to minimize investment investments. Consequently, as an adequate multi-criteria optimization algorithm, for solving the problem defined in this way, an algorithm based on the principle of non-domination (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA II) was used. In addition to generating the Pareto front and preserving the best solutions through elitism, the proposed algorithm is also characterized by low computational complexity, which further contributes to its wide and increasingly intensive use. Additionally, the paper presents the *Kalai-Smorodinski* method, which, based on the Pareto front, determines a compromise solution that provides proportional progress in both objectives.

The application of the proposed methodology was carried out on test IEEE-14 bus, IEEE-30 bus and IEEE-118 bus systems, where the optimal location and dimensioning of one, two and three shunt reactors was performed, respectively. Taking into account a set of characteristic operational scenarios, which effectively depict possible operating states of real transmission systems during outages or faults, the algorithm showed satisfactory performance in terms of determining the optimal locations and sizes of control devices.

By integrating the shunt reactors defined in this way, the system managed to preserve global voltage stability and reduce total active losses, which successfully confirms the efficiency in planning and managing reactive compensation.

Keywords: shunt reactor, transmission network, multi-criteria optimization, NSGA – II algorithm

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| UVOD | 1 |
| 2. PREGLED LITERATURE | 4 |
| 2.1 Analitičke metode | 4 |
| 2.1.1 Indeksi osjetljivosti gubitaka aktivne snage..... | 4 |
| 2.1.2 Indeksi kvaliteta naponskog profila | 5 |
| 2.1.3 Indeksi opterećenosti mrežnih elemenata..... | 5 |
| 2.2 Optimizacione metode | 6 |
| 2.2.1 Klasične metode optimizacije | 6 |
| 2.2.2 Metaheurističke metode optimizacije..... | 7 |
| 2.3 Hibridne metode | 13 |
| 2.3.1 Analitičko-metaheuristički pristupi..... | 13 |
| 2.3.2 Metaheurističko-metaheuristički pristupi..... | 15 |
| 2.4 Praznine u literature | 15 |
| 3. PREDLOŽENI METOD ZA OPTIMALNU ALOKACIJU I DIMENZIONISANJE ŠANT REAKTORA | 17 |
| 3.1 Formulacija problema | 17 |
| 3.1.1 Kriterijumske funkcije..... | 17 |
| 3.1.2 Ograničenja | 20 |
| 3.1.2.1 Termička ograničenja mrežnih elemenata | 20 |
| 3.1.2.2 Naponska ograničenja..... | 20 |
| 3.1.2.3 Ograničenja instalisane snage šant reaktora..... | 21 |
| 3.2 Primijenjeni metod višekriterijumske optimizacije | 21 |
| 3.2.1 NSGA-II algoritam..... | 22 |
| 3.2.2 Kalai-Smorodinsky metod odlučivanja | 27 |
| 4. NUMERIČKI REZULTATI | 30 |
| 4.1 Testne prenosne IEEE mreže | 30 |
| 4.2. Selekcija operativnih scenarija | 33 |
| 4.3. Optimizacija parametara NSGA-II algoritma | 34 |
| 4.4 Analiza priključenja šant reaktora | 35 |
| 4.4.1 Analiza priključenja jednog šant reaktora na testnom IEEE - 14 čvornom sistemu ... | 35 |
| 4.4.2 Analiza priključenja dva šant reaktora na testnom IEEE 30 bus sistemu | 45 |
| 4.4.3 Analiza priključenja tri šant reaktora na testnom IEEE - 118 bus sistemu | 54 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| 5. ZAKLJUČAK..... | 65 |
| LITERATURA | 67 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2. Podjela metaheurističkih algoritama po inspiraciji | 8 |
| Slika 3. Pregled biološki inspirisanih algoritama..... | 9 |
| Slika 4. Pregled fizički inspirisanih algoritama..... | 11 |
| Slika 5. Pregled hemijski inspirisanih algoritama | 12 |
| Slika 6. Zavisnost troškova proširenja trafostanice od naponskog nivoa | 19 |
| Slika 7. Zavisnost specifičnih troškova reaktora od naponskog nivoa | 19 |
| Slika 8. Geometrijska interpretacija Kalai-Smorodinsky metoda odlučivanja | 29 |
| Slika 9. Standardna prenosna IEEE mreža sa 14 čvorova..... | 30 |
| Slika 10. Standardna prenosna IEEE mreža sa 30 čvorova..... | 31 |
| Slika 11. Standardna prenosna IEEE mreža sa 118 čvorova..... | 32 |
| Slika 12. Prikaz Pareto fronta i Kalai – Smorodinsky rješenja za slučaj priključenja jednog šant na testnom IEEE - 14 čvornom sistemu | 38 |
| Slika 13. Naponski profil testnog IEEE -14 čvornog sistema kod scenarija broj 1 | 39 |
| Slika 14. Naponski profil testnog IEEE -14 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora u čvoru 8 | 40 |
| Slika 15. Ukupni aktivni gubici testnog IEEE -14 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora..... | 41 |
| Slika 16. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -14 čvornom sistemu bez šant reaktora..... | 42 |
| Slika 17. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -14 čvornom sistemu sa šant reaktorom | 43 |
| Slika 18. Promjena medijane napona po čvorovima u IEEE -14 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora | 44 |
| Slika 19. Statistička raspodjela ukupnih aktivnih gubitaka u IEEE – 14 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora u čvoru 8 | 45 |
| Slika 20. Prikaz Pareto fronta i Kalai – Smorodinsky rješenja za slučaj priključenja dva šant reaktora na testnom IEEE - 30 čvornom sistemu..... | 47 |
| Slika 21. Naponski profil testnog IEEE -30 čvornog sistema kod scenarija broj 1 | 48 |
| Slika 22. Naponski profil testnog IEEE -30 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora u čvorovima 29 i 30..... | 49 |
| Slika 23. Ukupni aktivni gubici testnog IEEE - 30 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora..... | 50 |
| Slika 24. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -30 čvornom sistemu bez šant reaktora..... | 51 |
| Slika 25. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -30 čvornom sistemu sa šant reaktorom | 51 |
| Slika 26. Promjena medijane napona po čvorovima u IEEE -30 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora | 52 |
| Slika 27. Statistička raspodjela ukupnih aktivnih gubitaka u IEEE – 30 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora | 54 |
| Slika 28. Prikaz Pareto fronta i Kalai – Smorodinsky rješenja za slučaj priključenja jednog šant reaktora na testnom IEEE 118 čvornom sistemu | 56 |
| Slika 29. Naponski profil testnog IEEE -118 čvornog sistema kod scenarija broj 1 | 57 |

| | |
|--|----|
| Slika 30. Naponski profil testnog IEEE -118 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora | 58 |
| Slika 31. Ukupni aktivni gubici testnog IEEE -118 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora | 59 |
| Slika 32. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -118 čvornom sistemu bez šant reaktora..... | 59 |
| Slika 33. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -118 čvornom sistemu sa šant reaktorima..... | 60 |
| Slika 34. Promjena medijane napona po čvorovima u IEEE -118 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora | 64 |
| Slika 35. Statistička raspodjela ukupnih aktivnih gubitaka u IEEE – 30 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora | 64 |

POPIS TABELA

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Opšte informacije o IEEE sistemu sa 14 čvorova | 31 |
| Tabela 2. Opšte informacije o IEEE sistemu sa 30 čvorova | 32 |
| Tabela 3. Opšte informacije o IEEE sistemu sa 118 čvorova | 33 |
| Tabela 4. Parametri NSGA- II algoritma | 35 |
| Tabela 5. Prikaz karakterističnih 50 scenarija za IEEE -14 čvorni sistem..... | 36 |
| Tabela 6. Vrijednosti medijana napona testnog IEEE – 14 čvornog sistema po čvorovima prije i nakon ugradnje šant reaktora..... | 44 |
| Tabela 7. Prikaz karakterističnih 50 scenarija za IEEE - 30 čvorni sistem..... | 46 |
| Tabela 8. Vrijednosti medijana napona testnog IEEE – 30 čvornog sistema po čvorovima prije i nakon ugradnje šant reaktora..... | 53 |
| Tabela 9. Prikaz karakterističnih 50 scenarija za IEEE -118 čvorni sistem..... | 54 |
| Tabela 10. Vrijednosti medijana napona testnog IEEE – 118 čvornog sistema po čvorovima prije i nakon ugradnje šant reaktora | 61 |

UVOD

Savremeni elektroenergetski sistemi prolaze kroz značajne promjene koje su, pored ostalih, uslovljene i globalnim težnjama za očuvanjem životne sredine. S tim u vezi, proizvodni kapaciteti na fosilna goriva postepeno izlaze iz pogona, dok se na mrežu priključuje sve više obnovljivih izvora energije, poput solarnih fotonaponskih postrojenja i vjetroelektrana. Uvođenje obnovljivih izvora energije, donijelo je značajne promjene u strukturi i tehnologiji elektroenergetskih sistema. Za razliku od sinhronih generatora, koji trenutno predstavljaju glavni izvor reaktivne snage, obnovljivi izvori energije imaju značajno manje mogućnosti u pogledu regulacije iste, što dovodi do smanjenja sposobnosti elektroenergetskog sistema za efikasnim upravljanjem naponskim prilikama. Istovremeno, zbog prostornih i ekoloških ograničenja vezanih za izgradnju visokonaponskih nadzemnih vodova, prenosne mreže su sve više orijentisane ka izgradnji kablovskih vodova, koji zbog svoje visoke kapacitivnosti mogu rezultirati neželjenim porastom napona. Ovaj fenomen poznat je kao Ferrantijev efekat, a posebno dolazi do izražaja u slučaju niskog opterećenja. Zbog svega navedenog, u elektroenergetskim sistemima postoji sve veća potreba za integracijom različitih naponsko-reaktivnih regulacionih resursa.

Regulacija napona i reaktivnih snaga predstavlja jedan od ključnih aspekata normalnog funkcionisanja elektroenergetskog sistema. Za razliku od distributivnih mreža, gdje je regulacija napona orijentisana ka zahtjevima potrošača, osnovni cilj regulacije napona u prenosnim mrežama predstavlja očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sistema. To znači da je primarni cilj regulacije održati ravnotežu između proizvodnje i potrošnje reaktivne snage, spriječiti nagle promjene napona i reagovati na poremećaje koji mogu ugroziti mrežu. Kako je odnos ekvivalentne otpornosti i reaktanse u prenosnim mrežama značajno manji u odnosu na distributivne, to konkretno znači da su odstupanja napona više izražena na većem naponskom nivou. Dopusćeni opseg tolerancije napona u prenosnim mrežama je 10 %, dok je u distributivnim 5 %.

Za regulaciju napona i reaktivnih snaga koriste se različiti regulacioni resursi kao što su regulacioni transformatori, sinhroni generatori i kompenzatori, baterije kondenzatora, šant reaktori i FACTS uređaji. U kontekstu prenosa električne energije, pogotovo u mrežama sa velikim brojem kablovskih vodova i izraženom kapacitivnošću, šant reaktori čine jedno od najefikasnijih i najčešće korišćenih rješenja. Ovi uređaji predstavljaju pasivne, kompenzacione uređaje koji se primjenjuju u svrhu apsorpcije viškova reaktivne snage iz mreže. Shodno tome, šant reaktori su ključni faktor za održavanje napona unutar dozvoljenih granica, posebno u periodu niskog opterećenja.

Prve primjene šant reaktora datiraju još od početka dvadesetog vijeka. Njihova široka primjena potvrđuje tehnološku zrelost i efikasnost ovog rješenja u regulaciji naponskih prilika u prenosnim mrežama. Međutim, prednosti i pozitivna dejstva šant reaktora, biće izražene jedino u slučaju ako je regulacioni uređaj pravilno dimenzionisan i optimalno lociran u mreži. U suprotnom može doći do neefikasnog iskorišćenja, pa čak i pogoršanja naponskih prilika. Naime, prevelika snaga šant reaktora, potencijalno može dovesti do sniženja napona u pojedinim čvorovima ispod dozvoljenih granica, što negativno može uticati na stabilnost sistema. Suprotno, reaktori nedovoljne snage apsorpcije često nijesu adekvatni da pomognu sistemu da se izbori sa povišenim naponskim vrijednostima, što direktno utiče na smanjenu pouzdanost mreže. Osim toga, pravilno locirani šant reaktori značajno smanjuju mogućnost pojave visokih napona u čvorovima pri

promjenama različitih radnih režima, koji uključuju iznenadne promjene u opterećenju, kvarove i ispade generatora, transformatora i vodova.

Dakle, u periodu planiranja razvoja, operatori prenosnog sistema moraju dati odgovor na pitanje optimalne konfiguracije šant reaktora u mreži koja rezultira zadovoljavanjem kriterijuma sigurnog i ekonomičnog pogona elektroenergetskog sistema, sa parametrima kvaliteta električne energije unutar granica propisanih međunarodnim standardima. Pri tome, optimalna konfiguracija šant reaktora se teži postići uz minimalna investiciona ulaganja koja su najčešće podložna budžetskim ograničenjima. U tom kontekstu, problem optimalne alokacije i dimenzionisanja šant reaktora je formulisan kao višekriterijumski optimizacioni problem, čijim se rješavanjem postiže kompromis između tehničkih performansi elektroenergetskog sistema i investicionih troškova.

U ovom master radu, predloženi metod je primijenjen za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje ne samo jednog, već više šant reaktora na različitim IEEE čvornim testnim, prenosnim sistemima. Analiziran je uticaj integracije šant reaktora na naponske prilike i gubitke aktivne snage i energije. Na ovaj način, ovo istraživanje ima i konkretan praktični značaj, budući da rezultati istraživanja mogu doprinijeti razumijevanju kompleksnih aspekata integracije šant reaktora u elektroprenosnoj mreži.

Obzirom na aktuelnost i složenost problema kontrole reaktivne snage i pojave prenaponskih stanja u savremenim prenosnim mrežama, cilj ovog master rada je definisanje nove metodologije koja na efikasan i pouzdan način teži obezbijediti optimalnu lokaciju i veličinu šant reaktora, uzimajući u obzir tehničke zahtjeve orjentisane ka minimizaciji naponskih odstupanja u čvorovima i ekonomske aspekte čiji fokus je stavljen na minimizaciji investicionih ulaganja.

Ovaj master rad se sastoji iz pet poglavlja i liste referenci, a organizovan je na sljedeći način :

- U **drugom poglavlju** predstavljen je pregled postojećih metoda za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje naponsko-reaktivnih regulacionih resursa u elektroenergetskim sistemima. Posebna pažnja usmjerena je na izbor kriterijumskih funkcija, ograničenja, kao i korišćene metode optimizacije.
- U **trećem poglavlju** je predložen novi metod za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje šant reaktora na bazi savremenih optimizacionih metoda. Data je matematička formulacija samog višekriterijumskog problema optimizacije, definisani su tehnički i ekonomski kriterijumi, kao i ograničenja . Takođe, ovo poglavlje daje detaljan opis NSGA II (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) algoritma, njegovih karakteristika, kao i način primjene u rješavanju optimizacionih problema. Osim NSGA II algoritma, u radu je opisan i Kalai-Smorodinsky metod kako bi se iz više kompromisnih rješenja (Pareto front) odabralo ono koje najbolje doprinosi jednakoj koristi između suprotstavljenih ciljeva optimizacije.
- U **četvrtom poglavlju** su predstavljeni numerički rezultati proračuna, zasnovanog na pronalasku optimalne lokacije i veličine jednog, dva i tri šant reaktora primjenom predloženog NSGA II metoda na primjeru testnih IEEE-14 čvornih, IEEE – 30 čvornih i IEEE – 118 čvornih prenosnih mreža. Ovo poglavlje daje detaljan opis korišćenih testnih sistema i definiše različite radne režime istih, koji mogu nastati usljed kvarova, ispada elemenata i

promjena opterećenja, a koji kao za posljedicu imaju povećane naponske vrijednosti u pojedinim potrošačkim čvorovima. Shodno tome, radi jasnijih analiza za svaki od predložena tri sistema analiziran je slučaj priključenja šant reaktora, prvo za najkritičniji scenario po pitanju povećanih naponskih vrijednosti, a potom je izvršena statistička analiza napona i gubitaka aktivnih snaga kroz skup od 50 odabranih slučajeva.

- Na samom kraju, u **petom poglavlju** su predstavljeni glavni zaključci istraživanja, fokusirajući se na rezultate proračuna, kao i preporuke za buduća istraživanja.

2. PREGLED LITERATURE

Optimalna alokacija i dimenzionisanje naponsko-reaktivnih regulacionih resursa predstavlja složen problem koji zahtijeva balansiranje tehničkih, ekonomskih i eksploatacionih kriterijuma. U cilju rješavanja ovog problema, u literaturi je razvijen veliki broj različitih pristupa koji se primjenjuju kako u prenosnim, tako i u distributivnim mrežama. Ključna karakteristika ovih metoda jeste njihova univerzalnost. Pristupi razvijeni za jednu klasu kompenzacionih uređaja mogu se, uz minimalne modifikacije, primijeniti i na druge naponsko-reaktivne regulacione resurse. Iz tog razloga, pregled literature predstavljen u ovom radu pored šant reaktora uključuje i ostale naponsko-reaktivne regulacione resurse.

Postojeći pristupi za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje naponsko-reaktivnih regulacionih resursa mogu se svrstati u tri osnovne kategorije, uključujući analitičke, optimizacione i hibridne metode [1]. U nastavku poglavlja dat je detaljan pregled metoda iz navedenih kategorija, sa osvrtom na njihove karakteristike, prednosti, nedostatke i primjenu kod različitih tipova kompenzacionih uređaja. Posebna pažnja posvećena je identifikaciji pristupa za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje šant reaktora.

2.1 Analitičke metode

Analitičke metode zasnovane su na primjeni različitih indeksa osjetljivosti koji omogućavaju brzu i efikasnu identifikaciju optimalnih lokacija za priključenje naponsko-reaktivnih regulacionih resursa. Ove metode odlikuje jednostavnost implementacije, računarska efikasnost i pouzdanost, što ih čini pogodnim za preselekciju kandidatskih lokacija. Iako ograničene tačnosti zbog korišćenja brojnih aproksimacija, analitičke metode i danas nalaze široku primjenu, posebno kao sastavni dio hibridnih pristupa.

Prema prirodi problema koji rješavaju, razlikuju se tri najčešće korišćene vrste indeksa, uključujući indekse zasnovane na gubicima aktivne snage, naponskom profilu i opterećenosti mrežnih elemenata.

2.1.1 Indeksi osjetljivosti gubitaka aktivne snage

Smanjenje gubitaka aktivne snage predstavlja jedan od primarnih ciljeva kod ugradnje kompenzacionih uređaja, posebno u distributivnim mrežama. Indeksi osjetljivosti gubitaka koriste se za identifikaciju lokacija za priključenje kompenzacionih uređaja koje rezultiraju najvećim smanjenjem ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži.

Jedan od najčešće korišćenih indeksa iz ove kategorije je faktor osjetljivosti gubitaka (eng. *Loss Sensitivity Factor*, LSF). LSF predstavlja vrijednost parcijalnog izvoda ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži po injektiranju aktivne ili reaktivne snage u nekom čvoru. Čvor koji karakteriše najniža negativna vrijednost LSF indeksa predstavlja optimalnu lokaciju za priključenje kompenzacionog uređaja. Osim za optimalnu alokaciju baterija kondenzatora [2], LSF je našao veliku primjenu za potrebe optimalne alokacije distribuiranih generatora [3, 4].

Pored LSF indeksa, veliku primjenu u alokaciji kompenzacionih uređaja našao je indeks osjetljivosti gubitaka aktivne snage vodova (eng. *Power Loss Sensitivity*, PLS). PLS indeks predstavlja vrijednost parcijalnog izvoda gubitaka aktivne snage na vodu po aktivnoj ili reaktivnoj snazi voda. Vodovi sa visokom vrijednošću PLS indeksa predstavljaju kandidatske lokacije za priključenje kompenzacionih uređaja [5, 6].

Kao proširenje PLS indeksa, u [7] je predložen kombinovani indeks osjetljivosti gubitaka (eng. *Combined Power Loss Sensitivity*, CPLS), koji pored osjetljivosti gubitaka aktivne snage, uključuje i osjetljivost gubitaka reaktivne snage na promjenu injektiranja reaktivne snage. Ovaj pristup pruža sveobuhvatniju analizu, jer uzima u obzir činjenicu da ugradnja reaktivnog kompenzatora ne utiče samo na gubitke aktivne, već i na gubitke reaktivne snage u mreži.

2.1.2 Indeksi kvaliteta naponskog profila

Očuvanje napona u svim čvorovima unutar dozvoljenih granica od kritičnog je značaja za kvalitet napajanja i stabilnost sistema. Iz tog razloga, indeksi kvaliteta naponskog profila koriste se kao kriterijum za određivanje optimalne lokacije za priključenje kompenzacionih resursa u velikom broju istraživanja. Bez obzira na formulaciju indeksa, lokacija koja rezultira najvećim poboljšanjem indeksa kvaliteta naponskog profila predstavlja optimalnu lokaciju za priključenje kompenzacionog uređaja.

Najčešće korišćen pokazatelj kvaliteta naponskog profila je indeks odstupanja napona (eng. *Voltage Deviation Index*, VDI). Iako su u literaturi dostupne različite formulacije ovog indeksa, u suštini isti predstavlja sumu razlika nominalne i stvarne vrijednosti napona u svim čvorovima mreže [8]. U [9] i [10] se umjesto odstupanja napona u svim čvorovima koristi varijanta VDI koja u obzir uzima samo čvorove čiji se naponi nalaze izvan dozvoljenih granica.

Uz VDI, jedan od najčešće korišćenih kriterijuma za alokaciju kompenzacionih resursa je indeks poboljšanja naponskog profila (eng. *Voltage Profile Enhancement Index*, VPEI) predložen u [11]. VPEI u suštini kvantifikuje srednju udaljenost napona u svim čvorovima od donje i gornje granične vrijednosti. U [12] i [13] je VPEI primijenjen za optimalno alociranje distribuiranih generatora i statičkih kompenzacionih sistema.

2.1.3 Indeksi opterećenosti mrežnih elemenata

Sigurnost elektroenergetskog sistema, definisana kao sposobnost sistema da izdrži ispade iz pogona pojedinačnih generatora ili mrežnih elemenata, predstavlja važan aspekt alokacije kompenzacionih resursa. Indeksi opterećenosti mrežnih elemenata koriste se za identifikaciju kritičnih vodova i transformatora čija bi isključenja mogla dovesti do kaskadnih ispada.

Jedan od najčešće korišćenih indeksa je indeks performansi aktivne snage (eng. *Real Power Performance Index*, RPPI) predložen u [14]. RPPI kvantifikuje udaljenost stvarnog opterećenja od termičkih granica svih vodova u mreži. Indeks je formulisan koristeći eksponencijalnu funkciju kojom se povećava doprinos relativno visoko opterećenih vodova ukupnoj vrijednosti indeksa. Na bazi RPPI indeksa su u [15] i [16] predložene nove metodologije za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje različitih tipova FACTS uređaja.

Za potrebe identifikacije lokacija za priključenje FACTS uređaja, u [17-19] je korišćen faktor iskorišćenja vodova (eng. *Line Utilization Factor*, LUF). LUF se jednostavno definiše kao odnos opterećenja voda i njegovog maksimalnog kapaciteta. Vodovi sa visokom vrijednošću faktora iskorišćenja predstavljaju kandidatske lokacije za ugradnju kompenzacionih uređaja.

Za razliku od LUF indeksa koji razmatra samo jedan operativni scenario, u [20] je za optimalnu alokaciju TCSC uređaja predložen indeks osjetljivosti preopterećenja voda (eng. *Line Overload Sensitivity Index*, LOSI), koji razmatra različite N-1 scenarije. U suštini, LOSI omogućava određivanje vodova koji su najčešće preopterećeni u slučaju neočekivanih ispada u mreži. LOSI je u [21] korišćen za optimalnu alokaciju UPFC uređaja.

2.2 Optimizacione metode

Sa povećanjem složenosti elektroenergetskih sistema, primjena analitičkih metoda postala je gotovo nemoguća. Sa druge strane, razvoj računarske tehnologije omogućio je primjenu naprednih metoda optimizacije za rješavanje problema optimalne alokacije i dimenzionisanja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa. Za razliku od analitičkih pristupa, optimizacione metode omogućavaju tretiranje svih nelinearnosti problema bez potrebe za uvođenjem aproksimacija, što rezultira značajno preciznijim rješenjima.

Metode optimizacije se mogu podijeliti na klasične i metaheurističke. U nastavku poglavlja predstavljen je pregled primjena metoda iz obje kategorije za rješavanje problema optimalne alokacije i dimenzionisanja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa.

2.2.1 Klasične metode optimizacije

Klasične metode optimizacije predstavljaju deterministički pristup zasnovan na matematičkoj analizi i gradijentnim tehnikama. Ove metode koriste informacije o izvodima funkcije cilja kako bi sistematski usmjeravale pretraživanje ka optimalnom rješenju. Glavna prednost klasičnih metoda je njihova sposobnost da garantuju optimalno rješenje ukoliko je problem konveksan i ukoliko algoritam konvergira. Međutim, ove metode karakteriše nekoliko značajnih nedostataka. Proizvoljno odabrana početna rješenja mogu dovesti do zaglavljivanja u lokalnom minimumu, što znači da ne postoji garancija pronalaženja globalnog optimuma. Dodatno, ove metode imaju veoma složenu strukturu koja komplikuje programsku implementaciju i nepogodne su za rješavanje problema sa velikim brojem različitih ograničenja.

U kontekstu optimalne alokacije i dimenzionisanja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa, klasične metode nijesu našle široku primjenu. Glavni razlozi za ovo su složenost problema, visoka dimenzionalnost prostora rješenja, prisustvo diskretnih promjenljivih i nekonveksna priroda funkcije cilja. Najveću primjenu među klasičnim metodama našlo je **mješovito cjelobrojno programiranje** (eng. *Mixed Integer Programming*, MIP), čije varijante uključuju mješovito cjelobrojno linearno programiranje (eng. *Mixed Integer Linear Programming*, MILP) i mješovito cjelobrojno nelinearno programiranje (eng. *Mixed Integer Nonlinear Programming*, MINLP).

MILP i MINLP predstavljaju metode optimizacije u kojima dio promjenljivih poprima samo cjelobrojne vrijednosti, dok su preostale promjenljive realni brojevi. Ovaj pristup omogućava

modelovanje složenih problema u elektroenergetskim sistemima, kombinujući kontinuirane promjenljive kao što je snaga kompenzacionih uređaja sa diskretnim promjenljivim poput broja kompenzacionih uređaja ili lokacija za njihovu ugradnju.

U [22] je problem optimalne alokacije transformatora pomjerača faze u prenosnoj mreži riješen primjenom MILP. Optimizacioni problem je formulisan kao problem minimizacije ukupnih investicionih troškova uz zadovoljavanje naponskih ograničenja u svim čvorovima mreže. Sličan pristup je u [23] iskorišćen za optimalnu alokaciju SVC uređaja s ciljem unaprijeđenja sigurnosti elektroenergetskog sistema.

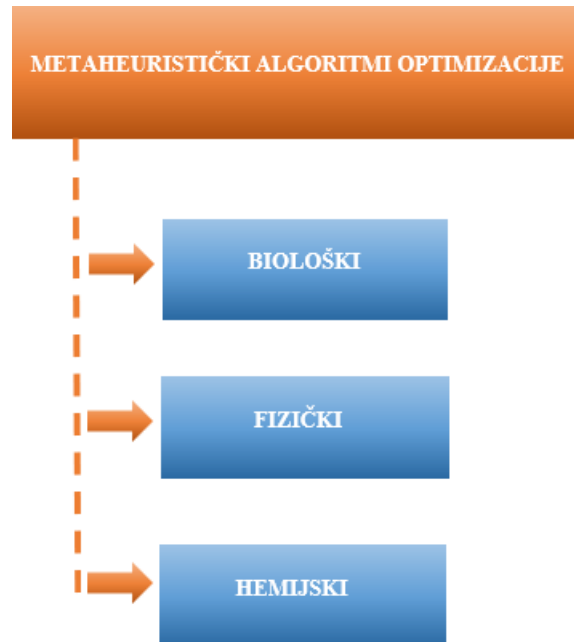
U [24] je primijenjeno MINLP za određivanje optimalnog broja i lokacije TCSC uređaja u deregulisanim tržištima električne energije s ciljem povećanja dostupnog prenosnog kapaciteta. U [25] je ovaj pristup proširen za simultanu alokaciju različitih tipova FACTS uređaja. U [26] je razvijena MINLP formulacija za optimalnu alokaciju TCSC uređaja s ciljem očuvanja sigurnosti sistema u slučaju ispada jednog mrežnog elementa.

Glavna prednost MILP pristupa je rigorozna matematička osnova koja, pod određenim uslovima, garantuje pronalaženje globalnog optimuma. Međutim, značajan nedostatak je izrazita računarska složenost koja eksponencijalno raste sa povećanjem broja cjelobrojnih promjenljivih. Za velike elektroenergetske sisteme, vrijeme potrebno za pronalaženje optimalnog rješenja može biti neprihvatljivo dugo, što ograničava mogućnost praktične primjene ovih metoda. Ova ograničenja dovela su do toga da su klasične metode postepeno zamijenjene metaheurističkim pristupima koji, iako ne garantuju matematičku optimalnost, nude daleko bolju skalabilnost i fleksibilnost za probleme optimalne alokacije kompenzacionih resursa.

2.2.2 Metaheurističke metode optimizacije

Metaheurističke metode optimizacije, poznate i kao moderne metode optimizacije, u praksi sve više nalaze primjenu kod složenih i kompleksnih problema u elektroenergetskim sistemima. Priroda metaheurističkih pristupa omogućava njihovu primjenu kod velikog broja različitih problema bez obzira na formulaciju. Sposobnost pronalaženja globalnog optimuma, nezavisnost od početnih uslova i mogućnost rada sa diskontinuiranim funkcijama predstavljaju glavne prednosti ovih metoda.

Metaheurističke metode koriste stohastičke operatore za generisanje novih rješenja. Dobra rješenja imaju veću vjerovatnoću da budu izabrana, što usmjerava pretraživanje ka perspektivnim regijama prostora rješenja i izbjegava prijevremenu konvergenciju. Bez obzira na različit dizajn i implementaciju, svaka metoda počiva na istom principu: procijeniti kvalitet kandidatskih rješenja i kroz niz postupaka doći do optimalnih. Inspiracija prirodom dovela je do toga da se ovi pristupi mogu podijeliti u tri najvažnije grupe prikazane na Slici 2.1.



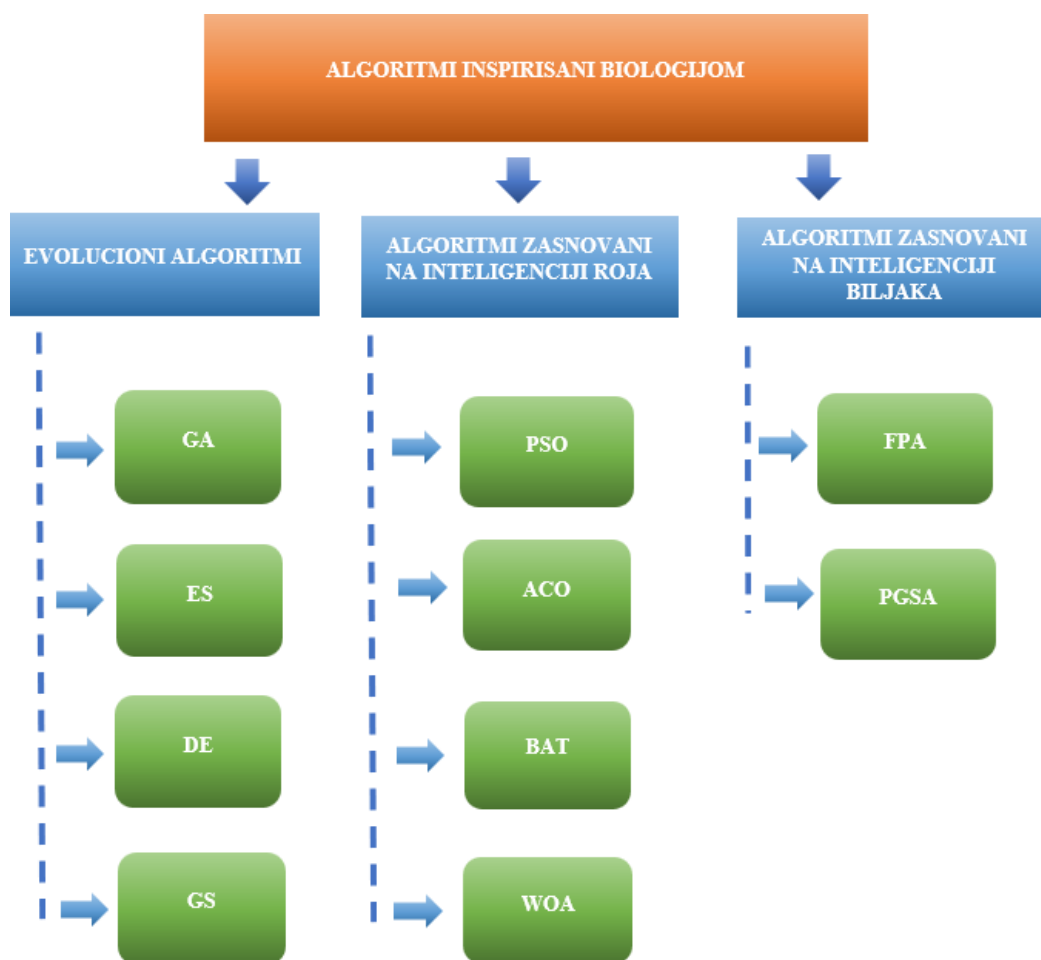
Slika 1. Podjela metaheurističkih algoritama po inspiraciji

2.2.2.1 *Biloški inspirisani algoritmi*

Biloški inspirisane metode predstavljaju dominantnu kategoriju metaheurističkih algoritama korišćenih u optimizaciji elektroenergetskih sistema. Ove metode crpe inspiraciju iz prirode, počevši od evolutivnih procesa koji su oblikovali život na Zemlji tokom milijardi godina, preko kolektivne inteligencije životinja, do mehanizama rasta i reprodukcije biljaka. Zajednička karakteristika svih biloški inspirisanih metoda je primjena populacije potencijalnih rješenja koja evoluiraju tokom iterativnog procesa, pri čemu svaka iteracija predstavlja generaciju ili vremenski korak u prirodnom sistemu. Kao što je prikazano na Slici 2.2, biloški inspirisani algoritmi dijele se na evolucione algoritme, algoritme inspirisane inteligencijom roja i algoritme zasnovane na inteligenciji biljaka.

Evolucionni algoritmi predstavljaju prvu i najstariju klasu metaheurističkih metoda. Oni simuliraju proces prirodne selekcije opisane u Darwinovoj teoriji evolucije, gdje najsposobnije jedinke imaju veće šanse za preživljavanje i reprodukciju. Evolucionni algoritmi održavaju populaciju potencijalnih rješenja koja evoluira kroz generacije primjenom operatora inspirisanih genetskim procesima, uključujući selekciju, ukrštanje i mutaciju.

Glavni predstavnik evolucionih algoritama je genetski algoritam (eng. *Genetic Algorithm*, GA). Proces optimizacije počinje sa nasumično generisanom populacijom rješenja. U svakoj generaciji, algoritam evaluira *fitness* svake jedinke prema zadatoj funkciji cilja, bira roditeljske jedinke za reprodukciju, primjenjuje operatore ukrštanja za stvaranje potomaka i povremeno uvodi mutacije za održavanje genetske raznovrsnosti. Ovaj proces se ponavlja kroz više generacija, pri čemu prosječan i najbolji *fitness* populacije postepeno raste.



Slika 2. Pregled biološki inspirisanih algoritama

U [27] je GA korišćen za određivanje optimalne lokacije i instalisane snage različitih tipova FACTS uređaja s ciljem poboljšanja naponske stabilnosti, smanjenja gubitaka aktivne snage i minimizacije investicionih troškova. Višeciljna funkcija je formulisana korišćenjem L-indeksa za naponsku stabilnost i standardnih jednačina za gubitke aktivne snage. Rezultati su pokazali da UPFC ima najveći doprinos naponskoj stabilnosti i ukupnim gubicima aktivne snage u sistemu. Sličan pristup je predstavljen u [28] za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje STATCOM uređaja, gdje je optimizacioni problem riješen primjenom *fuzzy* varijante genetskog algoritma. U [29] je predložena primjena višekriterijumskog genetskog algoritma za određivanje optimalnog broja, lokacija i kapaciteta distribuiranih generatora i kondenzatorskih baterija. Funkcijom cilja tretirani su naponski profil, naponska stabilnost, gubici aktivne snage i investicioni troškovi distribuiranih generatora. U [30-32] je genetski algoritam primijenjen za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje SVC i STATCOM uređaja uzimajući u obzir najvjerovatnije ispade pojedinačnih elemenata.

Algoritmi zasnovani na inteligenciji roja (eng. *swarm intelligence*) predstavljaju drugu veliku podgrupu biološki inspirisanih metoda. Ovi algoritmi imitiraju kolektivno ponašanje samorganizujućih sistema u prirodi, kao što su jata ptica, rojevi pčela i kolonije mrava. Ključna karakteristika ovih algoritama je da inteligentno ponašanje nastaje iz interakcije velikog broja jednostavnih agenata koji slijede jednostavna pravila. Svaki agent u rojevima ima ograničeno znanje o globalnom problemu, ali kroz razmjenu informacija sa susjednim agentima i kretanje kroz prostor pretraživanja, populacija postepeno konvergira ka optimalnim rješenjima.

Optimizacija rojem čestica (eng. *Particle Swarm Optimization*, PSO) je jedan od najpopularnijih algoritama u ovoj kategoriji, inspirisan socijalnim ponašanjem jata ptica. U PSO algoritmu, svaka čestica predstavlja potencijalno rješenje i kreće se kroz prostor pretraživanja određenom brzinom, pri čemu se pozicija i brzina svake čestice ažuriraju na osnovu dvije komponente: njenog ličnog iskustva i iskustva cijelog roja. Ovaj mehanizam omogućava balans između istraživanja novih regiona i pretrage oko poznatih dobrih rješenja. Standardni PSO karakterišu problemi sa konvergencijom ako sve čestice prate globalni optimum, pa su s ciljem rješavanja ovog problema razvijene brojne modifikacije osnovnog algoritma.

U [33] je predložena primjena varijante PSO algoritma sa vremenski promjenljivim koeficijentima ubrzanja (eng. *Time Varying Acceleration Coefficients*, PSO-TVAC) za optimalnu alokaciju STATCOM uređaja uzimajući u obzir ispade pojedinačnih elemenata. U predloženoj varijanti se koeficijenti ubrzanja koji kontrolišu važnost kognitivne i socijalne komponente adaptivno mijenjaju tokom iteracija, što omogućava prirodan prelazak od eksploracije ka eksploataciji. U [34] je predložena primjena varijante PSO algoritma sa višestrukim liderima (eng. *Enhanced Leader PSO*, ELPSO) za optimalnu alokaciju TCSC uređaja. Predložena varijanta rješava problem jednake orijentacije svih čestica uvođenjem višestrukih lidera u različitim regionima prostora pretraživanja, čime se održava veća raznovrsnost populacije. U [35] je predložena primjena višekriterijumske varijante metoda optimizacije rojem čestica (eng. *Multi-Objective PSO*, MOPSO) za simultanu alokaciju distribuiranih generatora i baterija kondenzatora, dok se finalno rješenje sa Pareto fronta određuje primjenom *fuzzy* odlučivanja.

Algoritam svitaca (eng. *Firefly Algorithm*, FA) inspirisan je principima privlačnosti svitaca. Sjajniji svici privlače tamnije, a intenzitet sjaja opada sa udaljenošću, što kreira prirodan mehanizam za lokalno i globalno pretraživanje. U [36] je korišćen samoadaptivni algoritam svitaca (eng. *Self-Adaptive Firefly Algorithm*, SAFA) za optimalnu alokaciju različitih FACTS uređaja s ciljem smanjenja gubitaka aktivne snage, poboljšanja naponskih prilika i unaprijeđenja naponske stabilnosti. Predstavljeni rezultati ukazuju na superiornost SAFA u odnosu na referentne metode optimizacije, što se ogleda kroz unaprijeđenje tehničkih performansi elektroenergetskog sistema.

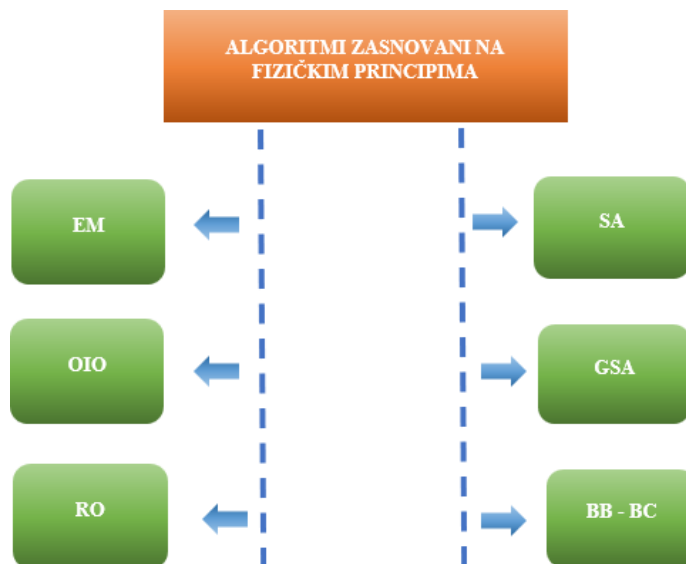
Algoritam optimizacije kitovima (eng. *Whale Optimization Algorithm*, WOA) simulira lovačko ponašanje grbastih kitova, specifično tehniku tzv. *bubble-net* napada. Kitovi ronilačkim spiralnim kretanjem stvaraju mrežu mjehurića koja zarobljava ribe, a zatim napadaju kroz centar. U [37] je WOA korišćen za optimalnu alokaciju baterija kondenzatora u radijalnim distributivnim mrežama. Kriterijumska funkcija je formulisana uzimajući u obzir gubitke aktivne snage, naponske prilike u mreži i investicione troškove baterija kondenzatora. Komparativna analiza sa referentnim pristupima poput MINLP i PSO pokazala je da WOA rezultira najvećim smanjenjem gubitaka, najvećim poboljšanjem naponskog profila i najvećim finansijskim uštedama.

2.2.2.2 Fizički inspirisani algoritmi

Fizički inspirisani algoritmi crpe inspiraciju iz fundamentalnih zakona fizike i prirodnih fizičkih fenomena. Za razliku od bioloških metoda koje simuliraju kompleksne biološke sisteme, fizički inspirisani algoritmi često koriste relativno jednostavne matematičke principe izvedene iz termodinamike, mehanike, akustike ili drugih grana fizike. Iako ih često karakterišu veoma jednostavne formulacije, fizički inspirisani algoritmi se pokazuju veoma efikasnim u rješavanju kompleksnih optimizacionih problema. Neki od najčešće korišćenih fizički inspirisanih algoritama predstavljeni su na Slici 2.3.

Algoritam gravitacionog pretraživanja (eng. *Gravitational Search Algorithm*, GSA) zasnovan je na Njutnovom zakonu gravitacije i zakonu kretanja. Algoritam tretira svako rješenje kao objekat sa određenom masom, gdje kvalitetnija rješenja imaju veću masu i privlače druga rješenja prema sebi. Pozicije agenata ažuriraju se na osnovu gravitacionih sila koje djeluju između njih, pri čemu teži objekti (kvalitetnija rješenja) imaju jače gravitaciono polje. Ova metafora prirodno balansira eksploraciju i eksploataciju tokom procesa optimizacije. U [38] je GSA korišćen za određivanje optimalne lokacije i dimenzionisanje DSTATCOM uređaja u distributivnim mrežama, gdje je funkcija cilja formulisana kao minimizacija gubitaka aktivne snage, odstupanja napona i maksimizacija godišnjih ušteda. Komparativna analiza sa drugim metaheurističkim pristupima pokazala je superiornost GSA u pogledu kvaliteta pronađenih rješenja.

Algoritam harmonijskog pretraživanja (eng. *Harmony Search Algorithm*, HSA) inspirisan je muzičkom improvizacijom. Algoritam održava harmonijsku memoriju koja sadrži skup dobrih rješenja, dok se novo rješenje generiše na osnovu tri operatora: selekcije iz memorije, prilagođavanja visine tona i nasumičnog generisanja. Ovaj pristup omogućava fleksibilnu ravnotežu između korišćenja postojećih znanja i istraživanja novih oblasti prostora rješenja. U [39]



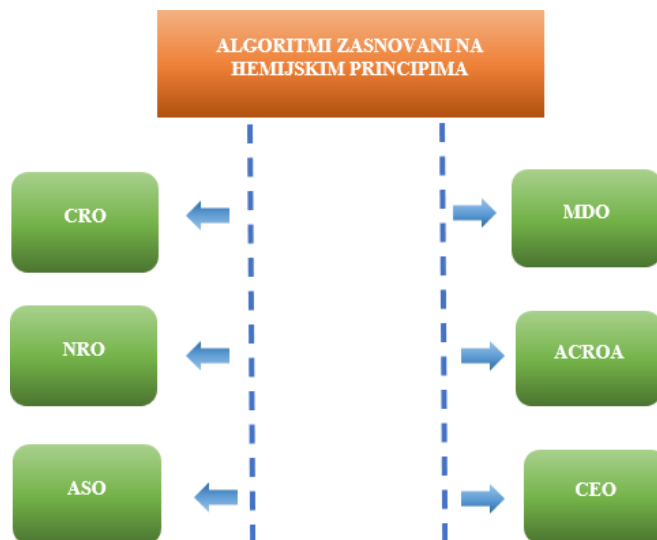
Slika 3. Pregled fizički inspirisanih algoritama

je predstavljen globalni HSA (eng. *global HSA*, GHSA) za određivanje optimalne lokacije i dimenzionisanje SVC i STATCOM uređaja, gdje su ciljevi bili smanjenje gubitaka, minimizacija odstupanja napona, maksimizacija margine naponske stabilnosti i redukcija investicionih troškova. Specifičnost fizički inspirisanih algoritama ogleda se u njihovoj matematičkoj eleganciji i intuitivnim operatorima koji često rezultiraju dobrom konvergencijom ka globalnom optimumu. Međutim, ovi algoritmi generalno imaju manji broj parametara u odnosu na biološki inspirisane metode, što može pojednostaviti proces podešavanja, ali istovremeno može ograničiti njihovu fleksibilnost za različite tipove problema.

2.2.2.3 Hemijski inspirisani algoritmi

Hemijski inspirisani algoritmi predstavljaju najmanju kategoriju prirodno inspirisanih metoda optimizacije. Ovi algoritmi simuliraju hemijske procese i reakcije koji se odvijaju na molekularnom nivou, uključujući formiranje i raskidanje hemijskih veza, kretanje molekula i energetske transformacije. Neki od najčešće korišćenih hemijski inspirisanih algoritama prikazani su na Slici 4.

Optimizacija hemijskim reakcijama (eng. *Chemical Reaction Optimization*, CRO) je najpoznatiji predstavnik ove kategorije. Algoritam imitira interakcije između molekula tokom hemijskih reakcija, gdje molekuli (rješenja) prolaze kroz različite tipove reakcija kako bi dostigli stabilno stanje sa minimalnom energijom. Operatori algoritma omogućavaju kako intenzifikaciju tako i diversifikaciju pretraživanja, pri čemu se energetski kriterijum koristi za prihvatanje ili odbijanje novih rješenja. U [40] je CRO primijenjen za određivanje optimalne lokacije STATCOM uređaja u različitim testnim sistemima. Kriterijumska funkcija je formulisana kao minimizacija gubitaka aktivne snage, poboljšanje naponskog profila i unapređenje naponske stabilnosti. Rezultati su pokazali da CRO pruža konkurentne rezultate u odnosu na PSO.



Slika 4. Pregled hemijski inspirisanih algoritama

2.3 Hibridne metode

Hibridne metode predstavljaju napredne pristupe koji kombinuju prednosti različitih optimizacionih tehnika kako bi se prevazišla ograničenja pojedinačnih metoda. U kontekstu optimalne alokacije i dimenzionisanja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa, hibridni pristupi mogu se klasifikovati u dvije osnovne kategorije: kombinacija analitičkih i metaheurističkih pristupa i kombinacija različitih metaheurističkih algoritama.

2.3.1 Analitičko-metaheuristički pristupi

Analitičko-metaheuristički pristupi, poznati i kao dvostepeni pristupi, predstavljaju najzastupljeniju kategoriju hibridnih metoda u literaturi. Osnovni princip ovih pristupa je korišćenje analitičkih metoda za preselekciju kandidatskih lokacija, čime se značajno redukuje prostor pretraživanja za naknadnu metaheurističku optimizaciju. Ovaj pristup istovremeno zadržava računarsku efikasnost analitičkih metoda i globalnu optimizacionu sposobnost metaheuristika.

U prvom koraku, primjenjuju se različiti indeksi osjetljivosti za identifikaciju najkritičnijih vodova ili čvorova koji predstavljaju najpogodnije kandidate za ugradnju kompenzacionih uređaja. Analitički pristup omogućava brzu procjenu velikog broja potencijalnih lokacija bez potrebe za iterativnim postupcima. U drugom koraku, metaheuristički algoritam optimizuje lokaciju (iz skupa kandidatskih lokacija), broj i dimenzionisanje uređaja uz zadovoljavanje svih tehničkih i ekonomskih ograničenja. Ovaj dvostepeni pristup značajno redukuje složenost optimizacionog problema i vrijeme potrebno za pronalaženje optimalnog rješenja.

Veliki broj istraživanja koristi PLS indeks za identifikaciju kandidatskih lokacija kondenzatorskih baterija. U [41] je PLS korišćen za preselekciju lokacija, dok je algoritam simulacije rasta biljaka (eng. *Plant Growth Simulation Algorithm*, PGSA) primijenjen za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje baterija, s ciljem poboljšanja naponskog profila i redukcije gubitaka aktivne snage. Sličan pristup predstavljen je u [42], gdje je kombinacija PLS i indeksa naponske stabilnosti korišćena za preselekciju, a algoritam hranjenja bakterija (eng. *Bacterial Foraging Algorithm*, BFOA) za optimizaciju. U [43] je algoritam oprašivanja cvijeća (eng. *Flower Pollination Algorithm*, FPA) korišćen nakon PLS preselekcije za optimalno dimenzionisanje kondenzatora, pri čemu je funkcija cilja obuhvatala minimizaciju investicionih troškova, gubitaka aktivne snage i poboljšanje naponskog profila. Komparativna analiza sa GA, PGSA, GSA, PSO i drugim algoritmima pokazala je da FPA pruža najniže ukupne troškove i najveće neto uštede. Slični pristupi koji kombinuju PLS indeks sa različitim metaheurističkim metodama optimizacije predstavljeni su u [44-46].

PLI indeks takođe je često korišćen za preselekciju lokacija. U [47] je PLI korišćen za identifikaciju kandidatskih čvorova, dok je unaprijeđeni algoritam harmonijskog pretraživanja (eng. *Improved HSA*, IHSA) primijenjen za optimalno dimenzionisanje kondenzatora. Funkcija cilja obuhvatala je redukciju ukupnih troškova, minimizaciju gubitaka i poboljšanje naponskog profila. U [48] je isti indeks kombinovan sa FPA, pri čemu su rezultati pokazali da predloženi pristup pruža najniže ukupne troškove i najveće neto uštede u poređenju sa drugim metodama iz

literature. Sličan pristup primijenjen je u [49] za nesimetrične radijalne distributivne mreže. U [50] je PLI indeks kombinovan sa algoritmom kukavičjeg pretraživanja (eng. *Cuckoo Search Algorithm*, CSA) za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje kondenzatora u radijalnim distributivnim mrežama sa različitim nivoima opterećenja.

CPLS indeks, koji kombinuje osjetljivost gubitaka aktivne i reaktivne snage, korišćen je u nekoliko istraživanja. U [51] je CPLS primijenjen za predselekciju kandidatskih lokacija za distribuirane generatore u radijalnim distributivnim mrežama, s ciljem redukcije gubitaka i poboljšanja naponskog profila. U [52] je CPLS indeks pokazao superiorne rezultate u odnosu na PLI i indeks u pogledu ukupnih ušteda troškova i redukcije gubitaka snage. U [53] je predstavljena komparativna analiza PSI, CPLS i drugih indeksa za optimalnu alokaciju DSTATCOM uređaja, pri čemu su rezultati pokazali da PSI i CPLS pružaju najbolje rezultate u smislu poboljšanja naponskog profila, redukcije troškova reaktivne snage i ukupnih godišnjih ušteda.

U [54] su kandidatske lokacije za TCSC i SVC uređaje određene primjenom analitičkih metoda koje razmatraju tokove reaktivne snage i naponske prilike u mreži, nakon čega je algoritam simuliranog kaljenja (eng. *Simulated Annealing*, SA) primijenjen za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje kompenzacionih uređaja s ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage, smanjenja devijacije napona i ukupnih operativnih troškova. Rezultati su pokazali da SA pruža robusna rješenja sa dobrom konvergencijom ka globalnom optimumu. U [55] su indeksi kvaliteta naponskog profila korišćeni za predselekciju lokacija za SVC uređaje, pri čemu je funkcija cilja definisana kao minimizacija devijacije napona i gubitaka snage uzimajući u obzir jednostruke ispade elemenata i rast opterećenja.

U [56] je predstavljen hibridni pristup koji kombinuje PLI za predselekciju lokacija šant kondenzatora, nakon čega je modifikovani algoritam vještačke kolonije pčela (eng. *Global best guided Artificial Bee Colony*, GABC) algoritam primijenjen za optimalno dimenzionisanje. Funkcija cilja obuhvatala je minimizaciju gubitaka aktivne snage, dok su devijacija napona, indeksi naponske stabilnosti i ukupne godišnje uštede korišćeni za validaciju performansi sistema. Komparativna analiza sa drugim algoritmima pokazala je efikasnost predloženog pristupa.

U [57] i [58] je kombinacija indeksa odstupanja napona i LUF indeksa korišćena za identifikaciju najkritičnijih vodova kroz N-1 analizu sigurnosti, nakon čega su algoritam diferencijalne evolucije (eng. *Differential Evolution*, DE) i algoritam vještačkih algi (eng. *Artificial Algae Algorithm*, AAA) primijenjeni za optimalno alociranje i dimenzionisanje UPFC uređaja. Cilj optimizacije bio je rasterećenje kritičnih vodova i poboljšanje naponskih prilika u slučaju jednostrukih ispada. Isti pristup proširen je u [59] za različite vrste FACTS uređaja korišćenjem PSO i drugih algoritama, pri čemu je cilj bio minimizacija investicionih troškova, odstupanja napona i opterećenja vodova u različitim scenarijima rasta opterećenja.

Analitičko-metaheuristički pristupi pokazali su se izuzetno efikasnim jer kombinuju brzinu i jednostavnost analitičkih metoda sa globalnom optimizacionom sposobnošću metaheuristika. Međutim, izbor odgovarajućeg indeksa za predselekciju od kritičnog je značaja, jer loš izbor može isključiti optimalna rješenja iz daljeg razmatranja.

2.3.2 Metaheurističko-metaheuristički pristupi

Metaheurističko-metaheuristički pristupi kombinuju prednosti različitih metaheurističkih algoritama kako bi se poboljšale performanse optimizacije. Osnovna ideja je da različiti algoritmi imaju različite karakteristike pretraživanja, pa njihova kombinacija može rezultirati boljom eksploracijom i eksploatacijom prostora rješenja.

U [60] je predstavljen hibridni PSO-GSA algoritam za optimalnu alokaciju IPFC i UPFC uređaja. PSO algoritam korišćen je za optimizaciju gravitacione konstante u GSA algoritmu, čime je poboljšana konvergencija standardnog GSA. Funkcija cilja obuhvatala je L-indeks za naponsku stabilnost i gubitke aktivne snage. Rezultati pokazuju da hibridni pristup nadmašuje pojedinačne PSO i GSA algoritme.

U [61] je razvijen hibridni CRO-DE pristup za optimizaciju lokacije i parametara UPFC uređaja. DE algoritam poboljšava globalno pretraživanje CRO metode kroz efikasnije generisanje novih rješenja. Funkcija cilja obuhvatala je minimizaciju ukupnih troškova proizvodnje i troškova ugradnje UPFC uređaja, poboljšanje naponskog profila i redukciju gubitaka u sistemu. Komparativna analiza sa IPSO, PSO, GA i drugim algoritmima pokazala je da hibridni CRO-DE pristup pruža superiorne rezultate u pogledu kvaliteta rješenja i brzine konvergencije.

U [62] je primijenjena kombinacija HSA i DE algoritama za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje baterija kondenzatora. HSA omogućava globalno pretraživanje kroz harmonijsku memoriju, dok DE osigurava intenzivnu lokalnu eksploataciju kroz diferencijalnu mutaciju i operatore ukrštanja. Komparativna analiza pokazala je da HSA-DE nadmašuje pojedinačne HSA, DE i druge algoritme iz literature.

Prednost metaheurističko-metaheurističkih pristupa je što mogu iskoristiti komplementarne karakteristike različitih algoritama. Jedan algoritam može biti superioran u globalnoj eksploraciji, dok drugi pruža efikasnu lokalnu eksploataciju. Međutim, povećana složenost implementacije i potreba za podešavanjem većeg broja parametara predstavljaju glavne nedostatke ovog pristupa.

2.4 Praznine u literaturi

Na osnovu detaljnog pregleda literature, može se zaključiti da postoji nekoliko značajnih praznina u istraživanjima optimalne alokacije i dimenzionisanja naponsko-reaktivnih regulacionih resursa:

1. *Nedovoljno istraživanja fokusiranih na šant reaktore*

Pregled literature pokazuje da se najveći broj istraživanja fokusira na reaktivnu kompenzaciju induktivnog karaktera, dok je optimalna alokacija šant reaktora kao sredstva za kompenzaciju kapacitivnih struja značajno manje zastupljena. Od svih analiziranih radova, samo nekoliko se eksplicitno bavilo optimizacijom šant reaktora.

2. *Nedostatak sveobuhvatnih višekriterijumskih pristupa*

Iako brojni radovi koriste višekriterijumsku optimizaciju, mali broj istovremeno tretira i investicione troškove i tehničke performanse mreže na sveobuhvatan način. Većina studija fokusira se na jedan ili dva cilja (najčešće minimizacija gubitaka i poboljšanje naponskog profila), dok se ekonomski aspekti i sigurnost u različitim operativnim scenarijima rijetko razmatraju istovremeno.

3. Posmatranje ograničenog broja operativnih scenarija

Većina istraživanja razmatra samo nekoliko operativnih scenarija (tipično: bazni slučaj, maksimalno opterećenje i kritični N-1 ispadi). Međutim, realne prenosne mreže karakteriše širok spektar operativnih režima koji zavise od godišnjeg doba, dnevnog dijagrama opterećenja, raspoloživosti obnovljivih izvora energije i mnogih drugih faktora. Samo nekoliko studija razmatra veći broj različitih operativnih scenarija.

Ove praznine ukazuju na potrebu za daljim istraživanjem u oblasti optimalne alokacije šant reaktora, posebno kroz razvoj sveobuhvatnih višekriterijumskih pristupa koji istovremeno tretiraju tehničke i ekonomske aspekte uz razmatranje velikog broja operativnih scenarija.

3. PREDLOŽENI METOD ZA OPTIMALNU ALOKACIJU I DIMENZIONISANJE ŠANT REAKTORA

U ovom poglavlju je predstavljen novi metod za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje šant reaktora u prenosnoj mreži. U prvom dijelu poglavlja predstavljena je formulacija optimizacionog problema, dok je u nastavku predstavljen odabrani metod višekriterijumske optimizacije, zajedno sa usvojenom metodom izbora kompromisnog rješenja.

3.1 Formulacija problema

U ovom potpoglavlju predstavljena je formulacija problema optimalne lokacije i dimenzionisanja šant reaktora, uključujući predložene kriterijumske funkcije i ograničenja normalnog pogona elektroenergetskog sistema.

3.1.1 Kriterijumske funkcije

Kriterijumska funkcija kvantifikuje cilj koji optimizacioni algoritam teži da maksimizuje, odnosno minimizuje, kako bi se dobilo najprihvatljivije rješenje optimizacionog problema. U ovom radu primijenjen je pristup višekriterijumske optimizacije koji istovremeno tretira tehničke i ekonomske aspekte ugradnje šant reaktora.

Stabilnost napona u svim čvorovima mreže predstavlja jedan od osnovnih kriterijuma za ocjenu kvaliteta pogona elektroenergetskog sistema. Naponi koji premašuju svoje granične vrijednosti mogu dovesti do mnogobrojnih negativnih efekata, među kojima su najvažniji povećano naprezanje izolacije i neželjeno djelovanje zaštitnih relejnih uređaja. Iz to razloga se naponi u svim čvorovima teže održati u uskim granicama oko nominalnog napona u svim operativnim scenarijima.

Shodno tome, prva kriterijumska funkcija u ovom radu predstavlja sumu odstupanja napona u čvorovima sistema od nominalne vrijednosti u nekoliko karakterističnih operativnih scenarija koji simuliraju različite radne uslove sistema. Kriterijumska funkcija je opisana izrazom:

$$f_1 = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_c} (V_i^s - V_{in})^2 \quad (1)$$

gdje je V_i^s napon čvora i u operativnom scenariju S , V_{in} je nominalni napon čvora i , N_c je ukupan broj čvorova u mreži, a N_s broj operativnih scenarija koji se razmatra. Kvadratna forma funkcije cilja dovodi do toga da se odstupanja različitih veličina različito tretiraju. Naime, veća odstupanja se proporcionalno više „kažnjavaju“ jer kvadratna funkcija raste brže od linearne. Manje vrijednosti funkcije f_1 znače manja odstupanja napona u svim posmatranim scenarijima, što ukazuje na veći stepen sigurnosti sistema. Sve ovo iziskuje potrebu za održavanjem napona u propisanim granicama, što navodi optimizacione algoritme da biraju ona rješenja najbliža referentnim vrijednostima.

Širok spektar posmatranih scenarija omogućava simulaciju sistema pri različitim operativnim uslovima, što dodatno povećava robusnost izabranog rješenja. Kako su realni elektroenergetski sistemi složeni, dinamični i podložni promjenama u opterećenju i topologiji mreže, u cilju detaljnije analize je u ovom master radu primjenjena Monte Carlo simulacija za generisanje 10.000 operativnih scenarija. Svaki generisani scenario obuhvata slučajne varijacije sljedećih parametara:

- a) Nivo opterećenja, uzimajući u obzir varijacije potrošnje u svim čvorovima u rasponu od minimalnog do maksimalnog opterećenja,
- b) Stanja generatora, uzimajući u obzir različite kombinacije uključenih i isključenih generatorskih jedinica, kao i
- c) Topološke promjene, uzimajući u obzir ispade pojedinačnih vodova i transformatora.

Za svaki generisani scenario sproveden je proračun tokova snaga. Samo oni scenariji kod kojih je proračun tokova snaga uspješno konvergirao i za koje su naponi u svim čvorovima ostali u fizički očekivanim granicama uzeti su u razmatranje za dalju analizu.

Kako je primarna funkcija šant reaktora kompenzacija kapacitivnog efekta vodova, odnosno smanjenje nedozvoljeno visokih napona u uslovima malog opterećenja, iz skupa validnih scenarija izabrano je 50 kritičnih scenarija koji rezultiraju najvišim naponima u mreži. Ovi kritični scenariji predstavljaju najnepovoljnije operativne uslove i stoga su od najvećeg značaja za optimalno dimenzionisanje i alokaciju šant reaktora. Na taj način osigurava se da rješenje optimizacije bude robusno i efikasno upravo u onim operativnim režimima gdje su šant reaktori najneophodniji za održavanje kvaliteta napona u propisanim granicama.

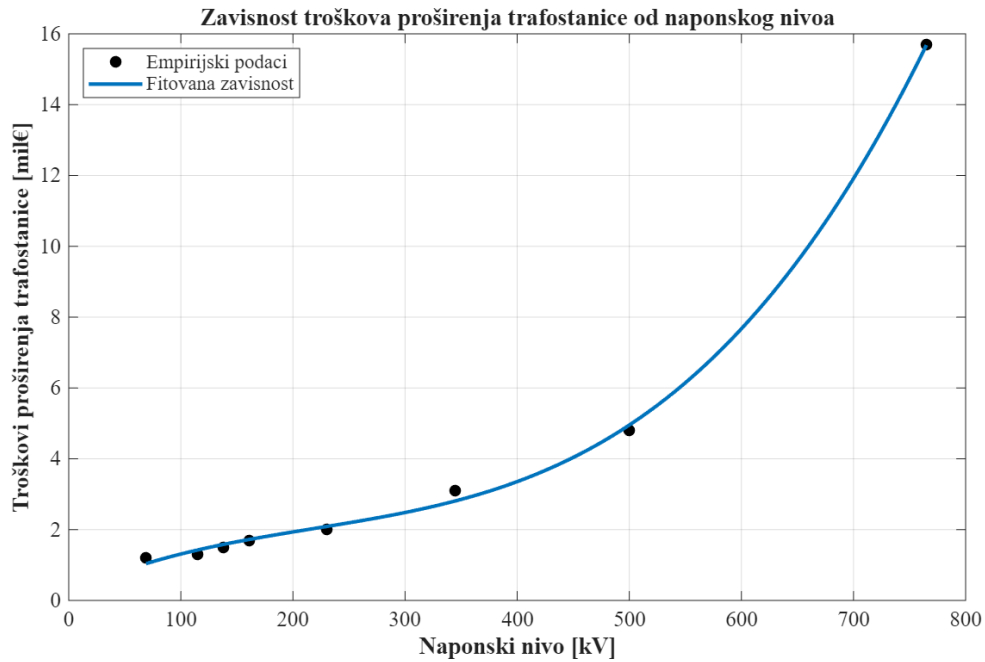
Druga kriterijumska funkcija zasniva se na ekonomskim performansama i opisuje investicione troškove šant reaktora:

$$f_2 = C_{TS}(U_n) + C_R(U_n)Q_n^\alpha \quad (2)$$

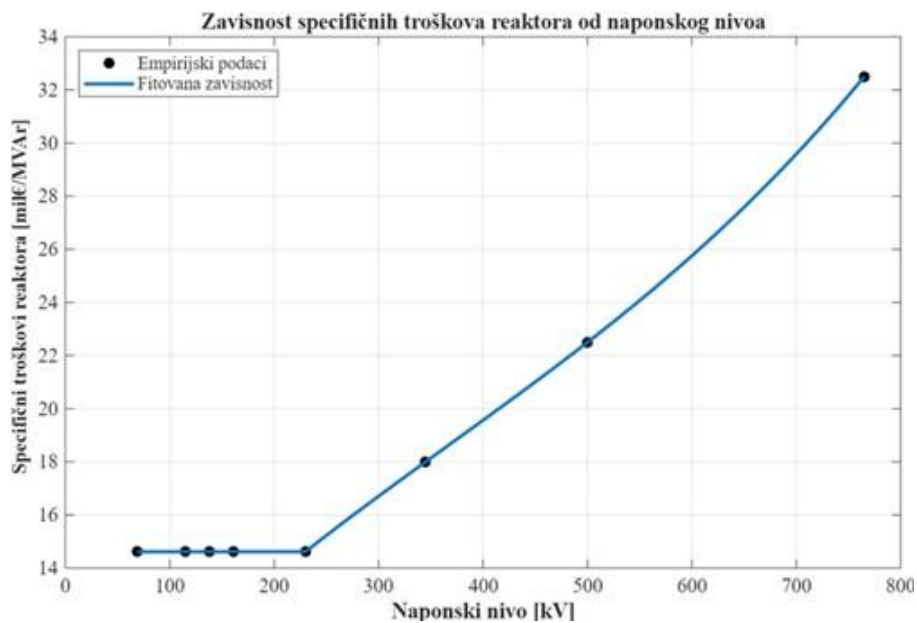
gdje su $C_{TS}(U_n)$ troškovi proširenja trafostanice, $C_R(U_n)$ su specifični troškovi šant reaktora, Q_n je naznačena snaga šant reaktora, a α je eksponent koji uzima u obzir ekonomiju obima, odnosno činjenicu da reaktori veće snage imaju manju specifičnu cijenu. Shodno tome, može se pretpostaviti vrijednost $\alpha = 0,95$.

Kao što se uočava, troškovi proširenja trafostanice zavise od naponskog nivoa. Ova zavisnost, utvrđena na osnovu podataka iz prakse, prikazana je na Slici 3.1. Uočava se da u zoni nižih naponskih nivoa, do 230 kV, trošak proširenja trafostanice nije podložan intenzivnim i velikim promjenama cijene. U dijelu naponskog nivoa iznad 230 kV kriva se mijenja, poprimajući izrazito konveksan oblik. Ovo je posljedica činjenice da mnogi elementi poput rastavljača, prekidača ili mjernih transformatora predstavljaju robusne elemente velikih dimenzija, čija proizvodnja, transport i montaža pri većim naponskim nivoima predstavlja značajan izazov. Istovremeno, rastu i zahtjevi u pogledu izolacionih razmaka i udaljenosti među fazama i prema zemlji, što direktno utiče na veličinu i složenost građevinskih objekata. Kao rezultat svega navedenog, javlja se potreba za nadogradnjom trafostanice, što iziskuje veliki obim građevinskih radova praćenih dodatnim elektro radovima i opremom.

Kao i troškovi proširenja trafostanice i specifični troškovi šant reaktora zavise od naponskog nivoa. Kao što je prikazano na Slici 3.2, u dijelu nižih naponskih nivoa do 230 kV specifični troškovi šant reaktora ostaju relativno nepromijenjeni, što se može objasniti činjenicom da u ovom rasponu napona šant reaktori pripadaju istoj tehnološkoj grupi proizvoda, koji ne zahtijevaju posebne kriterijume već se izgrađuju prema standardnim konstrukcijskim rješenjima. Prelaskom na veće naponske nivoe, kriva pokazuje jasan uzlazni trend. Shodno tome, svaki dodati MVAr na



Slika 5. Zavisnost troškova proširenja trafostanice od naponskog nivoa



Slika 6. Zavisnost specifičnih troškova reaktora od naponskog nivoa

višem naponskom nivou košta više nego isti MVar na nižem naponskom nivou. Gotovo linearan karakter specifičnih troškova na višim naponskim nivoima uzrokovan je povećanim izolacionim zahtjevima, složenijom konstrukcijom reaktora, većom dimenzijom elemenata, kao i otežanim transportom uređaja. Uz to, obavezna ispitivanja za uređaje na većem naponskom nivou su složenija i skuplja, što dodatno povećava ukupne investicione troškove.

3.1.2 Ograničenja

U postupku optimizacije i alokacije šant reaktora od suštinskog značaja su ograničenja pojedinih komponenti elektroenergetskog sistema koja eksplicitno utiču na sigurnost mreže. Postojanje jasno definisanih ograničenja omogućava zaobilaznje svih rješenja koja su tehnički nekorektna. Naime, sve granične vrijednosti elemenata proizilaze iz određenih tehničkih pravila, osiguravajući da rješenja koja se dobiju kroz optimizaciju budu kompatibilna sa fundamentalnim fizičkim zakonima i operativnim pravilima mreže. U nastavku su predstavljena ograničenja korišćena prilikom optimalne alokacije i dimenzionisanja šant reaktora u ovom radu.

3.1.2.1 Termička ograničenja mrežnih elemenata

Kako bi se u sistemu osigurala zaštita od preopterećenja mrežnih elemenata i spriječila pojava režima koji mogu ostaviti dugoročne posljedice na sistem, kao adekvatan mehanizam zaštite uvode se termička ograničenja. Termička ograničenja mrežnih elemenata definišu maksimalnu snagu koja može proticati kroz elemente elektroenergetskog sistema, a da pritom ne rezultira nedozvoljenim zagrijavanjem komponenti. U slučaju da prividna snaga pređe maksimalnu dozvoljenu vrijednost, temperatura provodnika ili namotaja raste, što može dovesti do oštećenja izolacije. Shodno tome, termička ograničenja mrežnih elemenata moraju biti zadovoljena u svakom operativnom scenariju:

$$S_i^s \leq S_i^{max} \quad (3)$$

gde je S_i^s prividna snaga grane i u operativnom scenariju s , a S_i^{max} je dozvoljeno termičko opterećenje elementa.

Ovako definisano termičko ograničenje omogućava optimizacionom algoritmu da pored minimizacije naponske greške i trošova šant reaktora, bira kombinacije lokacije i snage koje ne dovode do preopterećenja bilo kog elementa mreže.

3.1.2.2 Naponska ograničenja

Održavanje napona u propisanim granicama je osnovni preduslov za siguran i kvalitetan rad elektroenergetskog sistema. Previsoki naponi mogu oštetiti izolaciju i ubrzati starenje opreme, dok preniski naponi dovode do povećanih gubitaka, nestabilnosti i otežanog rada potrošača i generatora. U optimizacionom modelu, naponska ograničenja definisana su prema uobičajenoj praksi, koja dozvoljava odstupanje napona od $\pm 10\%$ u odnosu na nominalnu vrijednost:

$$V_i^{min} \leq V_i^s \leq V_i^{max} \quad (4)$$

gdje su V_i^{min} i V_i^{max} donja i gornja granična vrijednost napona u čvoru i , respektivno.

Naponska ograničenja primjenjuju se u svakoj iteraciji optimizacionog algoritma i za sve razmatrane operativne scenarije. Na taj način osigurava se da nijedan čvor u mreži ne radi van dozvoljenih granica, čime se potrošači i oprema štite od nepovoljnih režima rada.

3.1.2.3 Ograničenja instalisane snage šant reaktora

Instalisana snaga šant reaktora predstavlja naznačenu snagu uređaja koja određuje koliku maksimalnu reaktivnu snagu reaktor može apsorbirati iz sistema pri nominalnom naponu. U optimizacionom modelu, ova veličina predstavlja upravljačku promjenljivu koja determiniše dimenzije šant reaktora na svakoj od potencijalnih lokacija za priključenje. Ograničenja instalisane snage šant reaktora definisana su kao:

$$Q_R^{min} \leq Q_R \leq Q_R^{max} \quad (5)$$

U ovom istraživanju je za donju granicu snage reaktora usvojeno 0 MVar, dok je za gornju granicu usvojeno 100 MVar. Donja granica od 0 MVar označava da na posmatranoj lokaciji nije instaliran šant reaktor, dok gornja granica od 100 MVar predstavlja maksimalnu naznačenu snagu pojedinačnog šant reaktora koja se razmatra u ovoj analizi. Ovaj opseg odgovara realnim vrijednostima instalisanih snaga šant reaktora u prenosnim mrežama i obuhvata širok spektar tehničkih rješenja dostupnih u praksi.

3.2 Primijenjeni metod višekriterijumske optimizacije

Problem optimalne alokacije i dimenzionisanja šant reaktora u prenosnoj mreži predstavlja tipičan višekriterijumski optimizacioni problem, gdje je potrebno simultano minimizovati odstupanja napona i investicione troškove. Ovi ciljevi su po prirodi konfliktni: poboljšanje naponskih prilika kroz ugradnju većeg broja ili veće snage reaktora dovodi do povećanja investicionih troškova, dok minimizacija troškova može rezultirati gorim naponskim prilikama.

U teoriji višekriterijumske optimizacije razlikuju se dva osnovna pristupa: apriorni i aposteriorni. Apriorni pristup podrazumijeva kombinovanje više kriterijumskih funkcija u jedinstvenu skalarnu funkciju prije početka optimizacije, najčešće primjenom težinskih koeficijenata. Ovaj pristup zahtijeva unaprijed definisane preferencije donosioca odluke o relativnom značaju pojedinih ciljeva. Sa druge strane, aposteriorni pristup simultano optimizuje sve kriterijumske funkcije i generiše skup Pareto optimalnih rješenja, nakon čega donosilac odluke bira najpovoljnije rješenje na osnovu sveobuhvatne analize kompromisa između ciljeva. U ovom master radu primijenjen je aposteriorni pristup višekriterijumske optimizacije, koji omogućava:

- a) Pronalaženje čitavog skupa Pareto optimalnih rješenja,
- b) Uvid u konflikt između tehničkih i ekonomskih ciljeva,
- c) Fleksibilan izbor kompromisnog rješenja na osnovu različitih kriterijuma i
- d) Robusnu optimizaciju bez potrebe za subjektivnim definisanjem težinskih koeficijenata.

Za implementaciju aposteriornog pristupa odabran je genetski algoritam sa sortiranjem po nedominaciji (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*, NSGA II), jedan od najčešće korišćenih i najuspješnijih evolutivnih algoritama za višekriterijumsku optimizaciju. Odabir NSGA-II algoritma zasniva se na sljedećim prednostima:

- a) Efikasno generisanje uniformno raspoređenih rješenja duž Pareto fronta,
- b) Očuvanje najboljih rješenja kroz elitizam,
- c) Niska računarska složenost ($O(MN^2)$), gdje je M broj ciljeva, a N veličina populacije),
- d) Automatsko održavanje raznolikosti rješenja bez potrebe za dodatnim parametrima i
- e) Dokazana efikasnost u optimizaciji elektroenergetskih sistema.

Nakon što NSGA-II algoritam generiše Pareto optimalni front, za izbor konačnog kompromisnog rješenja primijenjen je Kalai-Smorodinsky metod odlučivanja, koji obezbeđuje matematički korektan i pravičan izbor rješenja zasnovan na principu proporcionalne jednakosti između konfliktnih ciljeva.

U nastavku poglavlja detaljno su objašnjeni NSGA-II algoritam i Kalai-Smorodinsky metod odlučivanja.

3.2.1 NSGA-II algoritam

NSGA-II predstavlja unaprijeđenu verziju originalnog NSGA algoritma, koja razvijena 2002. godine u [63]. Algoritam pripada klasi evolutivnih metoda zasnovanih na principima genetske evolucije (selekcije, ukrštanja i mutacije), prilagođenih za rješavanje višekriterijumskih optimizacionih problema. Osnovne karakteristike NSGA-II algoritma su:

- a) Brzo sortiranje po nedominaciji, koje predstavlja efikasnu proceduru za rangiranje rješenja prema Pareto dominaciji,
- b) Elitizam, koji omogućava očuvanje najboljih rješenja iz prethodnih generacija,
- c) *Crowding distance*, mehanizam koji omogućava održavanje raznolikosti rješenja duž Pareto fronta i
- d) Realno kodiranje, koje omogućava direktnu reprezentaciju upravljačkih promjenljivih realnim brojevima.

U nastavku su obrađeni koraci NSGA-II algoritma, uključujući: inicijalizaciju populacije, sortiranje po nedominaciji, *crowding distance*, genetske operatore selekcije, ukrštanja i mutacije, kao i načine za formiranje nove generacije i kriterijume zaustavljanja.

3.2.1.1 Inicijalizacija populacije

Prvi korak NSGA-II algoritma predstavlja generisanje početne populacije od N jedinki, gdje svaka jedinka predstavlja jedno moguće rješenje problema. Svako rješenje \mathbf{x}_k predstavlja vektor upravljačkih promjenljivih:

$$\mathbf{x}_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}) \quad (6)$$

gdje je n broj upravljačkih promjenljivih. U kontekstu optimalne alokacije i dimenzionisanja šant reaktora, upravljačke promjenljive su lokacije i instalisane snage šant reaktora. Početna populacija generiše se nasumičnim odabirom vrijednosti svake upravljačke promjenljive iz njenog dozvoljenog opsega. Početne vrijednosti uzorkuju se u skladu sa uniformnom raspodjelom, čime se obezbeđuje dobra pokrivenost prostora pretraživanja i visok nivo raznolikosti rješenja.

3.2.1.2 Sortiranje po nedominaciji

Nakon inicijalizacije, populacija se sortira u frontove na osnovu koncepta Pareto dominacije. Rješenje x_1 dominira nad rješenjem x_2 (označeno kao $x_1 < x_2$) ako je x_1 jednako dobro ili bolje od x_2 po svim ciljevima i ako je x_1 striktno bolje od x_2 po bar jednom cilju. Procedura sortiranja po nedominaciji sastoji se iz četiri ključna koraka:

1. Za svaku jedinku x iz populacije formira se skup S_x jedinki nad kojima x dominira i brojač n_x jedinki koje dominiraju nad x .
2. Sve jedinke za koje ne postoje jedinke koje dominiraju nad njima ($n_x = 0$) dodjeljuju se prvom frontu F_1 i dobijaju rang $r = 1$.
3. Za svaku jedinku x iz prvog fronta, za sve jedinke y iz skupa S_x smanjuje se brojač n_y za jedan.
4. Sve jedinke sa $n_y = 0$ dodjeljuju se drugom frontu F_2 i dobijaju rang $r = 2$.

Proces opisan koracima 1 – 4 se ponavlja dok se sve jedinke ne rasporede u odgovarajuće frontove.

3.2.1.3 Crowding distance

Nakon sortiranja populacije u frontove i dodjeljivanja ranga svakoj jedinki, slijedi proces koji utiče na raznolikost rješenja duž cijelog Pareto fronta, poznat kao *crowding distance*. *Crowding distance* predstavlja mjeru gustoće rješenja u prostoru ciljeva. U slučaju da je rastojanje između posmatrane jedinke i njoj susjednih jedinki vrlo malo, *crowding distance* dobija malu vrijednost. U suprotnom, rješenja koja se nalaze u rjeđim regionima fronta nose veću težinu. Dakle, ona rješenja na gušće naseljenom prostoru u frontu su od manjeg značaja jer oko sebe imaju vrlo slične susjede, dok su jedinke koje pokrivaju rjeđe naseljene područja fronta od suštinske važnosti za očuvanje raznovrsnosti rješenja. Izbor pojedinaca sa izraženom vrijednošću *crowding distance*, omogućava algoritmu da pristupi popunjavanju praznina duž fronta, trudivši se da obezbijedi različite vrste kompromisa između ciljeva.

Crowding distance se računa unutar svakog Pareto fronta posebno za svaku jedinku. Najprije se za svako x koje pripada frontu F_i vrijednost *crowding distance* postavi na nulu:

$$cd(x_j) = 0 \tag{7}$$

Postojanje više kriterijuma, uslovilo je računanje *crowding distance* odvojeno za svaki cilj. U slučaju da je optimizacioni problem opisan sa n različitih kriterijumskih funkcija, za svaku funkciju potrebno je izračunati minimalnu i maksimalnu vrijednost funkcije cilja n unutar posmatranog fronta F_i :

$$\begin{aligned} f_n^{min} &= \min_{x \in F_i} f^n(x) \\ f_n^{max} &= \max_{x \in F_i} f^n(x) \end{aligned} \quad (8)$$

Ove vrijednosti služe da odrede opseg u kome se nalaze sve jedinke obuhvaćene ciljem n . Na osnovu jasno definisanog raspona, vrši se skaliranje vrijednosti, tako da se sve kriterijumske funkcije mogu međusobno porediti. Shodno tome, *crowding distance* pruža realnu mjeru udaljenosti rješenja od svojih susjeda, bez favorizacije ciljeva većih numeričkih vrijednosti.

Nakon što su određene minimalne i maksimalne vrijednosti kriterijumskih funkcija unutar posmatranog fronta F_i , sprovodi se sortiranje rješenja unutar fronta. Naime, sva rješenja iz F_i se poređaju po rastućem redosljedu, od najmanje do najveće vrijednosti cilja. U nizu sortiranih rješenja $x_1, x_2, x_3, \dots, x_s$, rješenje x_1 rješenje ima najnižu vrijednost funkcije cilja n , dok rješenje x_s ima najveću vrijednost funkcije cilja n . Rješenja x_1 i x_s , kao granične vrijednosti sortiranog niza, imaju ključnu ulogu u održavanju raznovrsnosti rješenja, pa im se iz tog razloga dodjeljuje beskonačna vrijednost *crowding distance*:

$$cd(x_1) = cd(x_s) = \infty \quad (9)$$

Za ostala rješenja, od x_2 do x_{s-1} , *crowding distance* se ažurira na osnovu vrijednosti kriterijumske funkcije prethodnika x_{i-1} , odnosno sljedbenika x_{i+1} i to na sljedeći način:

$$cd(x_i) = cd(x_i) + \frac{f_n(x_{i+1}) - f_n(x_{i-1})}{f_n^{max} - f_n^{min}} \quad (10)$$

Zahvaljujući predloženom načina računanja *crowding distance*, NSGA-II algoritam obezbjeđuje raznolikost populacije, birajući rješenja koja su pozicionirana na djelovima prostora pretraživanja koji ima manju stopu naseljenosti. Jedinke koje značajno doprinose pravilnom odabiru rješenja imaju visok intezitet *crowding distance* koji značajno sprečava nagomilavanje sličnih jedinki u određenim regijama fronta.

3.2.1.4 Selekcija rješenja

Selekcija rješenja kod NSGA-II algoritma zasniva se na kombinaciji prethodno izračunate *crowding distance* mjere i ranga rješenja dobijenog procesom sortiranja po nedominaciji, koristeći operator poređenja udaljenosti (eng. *crowded comparison operator*). Shodno tome, operator poređenja udaljenosti poredi dvije jedinke, favorizujući onu sa manjim rangom nedominacije.

U slučaju uporedne analize dvije jedinke iz istog ranga, algoritam prioritet daje onom rješenju sa većom vrijednošću *crowding distance*. Naime, niža vrijednost ranga znači bolji kvalitet rješenja, dok veća vrijednost *crowding distance* predstavlja intezivniju raznovrsnost istih. Drugim riječima, rješenje x je bolje od rješenja y ako važi sljedeće:

$$\begin{aligned} rang(x) &< rang(y), \text{ uz } r(x) \neq r(y), \\ cd(x) &> cd(y), \text{ uz } r(x) = r(y) \end{aligned}$$

Selekcija roditelja za genetske operatore vrši se binarnom turnirskom selekcijom: nasumično se biraju dvije jedinke i bolja jedinka se selektuje kao roditelj, pri čemu se za izbor bolje jedinke koristi operator poređenja udaljenosti.

3.2.1.5 Genetski operatori

Za razliku od klasičnog genetskog algoritma, gdje su jedinke predstavljene kao binarni nizovi, NSGA-II algoritam kodira jedinke realnim brojevima. Naime, unaprijeđena verzija genetskog algoritma problem definiše u kontinualnom prostoru, gdje binarni zapis ne može obezbijediti adekvatnu preciznost. Shodno tome, kod većine savremenih optimizacionih problema koriste se realno kodirani genetski operatori, koji predstavljaju hromosome u obliku vektora realnih brojeva. Na taj način predstavljeni genetski operatori teže da zadrže temeljna načela klasičnih, binarnih algoritama, uključujući procese ukrštanja i mutacije. Kao dva najčešće korišćena realno kodirana genetska operatora izdvajaju se: simulirano binarno ukrštanje i polinomijalna mutacija.

Simulirano binarno ukrštanje

Simulirano binarno ukrštanje (eng. *Simulated Binary Crossover*) predstavlja najčešće korišćeni operator ukrštanja u realno kodiranim genetskim algoritmima, koji omogućava direktnu kombinaciju hromozoma opisanih vektorom realnih brojeva i razmjenu genetskog materijala među njima. Kod stvaranja potomaka, ovaj operator zadržava osnovnu ideju tradicionalnog jednopozicionog binarnog ukrštanja, gdje djeca nastaju u prostoru između roditelja, ali omogućava i generisanje potomaka u regionima koji se nalaze izvan prostora između roditeljskih jedinki.

Generisanje potomaka vrši se tako što se na osnovu dva roditelja \mathbf{x}_1 i \mathbf{x}_2 kreiraju potomci \mathbf{p}_1 i \mathbf{p}_2 , pri čemu se svaki gen g potomaka \mathbf{p}_1 i \mathbf{p}_2 formira primjenom jednačina:

$$p_{1g} = \frac{1}{2} [(1 - \beta_g)x_{1g} + (1 + \beta_g)x_{2g}] \quad (11)$$

$$p_{2g} = \frac{1}{2} [(1 + \beta_g)x_{1g} + (1 - \beta_g)x_{2g}] \quad (12)$$

gdje je β_g faktor raspona koji mjeri koliko se dijete razlikuje od roditelja. Faktor raspona β_g ima za cilj da obezbijedi nasumičnu raspodjelu potomaka u regionu između dva roditelja i izvan njega. Raspodjela faktora raspona definisana je funkcijom gustine vjerovatnoće:

$$\beta(u) = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & u \leq 0,5 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2(1-u)} \right)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & u > 0,5 \end{cases} \quad (13)$$

gdje je u slučajno generisan broj iz opsega od 0 do 1, a η_c indeks distribucije koji određuje koliko će potomci biti blizu ili daleko od roditelja. Veće vrijednosti indeksa distribucije rezultiraju potomcima koji su sličniji roditeljima, dok manje vrijednosti omogućavaju veću raznolikost.

Polinomijalna mutacija

Polinomijalna mutacija predstavlja operator mutacije koji se najčešće primjenjuje za jedinke kodirane realnim brojevima. Primarni cilj polinomijalne mutacije je očuvanje raznolikosti populacije putem suptilnog pomjeranja vrijednosti gena. Mutacija omogućava algoritmu da izbjegne zaustavljanje u lokalnim optimumima i da istražuje nove regione prostora pretraživanja koji možda nisu bili dostupni kroz proces ukrštanja. Mutacija gena g kod potomka \mathbf{p} vrši se kao:

$$p_g = x_g + (x_g^{max} - x_g^{min})\Delta_g \quad (14)$$

gdje je p_g mutirana vrijednost gena g , x_g je roditeljska vrijednost gena g , x_g^{min} i x_g^{max} su donja i gornja granična vrijednost gena, a Δ_g je bezdimenzioni nasumični pomak iz opsega od -1 do 1.

Vrijednost bezdimenzionalnog nasumičnog potomka Δ_g određuje se na osnovu nasumične vrijednosti u iz intervala od 0 do 1 primjenom relacije:

$$\Delta_g = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{n_m+1}} - 1, & u < 0.5, \\ 1 - (2(1-u))^{\frac{1}{n_m+1}}, & u \geq 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

gdje je n_m indeks mutacije koji kontrolira intenzitet pomaka. Veće vrijednosti indeksa rezultiraju manjim pomacima gena, što omogućava finu podešavanja postojećih rješenja. Suprotno, manje vrijednosti indeksa dovode do većih pomaka, što omogućava širu eksploraciju prostora pretraživanja.

3.2.1.6 Formiranje nove generacije

Proces formiranja nove generacije kod NSGA-II algoritma započinje spajanjem trenutne roditeljske populacije P_t sa novom populacijom potomaka Q_t , pri čemu se formira kombinovana populacija veličine $2N$:

$$R_t = P_t \cup Q_t \quad (16)$$

gdje je N veličina populacije. Ovaj korak predstavlja suštinsku karakteristiku NSGA-II algoritma koja omogućava očuvanje elitizma. Naime, spajanje najboljih rješenja iz prethodne i novoformirane populacije pruža mogućnost za stvaranje nove generacije koja selektuje i prenosi sva kvalitetna rješenja, bez obzira na generaciju u kojoj su nastala.

Nakon formiranja kombinovane populacije R_t sprovodi se proces sortiranja po nedominaciji koji rezultira formiranjem frontova nedominacije F_1, F_2, \dots, F_k . Nova roditeljska populacija P_{t+1} formira se postupnim popunjavanjem frontova po njihovom rangu, počevši od prvom fronta F_1 , zatim drugog fronta F_2 i tako redom, sve dok veličina nove populacije ne dostigne ili premaši zadanu veličinu populacije. U slučaju kada bi dodavanje cijelog fronta F_i dovelo do prekoračenja

veličine populacije N , iz tog fronta se biraju samo one jedinke koje imaju najveću vrijednost *crowding distance*.

Nakon formiranja nove roditeljske populacije, generiše se nova populacija potomaka primjenom genetskih operatora i ovaj proces se iterativno ponavlja kroz naredne generacije dok se ne ispuni jedan od kriterijuma za zaustavljanje algoritma. Mogući kriterijumi za zaustavljanje NSGA-II algoritma su:

- a) Postizanje maksimalnog broja generacija,
- b) Postizanje zadovoljavajuće konvergencije rješenja (minimalne promjene u Pareto frontu između uzastopnih generacija),
- c) Istek definisanog računarskog vremena ili
- d) Postizanje ciljnih vrijednosti kriterijumskih funkcija.

3.2.2 Kalai-Smorodinsky metod odlučivanja

Nakon što NSGA-II algoritam generiše skup Pareto optimalnih rješenja, neophodno je odabrati jedno konačno kompromisno rješenje koje će biti implementirano u praksi. Za tu svrhu u ovom radu primijenjen je Kalai-Smorodinsky metod odlučivanja, koji predstavlja jedan od najčešće korišćenih pristupa u savremenoj teoriji pregovaranja.

Suprotno Nash-ovom pristupu, koji je fokusiran na maksimizaciju proizvoda korisnosti pregovarača, Kalai-Smorodinsky metod definiše stabilan i pravičan ishod pregovora između suprotstavljenih strana. Ovaj metod karakterišu matematički precizna rješenja zasnovana na ostvarivanju individualnih ciljeva svih konfliktnih strana. Kao glavni aspekt u donošenju konačne odluke izdvaja se kriterijum pravičnosti, koji ima za cilj da obezbijedi proporcionalnu jednakost među suprotstavljenim stranama, tako da krajnji ishod predstavlja dobit za obje strane.

Prije formiranja pregovora, svaki pregovarački problem predstavlja se kao uređeni par $p(M, n)$, gdje je M zatvoren i konveksan skup koji označava grupu svih mogućih sporazuma do kojih može doći prilikom pregovora, a n je tačka nesporazuma (eng. *disagreement point*) ispod koje nijedna strana ne pristaje na pregovore.

Skup M sadrži sve moguće ishode pregovora, uključujući i one koji su gori od tačke nesporazuma, kao i rješenja koja nijesu Pareto efikasna. Stoga je neophodno razmatrati samo onaj dio skupa M koji sadrži isključivo Pareto efikasna rješenja. Problem $p(M, n)$ smatra se smislenim samo ako pregovori mogu obezbijediti bolju soluciju od one koja dovodi do nesporazuma, odnosno ako važi:

$$\exists(m_1, m_2) \in M, \quad m_2 > n_1, \quad m_2 > n_2 \quad (17)$$

gdje su m_1 i m_2 koristi prve i druge strane u određenom sporazumu, a n_1 i n_2 koristi strana ako pregovori uspiju.

Tačka ideala (eng. *ideal point*) formira se na način što se za svakog učesnika u pregovorima definiše maksimalna korist koju isti može ostvariti u procesu pregovora, odnosno:

$$i(M) = (b_1(M), b_2(M)) \quad (18)$$

gdje su $b_1(M)$ i $b_2(M)$ najveće individualne korist koje prva i druga strana mogu ostvariti u pregovorima, respektivno.

Kalai-Smorodinsky rješenje $K = (k_1, k_2)$ predstavlja tačku koja leži na presjeku prave koja spaja tačku nesporazuma n i tačku ideala $i(M)$ sa Pareto frontom. Ova tačka određuje se kao:

$$K = \arg \max_{\lambda \geq 0} \{n + \lambda(i(M) - n)\} \quad (19)$$

Pravičnost Kalai-Smorodinsky rješenja potvrđuje se odnosom koji obezbjeđuje da obje strane postignu jednak relativni napredak u odnosu na svoje idealne ishode:

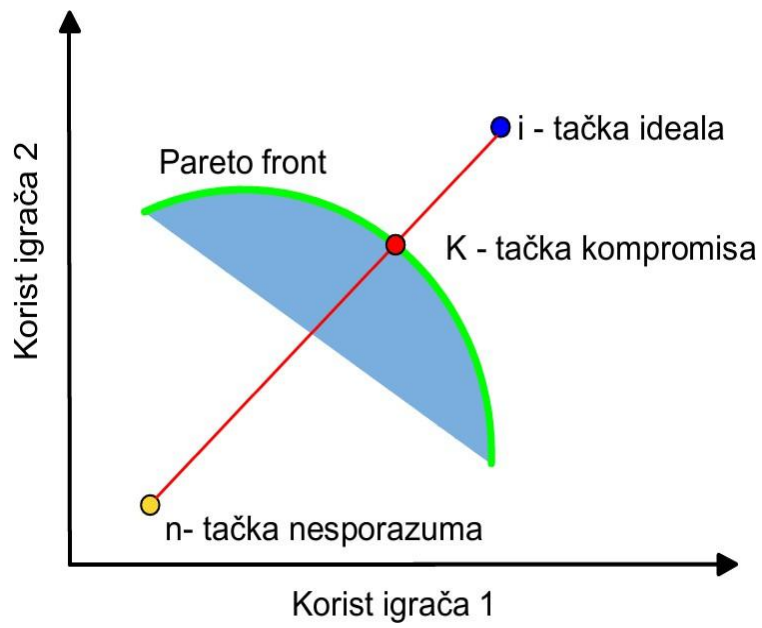
$$\frac{k_1 - n_1}{b_1(M) - n_1} = \frac{k_2 - n_2}{b_2(M) - n_2} \quad (20)$$

Ovaj odnos garantuje da nijedna strana ne ostvaruje proporcionalno veći napredak od druge, što obezbjeđuje pravičnost i stabilnost rješenja.

Na Slici 3.4 prikazana je geometrijska interpretacija Kalai-Smorodinsky metoda. Područje označeno sivom bojom predstavlja skup svih mogućih sporazuma M , dok granična linija skupa, označena plavom bojom, predstavlja Pareto front. Tačka nesporazuma n i tačka ideala $i(M)$ povezane su pravom linijom koja predstavlja putanju jednakih procenata napretka sa svih strana. Mjesto gdje ova prava dodiruje Pareto front predstavlja Kalai-Smorodinsky rješenje K , koje donosi podjednaku relativnu korist suprotstavljenim stranama, omogućavajući im da ostvare jednak procenat svog maksimalnog potencijala.

U kontekstu problema optimalne alokacije i dimenzionisanja šant reaktora, dvije konfliktne strane predstavljaju dva optimizaciona cilja: minimizacija odstupanja napona f_1 i minimizacija investicionih troškova f_2 . Tačka nesporazuma n se može definisati kao scenario bez ugradnje šant reaktora, gdje su odstupanja napona maksimalna, dok su investicioni troškovi jednaki nuli. Tačka ideala $i(M)$ definiše se kao kombinacija minimalnih vrijednosti oba cilja iz skupa Pareto optimalnih rješenja.

Primjenom Kalai-Smorodinsky metoda na Pareto front generisan NSGA-II algoritmom, dobija se kompromisno rješenje koje obezbeđuje proporcionalan napredak u oba cilja: smanjenju odstupanja napona i ograničavanju investicionih troškova. Ovakav pristup obezbeđuje da konačno rješenje bude i tehnički opravdano (kroz prihvatljive naponske prilike) i ekonomski održivo (kroz razumne investicione troškove).



Slika 7. Geometrijska interpretacija Kalai-Smorodinsky metoda odlučivanja

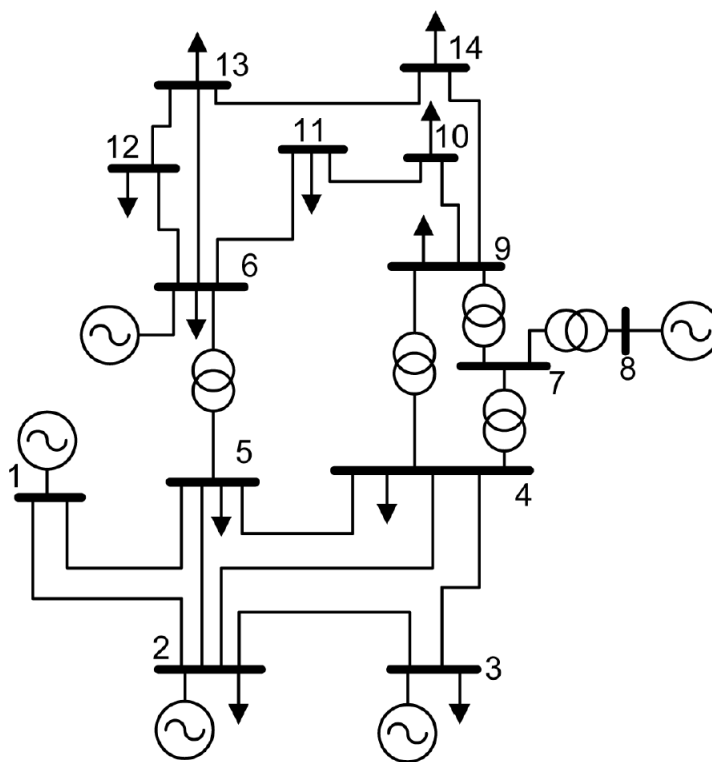
4. NUMERIČKI REZULTATI

U ovom poglavlju predstavljeni su numerički rezultati proračuna koji uključuju analizu naponskog profila i aktivnih gubitaka za slučajeve priključenja jednog, dva i tri šant reaktora. Analiza je sprovedena na IEEE testnim sistema od 14 čvorova, 30 čvorova i 118 čvorova, a svi rezultati su dobijeni primjenom programskog jezika MATLAB. Optimalne lokacije, snage i cijene šant reaktora postignute su primjenom NSGA-II algoritma. Predloženi algoritam predstavlja kompromis između suprotstavljenih kriterijuma minimizacije odstupanja napona u čvorovima i minimizacije investicionih troškova ugradnje reaktora. Kao rezultat algoritma, dobijen je Pareto front rješenja, koji je omogućio da se primjenom Kalai-Smorodinsky metode izabere rješenje koje doprinosi jednakoj raspodjeli koristi između suprotstavljenih ciljeva.

4.1 Testne prenosne IEEE mreže

Za potrebe sprovođenja analiza i predstavljanja rezultata predložene metode, ovaj master rad koristi standardne testne IEEE čvrne prenosne sisteme koji se danas široko primjenjuju u istraživanjima iz oblasti elektroenergetskih sistema. Svaki od predstavljenih sistema razlikuje se po dimenzionalnosti, kompleksnosti i strukturi, što omogućava jasan i sveobuhvatan pregled performansi razvijene metodologije. Opšte informacije o sistemima prikazane su u nastavku.

- IEEE testni sistem od 14 čvorova

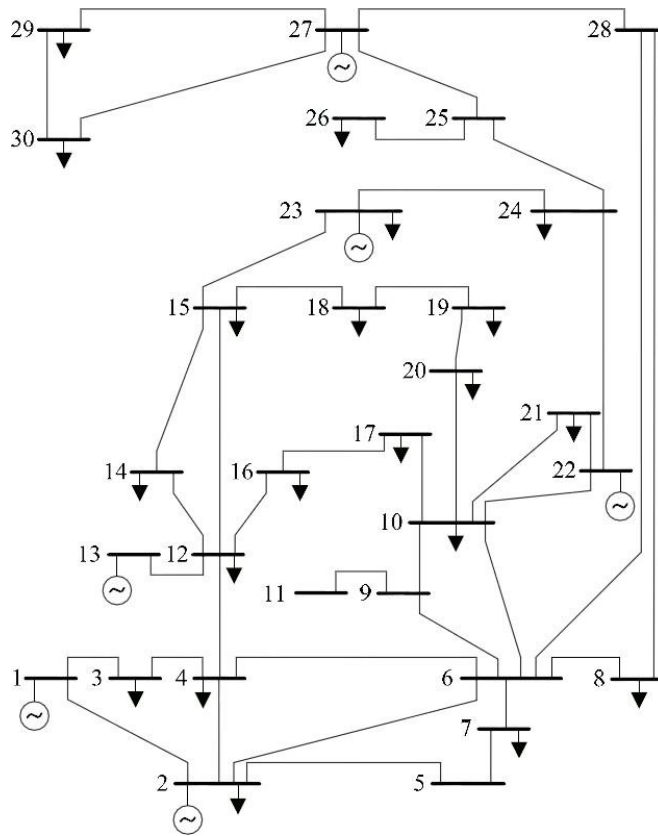


Slika 8. Standardna prenosna IEEE mreža sa 14 čvorova

Tabela 1. Opšte informacije o IEEE sistemu sa 14 čvorova

| | |
|---------------------------------------|------|
| Broj čvorova : | 14 |
| Broj grana : | 20 |
| Broj potrošača : | 9 |
| Broj generatora : | 5 |
| Broj transformatora : | 3 |
| Ukupno aktivno opterećenje [MW] : | 259 |
| Ukupno reaktivno opterećenje [MVar] : | 73,5 |

- IEEE testni sistem od 30 čvorova

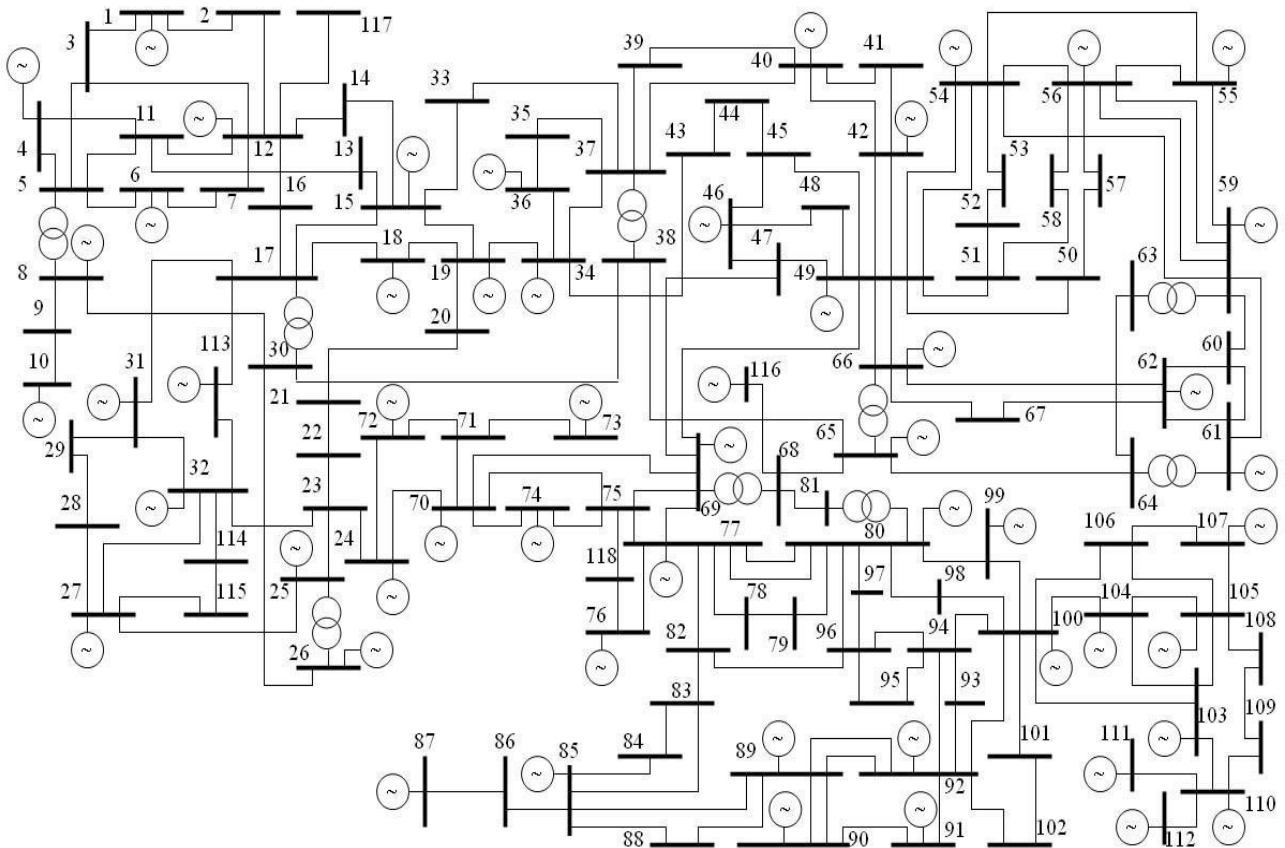


Slika 9. Standardna prenosna IEEE mreža sa 30 čvorova

Tabela 2. Opšte informacije o IEEE sistemu sa 30 čvorova

| | |
|--|-----------|
| Broj čvorova : | 30 |
| Broj grana : | 41 |
| Broj potrošača : | 21 |
| Broj generatora : | 6 |
| Broj transformatora : | 4 |
| Ukupno aktivno opterećenje [MW] : | 283 |
| Ukupno reaktivno opterećenje [MVar] : | 126 |

- IEEE testni sistem od 118 čvorova



Slika 10. Standardna prenosna IEEE mreža sa 118 čvorova

Tabela 3. Opšte informacije o IEEE sistemu sa 118 čvorova

| | |
|--|------|
| Broj čvorova : | 118 |
| Broj grana : | 186 |
| Broj potrošača : | 99 |
| Broj generatora : | 54 |
| Broj transformatora : | 9 |
| Ukupno aktivno opterećenje [MW] : | 4242 |
| Ukupno reaktivno opterećenje [MVar] : | 1438 |

4.2. Selekcija operativnih scenarija

U cilju detaljno sprovedene analize i realističnijeg prikaza uticaja šant reaktora na mrežu, neophodno je obezbijediti niz operativnih scenarija koji na adekvatan način prikazuju moguće varijacije u proizvodnji i potrošnji sistema, kao i promjene u konfiguraciji mreže. Prilikom generisanja scenarija, svi ovi uticaji moraju se posmatrati istovremeno, obzirom da nezavisno razmatranje pojedinačnih faktora na pravi način ne bi reprezentovalo stvarne pogonske uslove sistema. Shodno tome, za potrebe analize razvijen je algoritam koji generiše 10.000 različitih operativnih scenarija i obuhvata širok spektar događaja u sistemu.

Za svaki generator, algoritam jasno definiše minimalnu i maksimalnu vrijednost proizvodnje, tako da u bilo kom scenariju generator može proizvoditi između 0% i 125% svoje nominalne snage. Takođe, za svaki čvor u sistemu, aktivna snaga opterećenja varira između 50% i 150% osnovne vrijednosti. Na ovaj način, uspješno je izvršeno simuliranje različitih nivoa opterećenja koji mogu nastati tokom različitih pogonskih režima i uslova u sistemu. Pored toga, pomenuti algoritam nasumično određuje stanje grana i generatorskih jedinica u mreži. Dakle, za svaki element u sistemu postoji šansa od 1% da bude isključen, što jasno ukazuje na mogućnost prikaza realističnih scenarija, koji se dešavaju usljed kvarova, ispada ili isključenja.

Nakon generisanja svih 10.000 scenarija, algoritam selektuje 50 slučajeva koje karaktereriše najveća maksimalna vrijednost napona u mreži. Razlog ovakve selekcije je upravo taj, što slučajevi sa najvećom maksimalnom vrijednošću napona, daju sistematičan pregled za dalja istraživanja u domenu nedozvoljeno visokih napona i najbolje oslikavaju ulogu šant reaktora kod kontrole istih.

4.3. Optimizacija parametara NSGA-II algoritma

Proces optimizacije parametara NSGA-II algoritma, sproveden je sa ciljem određivanja kombinacije parametara koja obezbijuje optimalni kompromis između više suprotstavljenih kriterijuma. Ovaj master rad uključuje optimizaciju sljedećih parametara:

- Veličina populacije (eng. *Population Size*) - broj jedinki koje se razmatraju kao potencijalno dobra rješenja u svakoj generaciji tokom rada algoritma.
- Udio ukrštanja (eng. *Crossover Fraction*) - parametar NSGA-II algoritma, koji definiše procenat populacije stvorene prilikom samog procesa ukrštanja.
- Udio Pareto jedinki (eng. *Pareto Fraction*) - dio populacije koji se u procesu optimizacije zadržava kao skup nedominantnih rješenja tokom formiranja Pareto fronta.

Optimizacija parametara NSGA – II algoritma je izvedena eksperimentalnim postupkom, prilikom čega je zbog povećane statističke pouzdanosti i kvaliteta dobijenih rješenja, za svaku kombinaciju, NSGA – II algoritam pokrenut čak deset puta. Osim toga, za svaku kombinaciju parametara, proračunata je i vrijednost S -mjere (eng. *Hypervolume indicator*). Kombinacija s najvećom prosječnom vrijednošću S -mjere određena je kao optimalna.

S -mjera predstavlja zapreminu prostora pokrivenog tačkama sa Pareto fronta i ograničenog vrijednošću referentne tačke. Referentnu tačku čine koordinate prostora koje opisuju najnepovoljnije moguće scenarije za sve predložene kriterijume. U ovom slučaju pretpostavljene koordinate su $[1,1]$.

Prije samog proračuna S -mjere, kriterijumske funkcije se skaliraju u opsegu između 0 i 1, što dodatno doprinosi jednakoj koristi između suprotstavljenih ciljeva. Dakle, pokretanjem algoritma, za svaku kombinaciju parametara, određuje se minimum ili maksimum, uz primjenu linearnog skaliranja:

$$f_m = \frac{f_m - f_m^{\min}}{f_m^{\max} - f_m^{\min} + \varepsilon}, \quad m \in [1, 2] \quad (21)$$

Gdje su:

f_m - skalirana vrijednost m -te funkcije cilja,

f_m - stvarna vrijednost m -te funkcije cilja,

f_m^{\min} - minimalna vrijednost posmatrane m -te funkcije,

f_m^{\max} - maksimalna vrijednost posmatrane m -te funkcije,

ε - broj koji sprečava dijeljenje sa nulom.

Skaliranje ima za cilj da sve kriterijumske funkcije dovede u isti opseg vrijednosti, sprečavajući na taj način mogućnost zloupotrebe funkcija sa većim numeričkim vrijednostima.

U posmatranim slučajevima, problem je dvodimenzionalni i bavi se isključivo minimizacijom investicionih ulaganja i naponskih odstupanja. To znači da se S -mjera lako može proračunati uz

pomoć niza tačaka sa Pareto fronta $(f_{1,i}, f_{2,i})$, prethodno sortiranih po rastućoj vrijednosti prve funkcije cilja. Površina ispod same granice Pareto fronta, dobija se primjenom trapezastog pravila:

$$HV \approx \sum_{i=1}^{n-1} (f_{1,i+1} + f_{1,i}) \cdot \frac{(f_{2,i} + f_{2,i+1})}{2} \quad (22)$$

Gdje su :

HV - vrijednost S -mjere,

$f_{1,i}, f_{2,i}$ - vrijednost funkcije cilja za i -tu tačku sa Pareto fronta,

n - broj rješenja u Pareto frontu.

U slučaju da rješenja dominiraju većim dijelom prostora, tada je vrijednost S -mjere veća, što ujedno i znači bolji kvalitet Pareto fronta.

U konkretnom primjeru, kombinacija rješenja koja rezultirala najvećom vrijednošću S -mjere data je u Tabeli 4. Ovi parametri se smatraju optimalnim jer se njihovom upotrebom dobija Pareto front rješenja koji dominira najvećim dijelom prostora i ujedno čine najbolji kompromis među suprotstavljenim ciljevima.

Tabela 4. Parametri NSGA- II algoritma

| Optimizovani parametar | Opseg vrijednosti | Optimalne vrijednosti |
|------------------------|-------------------|-----------------------|
| Veličina populacije | 25, 50, 75, 100 | 50 |
| Udio ukrštanja | 0,7 – 0,8 – 0,9 | 0,8 |
| Udio Pareto jedinki | 0,3 – 0,4 – 0,5 | 0,3 |

4.4 Analiza priključenja šant reaktora

U ovom potpoglavlju su predstavljeni numerički rezultati proračuna koji uključuju analizu integracije šant reaktora, primjenom predložene metode, na testnim prenosnim sistemima različitih dimenzija i karakteristika. Posebna pažnja usmjerena je na naponski profil mreža prije i nakon integracije šant reaktora.

4.4.1 Analiza priključenja jednog šant reaktora na testnom IEEE - 14 čvornom sistemu

Nepredviđene okolnosti u radu elektroenergetskog sistema često mogu dovesti do neželjenih stanja i izazvati smanjenu stabilnost mreže. Naime, iznenadne promjene u opterećenju, ispadi elemenata poput generatora ili vodova, kvarovi na opremi i kratkotrajne oscilacije u proizvodnji često dovode do porasta napona u pojedinim djelovima mreže.

Kako je opisano u potpoglavlju 4.2, radi sveobuhvatnije i realnije analize, prije same integracije šant reaktora algoritam je formirao niz od 50 kritičnih scenarija koji uključuju različite pogonske uslove sistema. Osim toga, zbog jasnijih i preglednijih rezultata, naponske vrijednosti generatorskih čvorova fiksirane su na 1,0 r.j., dok su susceptanse vodova uvećane za 0.1. Na taj način, stvoren je preduslov da rezultati optimizacije budu precizniji, pouzdaniji i primjenjivi u realnim mrežnim uslovima. Konkretno, Tabela 5. prikazuje 50 kritičnih scenarija u IEEE – 14 čvornom sistemu. Scenariji su poređani po opadajućem redosljedu, tako da je brojem 1 označen najkritičniji slučaj kod koga se javlja najveća vrijednost maksimalnog napona.

Tabela 5. Prikaz karakterističnih 50 scenarija za IEEE -14 čvorni sistem

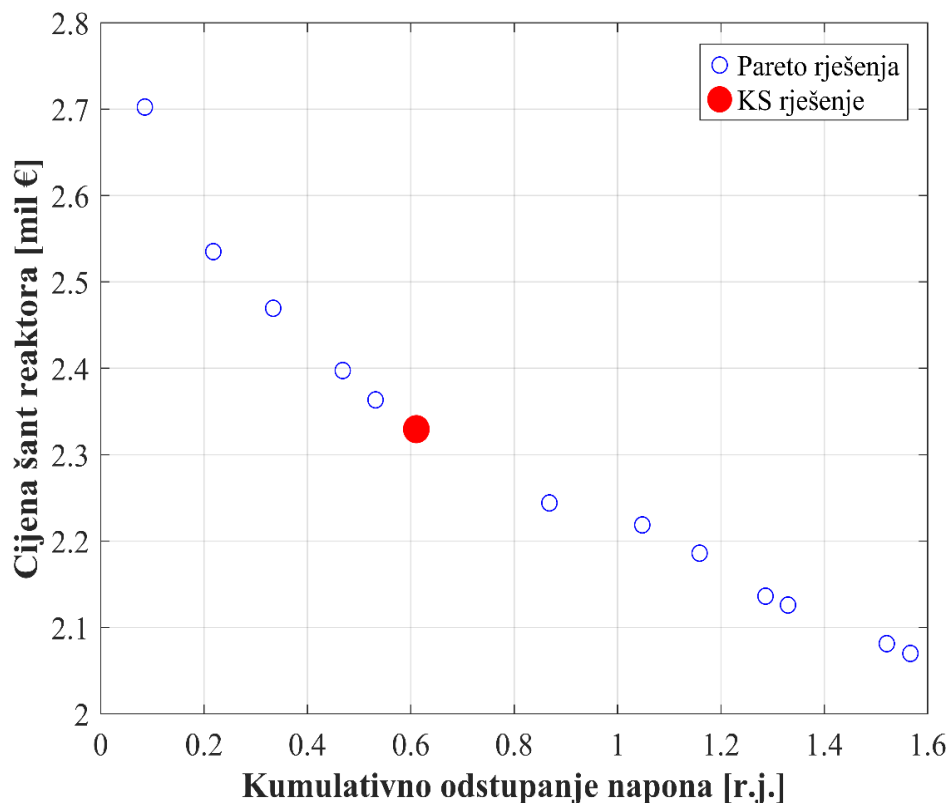
| Broj scenarija: | Isključene grane: | Isključeni generatori: | Potrošnja [MW]: |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1 | 4 - 7, 6 - 13 | 5 | 270.6405939 |
| 2 | 6 - 11 | 5 | 250.7269854 |
| 3 | / | 5 | 227.0745309 |
| 4 | / | 5 | 237.1059716 |
| 5 | / | 5 | 265.1179249 |
| 6 | 4 - 9, 6 - 13 | 5 | 262.105695 |
| 7 | / | 5 | 247.9985259 |
| 8 | 6 - 11, 13 - 14 | / | 251.8733351 |
| 9 | / | 5 | 253.4212247 |
| 10 | / | 5 | 253.9442174 |
| 11 | / | 5 | 240.5929657 |
| 12 | / | 5 | 245.8096901 |
| 13 | / | 5 | 257.252277 |
| 14 | / | 5 | 258.4812786 |
| 15 | / | 5 | 258.205075 |
| 16 | 6 - 11, 6 - 13 | / | 250.735716 |
| 17 | / | 5 | 256.3506966 |
| 18 | / | 5 | 253.3516699 |
| 19 | 4 - 9 | 5 | 253.692769 |
| 20 | / | 5 | 253.7029554 |
| 21 | / | 5 | 290.3003609 |
| 22 | / | 5 | 237.5967574 |
| 23 | / | 5 | 253.4241879 |
| 24 | / | 5 | 261.8007348 |
| 25 | / | 5 | 262.1552613 |
| 26 | / | 5 | 276.9838832 |
| 27 | / | 5 | 244.2836772 |
| 28 | / | 5 | 247.977888 |
| 29 | / | 5 | 263.9375877 |
| 30 | / | 5 | 240.9846878 |
| 31 | / | 5 | 275.1839412 |
| 32 | / | 5 | 245.9547614 |

| | | | |
|----|---------------|---|-------------|
| 33 | / | 5 | 271.8854358 |
| 34 | 6 - 11 | / | 260.1230427 |
| 35 | 5 - 6, 6 - 11 | / | 254.5912628 |
| 36 | / | 5 | 263.958301 |
| 37 | 3 - 4 | 5 | 253.5548104 |
| 38 | / | 5 | 264.2258227 |
| 39 | / | 5 | 268.0491056 |
| 40 | / | 5 | 265.040148 |
| 41 | / | 5 | 256.3596349 |
| 42 | / | 5 | 265.1515566 |
| 43 | / | 5 | 265.8797746 |
| 44 | / | 5 | 245.358135 |
| 45 | / | 5 | 250.9169949 |
| 46 | / | 5 | 260.2181952 |
| 47 | / | 5 | 262.6884757 |
| 48 | / | 5 | 259.0353089 |
| 49 | / | 5 | 262.9520032 |
| 50 | / | 5 | 277.3331629 |

Nakon formiranja niza operativnih scenarija na testnom IEEE – 14 čvornom sistemu, u nastavku rada predstavljeni su rezultati dobijeni primjenom višekriterijumskog NSGA-II algoritma, koji je na efikasan i pouzdan način uspio da odredi veličinu i definiše optimalnu lokaciju jednog šant reaktora. Naime, primjena ovog algoritma omogućila je formiranje skupa Pareto rješenja koja čine grupu potencijalnih kompromisa između međusobno konfliktnih kriterijuma. Izbor krajnjeg rješenja, koje na adekvatan način oslikava jednakost između suprotstavljenih ciljeva sproveden je primjenom Kalai-Smorodinsky metode.

Postizanjem optimalnog odnosa između tehničkih aspekata koji su fokusirani na minimizaciji naponskih odstupanja u čvorovima sistema i ekonomskih stanovišta koja imaju za cilj smanjenje investicionih troškova, došlo se do zaključka da se optimalno rješenje za instalaciju jednog šant reaktora u testnom sistemu sa 14 čvorova, dobija ugradnjom regulacionog uređaja u čvoru 8. Snaga projektovanog regulacionog uređaja je 20 MVAr, dok su potrebna investiciona ulaganja dostigla vrijednost od 2,3296 miliona €. Pored toga, kumulativno odstupanje napona u ovom slučaju iznosi 0,61072, što se jasno može uočiti na Slici 11.

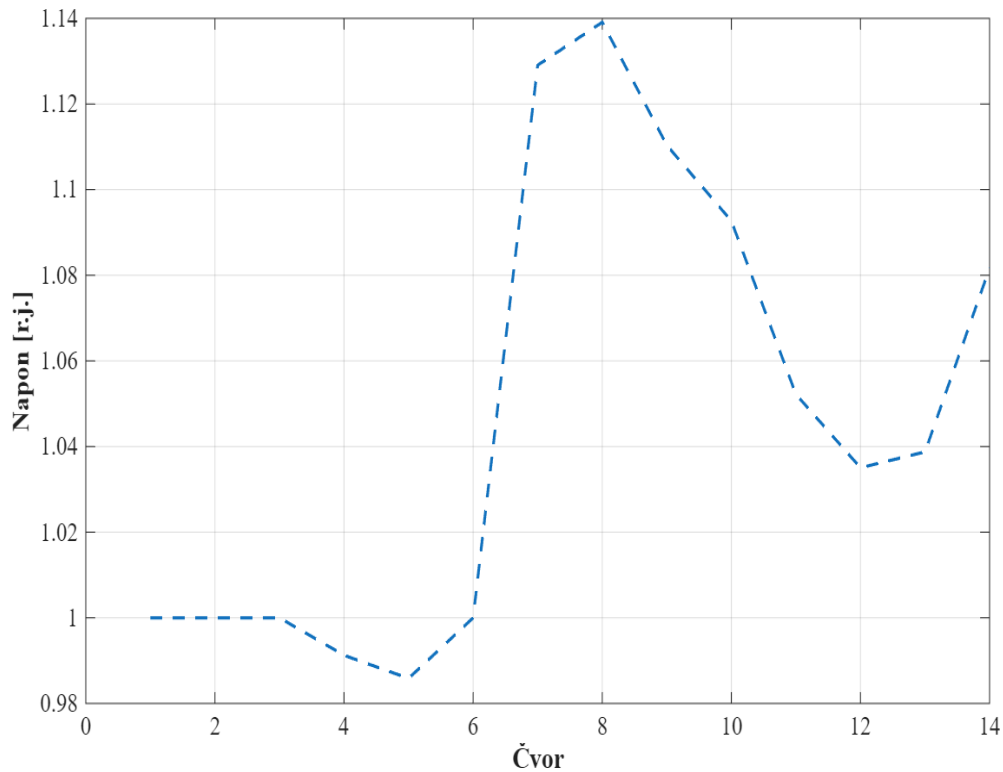
U cilju izvođenja pouzdanih i preciznih zaključaka, u daljem tekstu sprovedena je detaljna analiza koja obuhvata integraciju jednog šant reaktora na scenariju broj 1 iz Tabele 5. Ovaj scenario karakteriše najveća vrijednost maksimalnog napona u mreži, pa kao takav najbolje oslikava uticaj priključenja regulacionog uređaja.



Slika 11. Prikaz Pareto fronta i Kalai – Smorodinsky rješenja za slučaj priključenja jednog šant na testnom IEEE - 14 čvorom sistemu

Kako se može uočiti iz Tabele 4. analizirani scenario prije ugradnje šant reaktora obuhvata tri strukturne promjene koje direktno utiču na naponske prilike, tokove aktivnih i reaktivnih snaga i ukupne gubitke u mreži. Ispad petog generatora u mreži, isključenje prenosnih vodova 4-7 i 6-13 i djelimični porast opterećenja, uz povećanu vrijednost susceptansa grana, doveo je do povećanja napona u svim potrošačkim čvorovima. Sa Slike 12. koja prikazuje vrijednosti napona prije ugradnje šant reaktora u testnom IEEE-14 čvorom sistemu, jasno se uočavaju povećane naponske prilike u čvorovima 7, 8 i 9. Ovi čvorovi prelaze dozvoljenu vrijednost napona od 1,1 r.j. što direktno signalizira potrebu za ugradnjom regulacionog uređaja.

Instalacijom šant reaktora u čvoru 8, čija snaga apsorpcije reaktivne snage iznosi 20 MVar, došlo je do značajnih padova napona duž potrošačkih čvorova sistema. Kako se može primijetiti sa Slike 13. dodavanje induktivnog elementa u sistemu, izazvalo je stabilizaciju naponskog profila i eliminisalo povećane vrijednosti napona u kritičnim čvorovima. Najveći pad napona, od skoro 10,5 % očekivano bilježi čvor priključenja šant reaktora. Prije ugradnje regulacionog uređaja, čvor 8 je bilježio vrijednost napona 1,1391 r.j., što je jasno ukazivalo na višak kapacitivne reaktivne snage u lokalnoj zoni mreže. Ovako povećana vrijednost napona predstavljala je potencijalni rizik za opremu i sigurnost sistema, pa je neophodno bilo sistem vratiti u normalno pogonsko stanje.

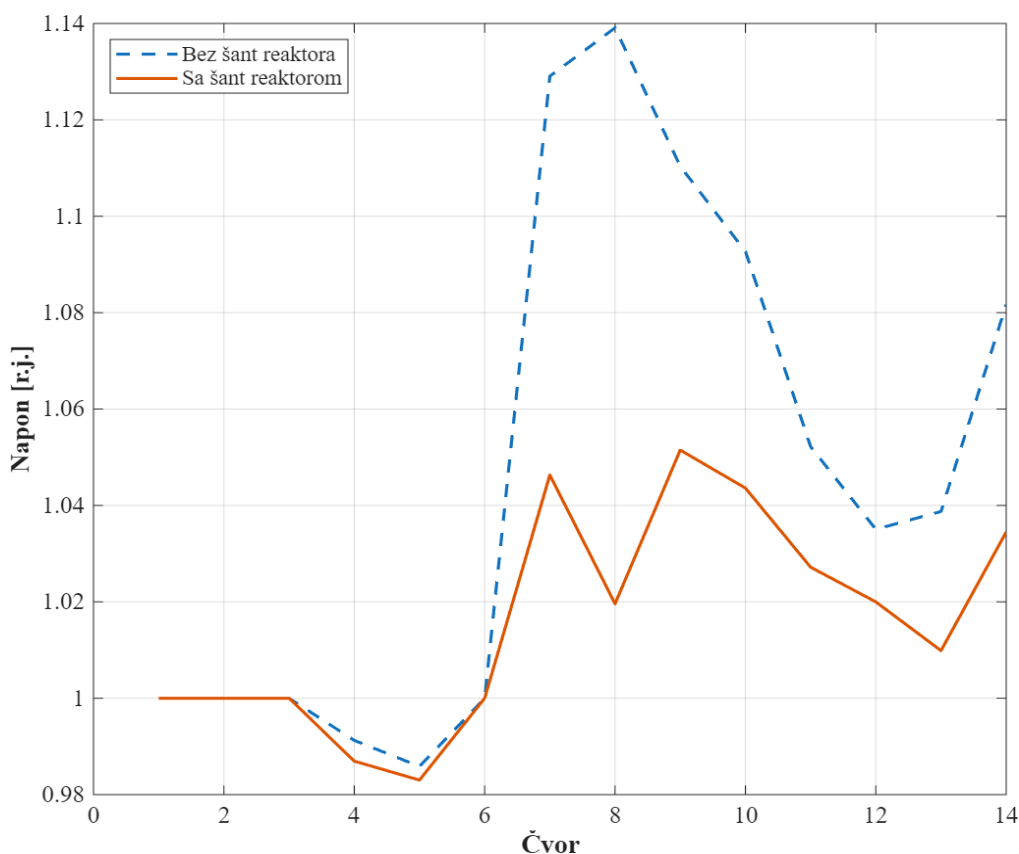


Slika 12. Naponski profil testnog IEEE -14 čvornog sistema kod scenarija broj 1

Ugradnjom reaktora, napon na sabirnici 8 se smanjio na 1,0196 r.j., što je povoljno uticalo na normalizaciju napona kako u pomenutom čvoru, tako i u okolnim kritičnim čvorovima 7 i 9. Ova dva čvora bilježe padove od 7,33% i 5,3% respektivno. Radijalna povezanost mreže, uslovlila je osjetan pad i u čvorovima povezanim sa sabirnicom 9, gdje se dejstvo reaktora osjeća posredno. Naime, potrošački čvorovi 10 i 14 doživljavaju osjetne padove od 4,49 % i 4,36%, što direktno utiče na bolju pouzdanost i stabilnost mreže. Normalizacija naponskog profila i na perifernom čvoru 14, ukazuje da reaktor u 8 povoljno utiče na regulaciju napona i na udaljenim krajnjim čvorovima sistema.

Osim toga, čvor 11, koji je istovremeno povezan sa generatorskim čvorom 6, uslijed smanjenih reaktivnih tokova, uspijeva da obezbijedi smanjenje napona sa 1,0522 r.j. na 1,0272 r.j. Shodno tome, naponi udaljenih potrošačkih sabirnica 12 i 13 takođe podliježu uticaju induktivnog uređaja, što dovodi do malih ali značajnih promjena od 1,46 % i 2,78 %.

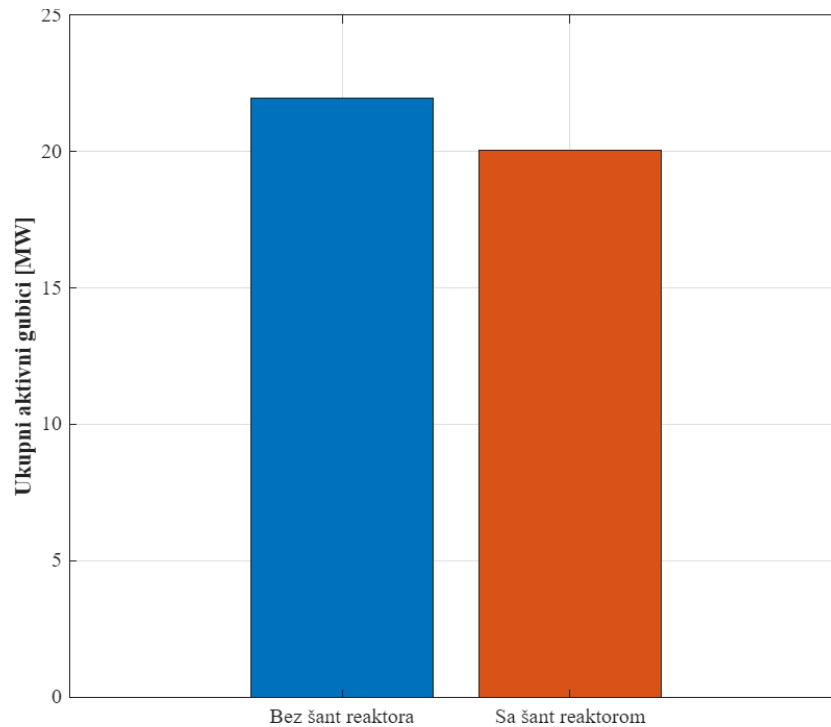
Zona koja obuhvata sabirnice 4 i 5 rezultirala je minimalnim padovima napona, koji su posljedica obimnije naponske krutosti čvorova i veće električne udaljenosti od mjesta instalacije reaktora. Stoga, naponske korekcije u ovim čvorovima rezultiraju padom od 0,43 % u 4, odnosno 0,28 % u 5.



Slika 13. Naponski profil testnog IEEE -14 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora u čvoru 8

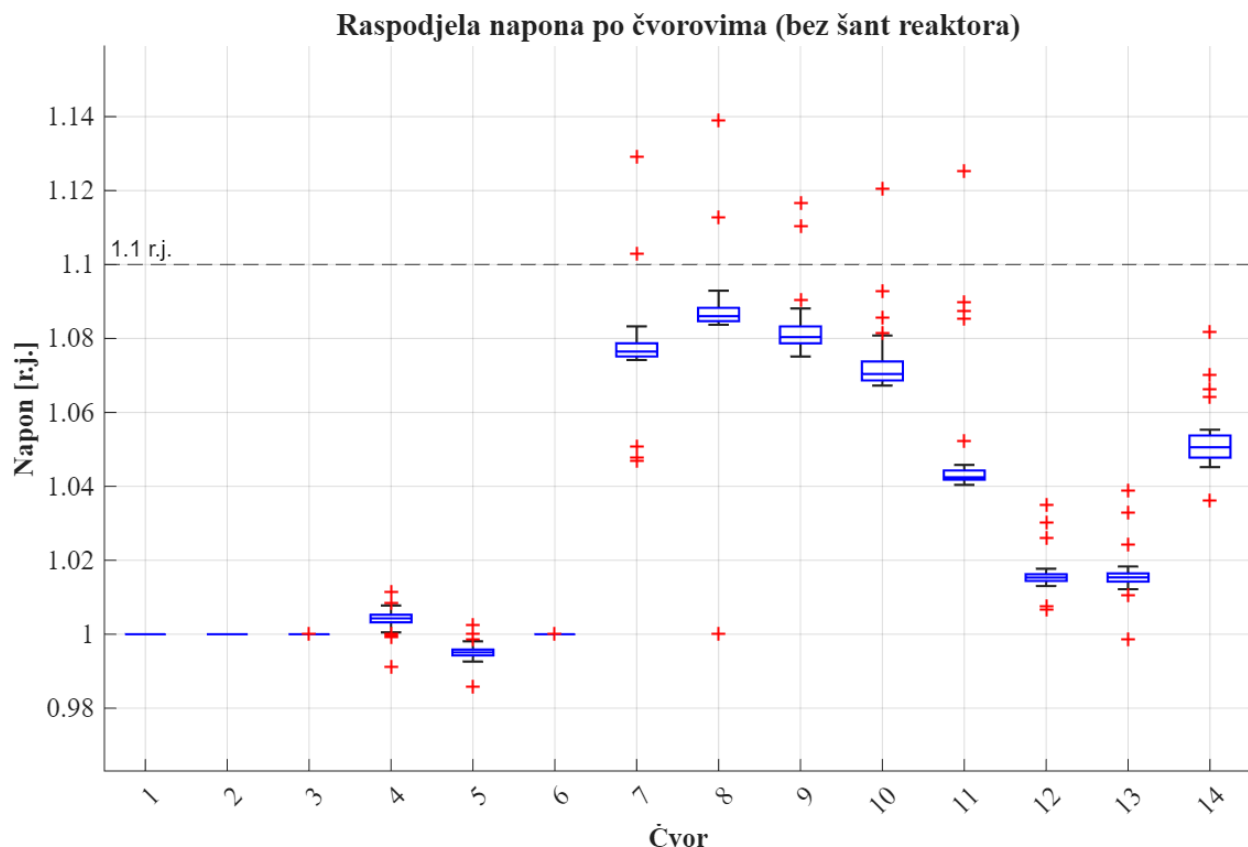
Rezultati sprovedene analize jasno pokazuju da se integracijom šant reaktora u čvoru 8 može ostvariti naponska stabilnost duž čitave mreže i obezbijediti efikasnost i sigurnost sistemskih elemenata. Dakle, može se zaključiti da induktivni element, koji je prethodno optimalno lociran i dimenzionisan, predstavlja idealno rješenje za probleme koji izazivaju opasna stanja, koja mogu uticati na povećanje napona u čvorovima.

Pored pozitivnog dejstva na normalizaciju naponskih prilika, šant reaktori pozitivno utiču i na smanjenje ukupnih aktivnih gubitaka. Ako se uzme u obzir da je prije ugradnje regulacionog uređaja, sistem bio dominantno kapacitivnog karaktera, sa izraženim naponskim vrijednostima i viškovima reaktivne snage u zoni potrošačkih čvorova, jasno je da se integracijom reaktora značajno uticalo na smanjenje reaktivnih tokova duž grana sistema. Odnosno, sistem je suočen sa smanjenom vrijednošću reaktivne komponente struje, što direktno utiče na smanjenje ukupnih aktivnih gubitaka. Shodno tome, rezultati prikazani na Slici 14. pokazuju da se u konkretnom slučaju ukupni aktivni gubici nakon ugradnje šant reaktora smanjuju sa 21,9674 MW na 20,0295 MW, što predstavlja relativno smanjenje od 8,82%. To potvrđuje činjenicu da pravilno dimenzionisan šant uređaj istovremeno može pružiti pozitivne efekte na stabilizaciju naponskog profila i smanjenje ukupnih aktivnih gubitaka.



Slika 14. Ukupni aktivni gubici testnog IEEE -14 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora

Međutim, analiziranje samo jednog scenarija nije dovoljno adekvatno da pokaže pouzdanost i efikasnost kod ugradnje kompenzacionog uređaja koji apsorbira reaktivnu snagu. Upravo zato u cilju sveobuhvatnije analize i realnijeg prikaza stanja mreže, u ovom master radu predstavljena je detaljna statistička obrada podataka koja na jednostavan način oslikava i vizuelno poredi naponske profile čvorova za svih 50 scenarija iz Tabele 5. Na taj način, jasno se mogu uočiti efekti ugradnje šant reaktora, bez obzira na scenario u kome se sistem nalazi.

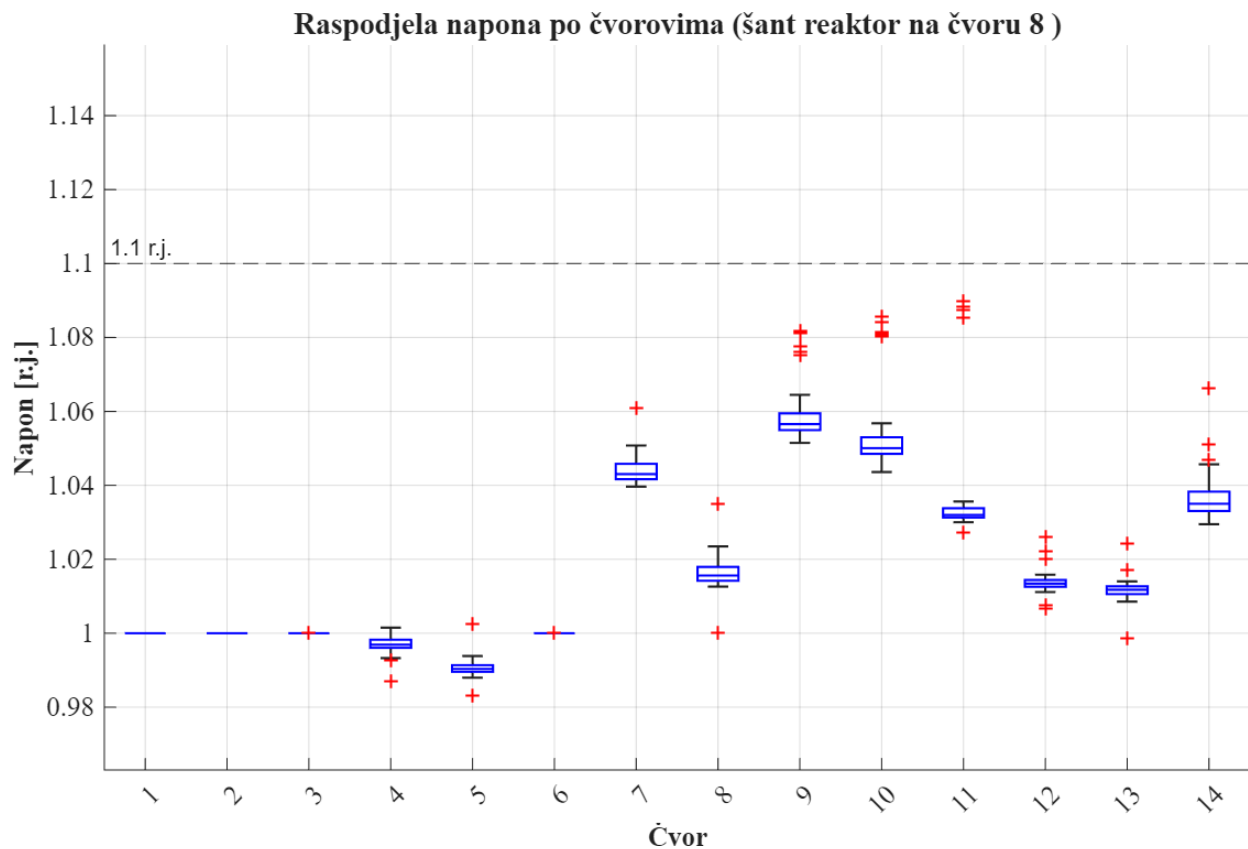


Slika 15. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -14 čvornom sistemu bez šant reaktora

Na Slici 15. prikazana je statistička raspodjela napona u čvorovima za svih 50 scenarija iz Tabele 5. prije ugradnje šant reaktora. Pravougaone kutije (box-ovi) pokazuju srednjih 50% vrijednosti napona u posmatranim čvorovima kroz 50 scenarija. Naime, donja ivica box-a čini tačku ispod koje je pozicionirano 25% podataka, dok je gornja ivica box-a granica iznad koje je smješteno još 25% informacija. Visina box-a daje jasnu preglednost varijabilnosti napona u posmatranom čvoru tokom scenarija. Drugim riječima, veći box znači i veće naponske promjene, dok manji simbolizuje ujednačenije vrijednosti istih. Linija, locirana u sredini posmatranih box-ova predstavlja medijan, odnosno najrobusniji pokazatelj tipičnog nivoa napona. Crveni plusevi, smješteni izvan granica posmatranih kutija označavaju vrijednosti napona u rijetkim scenarijima koji ukazuju na ekstremno važne slučajeve opasne po stabilnost sistema. Sa druge strane, crne vertikalne linije, smještene izvan domena kutija predstavljaju dozvoljeni opseg odstupanja od granica box-a definisan Tukeyjevim pravilom, dok male horizontale na krajevima tih linija označavaju pragove dopuštenih vrijednosti.

Naime, rezultati prikazani na Slici 15. pokazuju da sistem bez integrisanih šant reaktora nije u mogućnosti da se izbori sa povećanim naponima koji se javljaju u pojedinim scenarijima. Zonu koja obuhvata potrošačke čvorove 7, 8, 9 i 10 karakterišu povišeni naponi, koji u pojedinim slučajevima prelaze dozvoljenu vrijednost odstupanja od 1,1. r.j. Shodno tome, u sistemu se javljaju visoke naponske vrijednosti koje mogu ugroziti stabilnost i negativno uticati na rad

opreme, pa se ugradnja lokalnih induktivnih elemenata može smatrati opravdanom, jer značajno doprinosi povećanoj sigurnosti i pouzdanijem radu mreže.

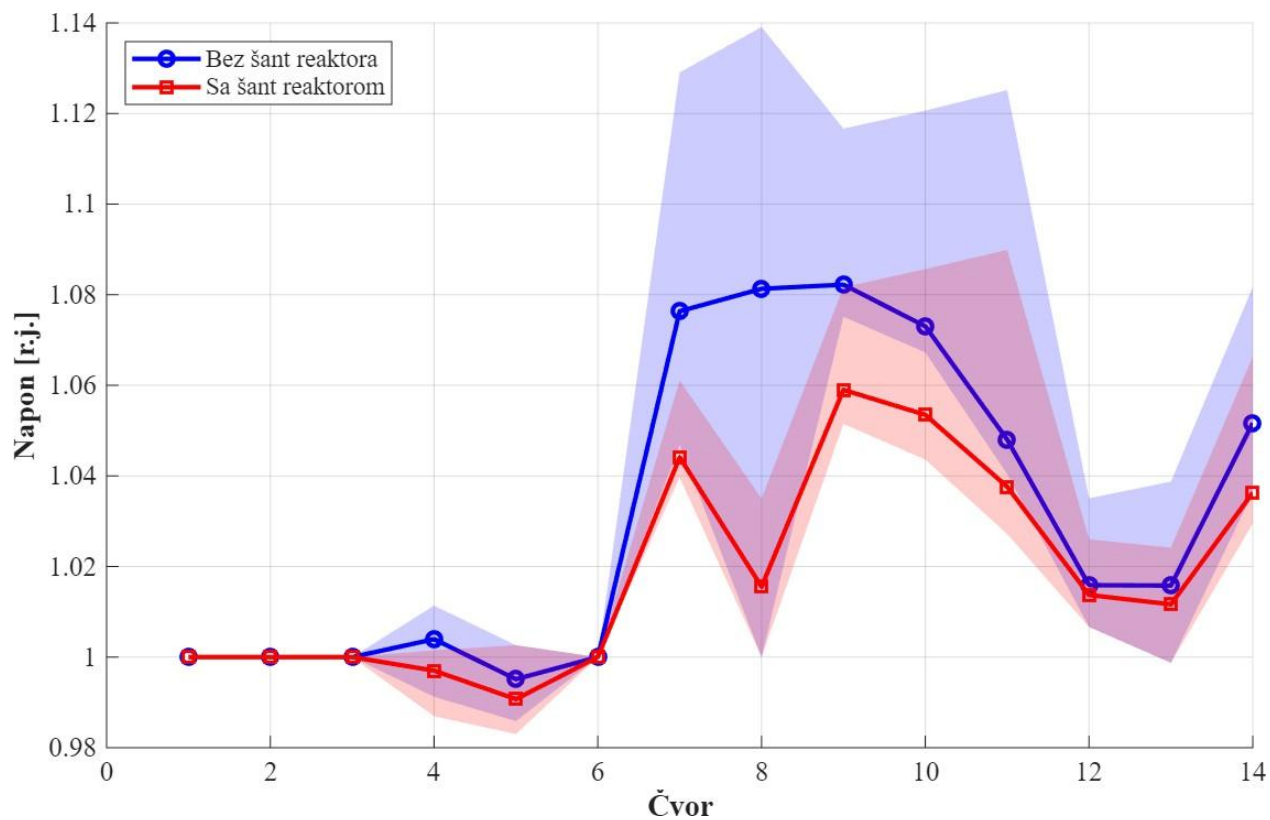


Slika 16. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -14 čvorovnom sistemu sa šant reaktorom

Ugradnja šant reaktora, snage 20 MVAR u čvoru 8 dovodi do smanjenja naponskih odstupanja u velikom broju čvorova, naročito u zoni koja obuhvata čvor priključenja regulacionog uređaja, i njemu bliske potrošačke čvorove. Rezultati pokazuju da se ugradnjom jednog reaktora, koji je prethodno optimalno lociran, postiže izražen stepen naponske sigurnosti u poređenju sa slučajem prije instalacije istog. Kako se uočava sa Slike 16. nakon ugradnje induktivnog elementa značajno se smanjuju varijacije i broj ekstremnih vrijednosti napona, naročito u čvorovima 7, 8, 9 i 10.

Slika 17. prikazuje promjenu medijana napona po čvorovima kroz svih 50 karakterističnih scenarija, prije i nakon ugradnje šant reaktora. Očekivano, najveći pad medijane napona zabilježen je kod čvora 8 (6,48%), gdje reaktor lokalno apsorbuje višak reaktivne snage. Ostali potrošački čvorovi, takođe ostvaruju djelimičan pad, ali zbog prostornog uticaja i električne blizine, efekat je dominantno izražen u čvorovima 7 (3,1%) i 9 (2,20%). Zbog prirode čvorova, naponi u balansnom (1) i generatorskim čvorovima (2, 3, 6) ostaju nepromijenjeni.

Osim uspješne minimizacije naponskih odstupanja u čvorovima sistema, koja je ujedno i prva kriterijumska funkcija na kojoj počiva ovaj master rad, može se zaključiti da je uspješno ostvaren i drugi kriterijum optimizacije – minimizacija troškova ugradnje šant reaktora, jer se uz relativno pristojne troškove sistem može sačuvati od neželjenih stanja.



Slika 17. Promjena medijane napona po čvorovima u IEEE -14 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora

Zbog jasnijeg pregleda rezultata, u Tabeli 6. su dati numerički rezultati medijane napona po čvorovima prije i nakon ugradnje regulacionih uređaja.

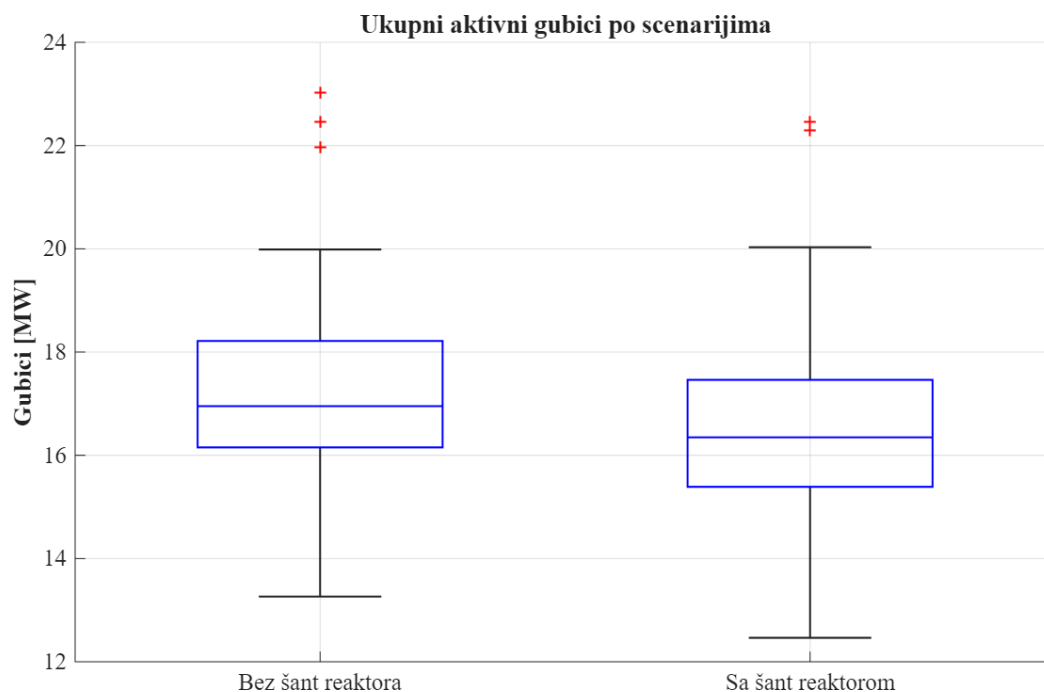
Tabela 6. Vrijednosti medijana napona testnog IEEE – 14 čvornog sistema po čvorovima prije i nakon ugradnje šant reaktora

| Čvor | Medijan napona prije priključenja šant reaktora [r.j.] | Medijan poslije priključenja reaktora [r.j.] | Δ Med [r.j.] |
|------|--|--|---------------------|
| 1 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 2 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 3 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 4 | 1.0043 | 0.9969 | -0.0074 |
| 5 | 0.9951 | 0.9904 | 0.0047 |
| 6 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 7 | 1.0765 | 1.0430 | -0.0334 |
| 8 | 1.0860 | 1.0156 | -0.0704 |
| 9 | 1.0804 | 1.0566 | -0.0238 |
| 10 | 1.0704 | 1.051 | -0.0203 |

| | | | |
|----|--------|--------|---------|
| 11 | 1.0425 | 1.0320 | -0.0105 |
| 12 | 1.0153 | 1.0134 | -0.0019 |
| 13 | 1.0154 | 1.0118 | -0.0036 |
| 14 | 1.0506 | 1.0350 | -0.0156 |

Pored primarnog fokusa koji je stavljen na naponsku stabilnost mreže, ovaj rad uključuje i analizu ukupnih aktivnih gubitaka prije i nakon dodavanja induktivnog uređaja kroz svih 50 posmatranih scenarija.

Uporednim posmatranjem oba slučaja prikazana na Slici 18. zaključuje se da integracijom šant reaktora dolazi do smanjenja ukupnih aktivnih gubitaka u sistemu, što dodatno utiče na poboljšanje energetske efikasnosti i pouzdanosti sistema. Naime, smanjenjem srednje vrijednosti aktivnih gubitaka sa 17,2315 MW na 16,5173 MW ostvaruje se značajan tehnički i ekonomski efekat i obezbjeđuje dugoročan rad sistema.



Slika 18. Statistička raspodjela ukupnih aktivnih gubitaka u IEEE – 14 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora u čvoru 8

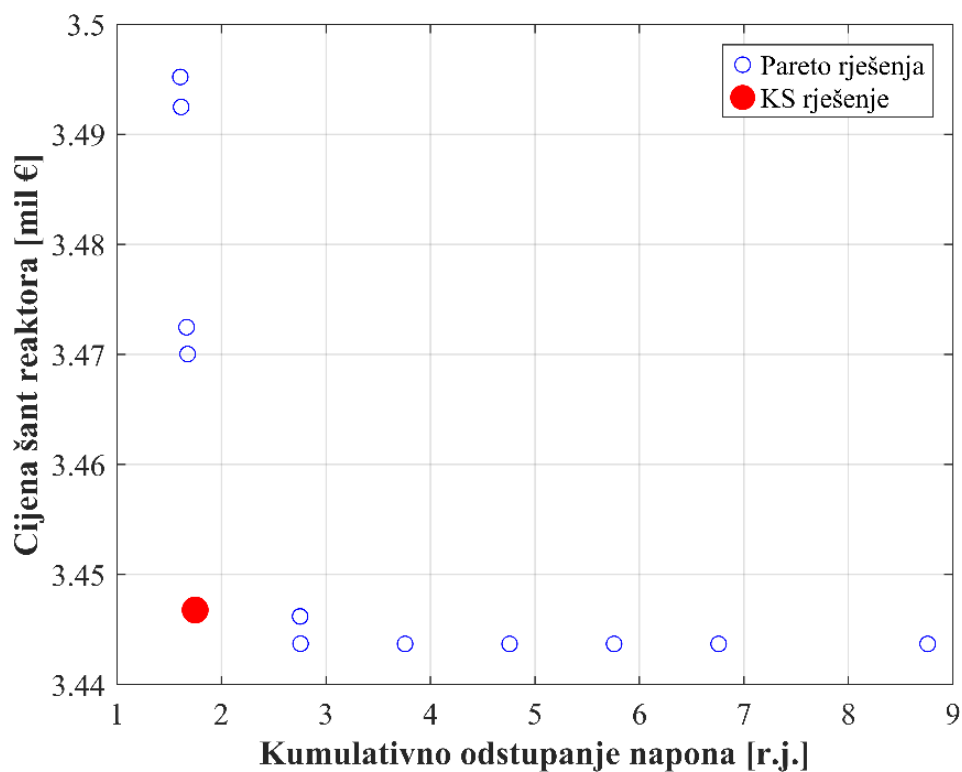
4.4.2 Analiza priključenja dva šant reaktora na testnom IEEE 30 čvornom sistemu

Sličnim postupkom kao i kod mreže sa 14 čvorova, formiran je niz od 50 scenarija koji obuhvataju različite pogonske uslove analiziranog IEEE – 30 čvornog sistema. Radi dobijanja preciznijih rezultata i u ovom slučaju naponske vrijednosti generatorskih čvorova postavljene su na 1,0 r.j., dok su susceptanse grana uvećane za 0,075.

Tabela 7. Prikaz karakterističnih 50 scenarija za IEEE - 30 čvorni sistem

| Broj scenarija: | Isključene grane: | Isključeni generatori: | Potrošnja [MW]: |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1 | / | 4 | 181.8600414 |
| 2 | / | 4 | 182.5899657 |
| 3 | 9 - 10 | 4 | 184.4430049 |
| 4 | / | 4 | 182.8697146 |
| 5 | / | 4 | 184.0490768 |
| 6 | / | 4 | 186.4656931 |
| 7 | / | 4 | 185.0954938 |
| 8 | / | 4 | 195.2901697 |
| 9 | / | 4 | 191.5709583 |
| 10 | / | 4 | 199.5118015 |
| 11 | / | 4 | 187.3886384 |
| 12 | / | 4 | 179.2973107 |
| 13 | / | 4 | 190.8375005 |
| 14 | / | 4 | 189.9179792 |
| 15 | / | 4 | 186.0073461 |
| 16 | / | 4 | 186.7988324 |
| 17 | / | 4 | 184.6575998 |
| 18 | 10 - 17 | 4 | 187.6991042 |
| 19 | / | 4 | 190.7382388 |
| 20 | / | 4 | 191.3622109 |
| 21 | / | 4 | 186.8684048 |
| 22 | / | 4 | 183.2223807 |
| 23 | / | 4 | 190.8604741 |
| 24 | / | 4 | 191.5979097 |
| 25 | / | 4 | 186.0388185 |
| 26 | / | 4, 6 | 187.344943 |
| 27 | / | 4 | 184.8953082 |
| 28 | 5 - 7 | 4 | 193.3848903 |
| 29 | / | 4 | 191.4772403 |
| 30 | / | 4 | 184.7980101 |
| 31 | / | 4 | 179.4717937 |
| 32 | / | 4 | 184.5550304 |
| 33 | / | 4 | 200.2782978 |
| 34 | / | 4 | 195.2355945 |
| 35 | / | 4 | 188.1920653 |

| | | | |
|----|---------|---|-------------|
| 36 | / | 4 | 189.0929943 |
| 37 | / | 4 | 181.3585262 |
| 38 | / | 4 | 190.2057792 |
| 39 | / | 4 | 187.0822175 |
| 40 | / | 4 | 194.6846198 |
| 41 | / | 4 | 194.8688703 |
| 42 | / | 4 | 186.4150359 |
| 43 | / | 4 | 186.8352361 |
| 44 | / | 4 | 189.4453192 |
| 45 | / | 4 | 187.2281719 |
| 46 | 21 - 22 | 4 | 190.420253 |
| 47 | 21 - 22 | 4 | 180.7031793 |
| 48 | / | 4 | 181.3693639 |
| 49 | / | 4 | 194.3388095 |
| 50 | / | 4 | 195.6115117 |



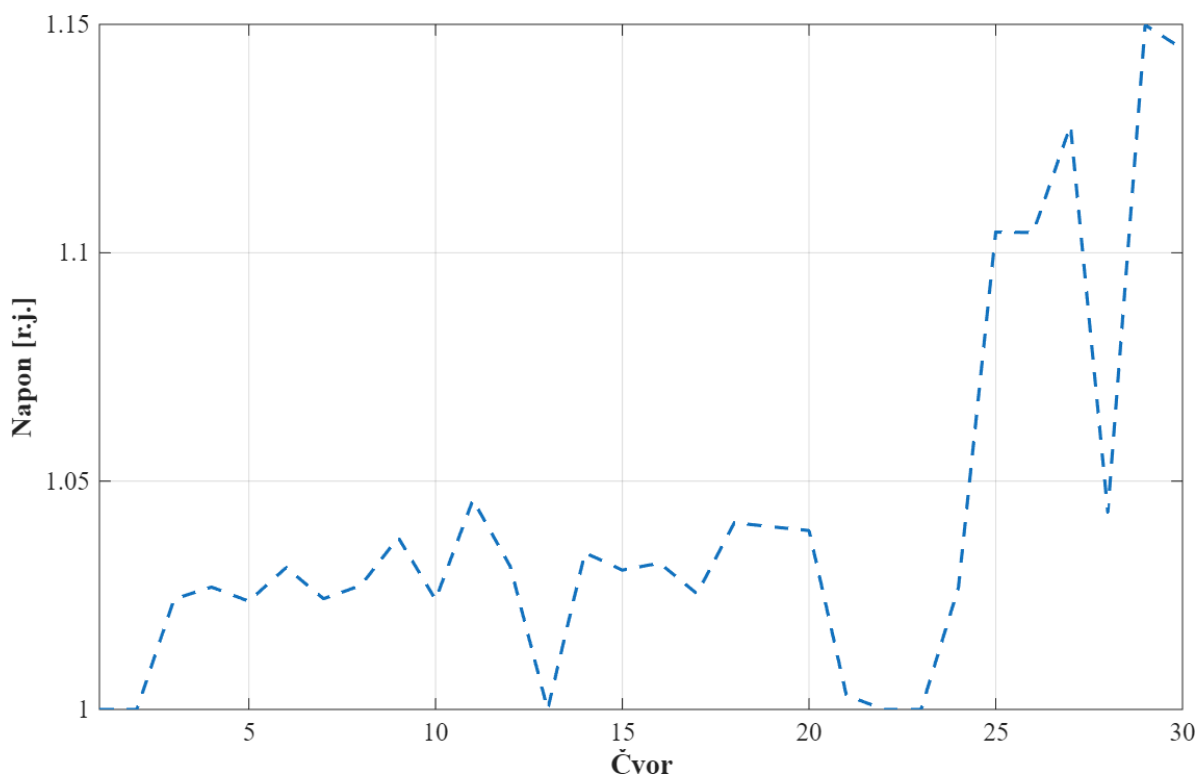
Slika 19. Prikaz Pareto fronta i Kalai – Smorodinsky rješenja za slučaj priključenja dva šant reaktora na testnom IEEE - 30 čvornom sistemu

Nakon formiranja scenarija, započinje postupak optimizacije. Za razliku od prethodnog slučaja, gdje je kao regulacioni uređaj korišćen jedan šant reaktor, za sistem od 30 čvorova uzeta su u obzir dva takva induktivna elementa. Lokacije i snage predloženih šant reaktora optimizovane

su uz pomoć NSGA-II algoritma, nakon čega je primjenom Kalai – Smorodinsky metode odabrano najbolje rješenje. Dobijeni rezultati optimizacije, signaliziraju postizanje najboljih performansi sistema u slučaju ugradnje reaktora u čvorovima 29 i 30, čije snage apsorpcije respektivno iznose 10 MVAR i 20 MVAR. Za instalaciju ovih uređaja, neophodno je izdvojiti sredstva u vrijednosti od 3,4468 miliona €, dok je kumulativno odstupanje napona 1,7499 r.j.

Slično kao u prethodnom potpoglavlju, radi jasnije analize i donošenja sveobuhvatnijih zaključaka, u nastavku rada prvo je analiziran najkritičniji scenario iz Tabele 7. označen brojem 1.

Ovaj scenario obuhvata smanjenje opterećenja uz istovremeni ispad četvrtog generatora u sistemu. Smanjenjem ukupnog opterećenja, dolazi do smanjene potrošnje reaktivne snage, što se manifestuje direktnim porastom naponskih vrijednosti u potrošačkim čvorovima. Naime, u konkretnom slučaju, najveći uticaj na naponski profil ostvaruju čvorovi locirani na periferiji sistema, gdje, usljed dugih i slabo opterećenih vodova dolazi do takozvanog Ferantijevog efekta. Osim toga, ispad četvrtog generatora dodatno pogoršava naponsku stabilnost, prilikom čega sistem gubi dio svojih regulacionih sposobnosti, pa pojedini čvorovi imaju tendenciju da se u njima pojave povišeni naponi. Stoga, ugradnjom šant reaktora adekvatnih snaga na optimalno lociranim čvorovima, omogućava se pravilno planiranje, održavanje i očuvanje sigurnog pogonskog režima.



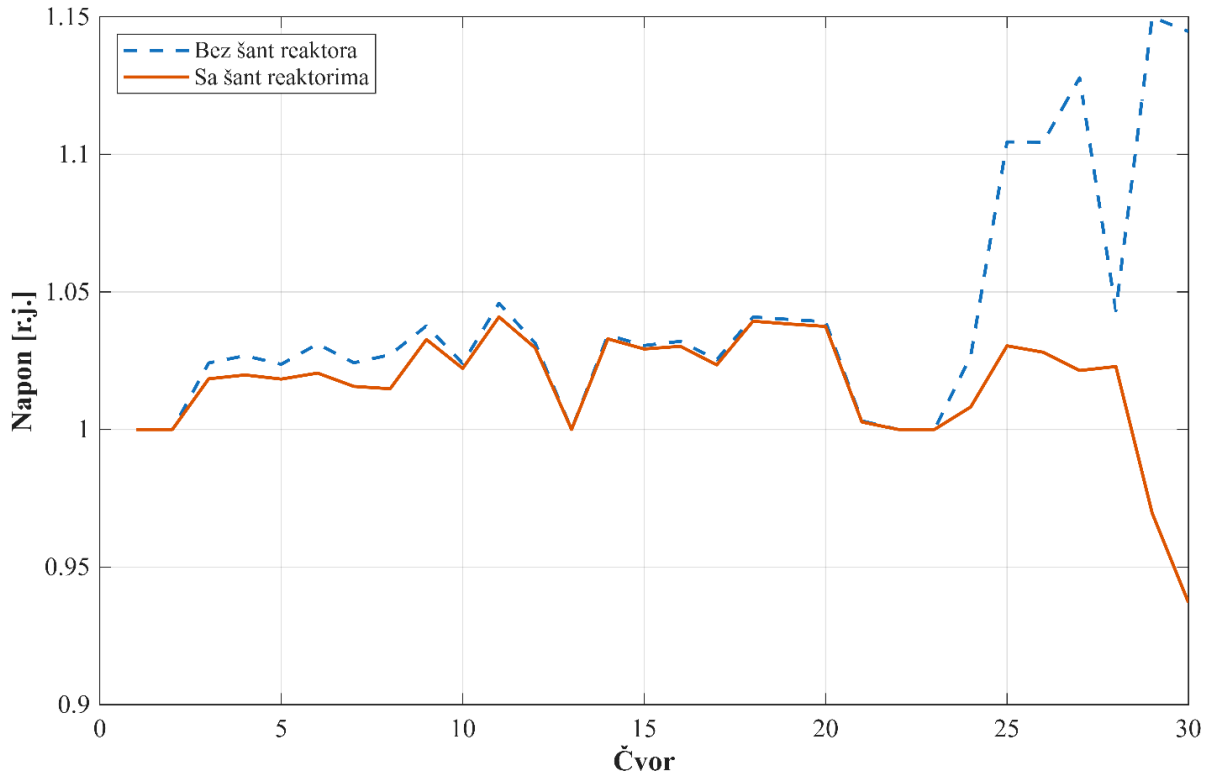
Slika 20. Naponski profil testnog IEEE -30 čvornog sistema kod scenarija broj 1

Slika 21. prikazuje naponski profil IEEE - 30 čvornog sistema, opisanog u scenariju 1, prije i nakon ugradnje dva šant reaktora, snage 10 MVAR i 20 MVAR u čvorovima 29 i 30. Kako se može primijetiti, prije priključenja reaktora, naponi u krajnjim čvorovima sistema zabilježili su značajan rast. Dakle, potrošački čvorovi 25, 26, 27, 29 i 30 prelaze vrijednosti dozvoljenog odstupanja napona, što direktno signalizira pojavu nedozvoljenih radnih režima. Integracijom dva

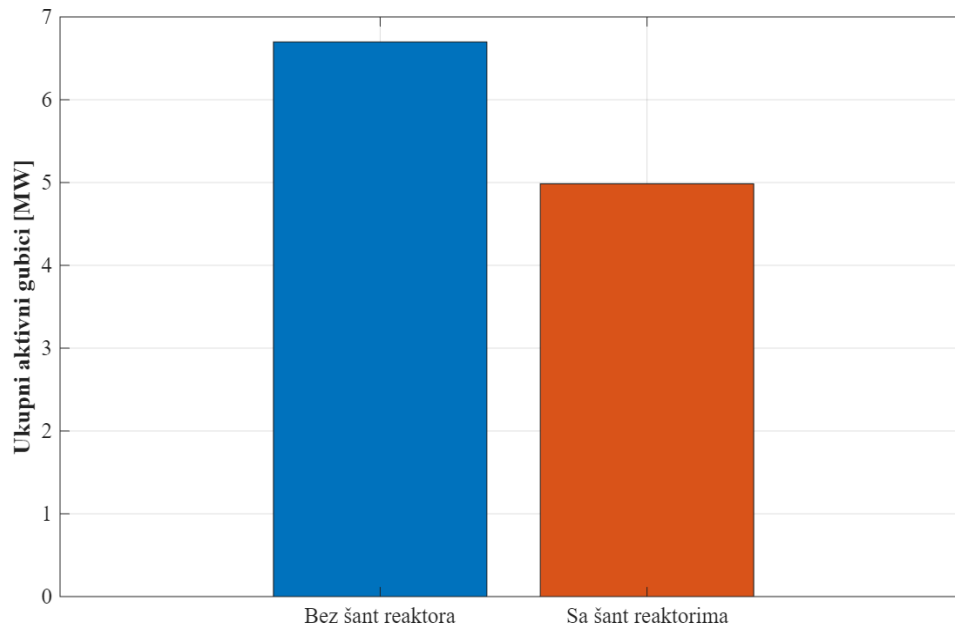
šant reaktora na sabirnicama 29 i 30, sistem normalizuje naponske prilike duž mreže i omogućava siguran rad i u karakterističnim pogonskim uslovima.

Naime, najizraženiji pad napona dešava se u čvorovima priključenja regulacionih uređaja. Očekivano, najveća promjena od čak 18,12 % ostvarena je u čvoru 30, dok je nešto skromniji, ali itekako osjetan pad registrovan u drugom čvoru priključenja 29. Ove naponske razlike javljaju se kao rezultat uticaja visoke apsorpcije reaktivne snage koja direktno utiče na smanjenje napona u priključnim i njima incidentnim potrošačkim čvorovima 25, 26, 27. Sa druge strane, vrijednosti napona na ostalim sabirnicama bivaju izložene minimalnim korekcijama, koje nemaju veliki značaj za ponašanje sistema. Drugim riječima, sistem je uspješno postigao lokalnu korekciju napona, bez narušavanja globalne stabilnosti.

Analitički posmatrano, ugradnjom optimalnih induktivnih elemenata koji kompenzuju viškove kapacitivne komponente reaktivne snage, omogućava se uspješno postizanje tehničkih zahtjeva orijentisanih ka naponskoj stabilnosti i ekonomskih ciljeva usmjerenih ka minimizaciji investicionih ulaganja.



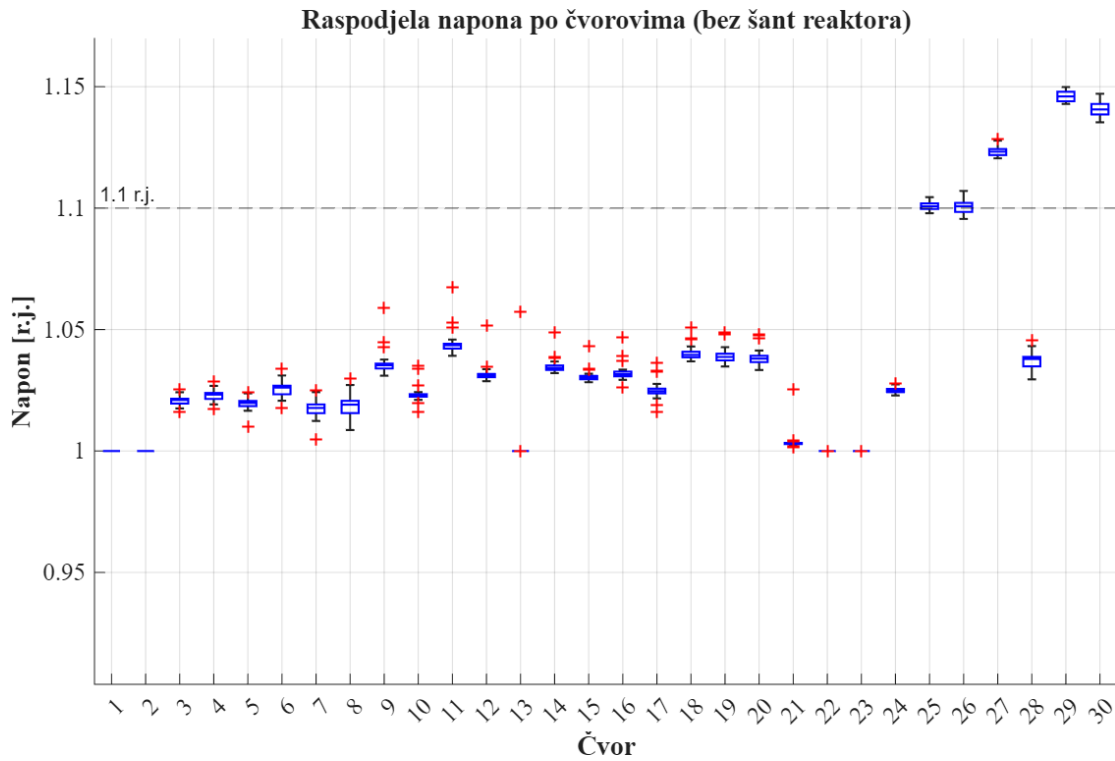
Slika 21. Naponski profil testnog IEEE -30 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora u čvorovima 29 i 30



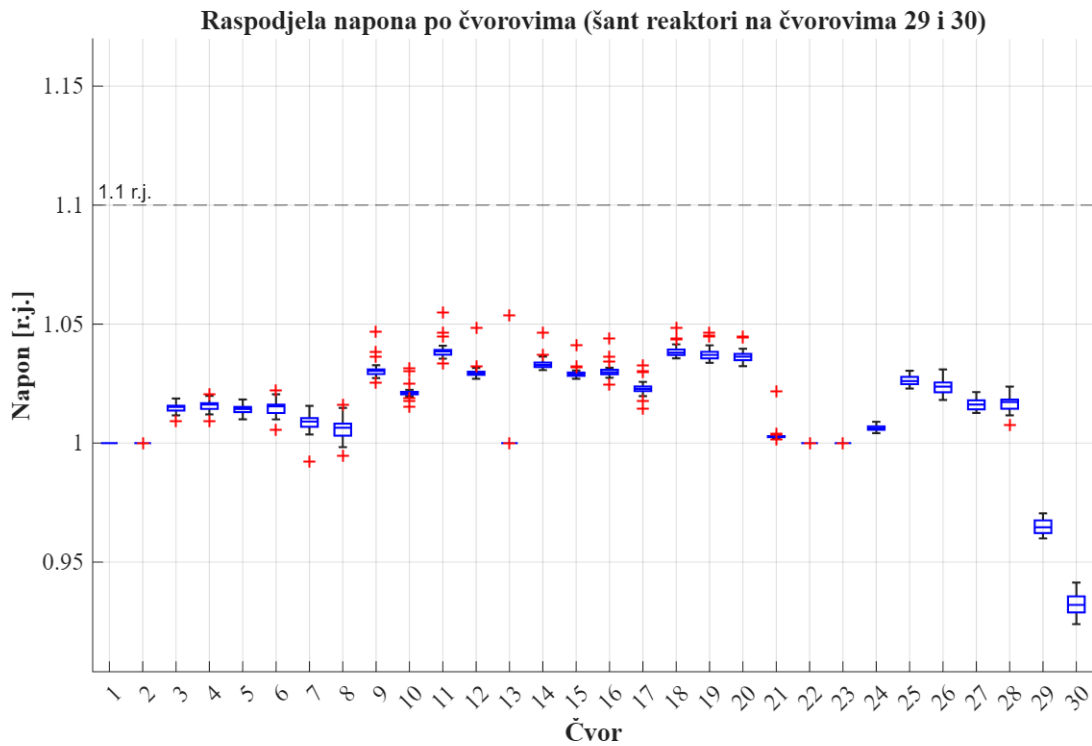
Slika 22. Ukupni aktivni gubici testnog IEEE - 30 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora

Pored naponskog profila, važan pokazatelj efikasnosti i ispravnosti ugradnje šant reaktora predstavljaju ukupni gubici aktivne snage u mreži. Usljed protoka smanjenih tokova reaktivnih snaga, dolazi do smanjenja struja duž sistema, što ujedno znači i smanjenje aktivnih gubitaka. Slika 22. prikazuje promjene ukupnih aktivnih gubitaka prije i nakon ugradnje dva šant reaktora. Rezultati pokazuju značajan pad aktivnih gubitaka sa 6,6978 MW na 4,9846 MW, što procentualno čini razliku od čak 25,6%. Ovaj rezultat potvrđuje da pravilno locirani i dimenzionisani šant reaktori, pored eliminacije povišenih napona i normalizacije naponskog profila, pozitivno djeluju i na povećanje energetske efikasnosti sistema.

U nastavku rada, zbog donošenja opštih zaključaka o efikasnosti priključenja regulacionih uređaja, analiziran je naponski profil svih 30 čvorova prije i nakon ugradnje šant reaktora kroz 50 karakterističnih scenarija iz Tabele 9. Slika 23. prikazuje statističku raspodjelu napona, duž čvorova prije instalacije induktivnih uređaja. Posebnu pažnju privlače čvorovi 24, 25, 27, 29 i 30, kod kojih dolazi do značajnog porasta napona u određenim operativnim scenarijima. Vrijednosti medijana u tim čvorovima iznose od 1,1008 r.j. do čak 1,1460 r.j., što direktno upućuje na ozbiljna režimska stanja. Prelaskom granice dozvoljenih odstupanja od 1,1 r.j. sistem je doveden u stanje opasnosti, koje može negativno uticati na pouzdanost i stabilnost mreže, pritom stvarajući opasnost od oštećenja i sagorijevanja opreme.



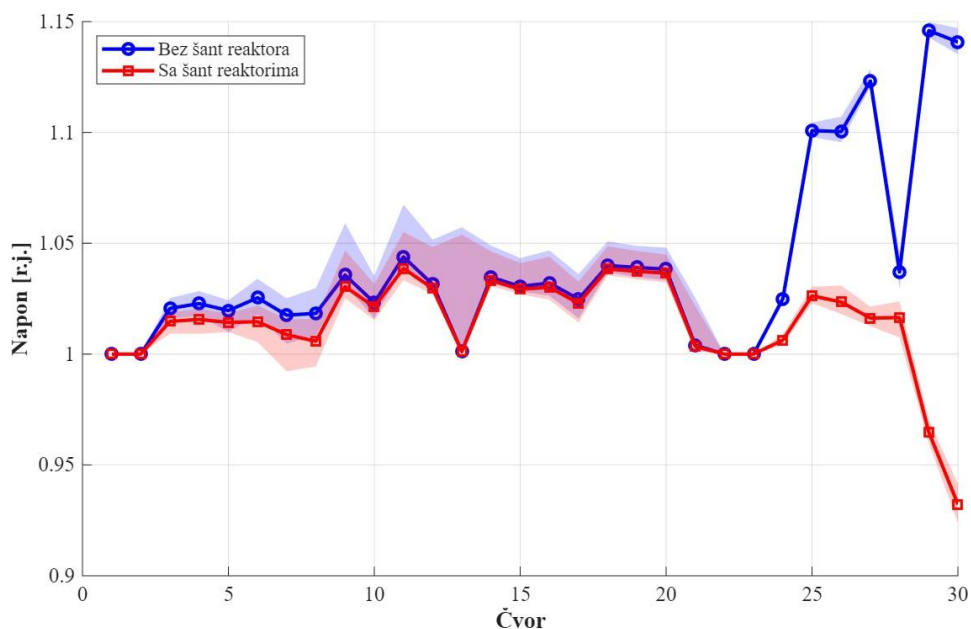
Slika 23. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -30 čvornom sistemu bez šant reaktora



Slika 24. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -30 čvornom sistemu sa šant reaktorom

Ugradnjom šant reaktora na čvorovima 29 i 30 došlo je do značajnih naponskih promjena uslovljenih apsorpcijom viškova reaktivne snage. Slika 24. prikazuje statističku raspodjelu napona nakon integracije reaktora za svih 50 scenarija. Evidentno je da je priključenje regulacionih uređaja pozitivno djelovalo na naponski profil kritičnih potrošačkih čvorova u svim posmatranim scenarijima. Očekivano, najveći pad bilježe upravo čvorovi gdje su priključeni šant reaktori. Na tim sabirnicama sistema, napon ni u jednom slučaju ne prelazi dozvoljenu vrijednost od 1,1 r.j., što govori o efikasnosti i ispravnosti ugradnje priključenih elemenata. Shodno tome, medijane napona u čvorovima 24, 25, 26, 27, 29 i 30 su osjetno manje i bilježe vrijednosti u rasponu od 0,9320 do 1,026 r.j. Takođe, bitno je naglasiti da minimalna odstupanja napona čvorova koji su električno udaljeni od čvorova priključenja, neće uticati na stabilnost sistema, jer se sve medijane nalaze u dozvoljenom opsegu između 0,9 r.j. i 1,1. r.j. To potvrđuje opravdanost i funkcionalnost ugradnje šant reaktora kao adekvatnog kompenzacionog sredstva za kontrolu i apsorpciju viškova reaktivne snage iz sistema.

Zbog preciznije i sveobuhvatnije analize slučaja, na Slici 25. prikazan je graf koji detaljno oslikava promjenu srednjih vrijednosti napona po čvorovima prije i nakon ugradnje reaktora. Najizraženiji učinak, očekivano je zabilježen na krajnjim čvorovima sistema, koji su u varijanti bez šant reaktora dostigli značajno veće naponske vrijednosti od dozvoljenih. Konkretno, medijana napona u čvoru 30 opada sa 1,1406 r.j. na 0,9320 r.j. što ujedno predstavlja i najveću naponsku promjenu, koja potvrđuje efikasnost lokalnog apsorbovanja reaktivne snage priključnih elemenata. Pored toga, globalna stabilnost sistema je sačuvana, jer šant reaktori nijesu doprinijeli značajnijem smanjenju napona u ostalim potrošačkim čvorovima koji bi mogli dovesti do neželjenih režimskih stanja. Takođe, uporednom analizom naponskih profila ova dva slučaja, može se konstantovati značajno smanjenje maksimalne vrijednosti medijane, čime se postiže ravnomjerniji i stabilniji naponski profil duž cijelog sistema. Shodno tome, zaključuje se da ugradnja šant reaktora ima izražen pozitivan učinak na napone u čvorovima sistema, bez obzira na pogonske režime koji mogu nastati usljed kvarova, iznenadnih ispada ili promjena u opterećenju.



Slika 25. Promjena medijane napona po čvorovima u IEEE -30 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora

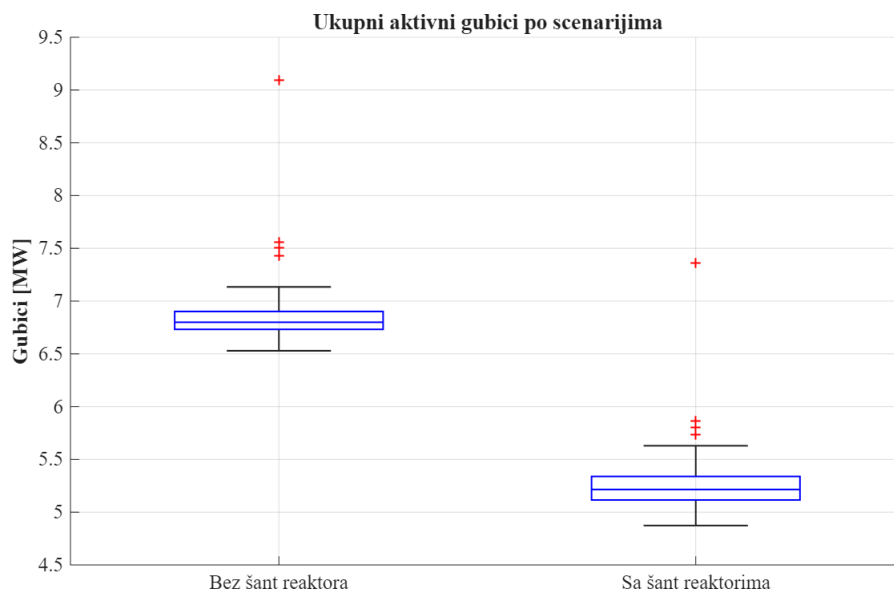
Zbog jasnijeg pregleda rezultata, u Tabeli 8. su dati numerički rezultati medijane napona po čvorovima prije i nakon ugradnje regulacionih uređaja.

Tabela 8. Vrijednosti medijana napona testnog IEEE – 30 čvornog sistema po čvorovima prije i nakon ugradnje šant reaktora

| Čvor | Medijan napona prije priključenja šant reaktora [r.j.] | Medijan poslije priključenja reaktora [r.j.] | ΔMed [r.j.] |
|-------------|---|---|--------------------------------------|
| 1 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 2 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 3 | 1.0210 | 1.0152 | -0.0058 |
| 4 | 1.0232 | 1.0162 | -0.0070 |
| 5 | 1.0198 | 1.0143 | -0.0054 |
| 6 | 1.0261 | 1.0154 | -0.0106 |
| 7 | 1.0177 | 1.0091 | -0.0086 |
| 8 | 1.0191 | 1.0065 | -0.0126 |
| 9 | 1.0353 | 1.0303 | -0.0050 |
| 10 | 1.0230 | 1.0212 | -0.0019 |
| 11 | 1.0435 | 1.0385 | -0.0050 |
| 12 | 1.0310 | 1.0293 | -0.0017 |
| 13 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 14 | 1.0342 | 1.0329 | -0.0014 |
| 15 | 1.0302 | 1.0290 | -0.0012 |
| 16 | 1.0316 | 1.0298 | -0.0018 |
| 17 | 1.0246 | 1.0228 | -0.0019 |
| 18 | 1.0396 | 1.0380 | -0.0015 |
| 19 | 1.0387 | 1.0370 | -0.0017 |
| 20 | 1.0380 | 1.0363 | -0.0017 |
| 21 | 1.0032 | 1.0028 | -0.0004 |
| 22 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 23 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 24 | 1.0248 | 1.0062 | -0.0187 |
| 25 | 1.1008 | 1.0260 | -0.0747 |
| 26 | 1.1008 | 1.0237 | -0.0770 |
| 27 | 1.1232 | 1.0162 | -0.1070 |
| 28 | 1.0379 | 1.0173 | -0.0206 |
| 29 | 1.1460 | 0.9646 | -0.1813 |
| 30 | 1.1406 | 0.9320 | -0.2086 |

Da integracija pomenutih uređaja pruža izrazito povoljan efekat i na smanjenje aktivnih gubitaka potvrđuje Slika 26. Naime, rezultati pokazuju da ugradnjom dva šant reaktora u sistemu sa 30 čvorova srednja vrijednost ukupnih gubitaka, posmatrana kroz svih 50 odabranih scenarija, opada sa 6,8984 MW sa 5,2857 MW. U kvantitativnom smislu, ostvareni pad napona i ukupnih

gubitaka upućuje na veću efikasnost i učinkovitost sistema manifestovanu kroz povoljniji ekonomski učinak i produžen vijek trajanja opreme.



Slika 26. Statistička raspodjela ukupnih aktivnih gubitaka u IEEE – 30 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora

4.4.3 Analiza priključenja tri šant reaktora na testnom IEEE - 118 čvornom sistemu

Sličnim postupkom kao i za sisteme sa 14 i 30 čvorova, za IEEE - 118 čvorni sistem formiran je niz od 50 kritičnih scenarija koji na najbolji način oslikavaju promjene sa kojima se sistem suočava. Analogno prošlim analizama, brojem 1 označen je scenario koji se pokazao kao najkritičniji po pitanju najveće vrijednosti maksimalnog napona. i u ovom slučaju napon generatorskih čvorova fiksiran je na 1,0 r.j., dok su susceptanse grana uvećane za 0,2.

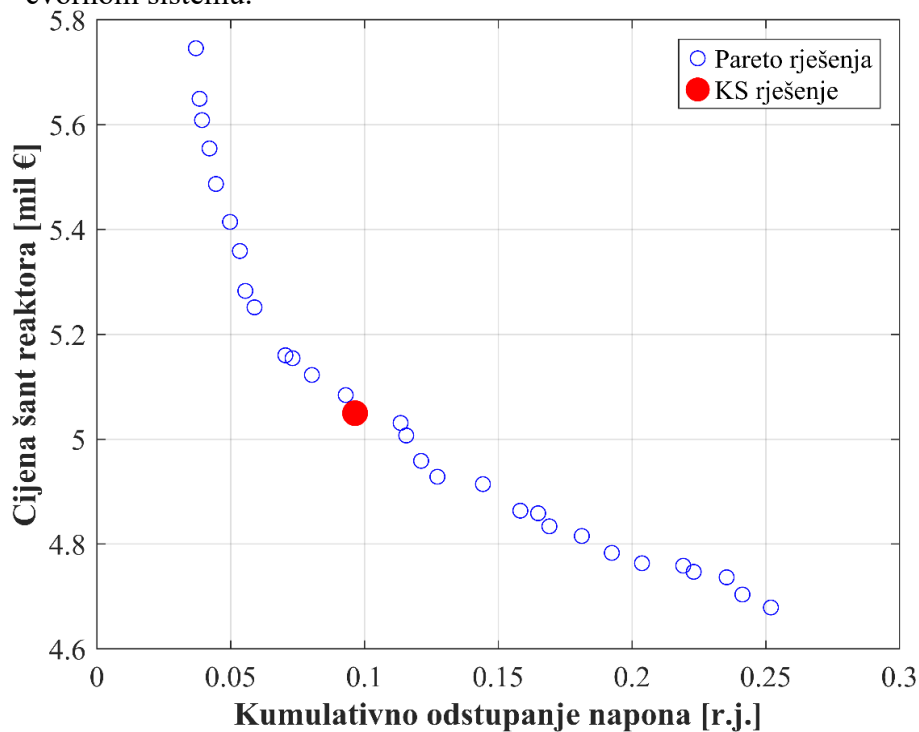
Tabela 9. Prikaz karakterističnih 50 scenarija za IEEE -118 čvorni sistem

| Broj scenarija: | Isključene grane : | Isključeni generatori : | Potrošnja [MW] : |
|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | 19 - 20 | 10, 42 | 4257.024634 |
| 2 | 19 - 20, 95 - 96 | 10 | 4263.406557 |
| 3 | 19 - 20, 34 - 37 | 10 | 4153.626228 |
| 4 | 19 - 20, 108 - 109 | 7 | 4191.853543 |
| 5 | 27 - 28, 49 - 51, 56 - 58 | / | 4276.800276 |
| 6 | 19 - 20, 70 - 71 | 17, 40 | 4176.629841 |
| 7 | 19 - 20, 23 - 32 | / | 4289.089871 |

| | | | |
|-----------|--|--------|-------------|
| 8 | 3 - 5, 19 - 20, 46 - 47, 24 - 72, 92 - 100 | / | 4196.457986 |
| 9 | 19 - 20, 26 - 25, 29 - 31, 65 - 66, 89 - 90, 94 - 95 | 42 | 4166.943352 |
| 10 | 19 - 20, 26 - 25, 69 - 75, 105 - 106 | 42 | 4276.6477 |
| 11 | 19 - 20, 15 - 19, 26 - 25 | / | 4253.767759 |
| 12 | 19 - 20, 15 - 19, 77 - 80 | / | 4220.153348 |
| 13 | 19 - 20 | 25 | 4188.373766 |
| 14 | 19 - 20, 80 - 96 | / | 4219.312317 |
| 15 | 19 - 20, 28 - 29, 77 - 82 | 24 | 4259.750843 |
| 16 | 19 - 20, 34 - 43, 51 - 58 | / | 4267.393677 |
| 17 | 19 - 20, 34 - 37, 56 - 58 | 37 | 4285.315877 |
| 18 | 19 - 20, 99 - 100 | / | 4255.917635 |
| 19 | 19 - 20, 24 - 72, 94 - 100 | / | 4275.679639 |
| 20 | 19 - 20 | / | 4235.449033 |
| 21 | 19 - 20 | / | 4279.099066 |
| 22 | 19 - 20, 25 - 27, 70 - 74, 82 - 96 | / | 4102.686964 |
| 23 | 19 - 20, 70 - 75 | 13, 26 | 4322.979546 |
| 24 | 19 - 20 | 32, 50 | 4175.912151 |
| 25 | 19 - 20, 80 - 98 | / | 4312.984612 |
| 26 | 19 - 20, 26 - 25, 15 - 33 | 6 | 4212.59394 |
| 27 | 19 - 20, 35 - 37 | / | 4240.68069 |
| 28 | 19 - 20, 46 - 48 | / | 4184.225895 |
| 29 | 19 - 20, 69 - 75 | / | 4252.746273 |
| 30 | 19 - 20, 23 - 25, 50 - 57 | 9, 49 | 4398.630601 |
| 31 | 19 - 20, 35 - 37 | / | 4167.3221 |
| 32 | 19 - 20, 75 - 77 | / | 4228.189631 |
| 33 | 19 - 20, 49 - 54, 62 - 66 | / | 4300.048024 |
| 34 | 19 - 20, 81 - 80, 27 - 115 | / | 4356.37608 |
| 35 | 19 - 20 | 48 | 4110.600357 |
| 36 | 13 - 15, 19 - 20, 28 - 29, 101 - 102 | 3 | 4168.820483 |
| 37 | 19 - 20 | / | 4310.933457 |

| | | | |
|----|---|----|-------------|
| 38 | 19 - 20, 65 - 66 | / | 4179.314393 |
| 39 | 8 - 5, 19 - 20 | / | 4224.615304 |
| 40 | 19 - 20, 29 - 31 | 22 | 4242.36602 |
| 41 | 19 - 20 | 32 | 4189.519337 |
| 42 | 19 - 20 | 8 | 4199.669725 |
| 43 | 15 - 17, 19 - 20, 56 - 59, 82 - 83, 100 - 101 | 23 | 4320.64943 |
| 44 | 19 - 20, 24 - 72, 89 - 90 | 51 | 4322.419593 |
| 45 | 18 - 19, 19 - 20, 29 - 31, 56 - 58 | 48 | 4221.876177 |
| 46 | 19 - 20, 83 - 85 | / | 4184.063856 |
| 47 | 19 - 20, 19 - 34, 80 - 98 | / | 4363.472769 |
| 48 | 3 - 12, 19 - 20, 69 - 70, 92 - 94, 100 - 106 | 18 | 4292.519289 |
| 49 | 49 - 51, 56 - 58 | 33 | 4303.555547 |
| 50 | 11 - 13, 19 - 20, 26 - 30 | / | 4305.50788 |

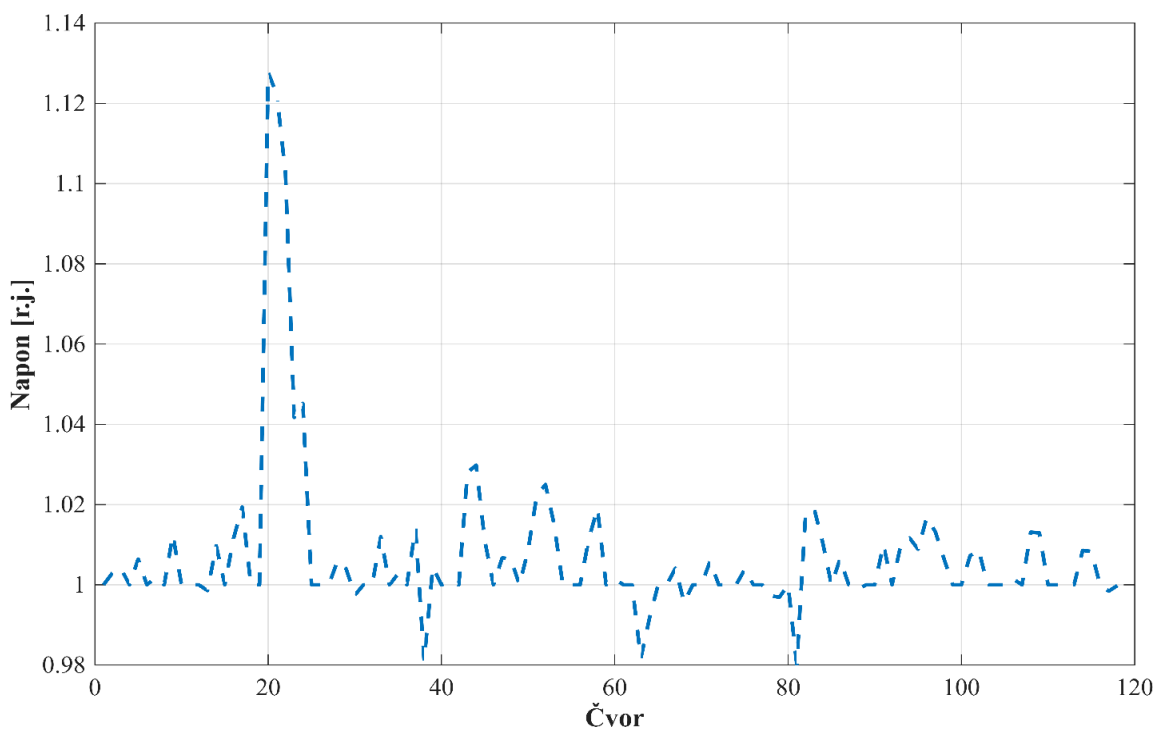
Zadržavajući suštinu prethodnih analiza, kod kojih je višekriterijumska optimizacija orjentisana isključivo na minimizaciji naponskih odstupanja i investicionih ulaganja, u nastavku rada predstavljeni su opšti zaključci sprovedeni analiziranjem priključenja 3 šant reaktora u testnom 118 – čvornom sistemu.



Slika 27. Prikaz Pareto fronta i Kalai – Smorodinsky rješenja za slučaj priključenja jednog šant reaktora na testnom IEEE 118 čvornom sistemu

Shodno tome, Slika 27. prikazuje Pareto front rješenja i Kalai- Smorodinski rješenje koje se po principu jednakosti ciljeva izdvaja kao najprihvatljivije. Naime, rezultati dobijeni primjenom NSGA-II algoritma ukazuju da pozicije optimalnog priključenja induktivnih uređaja predstavljaju čvorovi 21, 43 i 52, čije snage apsorpcije respektivno iznose 30 MVar, 20 MVar i 30 MVar. Naponska greška u tom slučaju iznosi 0.61072, dok je za instaliranje šant reaktora potrebno izdvojiti 5,0496 miliona €.

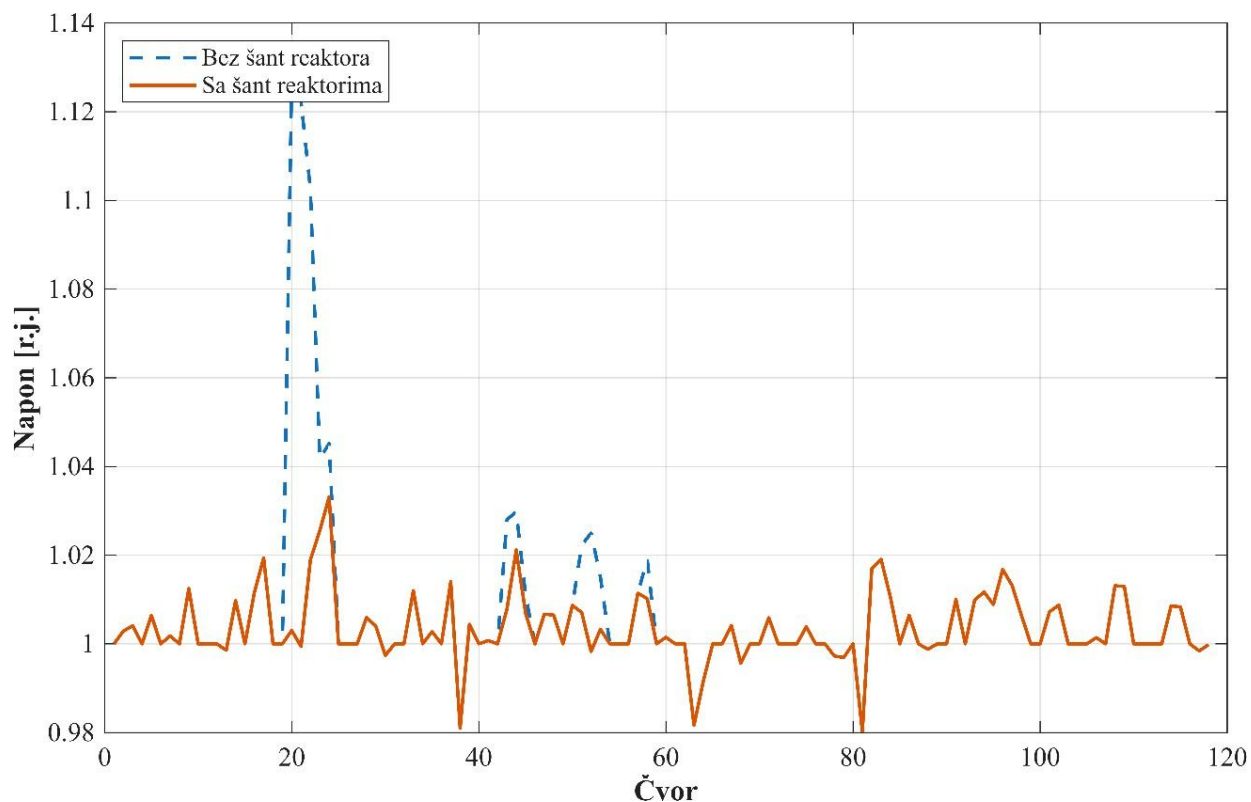
Za najkritičniji slučaj po pitanju povišenih napona, u testnom IEEE -118 sistemu, analiziran je scenario 1, koji se po pitanju najveće vrijednosti maksimalnog napona izdvojio kao dominantan. Slika 28. prikazuje naponski profil modifikovanog IEEE-118 čvornog sistema, u kome se pored ispada dva generatora (10 i 42), isključuje grana 19-20, uz istovremeni minimalni porast opterećenja od 0,35%. U ovom slučaju, sistem je suočen sa izraženim naponskim vrijednostima čvorova 20, 21 i 22 gdje vrijednosti prelaze dozvoljenu granicu odstupanja 1,1 r.j. Izražen porast napona u ovom dijelu mreže ukazuje na lokalni višak reaktivne snage prouzrokovan slabom potrošnjom iste. Budući da automatski regulatori napona na generatorskim čvorovima održavaju referentni napon od 1,0 r.j., globalni naponski profil ostaje stabilan, ali se povišeni naponi javljaju lokalno, gdje višak reaktivne snage ne može biti apsorbovan.



Slika 28. Naponski profil testnog IEEE -118 čvornog sistema kod scenarija broj 1

Ugradnjom tri šant reaktora u čvorovima 52, 43 i 21 snaga 30 MVar, 20 MVar i 30 MVar dolazi do apsorpcije viškova reaktivne snage koja je prethodno uzrokovala lokalno povećanje napona. Sa Slike 29. se uočava da se instalacijom regulacionih uređaja znatno povećala sigurnost sistema na način što se naponi koji su prethodno bili van dozvoljenih granica normalizuju. Konkretno, napon čvora 20 je pao sa 1,1277 r.j. na 1,0030 r.j., napon čvora 21 sa 1,1222 r.j. na

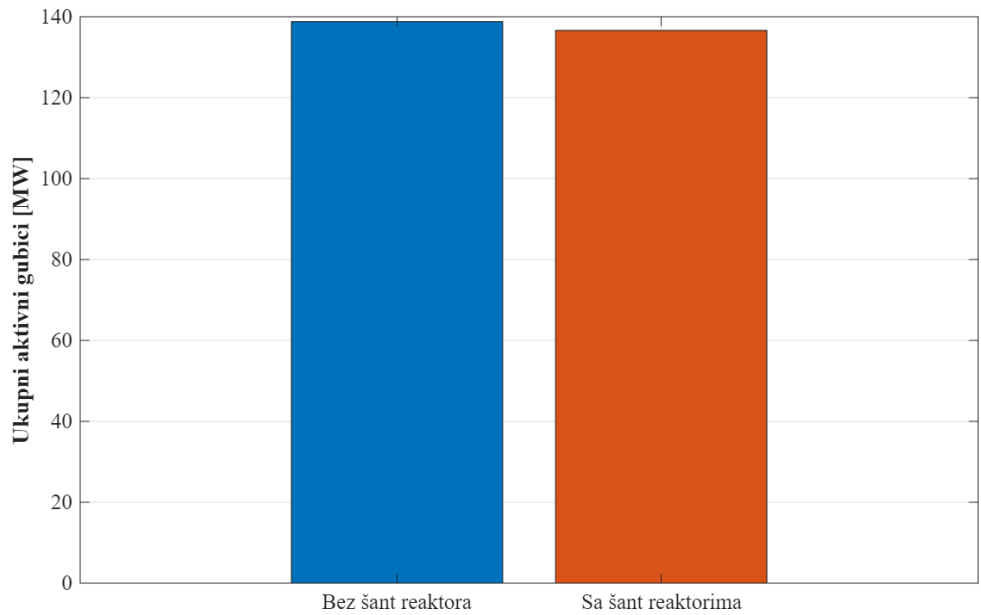
0,09994 r.j., dok je čvor 22 zabilježio promjenu sa 1,1025 na 1,0190 r.j. Osim pomenutih čvorova, sabirnice na kojima su priključena ostala dva uređaja takođe doživljavaju osjetan pad. Na taj način sistem se vratio u stabilno pogonsko stanje, uspješno eliminisajući kritične radne režime. Lokalna kompenzacija viška reaktivne snage, čiji uticaj na ostale, električno udaljene čvorove je minimalan i jedva osjetan potvrđuje pozitivno dejstvo reaktora u globalnom smislu. Dakle, instalacijom tri regulaciona uređaja koji su prethodno optimalno locirani i pravilno dimenzionisani, mreža je uspjela da zadrži stabilan naponski karakter, ne dovodeći u pitanje pojavu podnapona u pojedinim potrošačkim čvorovima.



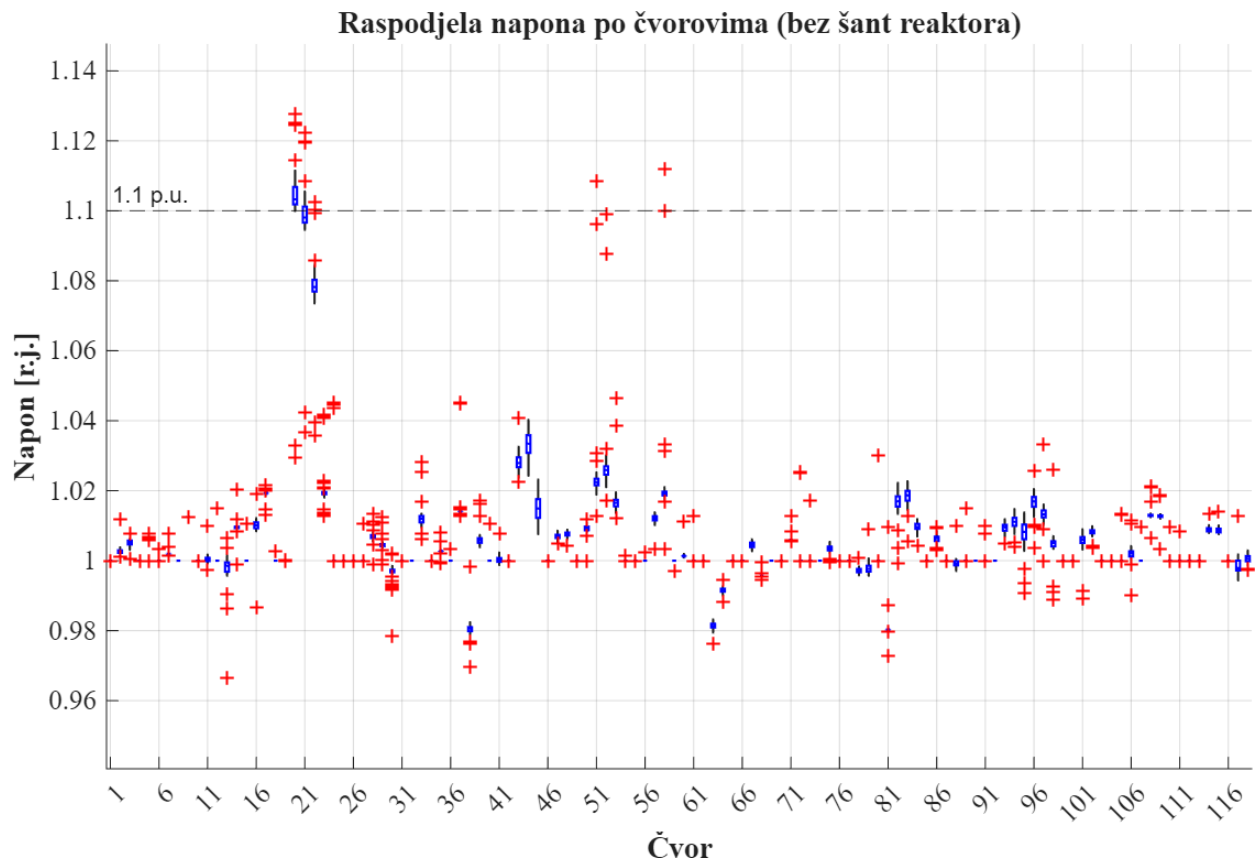
Slika 29. Naponski profil testnog IEEE -118 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora

Osim naponske stabilizacije, ugradnja šant reaktora dovodi i do smanjenja ukupnih aktivnih gubitaka u mreži. Rezultati pokazuju da se normalizacijom naponskog profila i smanjenjem tokova reaktivnih snaga, značajno redukuju i ukupni gubici. Naime, Slika 30. pokazuje promjenu u vrijednosti aktivnih gubitaka prije i nakon ugradnje regulacionog uređaja, što jasno upućuje na malu ali značajnu promjenu od nešto više od 2 MW.

Iako smanjenje ukupnih aktivnih gubitaka, nije primarni cilj instalacije šant reaktora, redukcija istih pokazala se kao važan efekat za povećanje sigurnosti pogona i minimizaciju eksplotacionih troškova.



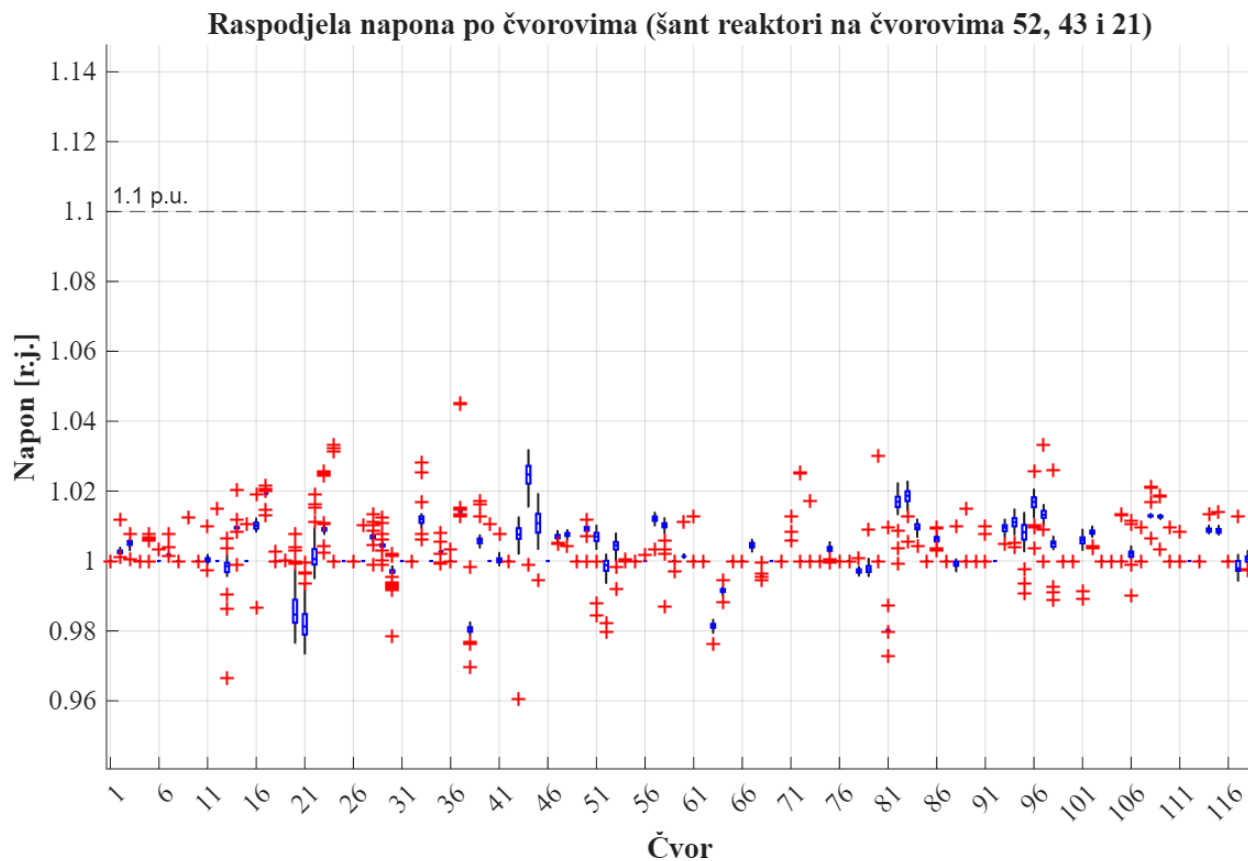
Slika 30. Ukupni aktivni gubici testnog IEEE -118 čvornog sistema kod scenarija broj 1, prije i nakon ugradnje šant reaktora



Slika 31. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE -118 čvornom sistemu bez šant reaktora

Na slici 31. je prikazana box plot analiza napona po čvorovima u svih 50 kritičnih scenarija iz tabele prije ugradnje šant reaktora u čvorovima 52, 43 i 21. Rezultati prikazuju da u pojedinim slučajevima, naponi određenih potrošačkih čvorova prelaze vrijednosti dozvoljene granice od 1,1 r.j., što direktno upućuje na ozbiljna pogonska stanja. Najkritičnija sabirnica je sabirnica 20 kod koje vrijednost medijane napona iznosi čak 1,1033 r.j. Izražena srednja naponska vrijednosti upućuje na veliki broj scenarija kod kojih je naponski porast u pomenutom čvoru izražen i prelazi granicu dozvoljenog odstupanja.

U cilju eliminacije povećanih naponskih vrijednosti i poboljšanih naponskih prilika u kritičnim potrošačkim čvorovima sprovedena je analiza stanja mreže prilikom priključenja tri šant reaktora, koji su prethodno optimalno dimenzionisani i locirani. Slika 32. prikazuje statističku raspodjelu napona po čvorovima sistema kroz svih 50 scenarija nakon ugradnje šant reaktora. Integracijom pomenutih uređaja, apsorbovan je višak lokalne reaktivne snage iz mreže, što je u velikoj mjeri uticalo na smanjenje naponskih prilika u čvorovima priključenja regulacionih uređaja i njima električno bliskim sabirnicama. Uticaj reaktora posebno je izražen u čvorovima 20, 21, 22, 43, 44, 45, 51 i 52 gdje naponi doživljavaju osjetan pad. Takođe, rezultati pokazuju da ugradnjom šant reaktora, napon potrošačkih čvorova ni u jednom od scenarija neće preći vrijednosti od 1,1 r.j., odnosno pasti ispod 0,9 r.j. Sve to je posljedica pravilno dimenzionisanih i pozicioniranih regulacionih uređaja koji prioritarno imaju za cilj očuvanje globalne stabilnosti mreže.



Slika 32. Statistička raspodjela napona po čvorovima u IEEE-118 čvornom sistemu sa šant reaktorima

Slika 33. prikazuje promjenu medijana napona kroz karakterističnih 50 scenarija prije i nakon ugradnje šant reaktora. Očekivano, dominantan pad zabilježen je u čvoru priključenja šant reaktora najveće snage (čvor 20) , gdje medijana napona opada za 10,75%. Potom, zbog električne blizine i dobre povezanosti sa 20, najosjetniji pad pogađa čvorove 21 i 22 gdje se medijana mijenja za 10,63%, odnosno 7,22%. Uređaj snage 30 MVar, priključen je u čvoru 43, koji bilježi pad od 1,97%. Sabirnica 52, na kojoj je lociran treći priključni element, izložena je srednjoj naponskoj promjeni od 2,64%.

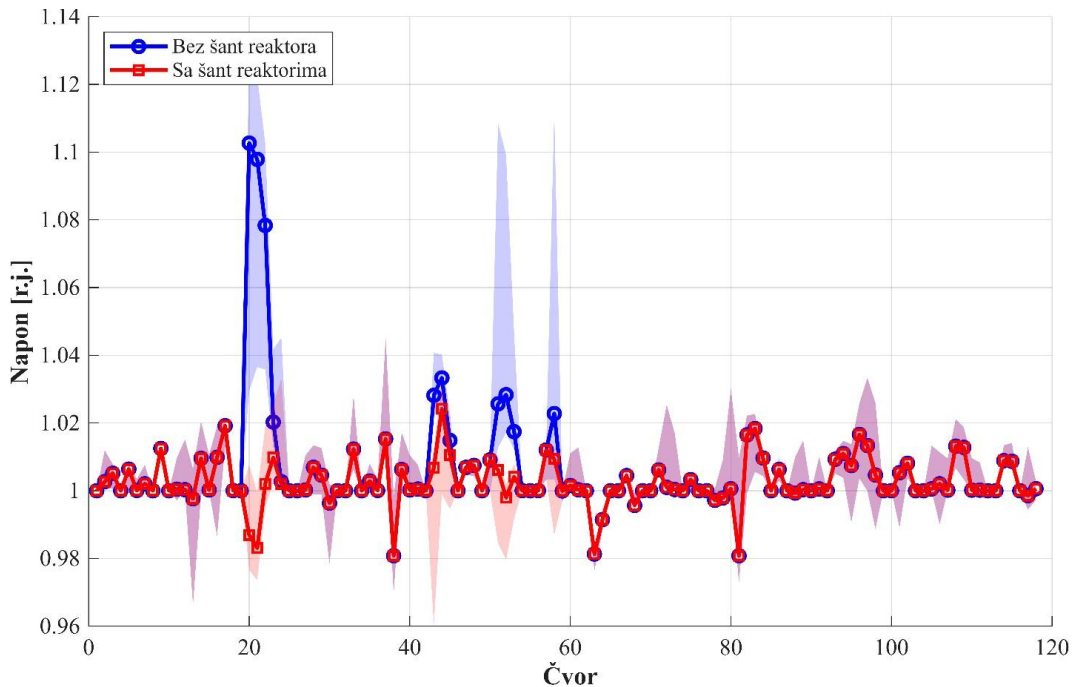
Zbog jasnijeg pregleda rezultata, u Tabeli 10. su dati numerički rezultati medijane napona po čvorovima prije i nakon ugradnje tri šant reaktora.

Tabela 10. Vrijednosti medijana napona testnog IEEE – 118 čvornog sistema po čvorovima prije i nakon ugradnje šant reaktora

| Čvor | Medijan napona prije priključenja šant reaktora [r.j.] | Medijan poslije priključenja reaktora [r.j.] | ΔMed [r.j.] |
|-------------|---|---|--------------------|
| 1 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 2 | 1.0025 | 1.0025 | 0.0000 |
| 3 | 1.0053 | 1.0053 | 0.0000 |
| 4 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 5 | 1.0065 | 1.0065 | 0.0000 |
| 6 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 7 | 1.0019 | 1.0019 | 0.0000 |
| 8 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 9 | 1.0125 | 1.0125 | 0.0000 |
| 10 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 11 | 1.0003 | 1.0003 | 0.0000 |
| 12 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 13 | 0.9985 | 0.9985 | 0.0000 |
| 14 | 1.0095 | 1.0095 | 0.0000 |
| 15 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 16 | 1.0101 | 1.0101 | 0.0000 |
| 17 | 1.0192 | 1.0192 | 0.0000 |
| 18 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 19 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 20 | 1.1033 | 0.9847 | -0.1186 |
| 21 | 1.0981 | 0.9813 | -0.1168 |
| 22 | 1.0782 | 1.0006 | -0.0777 |
| 23 | 1.0192 | 1.0090 | -0.0102 |
| 24 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 25 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 26 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 27 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 28 | 1.0069 | 1.0069 | 0.0000 |

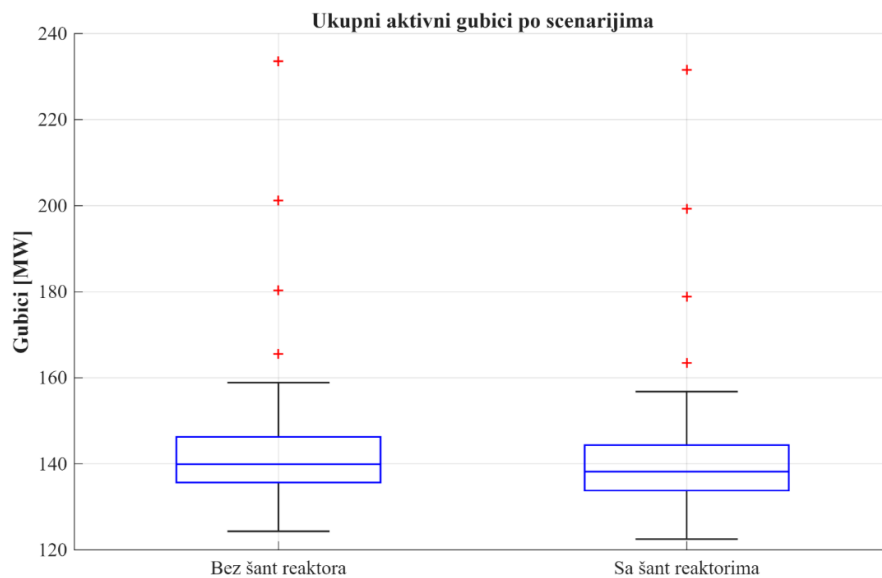
| | | | |
|----|--------|--------|---------|
| 29 | 1.0045 | 1.0045 | 0.0000 |
| 30 | 0.9971 | 0.9971 | 0.0000 |
| 31 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 32 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 33 | 1.0120 | 1.0120 | 0.0000 |
| 34 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 35 | 1.0027 | 1.0027 | 0.0000 |
| 36 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 37 | 1.0141 | 1.0141 | 0.0000 |
| 38 | 0.9805 | 0.9805 | 0.0000 |
| 39 | 1.0058 | 1.0058 | 0.0000 |
| 40 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 41 | 1.0003 | 1.0003 | 0.0000 |
| 42 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 43 | 1.0279 | 1.0076 | -0.0203 |
| 44 | 1.0334 | 1.0248 | -0.0087 |
| 45 | 1.0149 | 1.0108 | -0.0041 |
| 46 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 47 | 1.0069 | 1.0069 | 0.0000 |
| 48 | 1.0074 | 1.0074 | 0.0000 |
| 49 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 50 | 1.0093 | 1.0093 | 0.0000 |
| 51 | 1.0224 | 1.0070 | -0.0154 |
| 52 | 1.0259 | 0.9988 | -0.0271 |
| 53 | 1.0165 | 1.0045 | -0.0121 |
| 54 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 55 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 56 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 57 | 1.0122 | 1.0122 | 0.0000 |
| 58 | 1.0192 | 1.0102 | -0.0090 |
| 59 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 60 | 1.0014 | 1.0014 | 0.0000 |
| 61 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 62 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 63 | 0.9813 | 0.9813 | 0.0000 |
| 64 | 0.9915 | 0.9915 | 0.0000 |
| 65 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 66 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 67 | 1.0045 | 1.0045 | 0.0000 |
| 68 | 0.9956 | 0.9956 | 0.0000 |
| 69 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 70 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 71 | 1.0059 | 1.0059 | 0.0000 |
| 72 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 73 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |

| | | | |
|-----|--------|--------|--------|
| 74 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 75 | 1.0034 | 1.0034 | 0.0000 |
| 76 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 77 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 78 | 0.9971 | 0.9971 | 0.0000 |
| 79 | 0.9977 | 0.9977 | 0.0000 |
| 80 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 81 | 0.9803 | 0.9803 | 0.0000 |
| 82 | 1.0170 | 1.0170 | 0.0000 |
| 83 | 1.0187 | 1.0187 | 0.0000 |
| 84 | 1.0096 | 1.0096 | 0.0000 |
| 85 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 86 | 1.0064 | 1.0064 | 0.0000 |
| 87 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 88 | 0.9991 | 0.9991 | 0.0000 |
| 89 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 90 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 91 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 92 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 93 | 1.0095 | 1.0095 | 0.0000 |
| 94 | 1.0111 | 1.0111 | 0.0000 |
| 95 | 1.0082 | 1.0082 | 0.0000 |
| 96 | 1.0170 | 1.0170 | 0.0000 |
| 97 | 1.0132 | 1.0132 | 0.0000 |
| 98 | 1.0050 | 1.0050 | 0.0000 |
| 99 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 100 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 101 | 1.0060 | 1.0060 | 0.0000 |
| 102 | 1.0083 | 1.0083 | 0.0000 |
| 103 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 104 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 105 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 106 | 1.0021 | 1.0021 | 0.0000 |
| 107 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 108 | 1.0129 | 1.0129 | 0.0000 |
| 109 | 1.0127 | 1.0127 | 0.0000 |
| 110 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 111 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 112 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 113 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 114 | 1.0088 | 1.0088 | 0.0000 |
| 115 | 1.0086 | 1.0086 | 0.0000 |
| 116 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 117 | 0.9979 | 0.9979 | 0.0000 |
| 118 | 1.0006 | 1.0006 | 0.0000 |



Slika 33. Promjena medijane napona po čvorovima u IEEE -118 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora

Slika 34. prikazuje promjenu medijane ukupnih aktivnih gubitaka prije i nakon ugradnje tri, optimalno locirana i dimenzionisana šant reaktora. Naime, jasno je da se integracijom istih srednja vrijednost ukupnih gubitaka smanjila sa 144,5135 MW na 142,6118 MW, što predstavlja još jedan pokazatelj ispravnosti ugradnje šant reaktora. Dakle, iako primarno namijenjeni regulaciji napona, ovi uređaji značajno doprinose i smanjenju aktivnih gubitaka koji se posljedično javljaju kao rezultat smanjenih tokova reaktivnih snaga i manjih strujnih opterećenja.



Slika 34. Statistička raspodjela ukupnih aktivnih gubitaka u IEEE – 30 čvornom sistemu prije i nakon ugradnje šant reaktora

5. ZAKLJUČAK

Izražen kapacitivni karakter mreže, koji se posljedično javlja usred sve učestalije primjene kablovskih vodova i slabe opterećenosti dugačkih nadzemnih vodova visokih napona, predstavlja jedan od glavnih razloga povećanih naponskih vrijednosti na sabirnicama savremenih elektroprenosnih mreža. Osim toga, ograničena upotreba sinhronih generatora smanjila je sposobnost sistema da uspješno kontroliše reaktivnu snagu, što je dodatno doprinijelo nepovoljnim naponskim prilikama u mreži. Dodatno, intezivna integracija obnovljivih izvora energije donijela je veliku varijabilnost u proizvodnji, i time je potencijalno stvorena mogućnost pojave neželjenih vrijednosti napona u pojedinim potrošačkim čvorovima. U tom kontekstu, šant reaktori se izdvajaju kao adekvatno, naponsko – reaktivno regulaciono sredstvo, koje će apsorpcijom viškova reaktivne snage iz mreže uspjeti da normalizuje naponske prilike i dovede sistem u stabilno pogonsko stanje.

U ovom master radu, radi jasnijeg i sveobuhvatnijeg pregleda, sistematizovani su postojeći pristupi za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje naponsko-reaktivnih regulacionih sredstava koji se danas često upotrebljavaju u savremenim elektroenergetskim sistemima. Na temelju analize prednosti i nedostataka postojećih metoda predložena je nova metoda za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje šant reaktora u prenosnim mrežama. Predložena metoda je primijenjena na testnim elektroenergetskim sistemima različitih dimenzija s ciljem ispitivanja njenih performansi. Primjena višekriterijumskog NSGA – II algoritma omogućila je uvid u konflikt između tehničkih i ekonomskih ciljeva i stvorila robusnu optimizaciju bez potrebe za subjektivnim definisanjem težinskih koeficijenata. Dakle, problem alokacije i dimenzionisanja šant reaktora formulisan je kao višekriterijumski optimizacioni problem, kod kojeg kombinacija tehničkih i ekonomskih kriterijuma omogućila pronalaženje Pareto optimalnih rešenja.

Pored toga, zbog dobijanja detaljnijih i realističnijih podataka, sama analiza obuhvata više operativnih scenarija koji simuliraju ponašanje sistema tokom iznenadnih poremećaja uslovljenih ispadom generatora, vodova ili promjena u opterećenju. Takav pristup daje sveobuhvatniju sliku sistema prije i nakon integracije šant reaktora, što doprinosi jasnijem razumijevanju problema i donošenju relevantnijih zaključaka.

Na osnovu rezultata proračuna i integracije šant reaktora u tri sistema različitih dimenzija i karakteristika, moguće je izvesti sljedeće zaključke :

- Strateškom integracijom šant reaktora omogućeno je očuvanje napona u svim čvorovima sistema, unutar dozvoljenog opsega, tokom različitih pogonskih stanja i prilikom ispada određenih energetskih komponenti.
- Bez obzira na dimenzionalnost sistema i njegovu kompleksnost, optimalno locirani i dimenzionisani šant reaktori mogu lokalno korigovati naponske prilike u čvorovima, ne narušavajući globalnu stabilnost mreže. Zbog prostorno ograničenog efekta, ovi uređaji apsornuju reaktivnu snagu samo lokalno, ne izazivajući značajne promjene u tokovima snaga duž cijelog sistema.

- Proračunska složenost predložene metode za optimalnu alokaciju i dimenzionisanje šant reaktora ne predstavlja ograničavajući faktor za njenu primjenu u realnim elektroenergetskim sistemima velikih dimenzija.
- Primjena višekriterijumske optimizacije predstavlja jedan od glavnih preduslova za efikasno planiranje savremenih elektroenergetskih sistema. Ovakav pristup omogućio je da se optimalnim pozicioniranjem i dimenzionisanjem šant reaktora obezbijedi kompromis između tehničkih i ekonomskih zahtjeva, čime je postignut veći stepen fleksibilnosti i efikasnosti prenosne mreže.
- Pored pozitivnog dejstva na normalizaciju naponskih prilika, šant reaktori pozitivno utiču i na smanjenje ukupnih aktivnih gubitaka. Odnosno, prilikom ugradnje ovih uređaja, sistem biva suočen sa smanjenom vrijednošću reaktivne komponente struje, što direktno utiče na smanjenje ukupnih aktivnih gubitaka.

Potencijalni pravci budućih istraživanja, orjentisani su ka daljem razvoju optimizacijskog modela koji uključuje primjenu NSGA – II algoritma u realnim elektroprenosnim sistemima. Takođe, fokus daljih istraživanja može biti i integracija šant reaktora u pametnim mrežama, što bi predstavljalo veliki korak ka fleksibilnosti i pouzdanosti sistema. Posebnu pažnju treba posvetiti optimizaciji koja uključuje i druge regulacione uređaje u kombinaciji sa šant reaktorom.

LITERATURA

1. B. Ismail, N. I. Abdul Wahab, M. L. Othman, M. A. M. Radzi, K. Naidu Vijyakumar and M. N. Mat Naain, „A Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid-Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Loadability Enhancement,“ in IEEE Access, vol. 8, pp. 222733-222765, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043297.
2. J. L. Bala, P. A. Kuntz and R. M. Taylor, „Sensitivity-based optimal capacitor placement on a radial distribution feeder,“ IEEE Technical Applications Conference and Workshops. Northcon/95. Conference Record, Portland, OR, USA, 1995, pp. 225-230, doi: 10.1109/NORTHCON.1995.485077.
3. Acharya, Naresh, Pukar Mahat, and Nadarajah Mithulananthan. „An analytical approach for DG allocation in primary distribution network." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 28, no. 10 (2006): 669-678.
4. Vita, V. Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks. Energies 2017, 10, 1433. <https://doi.org/10.3390/en10091433>
5. Rao, R. Srinivasas, S. V. L. Narasimham, and M. Ramalingaraju. "Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm." International journal of electrical power & energy systems 33, no. 5 (2011): 1133-1139.
6. K. Prakash and M. Sydulu, "Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems," 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/PES.2007.386149.
7. Murthy, V. V. S. N., and Ashwani Kumar. "Comparison of optimal DG allocation methods in radial distribution systems based on sensitivity approaches." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 53 (2013): 450-467.
8. Montoya, Francisco G., Raúl Baños, Consolación Gil, Antonio Espín, Alfredo Alcayde, and Julio Gómez. "Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods." Engineering Applications of Artificial Intelligence 23, no. 5 (2010): 695-703.
9. Thangaraj, Yuvaraj, and Ravi Kuppan. "Multi-objective simultaneous placement of DG and DSTATCOM using novel lightning search algorithm." Journal of applied research and technology 15, no. 5 (2017): 477-491.
10. Yuvaraj, T., and K. Ravi. "Multi-objective simultaneous DG and DSTATCOM allocation in radial distribution networks using cuckoo searching algorithm." Alexandria engineering journal 57, no. 4 (2018): 2729-2742.
11. H. Iyer, S. Ray and R. Ramakumar, "Voltage profile improvement with distributed generation," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco, CA, USA, 2005, pp. 2977-2984 Vol. 3, doi: 10.1109/PES.2005.1489406.
12. Sannigrahi, Surajit, and Parimal Acharjee. "Maximization of system benefits with the optimal placement of DG and DSTATCOM considering load variations." Procedia computer science 143 (2018): 694-701.
13. Ghatak, Sriparna Roy, Surajit Sannigrahi, and Parimal Acharjee. "Comparative performance analysis of DG and DSTATCOM using improved PSO based on success rate for deregulated environment." IEEE Systems Journal 12, no. 3 (2017): 2791-2802.

14. Ejebe, G. C., and B. F. Wollenberg. "Automatic contingency selection." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1 (2007): 97-109.
15. Singh, S. N., and A. K. David. "Optimal location of FACTS devices for congestion management." *Electric Power Systems Research* 58, no. 2 (2001): 71-79.
16. Rao, R. Srinivasa, and V. Srinivasa Rao. "A generalized approach for determination of optimal location and performance analysis of FACTS devices." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73 (2015): 711-724.
17. Shaheen, Husam I., Ghamgeen I. Rashed, and S. J. Cheng. "Optimal location and parameter setting of UPFC for enhancing power system security based on differential evolution algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 33, no. 1 (2011): 94-105.
18. Zahid, Muhammad, Jinfu Chen, Yinhong Li, Xianzhong Duan, Qi Lei, Wang Bo, Ghulam Mohy-ud-Din, and Asad Waqar. "New approach for optimal location and parameters setting of UPFC for enhancing power systems stability under contingency analysis." *Energies* 10, no. 11 (2017): 1738.
19. Kavitha, K., and R. Neela. "Optimal allocation of multi-type FACTS devices and its effect in enhancing system security using BBO, WIPSO & PSO." *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 5, no. 3 (2018): 777-793.
20. Banu, R. Narmatha, and D. Devaraj. "Multi-objective GA with fuzzy decision making for security enhancement in power system." *Applied Soft Computing* 12, no. 9 (2012): 2756-2764.
21. Ravindra, S., Chintalapudi V. Suresh, S. Sivanagaraju, and VC Veera Reddy. "Power system security enhancement with unified power flow controller under multi-event contingency conditions." *Ain Shams Engineering Journal* 8, no. 1 (2017): 9-28.
22. Lima, Flavio GM, Francisco D. Galiana, Ivana Kockar, and Jorge Munoz. "Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming." *IEEE Transactions on Power Systems* 18, no. 3 (2003): 1029-1034.
23. Padmavathi, S. Venkata, Sarat Kumar Sahu, and A. Jayalaxmi. "Modeling and simulation of static var compensator to enhance the power system security." In *2013 IEEE Asia Pacific conference on postgraduate research in microelectronics and electronics (PrimeAsia)*, pp. 52-55. IEEE, 2013.
24. Sharma, Ashwani Kumar. "Optimal Number and Location of TCSC and Loadability Enhancement in Deregulated Electricity Markets Using MINLP." *International journal of emerging electric power systems* 5, no. 1 (2006).
25. Sharma, Ashwani, Saurabh Chanana, and Sanjoy Parida. "Combined optimal location of FACTS controllers and loadability enhancement in competitive electricity markets using MILP." In *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, pp. 670-677. IEEE, 2005.
26. Etemad, Reza, Reza Navabi, and Heidar Ali Shayanfar. "Optimal location and setting of TCSC under single line contingency using mixed integer nonlinear programming." In *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp. 250-253. IEEE, 2010.
27. Kalaivani, R., and S. K. Dheebika. "Enhancement of voltage stability and reduction of power loss using genetic algorithm through optimal location of SVC, TCSC and UPFC." *J. Eng. Sci. Technol* 11, no. 10 (2016): 1470-1485.
28. A. R. Phadke, M. Fozdar and K. R. Niazi, "Multi-objective fuzzy-GA formulation for optimal placement and sizing of shunt FACTS controller," *2009 International Conference on Power Systems*, Kharagpur, India, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPWS.2009.5442652.

29. Esmaeilian, Hamid Reza, Omid Darijany, and Mohsen Mohammadian. "Optimal placement and sizing of DG units and capacitors simultaneously in radial distribution networks based on the voltage stability security margin." *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science* (2014): 1-14.
30. Dixit, Shishir, Laxmi Srivastava, and Ganga Agnihotri. "Optimal placement of SVC for minimizing power loss and improving voltage profile using GA." In *2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)*, pp. 123-129. IEEE, 2014.
31. Dixit, Shishir, Laxmi Srivastava, and Ganga Agnihotri. "Optimal location and sizing of STATCOM for minimizing power loss and improving voltage profile using GA." *IJCSNT* 4, no. 1 (2014): 1-11.
32. Chauhan, N. S., N. V. Srikanth, and B. Vijay Kumar. "Optimal placement of SVC to minimize loss and improve voltage profile under power system contingency using GA." In *Proc. 5th SARCIRF Int. Conf.*, pp. 104-110. 2014.
33. Varshney, Sarika, Laxmi Srivastava, and Manjaree Pandit. "Optimal location and sizing of STATCOM for voltage security enhancement using PSO-TVAC." In *2011 International Conference on Power and Energy Systems*, pp. 1-6. IEEE, 2011.
34. Jordehi, A. Rezaee, J. Jasni, N. Abd Wahab, M. Z. Kadir, and M. S. Javadi. "Enhanced leader PSO (ELPSO): a new algorithm for allocating distributed TCSC's in power systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 64 (2015): 771-784.
35. Zeinalzadeh, Arash, Younes Mohammadi, and Mohammad H. Moradi. "Optimal multi objective placement and sizing of multiple DGs and shunt capacitor banks simultaneously considering load uncertainty via MOPSO approach." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 67 (2015): 336-349.
36. Ranganathan, Selvarasu, Munagala Surya Kalavathi, and Christoher Asir Rajan C. "Self-adaptive firefly algorithm based multi-objectives for multi-type FACTS placement." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10, no. 11 (2016): 2576-2584.
37. Prakash, D. B, and C. Lakshminarayana. "Optimal siting of capacitors in radial distribution network using whale optimization algorithm." *Alexandria Engineering Journal* 56, no. 4 (2017): 499-509.
38. Arya, Aadesh Kumar, Ashwani Kumar, and Saurabh Chanana. "Analysis of distribution system with D-STATCOM by gravitational search algorithm (GSA)." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B* 100, no. 3 (2019): 207-215.
39. Sirjani, Reza, Azah Mohamed, and Hussain Shareef. "Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 43, no. 1 (2012): 562-572.
40. Dutta, Susanta, Provas Kumar Roy, and Debashis Nandi. "Optimal location of STATCOM using chemical reaction optimization for reactive power dispatch problem." *Ain Shams Engineering Journal* 7, no. 1 (2016): 233-247.
41. Rao, R. Srinivasas, S. V. L. Narasimham, and M. Ramalingaraju. "Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm." *International journal of electrical power & energy systems* 33, no. 5 (2011): 1133-1139.
42. Devabalaji, K. Ravi, K. Ravi, and D. P. Kothari. "Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using bacterial foraging optimization algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 71 (2015): 383-390.

43. Abdelaziz, Almoataz Y., Ehab S. Ali, and S. M. Abd Elazim. "Flower pollination algorithm and loss sensitivity factors for optimal sizing and placement of capacitors in radial distribution systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 78 (2016): 207-214.
44. Mohamed Shuaib, Y., M. Surya Kalavathi, and C. Christober Asir Rajan. "Optimal capacitor placement in radial distribution system using gravitational search algorithm." *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 64 (2015): 384-397.
45. Abou El-Ela, Adel Ali, Ragab A. El-Sehiemy, Abdel-Mohsen Kinawy, and Mohamed Taha Mouwafi. "Optimal capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage profile improvement." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10, no. 5 (2016): 1209-1221.
46. Elsheikh, Ahmed, Yahya Helmy, Yasmine Abouelseoud, and Ahmed Elsherif. "Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems." *Alexandria Engineering Journal* 53, no. 4 (2014): 809-816.
47. Ali, E. S., S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz. "Improved harmony algorithm and power loss index for optimal locations and sizing of capacitors in radial distribution systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 80 (2016): 252-263.
48. Abdelaziz, A. Y., E. S. Ali, and S. M. Abd Elazim. "Optimal sizing and locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, no. 1 (2016): 610-618.
49. Subrahmanyam, J. B. V., and C. Radhakrishna. "A simple method for optimal capacitor placement in unbalanced radial distribution system." *Electric Power Components and Systems* 38, no. 11 (2010): 1269-1284.
50. El-Fergany, Attia A., and Almoataz Y. Abdelaziz. "Capacitor allocations in radial distribution networks using cuckoo search algorithm." *IET Generation, Transmission & Distribution* 8, no. 2 (2014): 223-232.
51. Murthy, V. V. S. N., and Ashwani Kumar. "Comparison of optimal DG allocation methods in radial distribution systems based on sensitivity approaches." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 53 (2013): 450-467.
52. Murty, Veera Venkata Satya Naryana, and Ashwani Kumar. "Comparison of optimal capacitor placement methods in radial distribution system with load growth and ZIP load model." *Frontiers in Energy* 7, no. 2 (2013): 197-213.
53. Gupta, Atma Ram, and Ashwani Kumar. "Optimal placement of D-STATCOM using sensitivity approaches in mesh distribution system with time variant load models under load growth." *Ain Shams Engineering Journal* 9, no. 4 (2018): 783-799.
54. S. Raj and B. Bhattacharyya, "Optimal placement of TCSC and SVC for reactive power planning using whale optimization algorithm," *Swarm. Evol. Comput.*, vol. 40, pp. 131-143, June. 2018.
55. S. Udgir, S. Varshney, and L. Srivastava, „Optimal placement and sizing of SVC for voltage security enhancement," *Int. J. Comp. Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 44-51, 2011.
56. Dixit, P. Kundu, and H. R. Jariwala, „Incorporation of distributed generation and shunt capacitor in radial distribution system for technoeconomic benefits," *Eng. Sci. Technol., Int. J.*, vol. 20, no. 2, pp. 482-493, Apr. 2017.
57. H. I. Shaheen, G. I. Rashed, and S. J. Cheng, "Optimal location and parameter setting of UPFC for enhancing power systems security based on differential evolution algorithm," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 94-105, Jan. 2011.

58. M. Zahid, J. Chen, Y. Li, X. Duan, Q. Lei, W. Bo, G. Mohy-Ud-Din, and A. Waqar, "New approach for optimal location and parameters setting of UPFC for enhancing power systems stability under contingency analysis," *Energies*, vol. 10, no. 11, pp. 1738-1761, 2017.
59. K. Kavitha and R. Neela, "Optimal allocation of multi-type FACTS devices and its effect in enhancing system security using BBO, WIPSO & PSO," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 777-793, 2018.
60. S. R. Inkollu and V. R. Kota, "Optimal setting of FACTS devices for voltage stability improvement using PSO adaptive GSA hybrid algorithm," *Eng. Sci. Technol., Int. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 1166-1176, Sep. 2016.
61. S. Dutta, P. K. Roy, and D. Nandi, "Optimal location of UPFC controller in transmission network using hybrid chemical reaction optimization algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 194-211, Jan. 2015.
62. K. Murthukumar, S. Jayalalitha, K. Sureshkumar, A. Sakthivel, K. Balamurugan, and M. Ramasamy, "Application of hybrid heuristic technique for optimal shunt capacitors planning problem in radial distribution network," *Soft Comput.*, vol. 23, no. 21, pp. 1127-11245, 2019.
63. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017.

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora : Lidija Ćorić
Broj indeksa/upisa : 16/22
Studijski program Elektroenergetski sistemi
Naslov rada : Optimalna alokacija i
dimenzionisanje šant reaktora u prenosnoj
mreži primjenom višekriterijumske
optimizacije
Mentor : prof. dr Vladan Radulović

Potpisani/a : Lidija Ćorić

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, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

U Podgorici, 04.11.2025. godine

Potpis magistranda

Lidija Ćorić

IZJAVA O KORIŠĆENJU

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

"Optimalna alokacija i dimenzionisanje šant reaktora u prenosnoj mreži primjenom višekriterijumske optimizacije",

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim prilogima 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 poštuju 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).

U Podgorici, 04.11.2025. godine

Potpis magistranda

Lidija Čović