

Optimizacija aktivne distribucijske mreže

Kelemen, Sanja

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:913239>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

OPTIMIZACIJA AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Diplomski rad

Sanja Kelemen

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMATIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Sanja Kelemen
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1459, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083063
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	Marina Dubravac, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Optimizacija aktivne distribucijske mreže
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno pregledati dostupnu literaturu i obraditi nekoliko primjera optimizacije primjenjene na aktivne distribucijske koje sadrže distribuiranu proizvodnju. U praktičnom djelu izvršiti proračun odabranog optimizacijskog problema koristeći se dostupnim računalnim programom. Sumentorica s FERIT-a: Marina Dubravac Tema rezervirana za: Sanja Kelemen
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	05.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	11.7.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	11.07.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 11.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Sanja Kelemen
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1459, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimizacija aktivne distribucijske mreže**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete

i sumentora Marina Dubravac, univ. mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Sanja Kelemen
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1459, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083063
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	Marina Dubravac, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Optimizacija aktivne distribucijske mreže
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno pregledati dostupnu literaturu i obraditi nekoliko primjera optimizacije primjenjene na aktivne distribucijske koje sadrže distribuiranu proizvodnju. U praktičnom djelu izvršiti proračun odabranog optimizacijskog problema koristeći se dostupnim računalnim programom. Sumentorica s FERIT-a: Marina Dubravac Tema rezervirana za: Sanja Kelemen
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	05.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	11.7.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	11.07.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 11.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Sanja Kelemen
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1459, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimizacija aktivne distribucijske mreže**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete

i sumentora Marina Dubravac, univ. mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	2
2. PREGLED PODRUČJA TEME	3
3. AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE	5
3.1. Definicija aktivne distribucijske mreže.....	5
3.2. Utjecaji distribuirane proizvodnje na prilike u distribucijskoj mreži	8
3.3. Metode za ublažavanje utjecaja distribuirane proizvodnje na prilike u distribucijskoj mreži	12
4. OPTIMIZACIJA AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE	15
4.1. Opća formulacija i funkcije cilja	15
4.2. Ograničenja	17
4.3. Metode rješavanja.....	19
5. PRIMJER OPTIMIZACIJE NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE S AKTIVNIM KUPCIMA	21
5.1. Modeliranje optimizacijskog problema	22
5.2. Modeliranje mreže	23
5.3. Postavljanje parametara optimizacije.....	34
5.4. Opis simulacija	36
6. ANALIZA REZULTATA	40
6.1. Bazni scenarij	40
6.2. Scenarij 1	42
6.3. Scenarij 2	43
6.4. Scenarij 3	45
6.5. Scenarij 4	47
6.6. Usporedba rezultata.....	48
6.6.1. Bazni scenarij, scenarij 1	48
6.6.2. Bazni scenarij, scenarij 2	50

6.6.3. Scenarij 1, scenarij 3.....	51
6.6.4. Scenarij 2, scenarij 4.....	52
6.6.5. Usporedba opterećenja transformatora	53
6.6.6. Usporedba gubitaka u mreži	54
7. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA	58
SAŽETAK.....	61
ABSTRACT	62
ŽIVOTOPIS.....	63
PRILOG	64

1. UVOD

Klimatske promjene, postupno iscrpljivanje tradicionalnih izvora energije te povećanje potrebe za električnom energijom uvjetovali su povećanu integraciju obnovljivih izvora električne energije u postojeći elektroenergetski sustav. Podizanjem svijesti o očuvanju okoliša u svijetu, postavljen je naglasak na prednosti distribuirane proizvodnje (DP). Distribuirana proizvodnja može se opisati kao lokalna proizvodnja električne energije korištenjem obnovljivih izvora energije. Uključivanjem DP u elektroenergetski sustav, tok energije iz jednosmjernog prelazi u dvosmjernan. Aktivni kupci predstavljaju kupce koji, osim što mogu uzimati električnu energiju iz mreže, istu mogu i proizvoditi te ju potrošiti, pohraniti ili prodati mreži i drugim potrošačima. Iako ima svoje prednosti, DP može uzrokovati nepovoljne prilike u distribucijskoj mreži. Stoga, u modernim sustavima sve veću važnost dobiva razvoj metoda i tehnika optimizacije kako bi se ublažili utjecaji DP na prilike u distribucijskoj mreži.

Autori u literaturi [1] bave se temom optimizacije napona u distribucijskim mrežama pomoću upravljanja jalovom snagom u fotonaponskim (FN) izmjenjivačima. Razmatrani su optimalni tokovi snaga te pripadne funkcije cilja, ograničenja i metode. Provedena je simulacija na testnoj mreži gdje su se volt/var regulacijom uspješno smanjile naponske neprilike u mreži. U literaturi [2] predstavljene su suvremene metode za rješavanje problema optimalnih tokova snage. Metode optimizacije podijeljene su u tri kategorije: matematičke, heurističke te metode strojnog učenja. Autori u literaturi [3] predlažu optimizacijske metode u kontekstu poboljšanja kvalitete napona, kvalitete snage, zaštite sustava i stabilnosti sustava. Predložene metode uključuju upravljanje potrošnjom, integraciju transformatora s promjenjivom sklopkom pri opterećenju, regulaciju jalove snage, ograničenje proizvodnje iz FN sustava, integraciju sustava za pohranu energije, statičkog sinkronog kompenzatora te pametnog pretvarača. U literaturi [4] autori se bave postojećim pristupima volt/var regulaciji te predlažu metode poput integracije kondenzatorske baterije, transformatora s promjenjivom sklopkom pri opterećenju, pametnih FN pretvarača, program odziva na potrošnju te program smanjenja napona radi očuvanja energije.

U diplomskom radu opisane su različite literature koje se bave problematikom optimizacije primijenjene na aktivne distribucijske mreže koje sadrže distribuiranu proizvodnju. Predstavljene su optimalni tokovi snaga kao najčešći i temeljni optimizacijski problem u elektroenergetskim sustavima. U nastavku rada dan je primjer optimizacije niskonaponske distribucijske mreže s aktivnim kupcima. Formuliran je matematički model optimizacijskog problema gdje pripadajuću funkciju cilja predstavlja minimizacija gubitaka snage. Pomoću programskog alata *pandapower*

[5], modelirana je mreža na temelju koje su odrađeni simulacijski slučajevi. Kao rješenje za smanjenje negativnih utjecaja distribuirane proizvodnje na mrežu, korištena je kombinacija metoda ograničenja proizvodnje iz FN sustava i upravljanja jalovom snagom iz FN pretvarača. Analizirana je mreža u slučaju kada FN sustavi nisu u funkciji. Zatim su provedeni proračuni tokova snaga te optimalnih tokova snaga u slučajevima kada su FN sustavi u funkciji na svakom drugom kućanstvu te u slučaju kada su u funkciji na svakom kućanstvu.

Struktura rada podijeljena je na sedam poglavlja. U drugom poglavlju navedena je i opisana literatura u kojoj se autori predlažu različite metode optimizacije aktivnih distribucijskih mreža. U trećem poglavlju dana je definicija aktivne distribucijske mreže, navedeni su utjecaji distribuirane proizvodnje na prilike u mreži te metode za ublažavanje negativnih utjecaja iste. U četvrtom poglavlju ukratko su opisani optimalni tokovi snaga kao temeljni optimizacijski problem u elektroenergetskim sustavima, dana je opća formulacija, prikazane su funkcije cilja, odgovarajuća ograničenja te metode za rješenje samog optimizacijskog problema. U petom poglavlju matematički je modeliran optimizacijski problem kojemu funkciju cilja predstavlja minimizacija gubitaka snage. Dan je prikaz modeliranja niskonaponske distribucijske mreže s aktivnim kupcima, prikazano je postavljanje parametara optimizacije te su opisani simulacijski slučajevi. Simulacije su provedene u programu *pandapower*. U šestom poglavlju dana je analiza rezultata simulacije. U posljednjem, sedmom poglavlju dan je osvrt na rezultate simulacije te su napisana zaključna razmatranja.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U radu je potrebno pregledati dostupnu literaturu i obraditi nekoliko primjera optimizacije primijenjene na aktivne distribucijske mreže koje sadrže distribuiranu proizvodnju. U praktičnom je dijelu potrebno izvršiti proračun odabranog optimizacijskog problema koristeći se dostupnim računalnim programom.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

U radu [6] predložena je dan-unaprijed koordinirana optimizacija djelatne i jalove snage za aktivne distribucijske mreže s obzirom na rekonfiguraciju mreže i SOP (eng. *Soft Open Point*). Glavni cilj optimizacijskog problema je minimizirati dnevne troškove rada aktivne distribucijske mreže, uzimajući u obzir ograničenja rada distribuirane proizvodnje, opreme za kompenzaciju jalove snage, dinamičke rekonfiguracije distribucijskih mreža i SOP-a. Problem je riješen metodom računalne inteligencije te je njegova učinkovitost potvrđena na IEEE distribucijskoj mreži od 33 čvora.

Autori u radu [7] predlažu optimizacijski model za regulaciju napona koristeći se pravednim smanjivanjem proizvodnje iz distribuiranih izvora energije. Strategija se temelji na poticajima, a sam optimizacijski problem je višeciljni – uključuje ublažavanje brzih poremećaja napona u distribucijskim mrežama, dok istovremeno osigurava ekonomske koristi i operatora distribucijskog sustava i kupaca. Pri rješavanju problema, u prvoj fazi korištena je metoda računalne inteligencije kojom se za dan-unaprijed određuje položaj preklopke transformatora i kondenzatorskih baterija. Predloženi pristup testiran je na IEEE 33 sabirničkoj distribucijskoj mreži.

U radu [8] autori predlažu metodu planiranja optimizacije aktivne distribucijske mreže uzimajući u obzir veliku integraciju električnih vozila. Ciljevi optimizacijskog problema uključuju minimiziranje operativnih troškova, smanjenje varijance neto opterećenja i maksimiziranje stope potrošnje energije iz FN u aktivnim distribucijskim mrežama. Za rješavanje problema, korištena je metoda računalne inteligencije. Učinkovitost predložene metode provjerena je na primjeru IEEE distribucijske mreže od 33 čvora.

U radu [9] predložen je optimizacijski okvir u kojem se za dan-unaprijed određuje položaj preklopke transformatora i kondenzatorskih baterija i unutarдневно kontrolira jalova snaga iz FN pretvarača. Optimizacijski problem je višeciljni, minimiziraju se naponsko odstupanje i gubici te je riješen metodom računalne inteligencije. Učinkovitost predloženog optimizacijskog modela testirana je na IEEE 123 sabirničkoj distribucijskoj mreži.

Autori u radu [10] predlažu optimizacijsku metodu za optimalan i održiv rad aktivnih distribucijskih mreža koje uključuju aktivne kupce (u pametnim stambenim zgradama), agregatore električnih vozila i obnovljive izvore energije. Optimizacijski problem riješen je pomoću metode

računalne inteligencije. Učinkovitost predložene strategije testirana je na IEEE 33 sabirničkoj distribucijskoj mreži.

U radu [1] autori sistematiziraju dostupne znanstvene radove koji se bave optimizacijom napona u distribucijskim mrežama pomoću upravljanja jalovom snagom u fotonaponskim izmjenjivačima. Pri rješavanju optimizacijskog problema, razmatrani su optimalni tokovi snaga te pripadne funkcije cilja, ograničenja i metode.

U radu [2] dan je pregled suvremenih metoda za rješavanje problema optimalnih tokova snage. Metode optimizacije podijeljene su u tri kategorije: matematičke, heurističke te metode strojnog učenja. Provedena je komparativna analiza različitih metodologija.

Autori u radu [3] daju detaljan prikaz utjecaja fotonaponskih sustava na distribucijsku mrežu. Predložene su optimizacijske metode u kontekstu poboljšanja kvalitete napona, kvalitete snage, zaštite sustava i stabilnosti sustava. Predložene metode uključuju upravljanje potrošnjom, integraciju transformatora s promjenjivom sklopkom pri opterećenju, regulaciju jalove snage, ograničenje proizvodnje iz fotonaponskih sustava, integraciju sustava za pohranu energije, statičkog sinkronog kompenzatora te pametnog pretvarača.

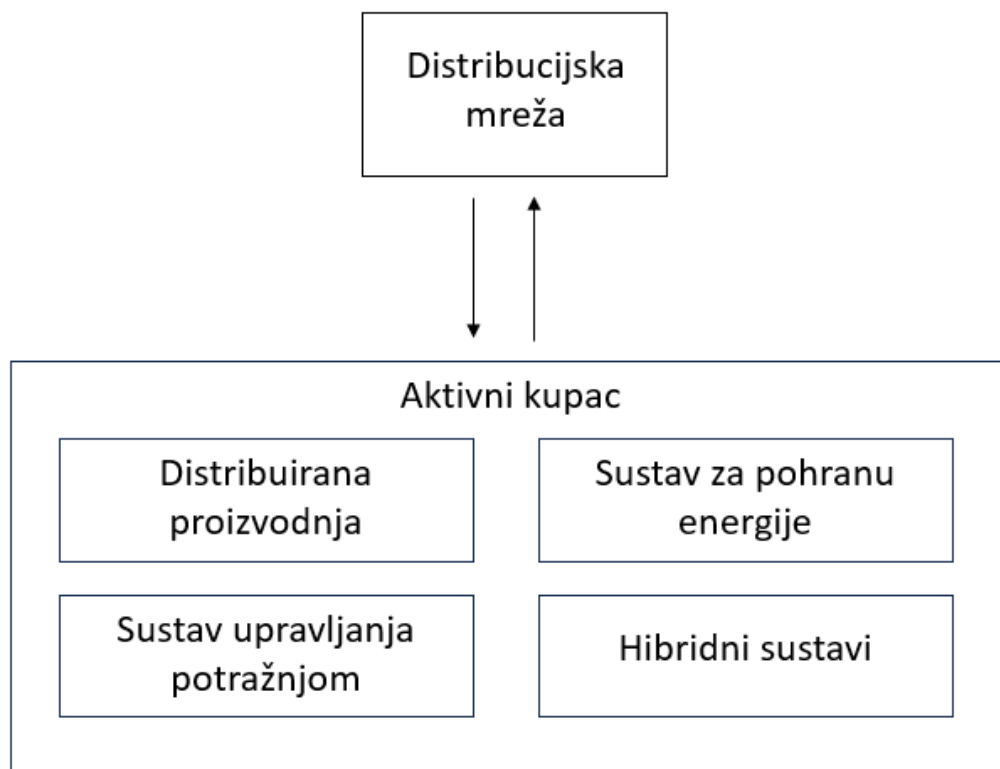
U radu [4] dan je pregled postojećih pristupa volt/var regulaciji. Optimizacijski problem uključuje regulaciju napona i jalove snage kako bi se omogućila integracija distribuirane proizvodnje u distribucijsku mrežu. Za rješenje optimizacijskog problema, autori predlažu metode poput integracije kondenzatorske baterije, transformatora s promjenjivom sklopkom pri opterećenju, pametnih fotonaponskih pretvarača, program odgovora na potražnju te program smanjenja napona radi očuvanja energije.

3. AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Diljem svijeta, konvencionalni elektroenergetski sustavi suočavaju se s problemima postupnog iscrpljivanja izvora fosilnih goriva, loše energetske učinkovitosti i zagađenja okoliša. Autori u literaturi [11] tvrde da su navedeni problemi doveli do novog trenda lokalne proizvodnje električne energije korištenjem nekonvencionalnih/obnovljivih izvora energije (kao što su biomasa, energija vjetra, sunčeva energija,...), te integracije istih u distribucijsku mrežu. Navedena vrsta proizvodnje električne energije (na lokaciji potrošača) naziva se distribuirana proizvodnja, a izvori energije nazivaju se distribuirani izvori energije. Izraz „distribuirana proizvodnja“ osmišljen je kako bi se ovakav koncept proizvodnje razlikovao od centralizirane konvencionalne proizvodnje. Distribucijska mreža postaje aktivna integracijom distribuirane proizvodnje i stoga se naziva aktivnom distribucijskom mrežom [11]. U ovome poglavlju dane su pobliže definicije aktivne distribucijske mreže, prikazani su negativni utjecaji distribuirane proizvodnje, te je dan pregled metoda za ublažavanje utjecaja DP na prilike u distribucijskoj mreži.

3.1. Definicija aktivne distribucijske mreže

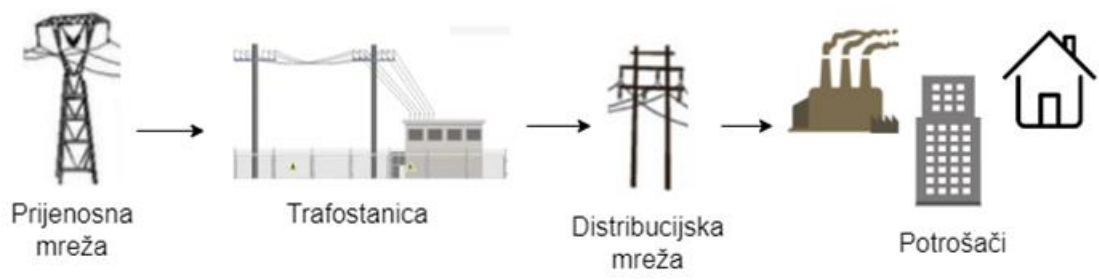
Na temelju CIGRE WG C6.11 [12], sustavi aktivne distribucije definirani su kao distribucijske mreže koje imaju postavljene sustave za kontrolu kombinacije distribuiranih energetske resursa (tj. distribuirane proizvodnje, upravljivih opterećenja ili skladištenja energije) [13]. Integracijom distribuirane proizvodnje pasivni kupci prelaze u aktivne. Stoga, autori u literaturi [1] spominju pojam aktivnog kupca (eng. *prosumer*) te ga definiraju kao „entitet koji ne samo da uzima energiju iz mreže, već također proizvodi energiju koja se može potrošiti, pohraniti ili prodati mreži i drugim potrošačima, te aktivno sudjeluje u pružanju veće fleksibilnosti kao što je regulacija napona i jalove snage“. Prema [1], aktivni kupac se sastoji od distribuirane proizvodnje, sustava upravljanja potrošnjom, a može sadržavati i sustav za pohranu energije. Distribuirani proizvođač (poput fotonaponske elektrane) i baterija su primjer hibridnog sustava. Na slici 3.1., dan je prikaz konfiguracije aktivnog kupca povezanog s distribucijskom mrežom. Električna vozila (EV), električna V2G vozila (eng. *vehicle-to-grid*), pametni sustav za upravljanjem energijom u kućanstvu (EMS) i druga fleksibilna opterećenja predstavljaju sustav upravljanja potrošnjom [1].



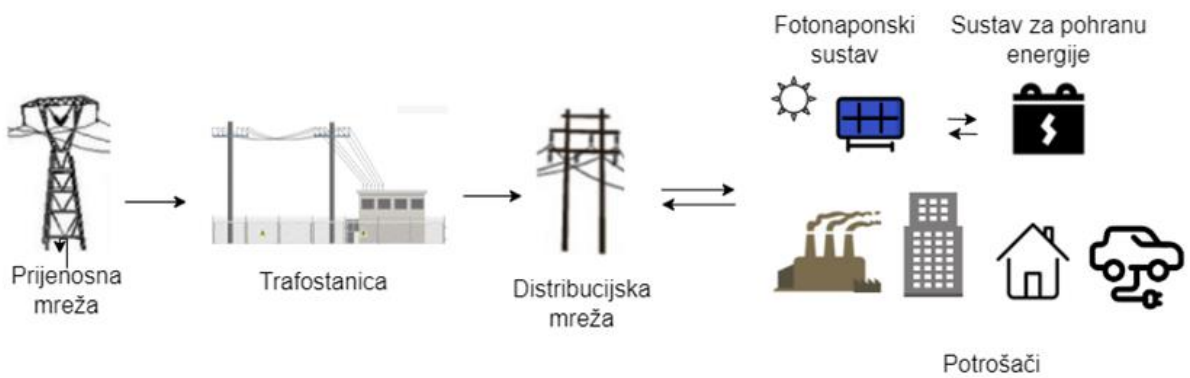
Slika 3.1. Prikaz konfiguracije aktivnog kupca i njegovog spoja na distribucijsku mrežu [1]

Prema [2], integracija distribuirane proizvodnje u mrežu transformirala je tradicionalni model mreže iz pasivnog prijammika energije u aktivnu mrežu koja sudjeluje u razmjeni energije. Razmjena energije DP-ova uobičajeno je postignuta preko komponenata energetske elektronike (energetskih pretvarača) [2].

Razlika između pasivnih i aktivnih distribucijskih mreža prikazana je na slikama 3.2. i 3.3. Pasivne mreže sastoje se od transformatora, električnih vodova i opterećenja (komercijalna i industrijska opterećenja, kućanstva), gdje je prisutan jednosmjernan tok energije (iz prijenosne mreže, preko trafostanice, do potrošača). Aktivne distribucijske mreže sastoje se od transformatora, električnih vodova, opterećenja i DP, a često i sustava za pohranu energije. U navedenim mrežama pojavljuje se dvosmjernan tok energije između aktivnih kupaca i distribucijske trafostanice.



Slika 3.2. Pasivna distribucijska mreža [2]



Slika 3.3. Aktivna distribucijska mreža [2]

3.2. Utjecaji distribuirane proizvodnje na prilike u distribucijskoj mreži

S obzirom da su fotonaponski sustavi glavni predstavnici distribuirane proizvodnje [1], isti su uzeti kao primjer na kojemu su prikazani mogući utjecaji koje distribuirana proizvodnja može imati na distribucijsku mrežu na koju je spojena.

Autori u literaturi [3] dijele moguće negativne utjecaje DP na sljedeći način:

1. Utjecaji na kvalitetu napona

a) Gubici energije

Gubici energije nastaju kao posljedica komponenti pomoću kojih se FN integrira u mreži, upotrebe FN panela s različitim strujno-naponskim karakteristikama u istom sustavu, zasjenjenja i onečišćavanja površina panela, te povećane razine integracije FN sustava u mrežu. Iako je alokacija distribuirane proizvodnje jedna od metoda smanjenja gubitaka u mreži, ako jedinice distribuirane proizvodnje nisu pravilno postavljene i dimenzionirane, može doći do preopterećenja vodova, što će rezultirati povećanim gubicima snage [3] [14] [15].

b) Suprotan tok snage

Uobičajeno, struja u električnoj mreži teče od trafostanice višeg napona prema potrošačima. Proizvedena električna energija koju potrošač ne iskoristi predaje se mreži, čime se mijenja smjer toka snage [3] [16].

c) Porast napona

Kada električna energija proizvedena iz FN sustava prekorači opterećenje potrošača, tada se povećava napon u točki zajedničkog spajanja pretvarača i mreže (PCC, eng. *Point of Common Coupling*) [3].

d) Nesimetrija napona

Nesimetrija napona javlja se zbog promjenjive struje i impedancije uzrokovane neuravnoteženošću između neto potrošnje i neto proizvodnje električne energije, zbog nesimetričnog postavljanja FN panela, te zbog nesimetrije struje zbog jedne faze na strani potrošača [3].

e) Fluktuacije napona

Fluktuacija napona predstavlja promjenu napona duž voda (između točke proizvodnje i potrošnje). Budući da do fluktuacija napona dolazi kada napon na PCC prijeđe određenu granicu, varijacije napona moraju biti unutar određenih dopuštenih raspona. Također, fluktuacije su često uzrokovane

lošim vremenom ili problemima sa spajanjem, a mogu dovesti do prekida u proizvodnji električne energije (što može rezultirati oštećenjem uređaja unutar sustava). Niskonaponski vodovi mogu uzrokovati fluktuacije napona na izlazu iz fotonaponskog panela [3].

f) Fluktuacije toka jalove snage

Fluktuacije toka jalove snage događaju se zbog čestog uključivanja/isključivanja kondenzatora, OLTC (eng. *On Load Tap Changer*) transformatora i mrežnih regulatora napona. Osim toga, dodatni pokretač povećanja fluktuacija toka jalove snage je i varijabilnost sunčevog zračenja [3] [17].

2. Utjecaji na kvalitetu snage

a) Frekvencija

Promjena opterećenja dovodi do odstupanja frekvencije u mreži, a frekvencija se dodatno smanjuje jer se djelatna snaga na izlazu iz FN sustava mijenja zbog promjenjivog sunčevog zračenja. Stvarna snaga može se povećati padom frekvencije generiranom gubicima u proizvodnji i povećanim opterećenjem. U vrijeme velike potrošnje energije, potreba za energijom se povećava, a frekvencija se dodatno smanjuje [3] [18].

b) Harmonici

Harmonici se javljaju zbog nelinearnih opterećenja, no mogu se dodatno povećati zbog visoke razine integracije FN sustava u mrežu i harmonijskih rezonancija koje se javljaju na PCC-u. Harmonici imaju negativne učinke na sustav (kao što su nepravilno otvaranje prekidača te oštećenje izolacije uređaja spojenih na sustav) koji uzrokuju skraćivanje vijeka trajanja uređaja, kao i povećanje gubitaka u mreži [3].

c) Faktor snage

U mrežama sa integriranim FN sustavima, vrijednost faktora snage mijenja se ovisno o razini integracije, pa se značaj korekcije faktora snage povećava u mrežama s visokom razinom integracije. Međutim, budući da FN paneli ne generiraju dovoljnu jalovu snagu (zbog cilja generiranja što veće djelatne snage), povećanjem razine integracije FN sustava, faktor snage u sustavu se smanjuje, a time gubici u sustavu rastu. Idealna vrijednost faktora snage za vlasnika DP trebala bi biti u rasponu od 0,95 do 1 [3] [19].

3. Utjecaji na stabilnost

a) Dinamička stabilnost napona

Dinamička stabilnost napona opisuje se kao sposobnost povratka u rad u stabilnom stanju tijekom i nakon trenutnih promjena ili prekida. Dok FN sustavi niske razine integracije nemaju utjecaja na stabilnost sustava, sustavi visoke razine uzrokuju poremećaje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Osim toga, na dinamičku stabilnost napona utječu i sunčevo zračenje, temperatura, stopa zasjenjenja, dinamičko modeliranje FN panela te kolaps napona [3] [20].

b) Statička stabilnost napona

Kolaps napona značajno utječe na statičku stabilnost, uzrokujući gubitke u sustavu. Osim toga, statička stabilnost napona mijenja se s povećanjem opterećenja u mreži, nemogućnošću proizvodnje jalove snage iz FN sustava i povećanjem količine FN sustava integriranih u mrežu [3].

c) Stabilnost malih signala

Stabilnost malog signala ukazuje na stalnu vještinu elektroenergetskih sustava da održe stabilan napon sustava nakon izlaganja manjim smetnjama uzrokovanim manjim promjenama opterećenja i snage. Budući da proizvodnja električne energije iz FN sustava ovisi o meteorološkim uvjetima (kao što su sunčevo zračenje, temperatura i naoblaka), generirana snaga je promjenjiva. Navedeno stanje smatra se malim smetnjama koje se kontinuirano pojavljuju [3] [21].

4. Utjecaji na sustav zaštite

a) Struja kvara

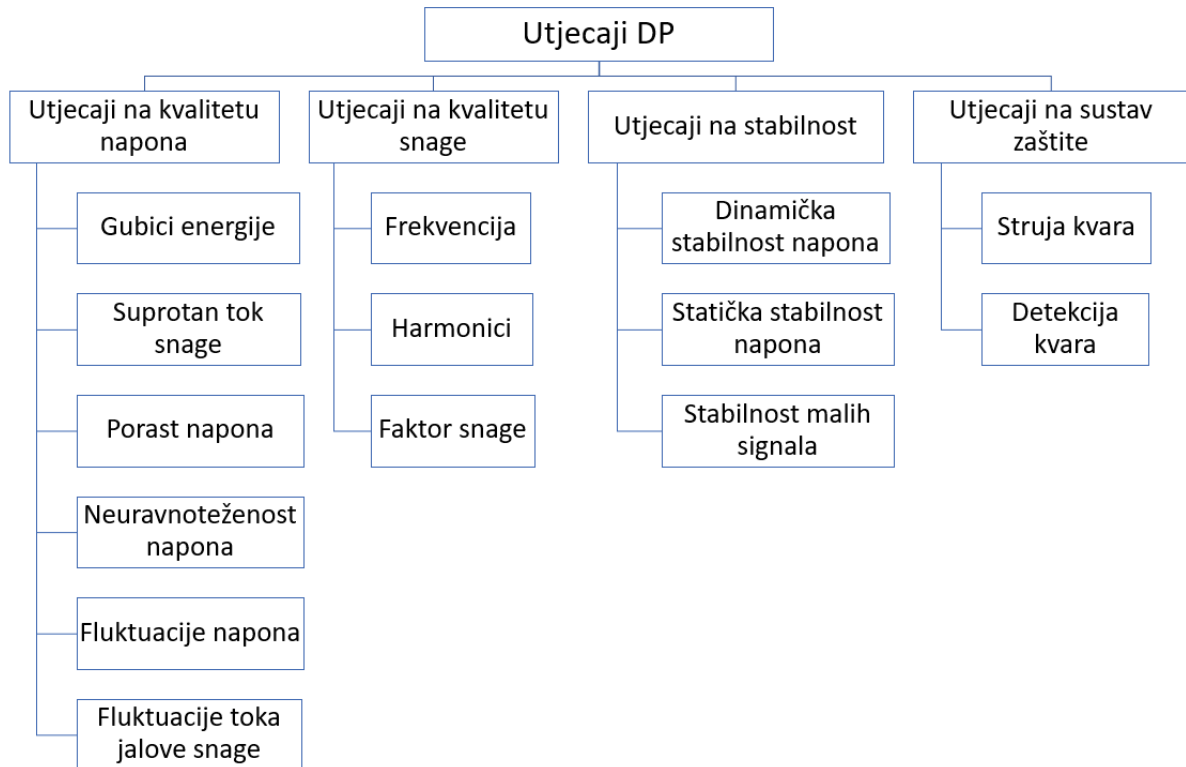
Razina struje kvara se povećava zbog povećane razine integracije FN sustava, nepravilnog postavljanja FN jedinica i dodatne struje kvara iz pretvarača. Neispravno područje je važno točno i brzo identificirati kako ne bi došlo do značajnih sigurnosnih problema i opasnosti od požara u FN nizovima [3].

b) Detekcija kvara

Povećana razina integracije FN sustava u mreži značajno utječe na probleme zaštite [3]. Prema [22], u određenim slučajevima zaštitni uređaji u sustavu ne uspijevaju otkriti odgovarajuće kvarove u fotonaponskom nizu zbog nižih veličina struje kvara, prisutnosti uređaja za praćenje maksimalne snage, te nelinearne FN karakteristike i njezine ovisnosti o razinama sunčeva zračenja. Nadalje, svaka pojava električnog kvara na istosmjernoj strani fotonaponskog sustava sigurno će

imati negativan učinak na izlazne karakteristike, što je obično nepredvidivo, a ponekad može izgorjeti cijeli sustav iako je opremljen zaštitnim uređajima. Također, kvarovi koji se javljaju pri niskim razinama zračenja mogu ostati neotkriveni u FN sustavu i dovesti do značajnih gubitaka energije i degradacije fotonaponskih panela [22].

Na slici 3.4. dan je sažeti prikaz mogućih utjecaja DP na distribucijsku mrežu.



Slika 3.4. Sažeti prikaz mogućih utjecaja DP

3.3. Metode za ublažavanje utjecaja distribuirane proizvodnje na prilike u distribucijskoj mreži

Budući da je sve više FN sustava integrirano u mrežu, među istraživačima se stvorio interes za pronalaženjem metoda i tehnika kojima bi se smanjili negativni utjecaji koje FN sustav (kao jedinica distribuirane proizvodnje) može imati na mrežu. Autori u literaturi [3] navode sljedeća rješenja:

1. Upravljanje potrošnjom (DSM, eng. *Demand Side Management*)

Upravljanje potrošnjom jedno je od rješenja koje potiče potrošače na prilagodbu potrošnje energije tijekom dana. Među prednostima korištenja ove metode, mogu se izdvojiti: regulacija frekvencije, sigurnost opskrbe, povećanje energetske učinkovitosti, uravnoteženje proizvodnje i potrošnje, optimizacija potrošnje energije, smanjenje vršnog opterećenja, izravna kontrola opterećenja. Često korišten pristup su tarifni sustavi prema kojima su cijene visoke u razdobljima vršnih opterećenja, a niske u razdobljima niskih opterećenja, čime se pokušava usmjeriti potrošače na smanjenje korištenja električne energije u razdobljima vršnih opterećenja. Proizvođači mogu prilagoditi svoje ponašanje u potrošnji električne energije i pokušati isporučiti više energije u mrežu tijekom vršnog razdoblja kako bi ostvarili veći profit, što pomaže u povećanju kapaciteta cijele mreže [3] [23].

2. Transformator s promjenjivom preklopkom pod opterećenjem (OLTC, eng. *On Load Tap Changer*)

Problemi poput nepravilnih povećanja napona, prenapona i fluktuacija napona javljaju se u sustavu zbog promjenjive prirode FN-a. Za prevladavanje navedenih problema, u FN sustavima koristi se transformator s promjenjivom preklopkom pod opterećenjem (OLTC). Glavni razlog za korištenje OLTC-a je taj što može automatski prilagoditi omjer transformatora tijekom rada pod opterećenjem, čime utječe na regulaciju napona bez narušavanja naponske stabilnosti. OLTC osigurava stabilnost sustava, a utječe i na detekciju kvara [3] [24].

3. Regulacija jalove snage (RPC, eng. *Reactive Power Control*)

Iako djelatna snaga vrši kontrolu napona u FN sustavima, jalovu snagu treba kontrolirati kako bi se statički podržao napon mreže. U tu svrhu, često se koriste pretvarači. Pretvarači reguliraju napon ograničavanjem djelatne snage te apsorbiranjem/ubrizgavanjem jalove snage u mrežu. Osim toga, napon je bolje reguliran kada su pretvarači integrirani u sustav zajedno sa sustavima za pohranu energije [3] [4] [24].

4. Sustavi za pohranu energije (ESSs, eng. *Energy Storage Systems*)

Prema [3], sustavi za pohranu energije često su korišteni u fotonaponskim sustavima, što rezultira učinkovitim upravljanjem energijom, ublažavanjem učinaka fluktuacija napona, reguliranjem frekvencije te rješavanjem problema s kvalitetom električne energije uzrokovanih visokom razinom integracije FN sustava. Budući da je vremenski interval fluktuacija napona u izlaznoj snazi manji od jedne minute, sustavi za kratkotrajno skladištenje (olovne baterije, superkondenzatori, litij-ionske baterije) pomažu u poboljšanju stabilnosti sustava [3].

5. Statički sinkroni kompenzator (STATCOM, eng. *Static Synchronous Compensator*)

Statički sinkroni kompenzator pripada skupini FACTS uređaja te može upravljati reaktivnom snagom u mreži čime utječe na regulaciju napona. U slučaju kada je mrežni napon viši od nazivnog napona, STATCOM crpi jalovu snagu iz mreže djelujući kao induktor na točki zajedničkog spajanja pretvarača i mreže. Sukladno tome, kada je mrežni napon manji od nazivnog napona, STATCOM injektira jalovu snagu djelujući kao kondenzator. Glavna svrha STATCOM-a je opskrba sustava simetričnom strujom kako bi se poboljšala kvaliteta napajanja uzrokovana nesimetrijom napona koja utječe na osjetljiva opterećenja. Osim toga, pruža i mogućnost filtriranja harmonika [3] [24].

6. Ograničenje proizvodnje iz FN sustava (APC, eng. *Active Power Curtailment*)

Fotonaponski sustavi visoke razine integracije koji ne koriste ESS (ili čiji je kapacitet ESS-a nedovoljan za pohranjivanje proizvedene energije) mogu stvoriti prenapon u mreži na koju su spojeni. Kako bi se smanjio i regulirao profil napona, APC tehnike mogu se primijeniti putem FN pretvarača. Navedena metoda predstavlja smanjenje proizvodnje električne energije, pri čemu se izlazna djelatna snaga smanjuje sve dok napon sustava ne padne ispod zakonski postavljenih granica kako bi se izbjegao prenapon [3].

7. Pametni pretvarač (eng. *Smart Inverter*)

Pametni pretvarači pružaju mogućnosti injektiranja/apsorbiranja jalove snage u mreži, čime se utječe na fluktuacije napona, povećanje napona, nesimetriju napona i suprotne tokove snage u mreži u koju su integrirani [3].

U tablici 3.1. dan je sažet prikaz područja utjecaja na koje pojedino rješenje može djelovati.

Tablica 3.1. Prikaz područja utjecaja pojedinog rješenja [3].

	DSM	OLTC	RPC	SSC	ESSs	APC	Pametni pretvarač
Kvaliteta napona	+	+	+	-	+	+	+
Kvaliteta snage	+	-	+	+	+	+	+
Stabilnost sustava	+	-	-	-	+	-	+
Sustav zaštite	-	-	-	-	-	+	+

4. OPTIMIZACIJA AKTIVNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Najčešći i temeljni optimizacijski problem u elektroenergetskim sustavima predstavljaju optimalni tokovi snaga (OPF, eng. *Optimal Power Flow*). OPF je od velikog značaja u planiranju te procesu razvoja distribucijske mreže [25]. Prema literaturi [1], OPF se koristi kao univerzalan izraz za probleme povezane s optimizacijom mreže, a sam koncept OPF-a predložen je ranih 1960-ih kao poboljšanje ekonomskog nadzora kako bi se pronašlo optimalno rješenje za kontrolu varijabilnih postavki pod različitim ograničenjima. Stoga, u ovome su poglavlju dani prikazi opće formulacije i funkcija cilja OPF-a, pripadajuća ograničenja te metode za rješenje optimizacijskog problema.

4.1. Opća formulacija i funkcije cilja

Problem OPF-a može se opisati kao minimiziranje funkcije cilja uz uzimanje u obzir ograničenja jednakosti i nejednakosti, što autori u literaturi [1] prikazuju sljedećim jednadžbama:

$$\min F(x, u) = 0 \quad (4-1)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (4-2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (4-3)$$

gdje su: $F(x,u)$ – funkcija cilja koju treba optimizirati; $g(x,u)$ – nelinearna ograničenja jednakosti; $h(x,u)$ – nelinearna ograničenja nejednakosti; x – varijable stanja; u – kontrolne (ispravljačke) varijable [1].

Autori u literaturi [1] navode sljedeće često korištene ciljeve u problemima optimizacije napona, praćene matematičkim izrazima:

1. Minimiziranje odstupanja napona:

$$V_{dev} = \sum_{i \in N} (V_i - V^{nom})^2 \quad (4-4)$$

gdje su: V_{dev} – odstupanje napona; V_i – napon na sabirnici i ; V^{nom} – nazivni napon.

2. Minimiziranje faktora naponske nesimetrije (VUF):

$$VUF = \frac{V_{inverzna}}{V_{direktna}} \quad (4-5)$$

gdje su: $V_{inverzna}$ – inverzna komponenta napona; $V_{direktna}$ – direktna komponenta napona.

3. Minimiziranje gubitka snage

$$\sum_{k=1}^N g_{ik}(V_i^2 + V_k^2 - 2V_iV_k \cos \theta_{ik}) + \sum_{(i,k) \in B} r_{ik} l_{ik,t} \quad (4-6)$$

gdje su: V_i i V_k – iznosi napona na i -toj i k -toj sabirnici; θ_{ik} – fazni kut i -tog i k -tog elementa vodljivosti g_{ik} ; r_{ik} i $l_{ik,t}$ – kvadratna vrijednost struje i otpora odvojaka od sabirnice i do sabirnice k .

4. Minimiziranje promjena preklopke OLTC-a

$$\sum_{m=1}^M s_{m,t} \quad (4-7)$$

gdje su: M – broj mogućih položaja preklopke; $s_{m,t}$ – položaj preklopke m u trenutku t .

5. Minimiziranje smanjenja proizvodnje FN (APC, eng. *Active Power Curtailment*)

$$\sum_{i=1}^N |P_{t,i}^{FN,ogr}| \quad (4-8)$$

gdje je: $P_{t,i}^{FN,ogr}$ – ograničena djelatna snaga FN-a u trenutku t .

6. Minimiziranje gubitaka FN pretvarača

$$\sum_{p=1}^3 \sum_{i \in \gamma} (k_{i1}^p S_{PVi}^p + k_{i2}^p S_{PVi}^p + k_{i3}^p) \quad (4-9)$$

gdje su: p – faze; γ – set sabirnica s fotonaponima; S_{PVi}^p – prividna snaga; $k_{i1}^p, k_{i2}^p, k_{i3}^p$ - koeficijenti podataka o učinkovitosti svakog pretvarača.

7. Minimiziranje injekcije/apsorpcije jalove snage

$$|Q_{inj.}|/|Q_{abs.}| \quad (4-10)$$

gdje su: $Q_{inj.}$, $Q_{inj.}$ – injektirana/apsorbirana reaktivna snaga.

8. Minimiziranje troškova kupljene energije

$$\sum_{t \in T} \alpha_t P_{1,t} \Delta t \quad (4-11)$$

gdje su: α_t – cijena energije u t -tom trenutku; $P_{1,t}$ – djelatna snaga uvezena iz vanjske mreže u trenutku t ; Δt – trajanje vremenskih intervala.

9. Minimizacija indeksa sigurnosne margine (SMI, eng. *Security Margin Index*)

$$\sum_{t \in T} (1 - \min \left| \frac{I_{l,t} - I_l^r}{I_l^r} \right|) \quad (4-12)$$

gdje su: $I_{l,t}$ – linijska struja u l -tom redu u trenutku t ; I_l^r – jakost linijske struje u l -tomvodu.

4.2. Ograničenja

Prema [26], ograničenja OPF-a s više ciljeva mogu se podijeliti u dvije kategorije: ograničenja jednakosti i ograničenja nejednakosti.

U elektroenergetskim sustavima, konvencionalni tok snage je nelinearan i nekonveksan te se uobičajeno rješava Newton-Raphsonovom iterativnom metodom. U ograničenim OPF primjenama, ograničenja jednakosti uključuju konvencionalne jednadžbe toka snage i druga ograničenja kako bi se osigurala ravnoteža. Detaljna verzija toka snage naziva se tok izmjenične struje [1]. Protok izmjenične struje kao ograničenje u OPF-u najčešće se formulira u polarnom obliku [1]:

$$P_i = \sum_{k=i}^N |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (4-13)$$

$$Q_i = \sum_{k=i}^N |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (4-14)$$

gdje su: P_i – djelatna snaga na sabirnici i ; Q_i – reaktivna snaga na sabirnici i ; V_i – iznos napona na sabirnici i ; V_k – iznos napona na sabirnici k ; Y_{ik} – ik -ti element matrice admitancija sabirnica

Y_{bus} ; δ_i – fazni kut napona na sabirnici i ; δ_k – fazni kut napona na sabirnici k ; θ_{ik} – fazni kut napona ik -tog elementa matrice admitancija sabirnica Y_{bus} .

Autori u literaturi [1] navode sljedeća ograničenja nejednakosti:

1. Ograničenja kontrolnih varijabli;
2. Ograničenje proizvodnje električne energije (gornje i donje granice djelatne i jalove snage);
3. Mrežna ograničenja dobivena analizom (npr. ograničenje MVA).

Prema [1], optimizacija napona treba zadovoljiti sljedeće zahtjeve ograničenja:

1. Jednadžbe protoka snage dane izrazima (4-13) i (4-14).
2. Ograničenje napona:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (4-15)$$

gdje su: V_i^{min} i V_i^{max} – donja i gornja granica napona.

3. Ograničenje djelatne i jalove snage FN-a:

$$0 \leq P_{PV,i} \leq P_{PV,av,i} \quad (4-16)$$

$$-\sqrt{S_{PV,i}^2 - P_{PV,i}^2} \leq Q_{PV,i} \leq \sqrt{S_{PV,i}^2 - P_{PV,i}^2} \quad (4-17)$$

gdje su: $P_{PV,i}$, $Q_{PV,i}$, $S_{PV,i}$ – djelatna, reaktivna i prividna snaga na sabirnici i ; $P_{PV,av,i}$ – dostupna djelatna snaga na sabirnici i .

4. Strujno (termičko) ograničenje voda:

$$I_{ik}^{min} \leq I_{ik} \leq I_{ik}^{max} \quad (4-18)$$

gdje su: I_{ik}^{min} i I_{ik}^{max} – donja i gornja granica struje voda između sabirnica i i k .

5. Ograničenje položaja preklopke OLTC-a (ako je primjenjivo):

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max} \quad (4-19)$$

gdje su: T_i^{min} i T_i^{max} – donja i gornja pozicija OLTC prekidača na sabirnici i .

6. Ograničenje kondenzatora (ako je primjenjivo):

$$Q_{Ci}^{min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{max} \quad (4-20)$$

gdje su: Q_{Ci}^{min} i Q_{Ci}^{max} – donja i gornja granica reaktivne snage kondenzatora na sabirnici i .

7. Ograničenje spremnika energije (ako je primjenjivo):

$$SoC_{i,t}^{min} \leq SoC_{i,t} \leq SoC_{i,t}^{max} \quad (4-21)$$

gdje su: $SoC_{i,t}^{min}$ i $SoC_{i,t}^{max}$ – donja i gornja granica napunjenosti sustava za pohranu energije u trenutku t .

Potrebno je napomenuti da se ciljevi i ograničenja moraju točno modelirati kako bi se dobilo zadovoljavajuće rješenje pri provedbi analize OPF-a [1].

4.3. Metode rješavanja

Prema [1], složenost OPF-a ovisi o pristupu formuliranja protoka snage. Ukoliko se za formulaciju OPF-a koriste izvorne jednadžbe tokova snage, optimizacijski problem je nelinearan i teško ga je riješiti. Stoga, mnogi istraživači pokušavaju pojednostaviti formulaciju OPF-a kako bi dobili problem linearne ili kvadratne optimizacije koji je lakše riješiti [1]. Formulacija OPF-a može se klasificirati u [1]:

1. Nelinearno programiranje (NLP, eng. *Nonlinear Programming*);
2. Linearno programiranje (LP, eng. *Linear Programming*);
3. Kvadratno programiranje (QP, eng. *Quadratic Programming*);
4. Mješovito-cjelobrojno linearno programiranje (MILP, eng. *Mixed-Integer Linear Programming*);
5. Mješovito-cjelobrojno nelinearno programiranje (MINLP, eng. *Mixed-Integer Nonlinear Programming*).

OPF formulacija određuje koja se metoda koristi. Osnovna kategorizacija metoda rješenja OPF-a podijeljena je na analitičke metode i metode računalne inteligencije.

Najčešće korištene analitičke metode za linearni OPF (LP i MILP) su: simpleksne metode (eng. *Simplex Methods*), sekvencijalno linearno programiranje (SLP, eng. *Sequential Linear Programming*) i metode unutarnjih točaka (IPM, eng. *Interior Point Methods*) [1].

Prema [1], analitičke metode primijenjene na NLP, QP i MINLP su sljedeće: metode temeljene na Newtonu (eng. *Newton-based methods*), IPM-ovi, sekvencijalno kvadratno programiranje (SQP, eng. *Sequential Quadratic Programming*) te metode gradijenta: metoda smanjenog gradijenta (RG, eng. *Reduced Gradient method*), metoda konjugiranog gradijenta (CG, eng. *Conjugate Gradient method*) i generalizirana metoda smanjenog gradijenta (GRG, eng. *Generalized Reduced Gradient method*).

Iako metode računalne inteligencije ne zahtijevaju preciznu matematičku formulaciju OPF problema, autori ih ubrajaju u skupinu metoda rješenja koje mogu riješiti nelinearne i cjelobrojne formulacije OPF jer mogu uzeti u obzir nelinearnosti u izvornom problemu [1].

Autori u literaturi [1] navode sljedeće metode računalne inteligencije: umjetna neuronska mreža (ANN, eng. *Artificial Neural Network*), genetski algoritam (GA, eng. *Genetic Algorithm*), optimizacija roja čestica (PSO, eng. *Particle Swarm Optimization*), optimizacija kolonije mrava (ACO, eng. *Ant Colony Optimization*), algoritam hranjenja bakterija (BFA, eng. *Bacterial Foraging Algorithm*), simulirano kaljenje (SA, eng. *Simulated Annealing*), tabu pretraživanje (TS, eng. *Tabu Search*) i neizrazita logika (FL, eng. *Fuzzy Logic*).

5. PRIMJER OPTIMIZACIJE NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE S AKTIVNIM KUPCIMA

Ovo poglavlje rada daje uvid u model niskonaponske distribucijske mreže s prisutnom distribuiranom proizvodnjom (FN sustavima). Promatra se utjecaj DP na prilike u mreži te se provodi optimizacija sa ciljem minimizacije gubitaka. Kao rješenje za smanjenje negativnih utjecaja DP na mrežu, korištena je kombinacija metoda ograničenja proizvodnje iz FN sustava i upravljanja jalovom snagom iz FN pretvarača. U prvome potpoglavlju dana je formulacija matematičkog modela optimizacijskog problema, zatim je opisan model testne mreže, definirani su parametri optimizacije te su opisani simulacijski slučajevi.

Modeliranje mreže i analiza optimalnih tokova snaga provedeni su korištenjem *pandapower* alata u *Python* programskom okruženju. *Pandapower* predstavlja kombinaciju biblioteke za analizu podataka *pandas* i alatnog okvira za analizu elektroenergetskog sustava *PYPOWER* kako bi stvorio program za izračun mreže. Iako je započeo kao dio *PYPOWER*-a, razvio se u samostalni alatni okvir za analizu elektroenergetskih sustava s opsežnom bibliotekom modela elektroenergetskih sustava, poboljšanim alatom za rješavanje protoka energije i mnogim drugim funkcijama za analizu elektroenergetskih sustava. Jednostavan je za korištenje sa ciljem automatizacije analize i optimizacije u elektroenergetskim sustavima [5].

Pandapower podržava sljedeće funkcije analize elektroenergetskog sustava [5]:

1. tokove snaga,
2. optimalne tokove snaga,
3. izračun kratkog spoja,
4. procjenu stanja,
5. topološko pretraživanje.

5.1. Modeliranje optimizacijskog problema

U ovome potpoglavlju provedeno je matematičko modeliranje optimizacijskog problema. Funkciju cilja predstavlja minimizacija gubitaka snage, matematički prikazana jednačinom (5-1):

$$\min \sqrt{P_{gub}^2 + Q_{gub}^2} \quad (5-1)$$

gdje su: P_{gub} – gubici djelatne snage; Q_{gub} – gubici reaktivne snage.

Pri daljnjem modeliranju optimizacijskog problema, potrebno je definirati odgovarajuća ograničenja. Pripadajuća ograničenja slijede u nastavku:

1. Ograničenja jednakosti - uključuju jednačbe tokova snaga:

$$P_i = \sum_{k=i}^N |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (5-2)$$

$$Q_i = \sum_{k=i}^N |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (5-3)$$

gdje su: P_i – djelatna snaga na sabirnici i ; Q_i – reaktivna snaga na sabirnici i ; V_i – iznos napona na sabirnici i ; V_k – iznos napona na sabirnici k ; Y_{ik} - ik -ti element matrice admitancija sabirnica Y_{bus} ; δ_i – fazni kut napona na sabirnici i ; δ_k – fazni kut napona na sabirnici k ; θ_{ik} – fazni kut napona ik -tog elementa matrice admitancija sabirnica Y_{bus} .

2. Ograničenja nejednakosti:

- a) Ograničenje napona

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (5-4)$$

gdje su: V_i^{min} i V_i^{max} – donja i gornja granica napona.

- b) Strujno (termičko) ograničenje voda:

$$I_{ik} \leq I_{ik}^{max} \quad (5-5)$$

gdje je: I_{ik}^{max} – gornja granica struje voda između sabirnica i i k .

c) Opterećenje transformatora:

$$S_{transf} \leq S_{transf}^{max} \quad (5-6)$$

gdje je: S_{transf}^{max} – gornja granica prividne snage transformatora (jednaka nazivnoj snazi transformatora).

d) Ograničenje djelatne i jalove snage FN-a:

$$0 \leq P_{PV,i} \leq P_{PV,av,i} \quad (5-7)$$

$$-P_{PV} \tan \varphi \leq Q_{PV,i} \leq P_{PV} \tan \varphi \quad (5-8)$$

gdje su: $P_{PV,i}$, $Q_{PV,i}$ – djelatna i reaktivna snaga na sabirnici i ; $P_{PV,av,i}$ – dostupna djelatna snaga na sabirnici i ; φ – kut faznog pomaka između napona i struje.

5.2. Modeliranje mreže

Model testne mreže sastoji se od vanjske distribucijske mreže, transformatora 10/0,4 kV te četiri radijalna izvoda iz kojih se napaja ukupno 39 kućanstava. Ukupna potrošnja koju zahtijeva trideset devet kućanstava iznosi 71 kW.

Pri modeliranju mreže u *pandapower* programskom alatu, potrebno je integrirati biblioteke koje omogućavaju provedbu nastavka koda (Slika 5.1.).

<i>Linija</i>	<i>Kod</i>
1:	<code>import pandapower as pp</code>
2:	<code>import pandapower.plotting as plot</code>
3:	<code>import os</code>
4:	<code>import numpy as np</code>
5:	<code>import pandas as pd</code>
6:	<code>import julia</code>
7:	<code>import math</code>

Slika 5.1. Prikaz integracije potrebnih biblioteka

Kratki opis navedenih biblioteka slijedi u nastavku [5]:

- *pandapower* - *Python* biblioteka za modeliranje, analizu i simulaciju električnih energetske mreže;
- *pandapower.plotting* - dio *pandapower* biblioteke koji omogućava vizualni prikaz električnih mreža;
- *os* - *Python* biblioteka za interakciju s operacijskim sustavom;
- *numpy* - biblioteka koja omogućava rad s nizovima (eng. *arrays*);
- *pandas* - biblioteka potrebna za analizu podataka;
- *julia* - programski jezik koji omogućuje dodatne analize i optimizacije (u ovome radu korišten je radi provedbe izračuna optimalnih tokova snaga);
- *math* - *Python* biblioteka koja omogućuje korištenje osnovnih matematičkih funkcija.

Na slici 5.2. prikazano je definiranje nove prazne mreže kojoj je dodijeljeno ime *net*. Definiranje je izvršeno pomoću naredbe *pp.create_empty_network*.

Linija Kod

```
9:        #Definiranje nove mreže  
10:        net = pp.create_empty_network()
```

Slika 5.2. Prikaz definiranja prazne mreže *net*

Model mreže sadrži 41 sabirnicu. Sabirnica na kojoj se nalazi vanjska distribucijska mreža je naponske razine 10 kV, dok su ostale sabirnice naponske razine 0,4 kV. Pri definiranju sabirnice korištena je naredba *pp.create_bus*. Obavezni parametri su naziv mreže kojoj se sabirnica pridružuje (u ovome slučaju *net*) te nazivni napon sabirnice u kV. Neobavezni parametar predstavlja naziv sabirnice. Osim navedenog, *pandapower* pruža mogućnost definiranja dodatnih neobaveznih parametara (poput indeksa, tipa sabirnice,...). Kao primjer, na slici 5.3. dan je prikaz modeliranja prvih sedam sabirnica. Na sabirnicu „b400V“ spojeni su radijalni izvodi.

Linija **Kod**

```
12:      #Definiranje sabirnice 10 kV
13:      b10kv = pp.create_bus(net, vn_kv=10.0, name="b10kv")
14:
15:      #Definiranje sabirnica 0.4 kV
16:      b400v = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b400v")
17:
18:      b04kv1 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV1")
19:      b04kv2 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV2")
20:      b04kv3 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV3")
21:      b04kv4 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV4")
22:      b04kv5 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV5")
```

Slika 5.3. Primjer modeliranja sabirnica

Pri modeliranju transformatora, vodova i kabela, *pandapower* pruža dvije mogućnosti:

- modeliranje pomoću prilagođenih parametara,
- modeliranje korištenjem prethodno definiranih standardnih tipova elemenata pohranjenih u jednoj od biblioteka programa.

U ovome radu modeliranje transformatora izvršeno je pomoću prilagođenih parametara (korištenjem naredbe *create_transformer_from_parameters*). Modeliran je transformator 10/0,4 kV, nazivne prividne snage 250 kVA. Predstavlja vezu između vanjske distribucijske mreže na 10 kV strani i četiri radijalna izvoda niskonaponske distribucijske mreže od 230/400 V. Podaci transformatora koji su uneseni u model prikazani su na slici 5.4., gdje su definirani pomoću sljedećih parametara [5]:

- *net* - naziv mreže u kojoj se vrši modeliranje transformatora;
- *hv_bus* - sabirnica višeg napona;
- *lv_bus* - sabirnica nižeg napona;
- *sn_mva* - nazivna prividna snaga (iskazana u MVA);
- *vn_hv_kv* - nazivni napon na strani višeg napona (iskazan u kV);
- *vn_lv_kv* - nazivni napon na strani nižeg napona (iskazan u kV);
- *vkr_percent* - realni dio relativnog pada napona (iskazan u postocima);
- *vk_percent* - relativni napon kratkog spoja (iskazan u postocima);
- *pfe_kw* - gubici u željezu (iskazani u kW);
- *i0_percent* - gubici kratkog spoja (iskazani u postocima);

- *shift_degree* - fazni pomak između napona sekundara i primara;
- *tap_side* - položaj regulacijske preklopke transformatora („hv“ označava položaj preklopke na strani višeg napona);
- *tap_neutral* - položaj regulacijske preklopke transformatora gdje je omjer transformatora jednak omjeru nazivnih napona;
- *tap_max* - maksimalan položaj preklopke za slučaj povećanja prijenosnog omjera i smanjenja napona na sekundaru;
- *tap_min* - minimalan položaj preklopke za slučaj smanjenja prijenosnog omjera i povećanja napona na sekundaru;
- *tap_step_percent* - postotak promjene napona za svaki položaj regulacijske preklopke;
- *tap_step_degree* - stupanj promjene napona za svaki položaj preklopke;
- *tap_pos* - trenutni položaj preklopke;
- *tap_phase_shifter* - mogućnost upravljanja faznim kutom pomoću preklopke;
- *name* - naziv transformatora.

Linija Kod

```

61:        #Modeliranje transformatora 10/0.4 kV
62:        pp. create_transformer_from_parameters(net, hv_bus=b10kv,
63:                                            lv_bus=b400v, sn_mva=0.25, vn_hv_kv=10, vn_lv_kv=0.4,
64:                                            vkr_percent=1.2, vk_percent=4.0, pfe_kw=0.65,
65:                                            i0_percent=0.2619, shift_degree=330, tap_side='hv',
66:                                            tap_neutral=0, tap_max=2, tap_min=-2,
67:                                            tap_step_percent=2.5, tap_step_degree=0,
68:                                            tap_pos=0,tap_phase_shifter=False, name="TS 10/0.4 kV")

```

Slika 5.4. Prikaz modeliranja transformatora 10/0,4 kV

Pri modeliranju vodova (kabela) korišteni su standardni tipovi vodova iz biblioteke *pandapower*-a. Za potrebe ovoga rada, uzet je vod NAYY 4x50 SE sljedećih karakteristika:

- presjek voda $q = 50 \text{ mm}^2$,
- jedinična otpornost $r = 0,642 \text{ } \Omega/\text{km}$,
- jedinična reaktancija $x = 0,083 \text{ } \Omega/\text{km}$,
- jedinični kapacitet $c = 210,0 \text{ nF}/\text{km}$,
- maksimalna struja $I_{\max} = 0,142 \text{ kA}$,
- temperaturni koeficijent rastezljivosti $\alpha = 0,00403 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Vodovi su modelirani pomoću naredbe *pp.create_line* u kojoj su definirani sljedeći parametri: naziv mreže u kojoj se vod modelira (*net*), početna i krajnja sabirnica (*from_bus*, *to_bus*), duljina voda u kilometrima (*length_km*), naziv korištenog standardnog tipa voda (*std_type*) te proizvoljno odabrani naziv voda u mreži (*name*). Kao primjer, na slici 5.5. prikazano je modeliranje prva tri voda prvog radijalnog izvoda. U svim radijalnim izvodima korišteni su vodovi jednakih karakteristika te je modelirano ukupno 39 vodova.

Linija* *Kod

```
70:       #Modeliranje vodova
71:       pp.create_line(net, from_bus=b400v, to_bus=b04kv1, length_km=0.053,
72:                     std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 1")
73:       pp.create_line(net, from_bus=b04kv1, to_bus=b04kv2, length_km=0.053,
74:                     std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 2")
75:       pp.create_line(net, from_bus=b04kv2, to_bus=b04kv3, length_km=0.053,
76:                     std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 3")
```

Slika 5.5. Primjer modeliranja vodova

U prvom radijalnom izvodu duljina voda od transformatora 10/0,4 kV do prvog potrošača (kućanstva) iznosi 53 metara, jednako kao i duljine vodova između preostalih potrošača. U drugome radijalnom izvodu navedene duljine vodova iznose 34 m, u trećem izvodu 80 m, a u četvrtom 40 m. U Tablici 5.1. dan je prikaz broja potrošača po pojedinom izvodu.

Tablica 5.1. Prikaz broja potrošača po pojedinom radijalnom izvodu.

	Broj potrošača
Prvi radijalni izvod	9
Drugi radijalni izvod	16
Treći radijalni izvod	5
Četvrti radijalni izvod	9

Vanjska distribucijska mreža je mreža naponske razine 10 kV koja napaja trafostanicu 10/0,4 kV. Modelirana je pomoću naredbe `pp.create_ext_grid` (Slika 5.6.) u kojoj su definirani parametri poput naziva pripadne mreže (*net*), naziva sabirnice na koju se vanjska mreža spaja (*bus*) te iznosa napona u čvorištu izraženog u p.u. (eng. *per unit*).

Linija Kod

```
153:    #Definiranje vanjske mreže
154:    pp.create_ext_grid(net, bus=b10kv, vm_pu=1.05)
```

Slika 5.6. Prikaz modeliranja vanjske mreže

Potrošači, odnosno opterećenja u mreži, modelirani su pomoću naredbe `pp.create.create_asymmetric_load`. Modelirani su kao jednofazna, nesimetrična opterećenja te su im definirani sljedeći parametri: naziv mreže kojoj se opterećenja pridružuju (*net*), iznos djelatne snage po pojedinoj fazi izražen u MW (*p_a_mw*, *p_b_mw*, *p_c_mw*), iznos reaktivne snage po pojedinoj fazi izražen u MVar (*q_a_mvar*, *q_b_mvar*, *q_c_mvar*), proizvoljno odabrani naziv (*name*), podešavanje veličine ikone simbola opterećenja pri grafičkom prikazu mreže (*scaling*), određivanje dostupnosti elementa pri radu (*in_service*), te tip konfiguracije (*type*).

Ukupno je modelirano 39 potrošača, od kojih 17 potrošača ima potrošnju 1 kW (0,323 kVAr), 12 potrošača ima potrošnju 2 kW (0,646 kVAr) te 10 potrošača ima potrošnju 3 kW (0,969 kVAr). Pretpostavljeni faktor snage iznosi 0,95 induktivno.

Na slici 5.7. dan je primjer modeliranja triju opterećenja prvog radijalnog izvoda.

Linija **Kod**

```
156:    #Modeliranje opterećenja na 0.4 kV
157:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv1, p_a_mw=0.001,
158:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
159:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 1",
160:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
161:    (...)
169:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv4, p_a_mw=0.0,
170:                                    p_b_mw=0.002, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
171:                                    q_b_mvar=0.000646, q_c_mvar=0.0, name="Teret 4",
172:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
173:    (...)
181:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv7, p_a_mw=0.0,
182:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.003, q_a_mvar=0.0,
183:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000969, name="Teret 7",
184:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
```

Slika 5.7. Primjer modeliranja opterećenja

Jedinice distribuirane proizvodnje (FN sustavi) modelirane su kao trofazni statički generatori pomoću naredbe *pp.create_sgen*. Pri modeliranju, definirani su sljedeći parametri: naziv mreže kojoj se DP pridružuje (*net*), najveći dopušteni iznos proizvedene djelatne snage izražen u MW (*p_mw*), nazivna snaga generatora izražena u MVA (*sn_mva*), indeks generatora (*index*), proizvoljno odabrani naziv (*name*), podešavanje veličine ikone simbola generatora pri grafičkom prikazu mreže (*scaling*), tip konfiguracije (*type*), te određivanje dostupnosti elementa pri radu (*in_service*).

Slika 5.8. prikazuje primjer modeliranja prvih pet jedinica DP u prvom radijalnom izvodu. Ukupno je modelirano 39 FN sustava nazivne snage 5 kVA te najveće predviđene proizvodnje 5 kW.

Linija ***Kod***

```
316: #Modeliranje DP
317: pp.create_sgen(net, bus=b04kv1, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=0,
318:               name="DP1", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
319: pp.create_sgen(net, bus=b04kv2, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=1,
320:               name="DP2", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
321: pp.create_sgen(net, bus=b04kv3, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=2,
322:               name="DP3", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
323: pp.create_sgen(net, bus=b04kv4, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=3,
324:               name="DP4", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
325: pp.create_sgen(net, bus=b04kv5, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=4,
326:               name="DP5", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
```

Slika 5.8. Primjer modeliranja DP

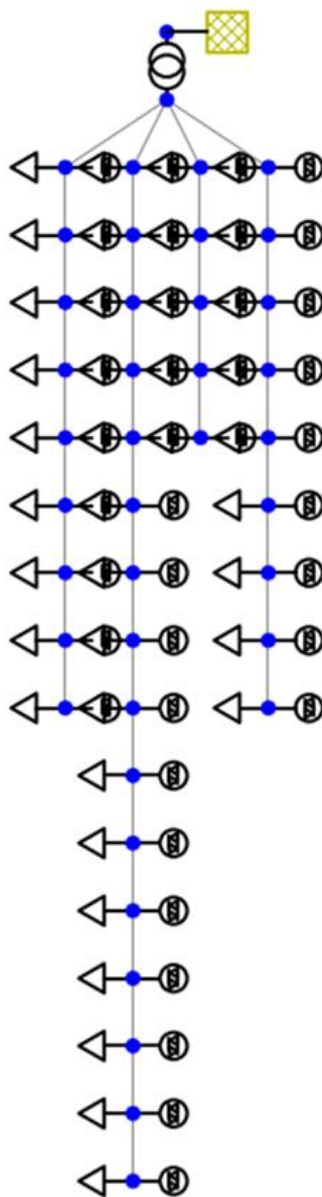
Opisani model mreže moguće je vizualno prikazati korištenjem naredbe *plot.simple_plot* (Slika 5.9.). Unutar naredbe definirani su parametri poput naziva mreže koja se prikazuje (*net*), željene veličine prikaza sabirnica (*bus_size*), vanjske mreže (*ext_grid_size*), transformatora (*trafo_size*), opterećenja (*load_size*) i generatora (*sgen_size*), te oznake kojima se naređuje prikazivanje simbola opterećenja (*plot_loads*) i simbola generatora (*plot_sgens*).

Linija ***Kod***

```
399: #Prikaz modelirane mreže
400: plot.simple_plot(net, bus_size=1.0, ext_grid_size=2.0,
401:                 trafo_size=2.5, plot_loads="True", plot_sgens="True",
402:                 load_size=2.5, sgen_size=2.0)
```

Slika 5.9. Definiranje koda za prikaz modelirane mreže

Na slici 5.10. prikazan je model mreže sa svim njezinim elementima što će predstavljati jedan od simulacijskih slučajeva u nastavku rada.



Slika 5.10. Prikaz modelirane mreže

Pandapower pruža mogućnost provedbe analize tokova snaga pomoću naredbe *pp.runpp* prikazanoj na slici 5.11.

Linija* *Kod

```
432:    #Tokovi snaga
433:    pp.runpp(net)
```

Slika 5.11. Prikaz programskog koda za provedbu analize tokova snaga

Dobiveni rezultati mogu se prikazati analitički pomoću programskog koda prikazanog na slici 5.12. Korištenjem naredbe *print()* ispisuju se sljedeći podaci:

- naponi na sabirnicama izraženi u p.u. (*net.res_bus.vm_pu*),
- opterećenje vodova izraženo u postocima (*net.res_line.loading_percent*),
- opterećenje transformatora izraženo u postocima (*net.res_trafo.loading_percent*),
- iznosi djelatne i reaktivne snage iz vanjske distribucijske mreže izraženi u MW i MVAr (*net.res_ext_grid*),
- iznosi djelatne i reaktivne izlazne snage generatora izraženi u MW i MVAr (*net.res_sgen*),
- gubici vodova izraženi u MW (*net.res_line.pl_mw.values.sum()*),
- gubici transformatora izraženi u MW (*net.res_trafo.pl_mw.values.sum()*),
- ukupni djelatni gubici izraženi u MW (*net.res_line.pl_mw.values.sum()* + *net.res_trafo.pl_mw.values.sum()*).

Linija **Kod**

```
438:   #Ispis rezultata
439:   print("Naponi na sabirnicama:")
440:   print(net.res_bus.vm_pu)
441:   print()
442:   print("Opterećenje vodova:")
443:   print(net.res_line.loading_percent)
444:   print()
445:   print("Opterećenje transformatora:")
446:   print(net.res_trafo.loading_percent)
447:   print()
448:   print("Snaga iz vanjske mreže:")
449:   print(net.res_ext_grid)
450:   print()
451:   print("Proizvodnja DG:")
452:   print(net.res_sgen)
453:   print()
454:   print("Gubici vodova:", net.res_line.pl_mw.values.sum())
455:   print("Gubici transformatora:", net.res_trafo.pl_mw.values.sum())
456:   print("Ukupni djelatni gubici:", net.res_line.pl_mw.values.sum() +
         net.res_trafo.pl_mw.values.sum())
```

Slika 5.12. Prikaz programskog koda za ispis rezultata analize tokova snaga

Rezultati analize tokova snaga mogu se prikazati i vizualno putem interaktivnih dijagrama pomoću naredbe `plot.plotly.pf_res_plotly` (Slika 5.13).

Linija **Kod**

```
458:   #Prikaz rezultata tokova snaga
459:   plot.plotly.pf_res_plotly(net)
```

Slika 5.13. Prikaz naredbe za vizualni prikaz rezultata analize tokova snaga

5.3. Postavljanje parametara optimizacije

Kako bi se izvršila optimizacija modelirane niskonaponske distribucijske mreže, potrebno je u programskom kodu navesti pripadajuća ograničenja optimizacije (definirana u poglavlju 5.1.).

Parametri koje je potrebno definirati u programskom kodu dani su u nastavku:

- mogućnost upravljanja opterećenjima
- mogućnost upravljanja distribuiranom proizvodnjom
- ograničenja distribuirane proizvodnje
- ograničenja napona na sabirnicama
- ograničenja djelatne i reaktivne snage vanjske mreže
- najveće dopušteno opterećenje vodova i transformatora
- označavanje svih vodova koji ulaze u proračun ukupnih gubitaka.

Ograničenja moraju biti u skladu s Mrežnim pravilima distribucijskog sustava [27].

Pri definiranju ograničenja DP postavljen je raspon proizvedene djelatne snage od 0 kW do najveće dopuštene proizvodnje modeliranog generatora (5 kW), dok se raspon reaktivne snage kreće od negativnog do pozitivnog iznosa dobivenog prema izrazu (5-9):

$$Q_{PV} = P_{PV} \tan \varphi \quad (5-9)$$

gdje su: P_{PV} – djelatna snaga na sabirnici i , φ – kut faznog pomaka između napona i struje
Pretpostavljeni faktor snage generatora iznosi 0,95.

Odstupanje napona ograničeno je na 5% od nazivnog napona. Raspon dopuštene razmjene snage s vanjskom mrežom kreće se od -1000 MW do 1000 MW djelatne snage te od -1000 MVar do 1000 MVar reaktivne snage. Najveće dopušteno opterećenje vodova i transformatora iznosi 100%.

Programski kod s postavljenim opisanim parametrima prikazan je na slici 5.14.

Linija **Kod**

```
404:    #Definiranje potrebnih ograničenja
405:    #Mogućnost upravljanja opterećenjima i DG
406:    net.load['controllable'] = False
407:    net.sgen['controllable'] = True
408:
409:    #Ograničenja distribuirane proizvodnje
410:    net.sgen["max_p_mw"] = net.sgen.p_mw.values
411:    net.sgen["min_p_mw"] = 0
412:    net.sgen["max_q_mvar"] = net.sgen.p_mw.values * 0.323
413:    net.sgen["min_q_mvar"] = -net.sgen.p_mw.values * 0.323
414:
415:    #Ograničenja napona na sabirnicama
416:    net.bus["max_vm_pu"] = 1.05
417:    net.bus["min_vm_pu"] = 0.95
418:
419:    #Ograničenja vanjske mreže
420:    net.ext_grid["max_q_mvar"] = 1000.0
421:    net.ext_grid["min_q_mvar"] = -1000.0
422:    net.ext_grid["max_p_mw"] = 1000.0
423:    net.ext_grid["min_p_mw"] = -1000.0
424:
425:    #Najveće opterećenje vodova i transformatora
426:    net.trafo["max_loading_percent"] = 100.0
427:    net.line["max_loading_percent"] = 100.0
428:
429:    #Definiranje svih vodova koji ulaze u proračun ukupnih gubitaka
430:    net.line["pm_param/target_branch"] = True
```

Slika 5.14. Prikaz programskog koda za definiranje ograničenja OPF-a

Provedba optimalnih tokova snaga pokreće se naredbom *pp.runpm_ploss* (Slika 5.15.).

Linija **Kod**

```
435:    #Optimalni tokovi snaga
436:    pp.runpm_ploss(net)
```

Slika 5.15. Prikaz programskog koda za provedbu OPF-a

Pri ispisu rezultata, korišten je jednak programski kod kao pri analizi tokova snaga (prikazan na slici 5.13.).

5.4. Opis simulacija

U ovom radu izvršene su simulacije kojima se istražio utjecaj distribuirane proizvodnje na prilike u distribucijskoj mreži. Simulacije obuhvaćaju dodavanje distribuirane proizvodnje (FN sustava) potrošačima. Izvršeni su proračuni konvencionalnih tokova snaga te su prikazani pomoću tri scenarija – osnovni slučaj i dva moguća scenarija. Nadalje, u sljedeća dva scenarija provedeni su proračuni optimalnih tokova snaga. Izvršena je optimizacija mreže sa ciljem minimizacije gubitaka. Negativni utjecaji DP na mrežu smanjeni su putem APC-a te upravljanja jalovom snagom iz FN pretvarača.

Provedena je SNAP analiza (eng. *Snapshot Analysis*) - izvršeni su proračun i analiza trenutnog stanja mreže u određenom trenutku vremena. Simulacije su provedene na prethodno opisanom modelu mreže. Predmet promatranja predstavljaju naponi na sabirnicama, opterećenost vodova te gubici u mreži. U scenariju

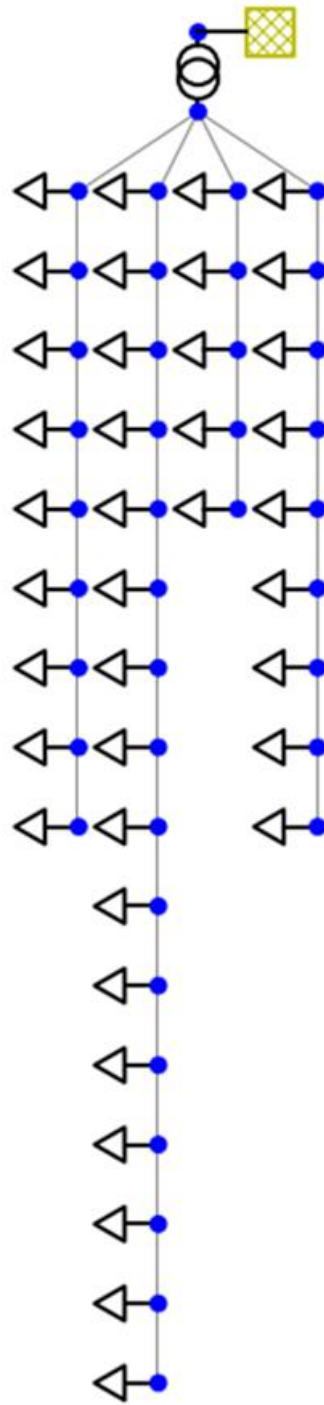
Prikazani su sljedeći scenariji:

- Bazni scenarij prikazuje osnovni slučaj, bez dodavanja distribuirane proizvodnje.

Na slici 5.16. prikazan je model mreže za opisani scenarij. Sabirnica „b10kv“ predstavlja spojnu točku vanjske mreže i transformatora, dok sabirnica „b400v“ predstavlja vezu između transformatora i 4 radijalna izvoda. Na „b400v“ spojene su sabirnice „b04kv1“, „b04kv10“, „b04kv26“ te „b04kv31“ (gledane s lijeva na desno prema slici 5.16.). Navedene sabirnice nalaze se na počecima radijalnih izvoda te se na njih nastavljaju preostale sabirnice nastavljajući numerički niz (primjer: prvi radijalni izvod obuhvaća sabirnice „b04kv1“-„b04kv9“).

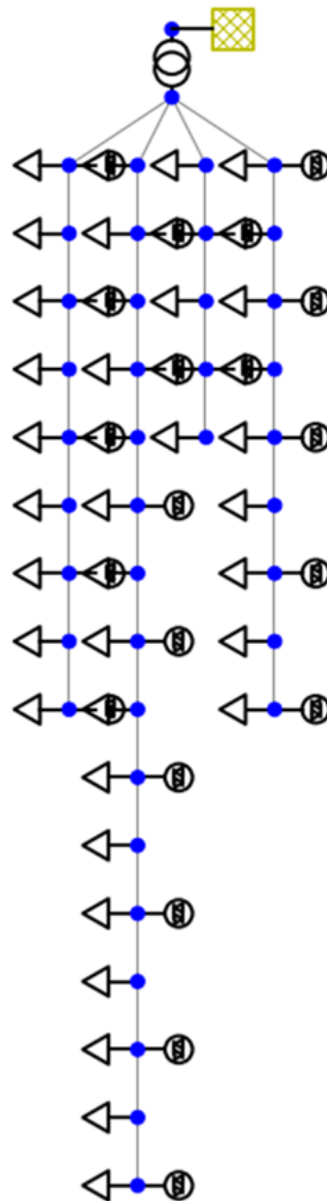
Oznake vodova u skladu su s oznakama sabirnica. Vod 1 povezuje sabirnice „b400v“ i „b04kv1“, vod 2 povezuje sabirnice „b04kv1“ i „b04kv2“, te se niz nastavlja numerički do kraja pojedinog izvoda, a zatim prelazi na sljedeći (gledano s lijeva na desno – Slika 5.16.).

Oznake sabirnica i vodova jednake su za sve scenarije.



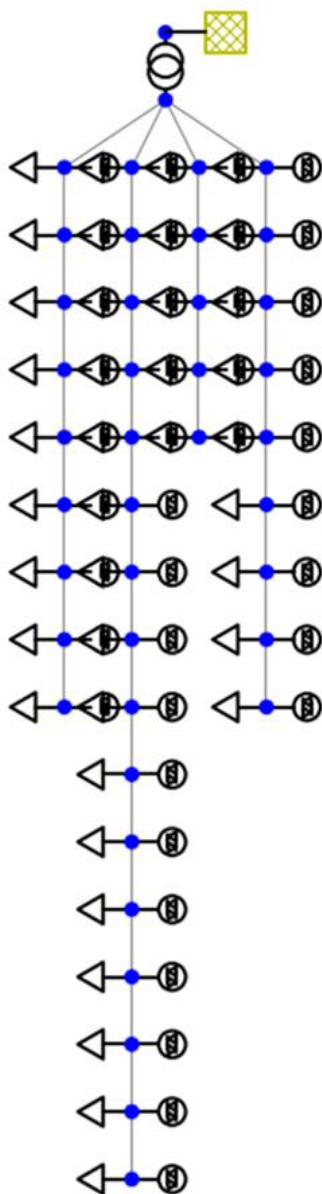
Slika 5.16. Prikaz modelirane mreže – bazni scenarij

- Scenarij 1 prikazuje dodavanje distribuirane proizvodnje svakom drugom potrošaču (Slika 5.17.).



Slika 5.17. Prikaz modelirane mreže – scenarij 1

- Scenarij 2 prikazuje dodavanje distribuirane proizvodnje svakome potrošaču (Slika 5.18.).



Slika 5.18. Prikaz modelirane mreže – scenarij 2

- Scenarij 3 prikazuje provedbu OPF-a nad mrežom iz scenarija 1 (Slika 5.17.).
- Scenarij 4 prikazuje provedbu OPF-a nad mrežom iz scenarija 2 (Slika 5.18.).

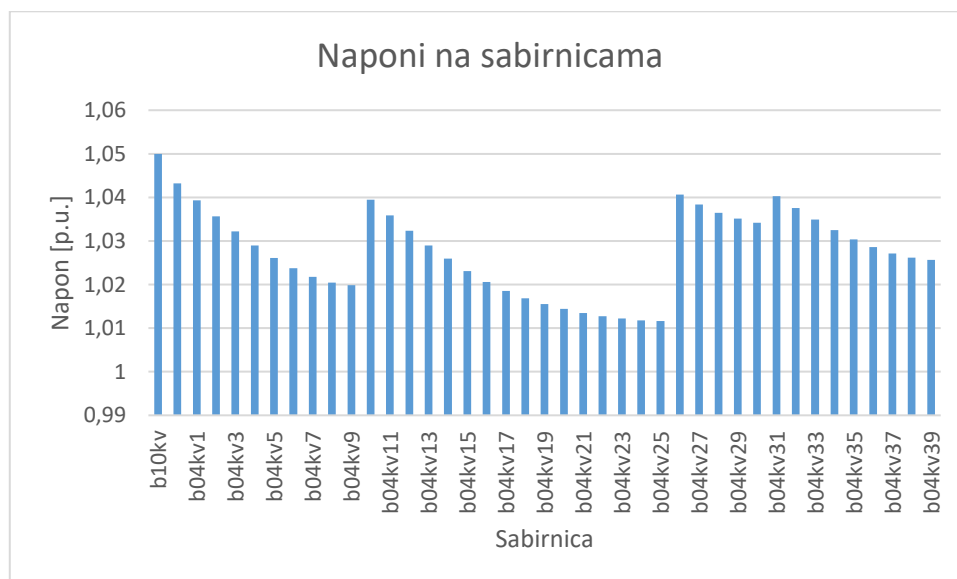
6. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati provedenih simulacija. Rezultati su obrađeni i grafički prikazani pomoću programskog alata Microsoft Excel.

6.1. Bazni scenarij

U baznom scenariju pretpostavlja se da FN sustavi nisu u funkciji. Mreža se sastoji od vanjske distribucijske mreže koja, preko 10/0,4 kV transformatora, napaja četiri radijalna izvoda sa ukupno 39 potrošača. Prvi radijalni izvod obuhvaća sabirnice „b04kv1“ – „b04kv9“. Drugi radijalni izvod obuhvaća sabirnice „b04kv10“ – „b04kv25“. Treći radijalni izvod obuhvaća sabirnice „b04kv26“ – „b04kv30“. Četvrti radijalni izvod obuhvaća sabirnice „b04kv31“ – „b04kv39“. Ukupno opterećenje u mreži iznosi 71 kW. Bez FN sustava na pojedinim kućanstvima, sva kućanstva se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže. Proveden je proračun tokova snaga. Izračunati su ukupni djelatni gubici u mreži koji iznose 2,261 kW. Opterećenje transformatora iznosi 29,366%.

Na slici 6.1. dan je grafički prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama.



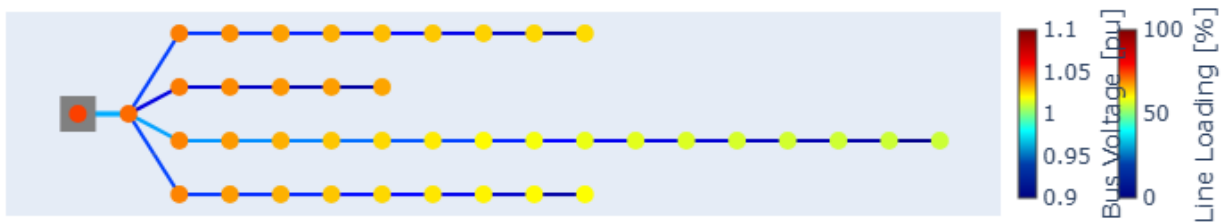
Slika 6.1. Prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama

Slika 6.2. grafički prikazuje opterećenost pojedinog voda u mreži.



Slika 6.2. Prikaz opterećenosti pojedinog voda

Slika 6.3. prikazuje interaktivni dijagram rezultata analize tokova snaga.



Slika 6.3. Prikaz rezultata analize tokova snaga

U Tablici 6.1. dani su podaci o gubicima vodova i transformatora te ukupnih gubitaka u mreži.

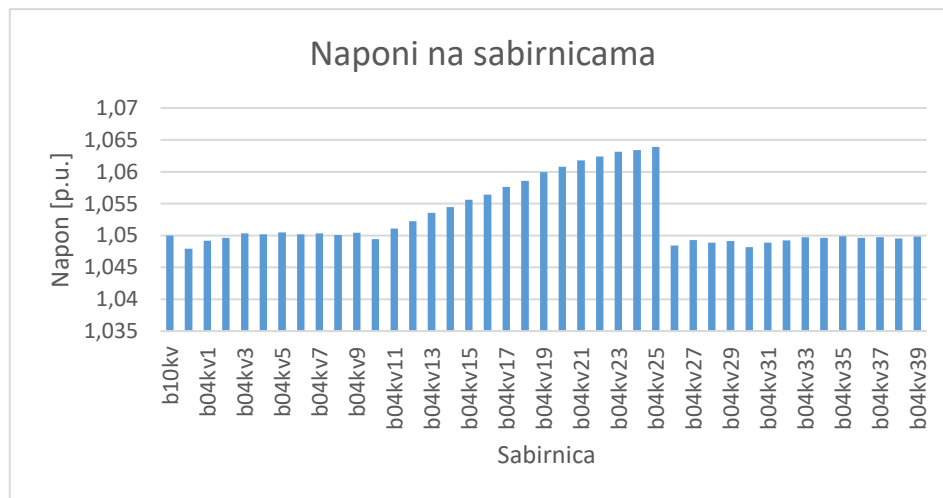
Tablica 6.1. Gubici vodova i transformatora, ukupni djelatni gubici za bazni scenarij.

Gubici vodova [kW]	1,293
Gubici transformatora [kW]	0,968338
Ukupni djelatni gubici [kW]	2,261

6.2. Scenarij 1

U scenariju 1 pretpostavlja se da je u funkciji dvadeset FN sustava. Pojedini FN sustav dodijeljen je svakom drugom kućanstvu. Pretpostavlja se maksimalno opterećenje. Ukupno opterećenje u mreži iznosi 71 kW. Kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično iz FN sustava modeliranim na pojedinim kućanstvima. Proveden je proračun tokova snaga. Izračunati su ukupni djelatni gubici u mreži koji iznose 1,079 kW. Opterećenje transformatora iznosi 14,026 %.

Na slici 6.4. dan je grafički prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama.



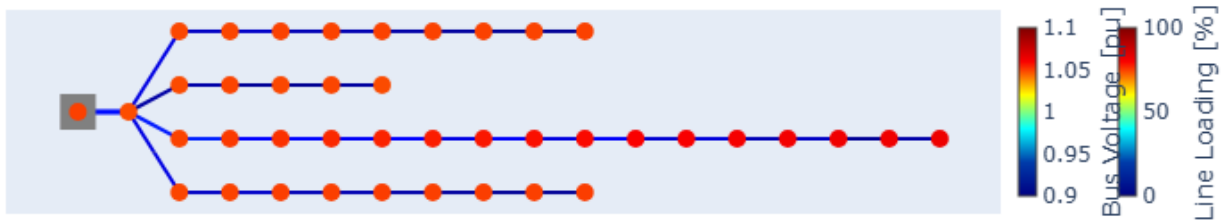
Slika 6.4. Prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama

Slika 6.5. grafički prikazuje opterećenost pojedinog voda u mreži.



Slika 6.5. Prikaz opterećenosti pojedinog voda

Slika 6.6. prikazuje interaktivni dijagram rezultata analize tokova snaga.



Slika 6.6. Prikaz rezultata analize tokova snaga

Tablica 6.2. prikazuje podatke o gubicima vodova i transformatora te ukupnim gubicima u mreži.

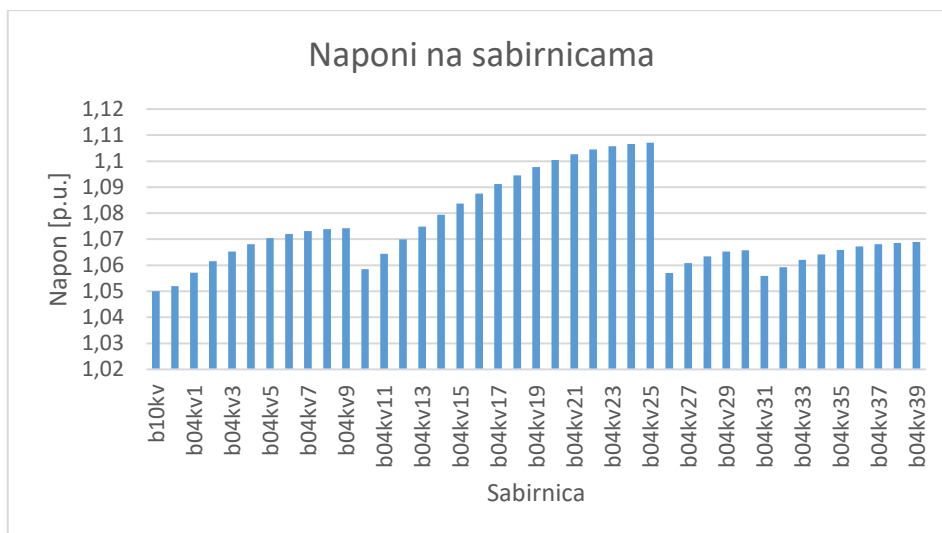
Tablica 6.2. Gubici vodova i transformatora, ukupni djelatni gubici za scenarij 1.

Gubici vodova [kW]	0,305
Gubici transformatora [kW]	0,773
Ukupni djelatni gubici [kW]	1,079

6.3. Scenarij 2

U scenariju 2 pretpostavlja se da su svi FN sustavi u funkciji. Svakome kućanstvu dodijeljena je jedinica DP. Pretpostavlja se maksimalno opterećenje. Ukupno opterećenje u mreži iznosi 71 kW. Kućanstva u radialnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično iz FN sustava modeliranim na pojedinim kućanstvima. Proveden je proračun tokova snaga. Izračunati su ukupni djelatni gubici u mreži koji iznose 4,182 kW. Opterećenje transformatora iznosi 46,925%.

Na slici 6.7. dan je grafički prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama.



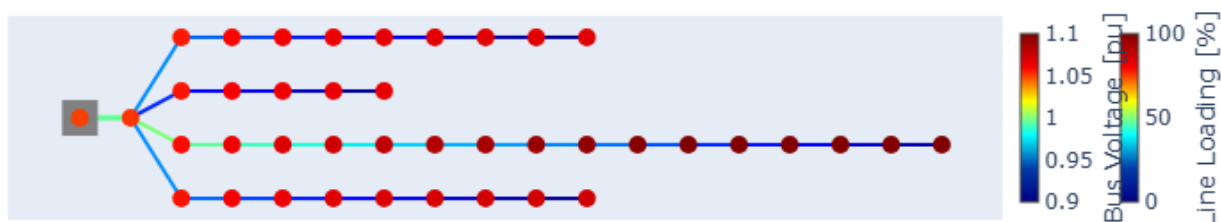
Slika 6.7. Prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama

Slika 6.8. grafički prikazuje opterećenost pojedinog voda u mreži.



Slika 6.8. Prikaz opterećenosti pojedinog voda

Slika 6.9. prikazuje interaktivni dijagram rezultata analize tokova snaga.



Slika 6.9. Prikaz rezultata analize tokova snaga

U Tablici 6.3. dani su podaci o gubicima vodova i transformatora te ukupnih gubitaka u mreži.

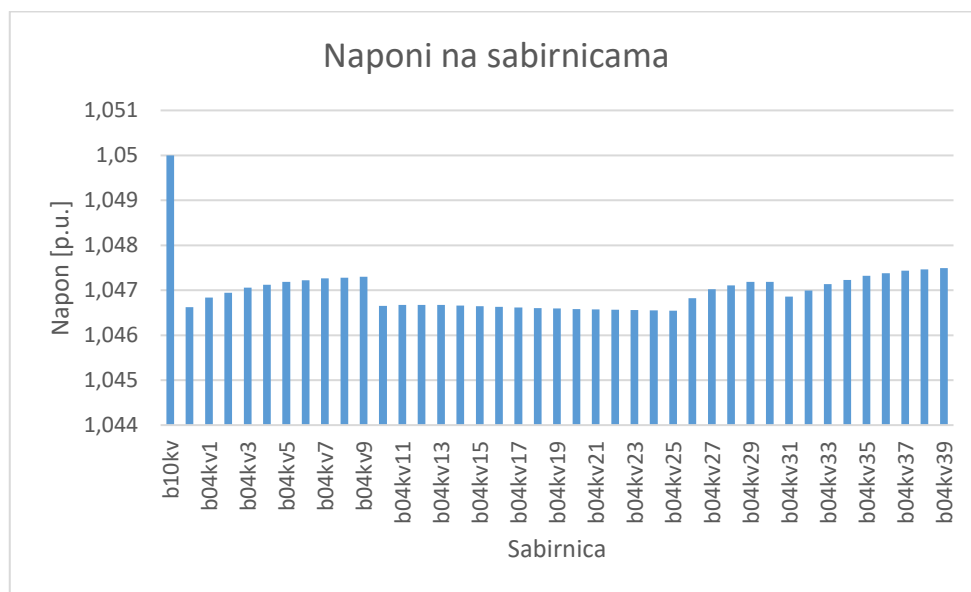
Tablica 6.3. Gubici vodova i transformatora, ukupni djelatni gubici za scenarij 2.

Gubici vodova [kW]	2,807
Gubici transformatora [kW]	1,375
Ukupni djelatni gubici [kW]	4,182

6.4. Scenarij 3

U scenariju 3 prikazana je provedba OPF-a sa ciljem minimizacije gubitaka. OPF je proveden nad mrežom iz scenarija 1.

Na slici 6.10. dan je grafički prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama.



Slika 6.10. Prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama

Slika 6.11. grafički prikazuje opterećenost pojedinog voda u mreži.



Slika 6.11. Prikaz opterećenosti pojedinog voda

Opterećenje transformatora iznosi 10,354%.

Tablica 6.4. prikazuje podatke o gubicima vodova i transformatora te ukupnim gubicima u mreži.

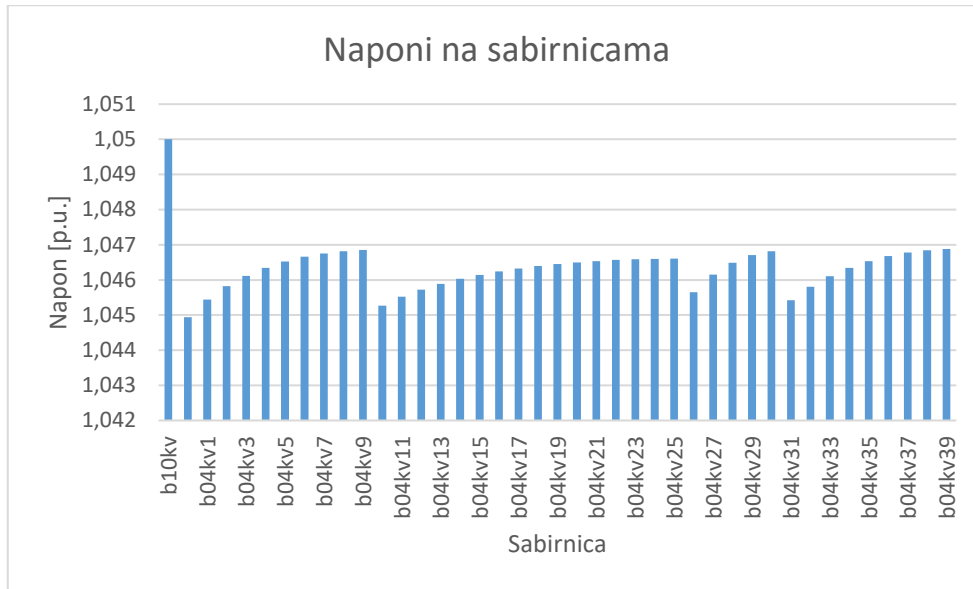
Tablica 6.4. Gubici vodova i transformatora, ukupni djelatni gubici za scenarij 3.

Gubici vodova [kW]	0,138
Gubici transformatora [kW]	0,744
Ukupni djelatni gubici [kW]	0,881

6.5. Scenarij 4

U scenariju 4 prikazana je provedba OPF-a sa ciljem minimizacije gubitaka. OPF je proveden nad mrežom iz scenarija 2.

Na slici 6.12. dan je grafički prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama.



Slika 6.12. Prikaz iznosa napona na pojedinim sabirnicama

Slika 6.13. grafički prikazuje opterećenost pojedinog voda u mreži.



Slika 6.13. Prikaz opterećenosti pojedinog voda

Opterećenje transformatora iznosi 16,951%.

Tablica 6.5. prikazuje podatke o gubicima vodova i transformatora te ukupnim gubicima u mreži.

Tablica 6.5. Gubici vodova i transformatora, ukupni djelatni gubici za scenarij 4.

Gubici vodova [kW]	0,316
Gubici transformatora [kW]	0,792
Ukupni djelatni gubici [kW]	1,108

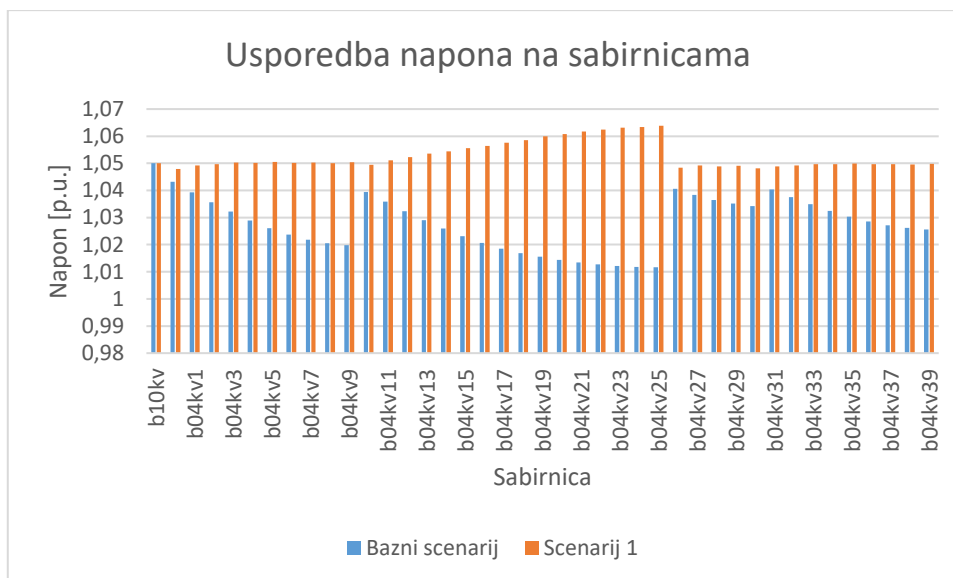
6.6. Usporedba rezultata

U ovom potpoglavlju dana je usporedba rezultata dobivenih u prethodno obrađenim primjerima.

6.6.1. Bazni scenarij, scenarij 1

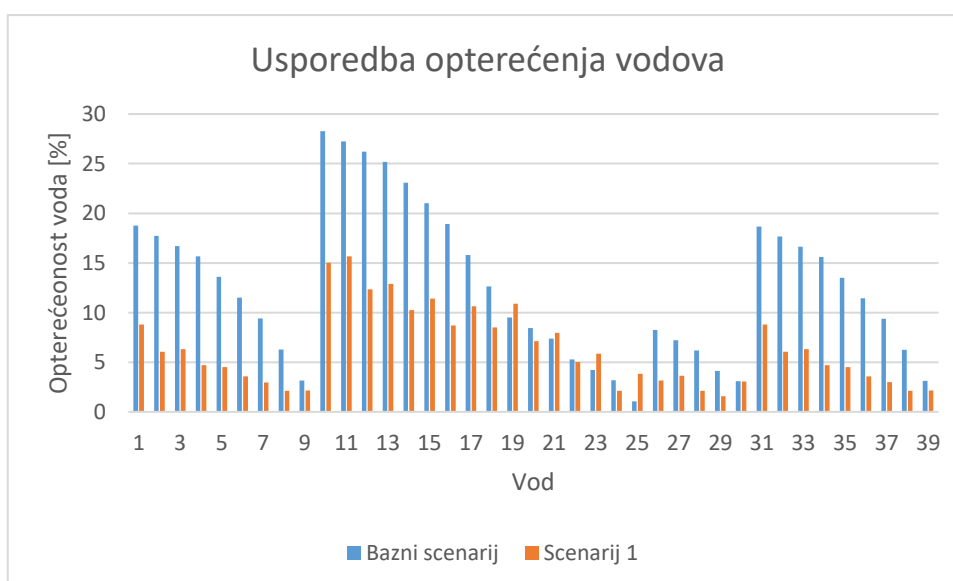
Slika 6.14. prikazuje usporedbu napona na sabirnicama u baznom scenariju i scenariju 1 gdje je FN sustav dodijeljen svakom drugom kućanstvu. Plava boja predstavlja bazni scenarij, a narančasta scenarij 1. U baznom scenariju najviši iznos napona imaju sabirnice koje su najbliže trafostanici. Promatranjem pojedinih radijalnih izvoda, uočljivo je kako napon postupno opada što je sabirnica udaljenija od trafostanice. U scenariju 1 vidljivo je povišenje napona u odnosu na bazni slučaj. Naponi sabirnica blago rastu prema kraju radijalnog izvoda.

Sabirnica „b10kv“ predstavlja spojno mjesto vanjske distribucijske mreže i transformatora 10/0,4 kV te je njezin iznos napona uvijek jednak 1,05 p.u., kao što je definirano u programskom kodu prilikom modeliranja.



Slika 6.14. Prikaz usporedbe napona na sabirnicama – bazni scenarij, scenarij 1

Slika 6.15. prikazuje usporedbu opterećenja vodova u baznom scenariju i scenariju 1. Plava boja predstavlja bazni scenarij, a narančasta scenarij 1. U baznom scenariju najopterećeniji su vodovi koji su najbliže trafostanici. Pri promatranju pojedinih radijalnih izvoda, uočljivo je kako opterećenje voda postupno opada prema kraju radijalnog izvoda. U scenariju 1 vidljivo je smanjenje opterećenja vodova u odnosu na bazni scenarij. Dinamika promjene opterećenja je jednaka – najopterećeniji su vodovi uz trafostanicu, dok opterećenost voda opada prema kraju radijalnog izvoda.

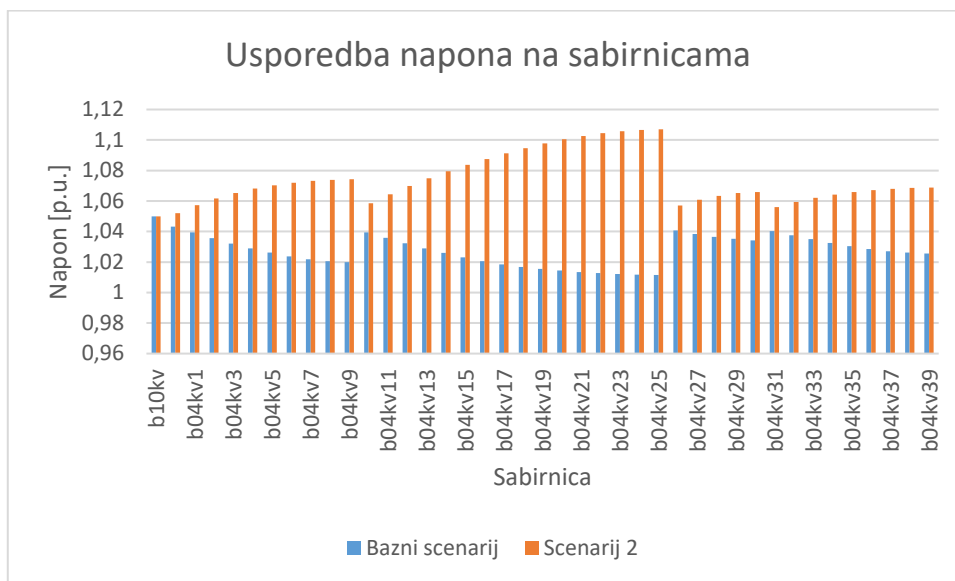


Slika 6.15. Prikaz usporedbe opterećenja vodova – bazni scenarij, scenarij 1

6.6.2. Bazni scenarij, scenarij 2

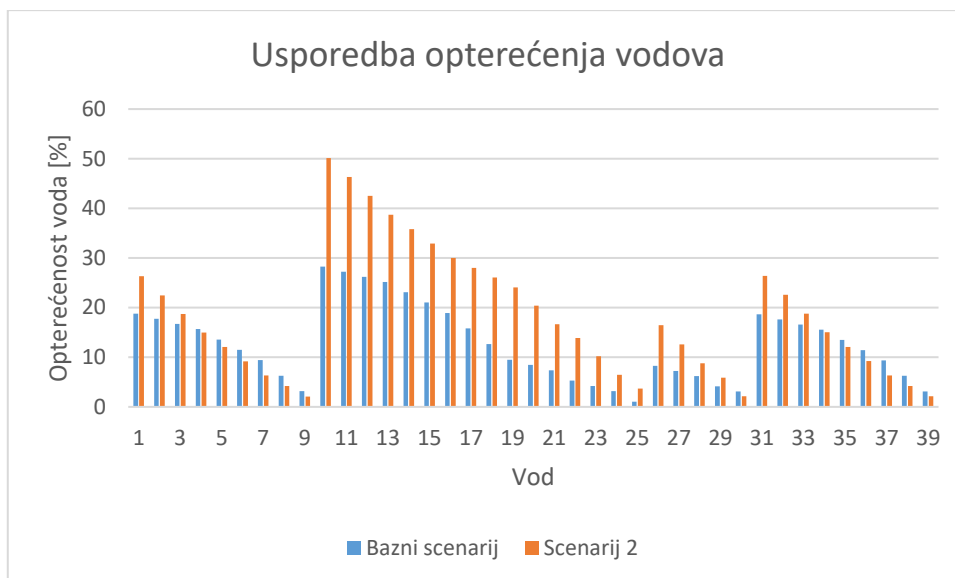
Slika 6.16. prikazuje usporedbu napona na sabirnicama u baznom scenariju i scenariju 2 gdje je FN sustav dodijeljen svakom kućanstvu. Plava boja predstavlja bazni scenarij, a narančasta scenarij 2. U scenariju 2 vidljiv je utjecaj DP na prilike u mreži – dolazi do povišenja napona. Naponi sabirnica rastu prema kraju radijalnog izvoda.

U scenariju 2 iznosi napona na sabirnicama trećeg radijalnog izvoda dosežu vrijednosti veće od 1,1 p.u., što nije u skladu s Mrežnim pravilima distribucijskog sustava. Stoga, navedenom modelu mreže potrebna je optimizacija kako bi se poboljšale prilike u mreži.



Slika 6.16. Prikaz usporedbe napona na sabirnicama – bazni scenarij, scenarij 2

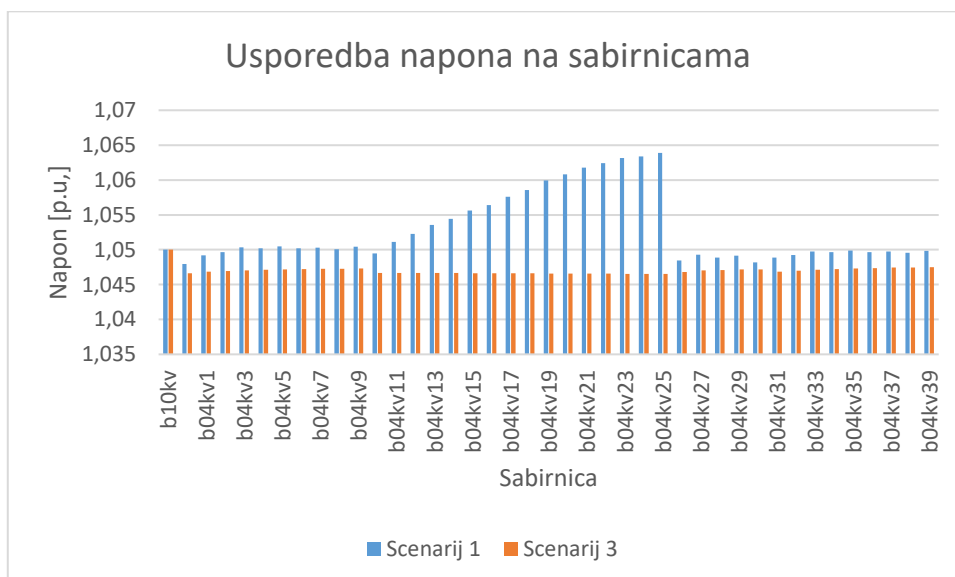
Slika 6.17. prikazuje usporedbu opterećenja vodova u baznom scenariju i scenariju 2. Plava boja predstavlja bazni scenarij, a narančasta scenarij 2. U scenariju 2 vidljivo je povećanje opterećenja vodova u odnosu na bazni scenarij. Dinamika promjene opterećenja je jednaka – najopterećeniji su vodovi uz trafostanicu; opterećenost voda opada prema kraju radijalnog izvoda. Najveću opterećenost postiže vod na početku drugog radijalnog izvoda (50,138%).



Slika 6.17. Prikaz usporedbe opterećenja vodova – bazni scenarij, scenarij 2

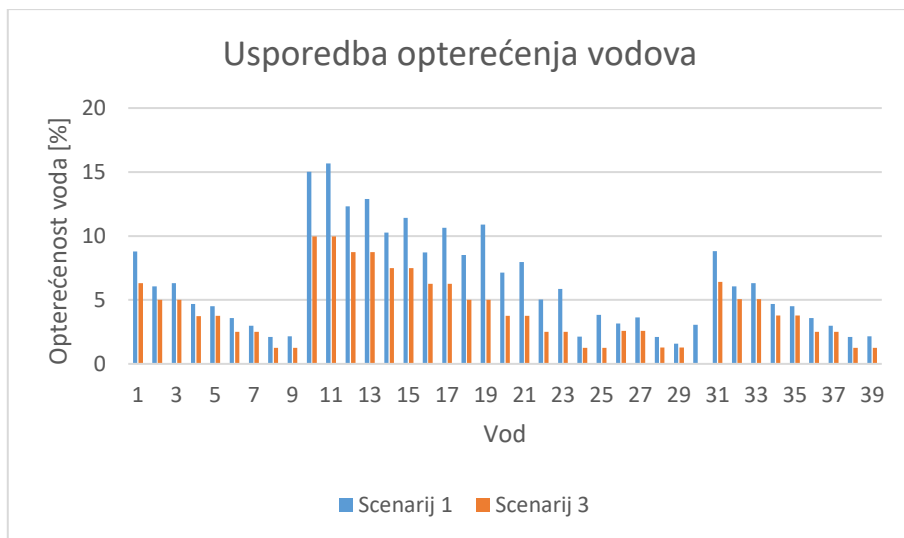
6.6.3. Scenarij 1, scenarij 3

Slika 6.18. prikazuje usporedbu napona na sabirnicama prije i nakon provedbe optimizacije mreže iz scenarija 1. Plava boja predstavlja scenarij 1 (proračun tokova snaga), a narančasta scenarij 3 (proračun optimalnih tokova snaga). Primjenom optimalnih tokova snaga regulirani su naponi na sabirnicama.



Slika 6.18. Prikaz usporedbe napona na sabirnicama – scenarij 1, scenarij 3

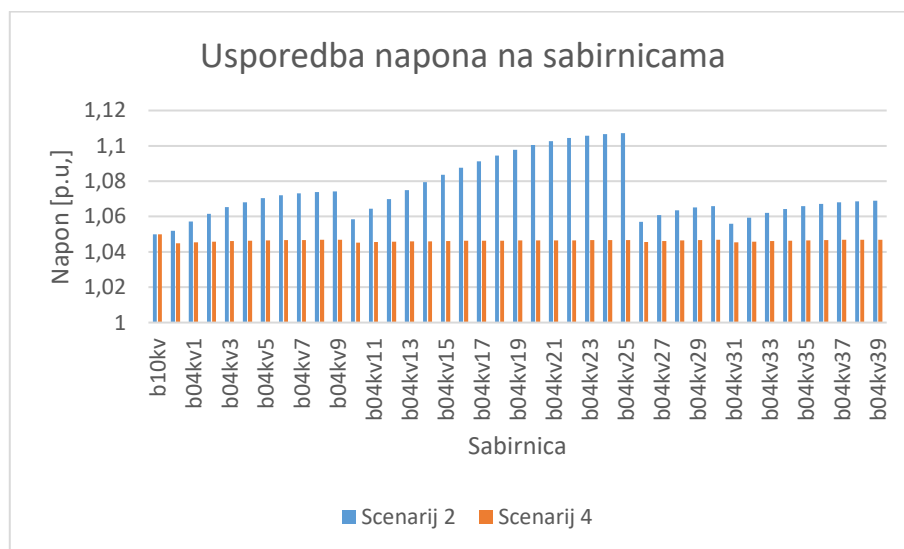
Slika 6.19. prikazuje usporedbu opterećenja vodova u scenariju 1 i scenariju 3. Plavom bojom prikazan je scenarij 1, a narančastom scenarij 3. Provedbom OPF-a opterećenja vodova su smanjena u odnosu na provedbu tokova snaga.



Slika 6.19. Prikaz usporedbe opterećenja vodova – scenarij 1, scenarij 3

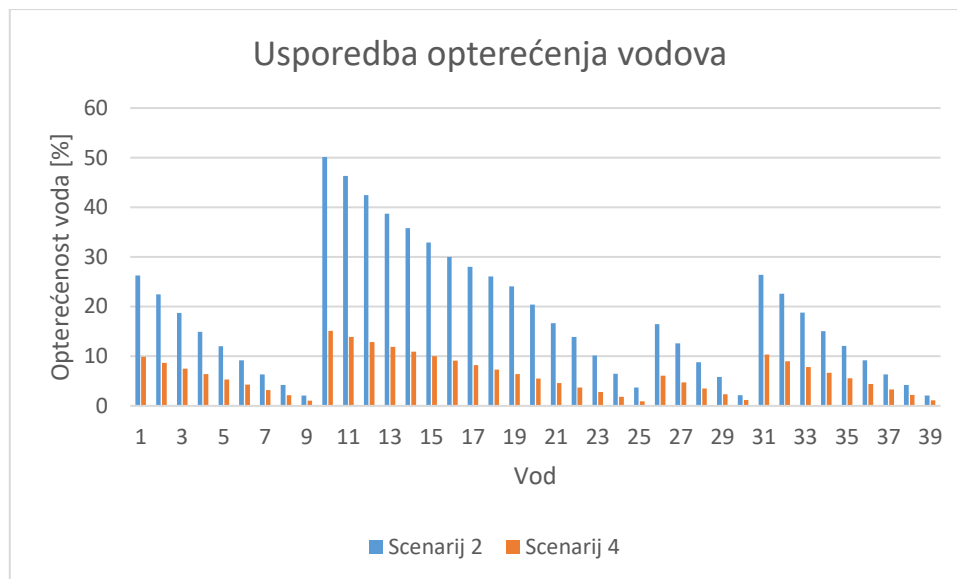
6.6.4. Scenarij 2, scenarij 4

Slika 6.20. prikazuje usporedbu napona na sabirnicama prije i nakon provedbe optimizacije mreže iz scenarija 2. Plava boja predstavlja scenarij 2 (proračun tokova snaga), a narančasta scenarij 4 (proračun optimalnih tokova snaga). Primjenom optimalnih tokova snaga regulirani su naponi na sabirnicama te su dovedeni unutar dopuštenih granica.



Slika 6.20. Prikaz usporedbe napona na sabirnicama – scenarij 2, scenarij 4

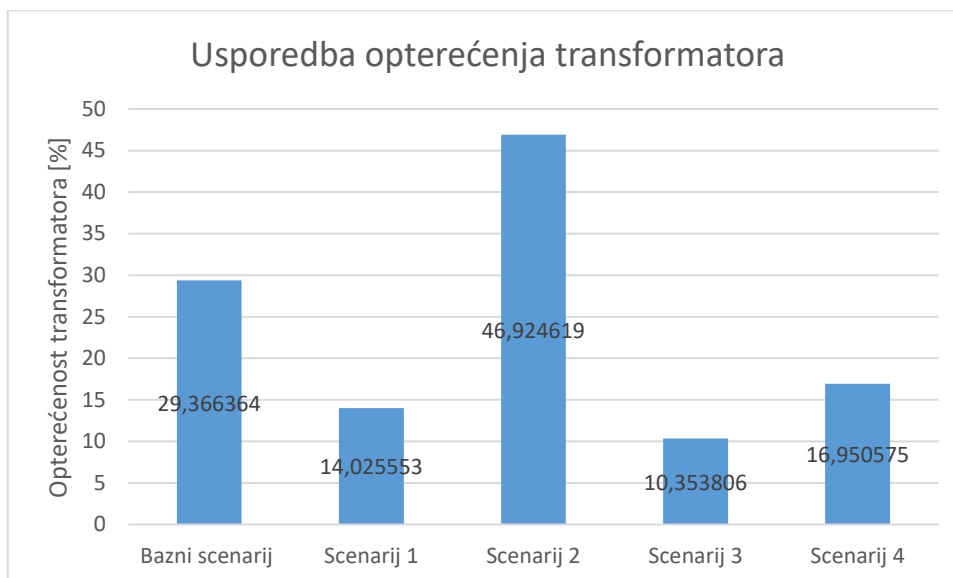
Slika 6.21. prikazuje usporedbu opterećenja vodova u scenariju 2 i scenariju 4. Plavom bojom prikazan je scenarij 2, a narančastom scenarij 4. Provedbom OPF-a opterećenja vodova su znatno smanjena u odnosu na provedbu tokova snaga.



Slika 6.21. Prikaz usporedbe opterećenja vodova – scenarij 2, scenarij 4

6.6.5. Usporedba opterećenja transformatora

Na slici 6.22. dan je grafički prikaz usporedbe opterećenja transformatora po pojedinim scenarijima. Transformator 10/0,4 kV najviše je opterećen pri scenariju 2 kada je svakome kućanstvu dodan FN sustav. Primjenom OPF-a na scenarij 2, opterećenje transformatora je znatno smanjeno (sa 46,925% na 16,951%). Prilikom primjene OPF-a na scenarij 1, opterećenje transformatora se također smanjuje, no nešto manje u odnosu na scenarij 2 (sa 14,026% na 10,354%). Razlog tome je već relativno nisko opterećenje transformatora u samome scenariju 1 (dobiveno proračunom tokova snaga).

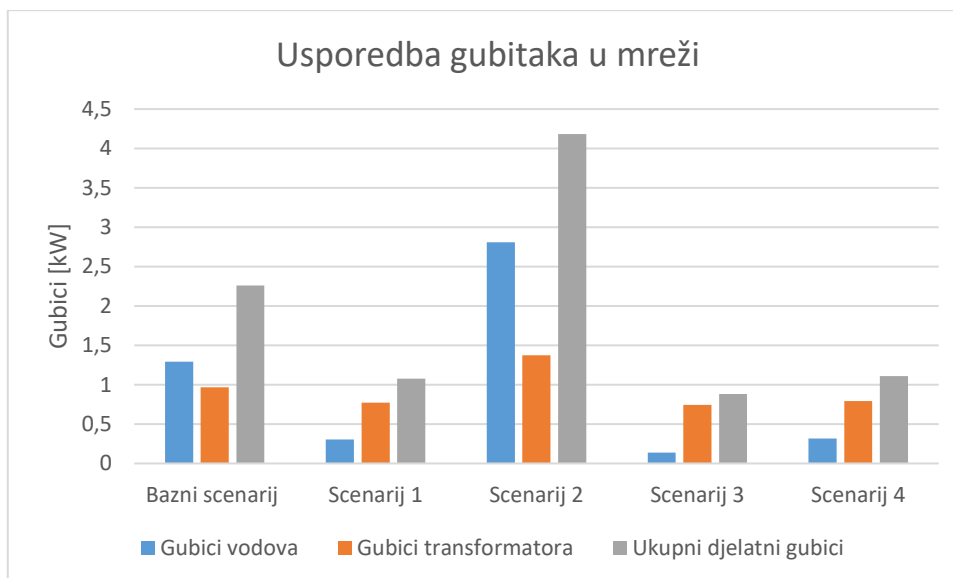


Slika 6.22. Prikaz usporedbe opterećenja transformatora po pojedinim scenarijima

6.6.6. Usporedba gubitaka u mreži

Na slici 6.23. dan je prikaz usporedbe gubitaka u mreži po pojedinim scenarijima. U usporedbi s baznim slučajem, dodavanje FN sustava svakom kućanstvu ima negativne posljedice na mrežu – povećavaju se ukupni djelatni gubici u mreži. U scenariju 1, dodavanjem FN sustava svakom drugom kućanstvu smanjuju se ukupni gubici čime se postiže pozitivan utjecaj na prilike u mreži.

Ukupni djelatni gubici najveći su kod scenarija 2 (4,182 kW). Primjenom OPF-a, gubici su znatno smanjeni (na 1,108 kW), iz čega se može zaključiti kako je optimizacija mreže uspješno provedena. Proračunom OPF-a nad mrežom iz scenarija 1, ukupni djelatni gubici su neznatno smanjeni - provedba optimizacije nije imala veliki utjecaj na prilike u mreži. S obzirom da u navedenoj mreži DP nije stvarala velike probleme, optimizacija je utjecala samo na smanjenje napona.



Slika 6.23. Prikaz usporedbe gubitaka u mreži po pojedinim scenarijima

7. ZAKLJUČAK

Budući da je integracija aktivnih kupaca u distribucijskoj mreži u porastu, velika je pažnja postavljena na utjecaje koje distribuirana proizvodnja može imati na prilike u mreži. Autori u literaturama predlažu razne metode kojima se postiže ublažavanje utjecaja DP na prilike u distribucijskoj mreži. Metode uključuju upravljanje potrošnjom, integraciju transformatora s promjenjivom sklopkom pri opterećenju, regulaciju jalove snage, ograničenje proizvodnje iz FN sustava, integraciju sustava za pohranu energije, statičkog sinkronog kompenzatora te pametnog pretvarača. U procesu razvoja distribucijske mreže veliki značaj imaju optimalni tokovi snaga.

U ovome radu optimizacija je prikazana na primjeru niskonaponske distribucijske mreže sa četiri radijalna izvoda te ukupno 39 kućanstava. Svakome kućanstvu dodijeljena je jedinica DP (FN sustav). Mreža je modelirana pomoću programskog alata *pandapower*. Simuliran je bazni scenarij te dva moguća scenarija (scenariji 1 i 2) u kojima su vidljivi utjecaji DP na prilike u mreži. U scenarijima 3 i 4 izvršena je optimizacija nad mrežama iz scenarija 1 i 2. Optimizacija je provedena sa ciljem minimizacije gubitaka snage. Negativni utjecaji DP na mrežu smanjeni su kombinacijom dviju metoda - ograničenja proizvodnje iz FN sustava te upravljanja jalovom snagom iz FN pretvarača.

U baznom scenariju FN sustavi nisu u funkciji. Sva kućanstva napajaju se iz vanjske 10 kV distribucijske mreže. Proveden je proračun tokova snaga. Svi naponi na sabirnicama nalaze se unutar dopuštenih granica te su u skladu s Mrežnim pravilima distribucijskog sustava. Opterećenost vodova je u dozvoljenim granicama, ukupni djelatni gubici u mreži iznose 2,261 kW, opterećenje transformatora iznosi 29,366%.

U scenariju 1 u funkciji je dvadeset FN sustava. Pojedini FN sustav nalazi se na svakom drugom kućanstvu. Kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično iz FN sustava modeliranim na pojedinim kućanstvima. Proveden je proračun tokova snaga. Analizom mreže utvrđeno je povišenje napona te smanjenje opterećenja vodova u odnosu na bazni scenarij. Visoki iznosi napona mogu uzrokovati probleme u mreži, stoga je poželjna provedba optimizacije mreže. Ukupni djelatni gubici u mreži iznose 1,079 kW, opterećenje transformatora iznosi 14,026 %.

U scenariju 2 pretpostavlja se da su svi FN sustavi u funkciji. Svakome kućanstvu dodijeljena je jedinica DP. Kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično iz FN sustava modeliranim na pojedinim kućanstvima.

Proveden je proračun tokova snaga. Analizom mreže utvrđeno je povišenje napona te povišenje opterećenja vodova u odnosu na bazni scenarij. Budući da iznosi napona na sabirnicama dosežu vrijednosti veće od 1,1 p.u., što nije u skladu s Mrežnim pravilima distribucijskog sustava, navedenom modelu mreže nužna je optimizacija. Ukupni djelatni gubici u mreži iznose 4,182 kW. Opterećenje transformatora iznosi 46,925%.

U scenariju 3 provedeni su proračuni optimalnih tokova snaga nad mrežom iz scenarija 1. Primjenom OPF-a smanjeni su iznosi napona na sabirnicama. Također, smanjena su opterećenja vodova. Ukupni djelatni gubici u mreži smanjeni su na 0,881 kW. Opterećenje transformatora iznosi 10,354%.

U scenariju 4 provedeni su proračuni optimalnih tokova snaga nad mrežom iz scenarija 2. Primjenom OPF-a regulirani su naponi na sabirnicama te su dovedeni unutar dopuštenih granica. Opterećenja vodova znatno su smanjena. Ukupni djelatni gubici u mreži smanjeni su na 1,108 kW. Opterećenje transformatora iznosi 16,951%.

Usporedbom provedenih simulacijskih slučajeva mogu se izvesti zaključna razmatranja. Integracijom DP u mrežu dolazi do povišenja napona što može uzrokovati probleme u mreži. U scenariju 1 došlo je do povišenja napona, no odstupanja nisu bila ekstremna. U navedenoj mreži DP nije stvarala velike probleme te je optimizacija utjecala na smanjenje napona. U scenariju 2 naponi dosežu visoke vrijednosti koje nisu u skladu s postojećim normama. Provedbom optimizacije nad navedenom mrežom reguliraju se iznosi napona te se dovode unutar dopuštenih granica. U oba scenarija provedbe optimizacije (scenariji 3 i 4) smanjeno je opterećenje transformatora te ukupni djelatni gubici u mreži.

LITERATURA

- [1] M. Dubravac, K. Fekete, D. Topić, M. Barukčić, "Voltage Optimization in PV-Rich Distribution Networks - A Review", *Applied Sciences*, vol. 12, No. 23, prosinac 2022., doi: doi.org/10.3390/app122312426
- [2] C. Yang, Y. Sun, Y. Zou, F. Zheng, S. Liu, B. Zhao, M. Wu, H. Cui, "Optimal Power Flow in Distribution Network: A Review on Problem Formulation and Optimization Methods", *Energies*, vol. 16, No. 16, kolovoz 2023., doi: 10.3390/en16165974
- [3] B. Uzum, A. Onen, H. M. Hasanien, S. M. Muyeen, "Rooftop Solar PV Penetration Impacts on Distribution Network and Further Growth Factors-A Comprehensive Review", *Electronics*, vol. 10, No. 1, prosinac 2020., doi: 10.3390/electronics10010055
- [4] K. Gholami, Md. Rabiul Islam, Md. M. Rahman, A. Azizivahed, A. Fekih, "State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids", *Energy Reports*, vol. 8, No. 3, pp. 8630-8651, studeni 2022., doi: 10.1016/j.egyr.2022.06.080
- [5] Službena internetska stranica programskog alata pandapower, dostupno na: <https://www.pandapower.org/about/> (datum pristupa: 10.6.2024.)
- [6] C. Li, Y. Dai, P. Wang, S. Xia, "Active and reactive power coordinated optimization of active distribution networks considering dynamic reconfiguration and SOP", *IET Renewable Power Generation*, pp. 1-12, kolovoz 2023., doi: 10.1049/rpg2.12814
- [7] X. Sun, J. Qiu, Y. Tao, Y. Ma, J. Zhao, "Coordinated Real-Time Voltage Control in Active Distribution Networks: An Incentive-Based Fairness Approach", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, No. 4, pp. 2650-2662, srpanj 2022., doi: 10.1109/TSG.2022.3162909
- [8] J. Chen, L. Mao; Y. Liu, J. Wang, X. Sun, "Multi-Objective Optimization Scheduling of Active Distribution Network Considering Large-Scale Electric Vehicles Based on NSGAI-NDAX Algorithm", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 97259-97273, siječanj 2023., doi: 10.1109/ACCESS.2023.3312573
- [9] C. Zhang, Y. Xu, Z. Y. Dong, R. Zhang, "Multi-Objective Adaptive Robust Voltage/VAR Control for High-PV Penetrated Distribution Networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, No. 6, pp. 5288-5300, studeni 2020., doi: 10.1109/TSG.2020.3000726

- [10] D. G. Kyriakou, F. D. Kanellos, "Sustainable Operation of Active Distribution Networks", *Applied Sciences*, vol. 13, No. 5, veljača 2023., doi: 10.3390/app13053115
- [11] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley, "Microgrids and Active Distribution Networks", The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.
- [12] CIGRE Working Group C6.11, "Development and operation of active distribution networks", CIGRE Technical Brochure, travanj 2011.
- [13] CIGRE Working Group C6.19, "Planning and optimization methods for active distribution systems", CIGRE Technical Report, kolovoz 2014.
- [14] M.R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M.I. Rezaad, S. Hajjghorbani, "Power loss due to soiling on solar panel: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1307-1316, lipanj 2016., doi: 10.1016/j.rser.2016.01.044
- [15] T. Adefarati, R. C. Bansal, "Integration of renewable distributed generators into the distribution system: A review", *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, No. 7, pp. 873-884, kolovoz 2016., doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0378
- [16] M. S. ElNozahy, M. M. A. Salama, "Technical impacts of grid-connected photovoltaic systems on electrical networks-A review", *J. Renewable Sustainable Energy*, vol. 5, No. 3, svibanj 2013., doi: 10.1063/1.4808264
- [17] B.F. Katiraei, J. R. Agüero, "Solar PV Integration Challenges", *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 9., No. 3, pp. 62-71, 2011., doi: 10.1109/MPE.2011.940579
- [18] S. Shivashankar, S. Mekhilef, H. Mokhlis, M. Karimi, "Methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources-A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1170-1184. lipanj 2016.
- [19] T. Alquthami, R. S. Kumar, A. Al Shaikh, "Mitigation of voltage rise due to high solar PV penetration in Saudi distribution network", *Electrical Engineering*, vol. 102, pp. 881-890, siječanj 2020., doi: 10.1007/s00202-020-00920-z
- [20] S. S. Refaat, H. Abu-Rub, A. P. Sanfilippo, A. Mohamed, "Impact of grid-tied large-scale photovoltaic system on dynamic voltage stability of electric power grids", *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, No. 2, pp. 157-164, 2018., doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0219

- [21] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao, "Study on small signal stability of microgrids: A review and a new approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, No. 9, pp. 4818-4828, 2011., doi: 10.1016/j.rser.2011.07.069
- [22] D. S. Pillai, N. Rajasekar, "A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp.18-40, kolovoz 2018., doi: 10.1016/j.rser.2018.03.082
- [23] K. Zhang, J. Yu, Y. Ren, "Demand side management of energy consumption in a photovoltaic integrated greenhouse", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, siječanj 2022., doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107433
- [24] M. M. Haque, P. Wolfs, "A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1195-1208, 2016., doi: 10.1016/j.rser.2016.04.025
- [25] W. Meng, D. Song, X. Deng, M. Dong, J. Yang, R. M. Rizk-Allah, V. Snášel, "Dynamic Optimal Power Flow of Active Distribution Network Based on LSOCR and Its Application Scenarios", *Electronics*, vol. 12, No. 7, ožujak 2023., doi: 10.3390/electronics12071530
- [26] O. Herbadji, L. Slimani, T. Bouktir, "Optimal Power Flow With Four Conflicting Objective Functions Using Multiobjective Ant Lion Algorithm: A Case Study of the Algerian Electrical Network", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, No. 1, pp. 94-113, ožujak 2019.
- [27] HEP – OPERATOR DISTRIBUCIJSKOG SUSTAVA D.O.O., "Mrežna pravila distribucijskog sustava", *Narodne novine*, izdanje: NN 74/2018, broj dokumenta u izdanju: 1539, kolovoz 2018., eli: /eli/sluzbeni/2018/74/1539

SAŽETAK

U ovome radu ukratko su opisane različite literature koje se bave temom optimizacije primijenjene na aktivne distribucijske mreže koje sadrže distribuiranu proizvodnju. Dana je definicija aktivne distribucijske mreže, navedeni su utjecaji distribuirane proizvodnje na prilike u mreži te metode za njihovo ublažavanje. Predstavljeni su optimalni tokovi snaga kao temeljni optimizacijski problem u elektroenergetskim sustavima. U nastavku rada dan je primjer optimizacije niskonaponske distribucijske mreže s aktivnim kupcima. Dana je formulacija matematičkog modela optimizacijskog problema gdje pripadajuću funkciju cilja predstavlja minimizacija gubitaka snage. Detaljno je prikazano modeliranje mreže na temelju koje su odrađeni simulacijski slučajevi te su definirani parametri optimizacije. Kao rješenje za smanjenje negativnih utjecaja DP na mrežu, korištena je kombinacija metoda ograničenja proizvodnje iz FN sustava i upravljanja jalovom snagom iz FN pretvarača. Simulacije su provedene u programu *pandapower*. Analizirana je mreža u slučaju kada FN sustavi nisu u funkciji. Zatim su provedeni proračuni tokova snaga te optimalnih tokova snaga u slučajevima kada su FN sustavi u funkciji na svakom drugom kućanstvu te u slučaju kada su u funkciji na svakom kućanstvu. Na temelju dobivenih rezultata, izvedena su zaključna razmatranja.

Ključne riječi: aktivni kupac, distribuirana proizvodnja, minimizacija gubitaka snage, optimalni tokovi snaga, *pandapower*

ABSTRACT

Optimization of active distribution grid

In this thesis, various literature dealing with the topic of optimization applied to active distribution networks containing distributed generation are briefly described. The definition of an active distribution network is provided, the impacts of distributed generation on network conditions are listed, and methods for mitigating these impacts are discussed. Optimal power flows are presented as a fundamental optimization problem in power systems. Further in the paper, an example of optimizing a low-voltage distribution network with active customers is given. The formulation of the mathematical model for the optimization problem is described, with the objective function representing the power loss reduction. The network modeling is described, based on which simulation cases were performed and the optimization parameters were defined. As a solution to reduce the negative impacts of distributed generation on the network, a combination of two methods was used – active power curtailment and reactive power control through the photovoltaic inverters. Simulations were conducted using the pandapower program. The network was analyzed in the case where photovoltaic systems were not operational. Then, power flow calculations and optimal power flows were executed in scenarios where photovoltaic systems were operational in every other household and in the scenario where they were operational in every household. Based on the obtained results, concluding considerations were made.

Keywords: prosumer, distributed generation, power loss reduction, optimal power flow, pandapower

ŽIVOTOPIS

Sanja Kelemen rođena je 15. siječnja 2001. godine u Virovitici. Završila je Osnovnu školu Eugena Kumičića u Slatini. Tijekom osnovnoškolskog obrazovanja sudjeluje na raznim natjecanjima te je, na osnovu napisanog istraživačkog rada, pozvana na Državni turnir mladih prirodoslovaca gdje ostvaruje odličan rezultat. Nakon završetka osnovne škole upisuje Srednju školu Marka Marulića u Slatini, smjer opća gimnazija. Sudjeluje na državnom natjecanju iz logike. Aktivno se bavi sportom – odbojkom i stolnim tenisom te predstavlja školu na državnoj razini. Srednju školu završava 2019. godine sa odličnim (5,00) uspjehom te iste godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Nakon druge godine opredjeljuje se za smjer elektroenergetika. U akademskoj godini 2020./2021., povodom obilježavanja 43. obljetnice fakulteta, dobiva priznanje za uspješnost u studiranju. Upisani preddiplomski studij završava 2022. godine s odličnim uspjehom te iste godine upisuje diplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok DEA – Elektroenergetski sustavi. U prosincu 2023. godine uručena joj je nagrada Lions Cluba Osijek za najbolje studente Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. U akademskoj godini 2023./2024., po Odluci Fakultetskog vijeća od 14. svibnja 2024., dobiva nagradu za uspješnost u studiranju. Dobitnica je Dekanove nagrade za izniman uspjeh u studiranju i ostvarene izvannastavne aktivnosti kojima je pridonijela ugledu Fakulteta. Tokom studiranja, aktivno se bavi sportom te predstavlja fakultet na sveučilišnoj razini.

PRILOG

Dan je prikaz programskog koda korištenog pri simulaciji scenarija 4 (provedba OPF-a na mreži iz scenarija 2).

Linija *Kod*

```
1:     import pandapower as pp
2:     import pandapower.plotting as plot
3:     import os
4:     import numpy as np
5:     import pandas as pd
6:     import julia
7:     import math
8:
9:     #Definiranje nove mreže
10:    net = pp.create_empty_network()
11:
12:    #Definiranje sabirnice 10 kV
13:    b10kv = pp.create_bus(net, vn_kv=10.0, name="b10kV")
14:
15:    #Definiranje sabirnica 0.4 kV
16:    b400v = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b400V")
17:
18:    b04kv1 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV1")
19:    b04kv2 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV2")
20:    b04kv3 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV3")
21:    b04kv4 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV4")
22:    b04kv5 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV5")
23:    b04kv6 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV6")
24:    b04kv7 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV7")
25:    b04kv8 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV8")
26:    b04kv9 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV9")
27:
28:    b04kv10 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV10")
29:    b04kv11 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV11")
30:    b04kv12 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV12")
31:    b04kv13 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV13")
32:    b04kv14 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV14")
33:    b04kv15 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV15")
34:    b04kv16 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV16")
35:    b04kv17 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV17")
36:    b04kv18 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV18")
37:    b04kv19 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV19")
38:    b04kv20 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV20")
39:    b04kv21 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV21")
40:    b04kv22 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV22")
41:    b04kv23 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV23")
42:    b04kv24 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV24")
43:    b04kv25 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kV25")
44:
```


Linija Kod

```
45:     b04kv26 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv26")
46:     b04kv27 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv27")
47:     b04kv28 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv28")
48:     b04kv29 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv29")
49:     b04kv30 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv30")
50:
51:     b04kv31 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv31")
52:     b04kv32 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv32")
53:     b04kv33 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv33")
54:     b04kv34 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv34")
55:     b04kv35 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv35")
56:     b04kv36 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv36")
57:     b04kv37 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv37")
58:     b04kv38 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv38")
59:     b04kv39 = pp.create_bus(net, vn_kv=0.4, name="b04kv39")
60:
61:     #Modeliranje transformatora 10/0.4 kV
62:     pp.create_transformer_from_parameters(net, hv_bus=b10kv,
63:         lv_bus=b400v, sn_mva=0.25, vn_hv_kv=10, vn_lv_kv=0.4,
64:         vkr_percent=1.2, vk_percent=4.0, pfe_kw=0.65,
65:         i0_percent=0.2619, shift_degree=330, tap_side='hv',
66:         tap_neutral=0, tap_max=2, tap_min=-2,
67:         tap_step_percent=2.5, tap_step_degree=0,
68:         tap_pos=0, tap_phase_shifter=False, name="TS 10/0.4 kV")
69:
70:     #Modeliranje vodova
71:     pp.create_line(net, from_bus=b400v, to_bus=b04kv1, length_km=0.053,
72:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 1")
73:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv1, to_bus=b04kv2, length_km=0.053,
74:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 2")
75:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv2, to_bus=b04kv3, length_km=0.053,
76:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 3")
77:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv3, to_bus=b04kv4, length_km=0.053,
78:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 4")
79:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv4, to_bus=b04kv5, length_km=0.053,
80:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 5")
81:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv5, to_bus=b04kv6, length_km=0.053,
82:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 6")
83:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv6, to_bus=b04kv7, length_km=0.053,
84:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 7")
85:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv7, to_bus=b04kv8, length_km=0.053,
86:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 8")
87:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv8, to_bus=b04kv9, length_km=0.053,
88:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 9")
89:
90:     pp.create_line(net, from_bus=b400v, to_bus=b04kv10, length_km=0.034,
91:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 10")
92:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv10, to_bus=b04kv11, length_km=0.034,
93:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 11")
94:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv11, to_bus=b04kv12, length_km=0.034,
95:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 12")
96:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv12, to_bus=b04kv13, length_km=0.034,
97:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 13")
98:     pp.create_line(net, from_bus=b04kv13, to_bus=b04kv14, length_km=0.034,
99:         std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 14")
```

Linija Kod

```
100: pp.create_line(net, from_bus=b04kv14, to_bus=b04kv15, length_km=0.034,
101:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 15")
102: pp.create_line(net, from_bus=b04kv15, to_bus=b04kv16, length_km=0.034,
103:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 16")
104: pp.create_line(net, from_bus=b04kv16, to_bus=b04kv17, length_km=0.034,
105:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 17")
106: pp.create_line(net, from_bus=b04kv17, to_bus=b04kv18, length_km=0.034,
107:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 18")
108: pp.create_line(net, from_bus=b04kv18, to_bus=b04kv19, length_km=0.034,
109:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 19")
110: pp.create_line(net, from_bus=b04kv19, to_bus=b04kv20, length_km=0.034,
111:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 20")
112: pp.create_line(net, from_bus=b04kv20, to_bus=b04kv21, length_km=0.034,
113:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 21")
114: pp.create_line(net, from_bus=b04kv21, to_bus=b04kv22, length_km=0.034,
115:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 22")
116: pp.create_line(net, from_bus=b04kv22, to_bus=b04kv23, length_km=0.034,
117:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 23")
118: pp.create_line(net, from_bus=b04kv23, to_bus=b04kv24, length_km=0.034,
119:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 24")
120: pp.create_line(net, from_bus=b04kv24, to_bus=b04kv25, length_km=0.034,
121:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 25")
122:
123: pp.create_line(net, from_bus=b400v, to_bus=b04kv26, length_km=0.08,
124:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 26")
125: pp.create_line(net, from_bus=b04kv26, to_bus=b04kv27, length_km=0.08,
126:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 27")
127: pp.create_line(net, from_bus=b04kv28, to_bus=b04kv28, length_km=0.08,
128:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 28")
129: pp.create_line(net, from_bus=b04kv29, to_bus=b04kv29, length_km=0.08,
130:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 29")
131: pp.create_line(net, from_bus=b04kv30, to_bus=b04kv30, length_km=0.08,
132:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 30")
133:
134: pp.create_line(net, from_bus=b400v, to_bus=b04kv31, length_km=0.04,
135:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 31")
136: pp.create_line(net, from_bus=b04kv31, to_bus=b04kv32, length_km=0.04,
137:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 32")
138: pp.create_line(net, from_bus=b04kv32, to_bus=b04kv33, length_km=0.04,
139:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 33")
140: pp.create_line(net, from_bus=b04kv33, to_bus=b04kv34, length_km=0.04,
141:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 34")
142: pp.create_line(net, from_bus=b04kv34, to_bus=b04kv35, length_km=0.04,
143:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 35")
144: pp.create_line(net, from_bus=b04kv35, to_bus=b04kv36, length_km=0.04,
145:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 36")
146: pp.create_line(net, from_bus=b04kv36, to_bus=b04kv37, length_km=0.04,
147:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 37")
148: pp.create_line(net, from_bus=b04kv37, to_bus=b04kv38, length_km=0.04,
149:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 38")
150: pp.create_line(net, from_bus=b04kv38, to_bus=b04kv39, length_km=0.04,
151:                   std_type="NAYY 4x50 SE", name="Vod 39")
152:
```

Linija Kod

```
153:    #Definiranje vanjske mreže
154:    pp.create_ext_grid(net, bus=b10kv, vm_pu=1.05)
155:
156:    #Modeliranje opterećenja na 0.4 kV
157:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv1, p_a_mw=0.001,
158:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
159:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 1",
160:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
161:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv2, p_a_mw=0.001,
162:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
163:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 2",
164:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
165:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv3, p_a_mw=0.001,
166:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
167:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 3",
168:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
169:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv4, p_a_mw=0.0,
170:                                    p_b_mw=0.002, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
171:                                    q_b_mvar=0.000646, q_c_mvar=0.0, name="Teret 4",
172:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
173:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv5, p_a_mw=0.0,
174:                                    p_b_mw=0.002, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
175:                                    q_b_mvar=0.000646, q_c_mvar=0.0, name="Teret 5",
176:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
177:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv6, p_a_mw=0.0,
178:                                    p_b_mw=0.002, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
179:                                    q_b_mvar=0.000646, q_c_mvar=0.0, name="Teret 6",
180:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
181:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv7, p_a_mw=0.0,
182:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.003, q_a_mvar=0.0,
183:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000969, name="Teret 7",
184:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
185:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv8, p_a_mw=0.0,
186:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.003, q_a_mvar=0.0,
187:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000969, name="Teret 8",
188:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
189:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv9, p_a_mw=0.0,
190:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.003, q_a_mvar=0.0,
190:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000969, name="Teret 9",
191:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
192:
193:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv10, p_a_mw=0.001,
194:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
195:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 10",
196:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
197:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv11, p_a_mw=0.001,
198:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
199:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 11",
200:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
201:    pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv12, p_a_mw=0.001,
202:                                    p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
203:                                    q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 12",
204:                                    scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
```

Linija Kod

```
205: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv13, p_a_mw=0.0,
206:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.002, q_a_mvar=0.0,
207:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000646, name="Teret 13",
208:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
209: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv14, p_a_mw=0.0,
210:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.002, q_a_mvar=0.0,
211:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000646, name="Teret 14",
212:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
213: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv15, p_a_mw=0.0,
214:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.002, q_a_mvar=0.0,
215:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000646, name="Teret 15",
216:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
217: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv16, p_a_mw=0.003,
218:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000969,
219:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 16",
220:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
221: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv17, p_a_mw=0.003,
222:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000969,
223:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 17",
224:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
225: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv18, p_a_mw=0.003,
226:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000969,
227:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 18",
228:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
229: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv19, p_a_mw=0.0,
230:     p_b_mw=0.001, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
231:     q_b_mvar=0.000323, q_c_mvar=0.0, name="Teret 19",
232:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
233: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv20, p_a_mw=0.0,
234:     p_b_mw=0.001, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
235:     q_b_mvar=0.000323, q_c_mvar=0.0, name="Teret 20",
236:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
237: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv21, p_a_mw=0.002,
238:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000646,
239:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 21",
240:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
241: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv22, p_a_mw=0.001,
242:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
243:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 22",
244:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
245: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv23, p_a_mw=0.001,
246:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
247:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 23",
248:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
249: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv24, p_a_mw=0.002,
250:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000646,
251:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 24",
252:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
253: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv25, p_a_mw=0.0,
254:     p_b_mw=0.001, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
255:     q_b_mvar=0.000323, q_c_mvar=0.0, name="Teret 25",
256:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
257:
```

Linija Kod

```
258: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv26, p_a_mw=0.001,
259:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
260:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 26",
261:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
262: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv27, p_a_mw=0.0,
263:     p_b_mw=0.001, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
264:     q_b_mvar=0.000323, q_c_mvar=0.0, name="Teret 27",
265:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
266: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv28, p_a_mw=0.0,
267:     p_b_mw=0.002, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
268:     q_b_mvar=0.000646, q_c_mvar=0.0, name="Teret 28",
269:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
270: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv29, p_a_mw=0.0,
271:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.001, q_a_mvar=0.0,
272:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000323, name="Teret 29",
273:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
274: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv30, p_a_mw=0.0,
275:     p_b_mw=0.003, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
276:     q_b_mvar=0.000969, q_c_mvar=0.0, name="Teret 30",
277:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
278:
279: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv31, p_a_mw=0.001,
280:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000323,
281:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 31",
282:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
283: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv32, p_a_mw=0.0,
284:     p_b_mw=0.001, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
285:     q_b_mvar=0.000323, q_c_mvar=0.0, name="Teret 32",
286:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
287: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv33, p_a_mw=0.0,
288:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.001, q_a_mvar=0.0,
289:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000323, name="Teret 33",
290:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
291: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv34, p_a_mw=0.002,
292:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000646,
293:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 34",
294:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
295: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv35, p_a_mw=0.0,
296:     p_b_mw=0.002, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
297:     q_b_mvar=0.000646, q_c_mvar=0.0, name="Teret 35",
298:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
299: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv36, p_a_mw=0.0,
300:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.002, q_a_mvar=0.0,
301:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000646, name="Teret 36",
302:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
303: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv37, p_a_mw=0.003,
304:     p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.000969,
305:     q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.0, name="Teret 37",
306:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
307: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv38, p_a_mw=0.0,
308:     p_b_mw=0.003, p_c_mw=0.0, q_a_mvar=0.0,
309:     q_b_mvar=0.000969, q_c_mvar=0.0, name="Teret 38",
310:     scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
```

Linija Kod

```
311: pp.create.create_asymmetric_load(net, bus=b04kv39, p_a_mw=0.0,
312: p_b_mw=0.0, p_c_mw=0.003, q_a_mvar=0.0,
313: q_b_mvar=0.0, q_c_mvar=0.000969, name="Teret 39",
314: scaling=1.0, in_service=True, type='wye')
315:
316: #Definiranje DP
317: pp.create_sgen(net, bus=b04kv1, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=0,
318: name="DP1", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
319: pp.create_sgen(net, bus=b04kv2, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=1,
320: name="DP2", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
321: pp.create_sgen(net, bus=b04kv3, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=2,
322: name="DP3", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
323: pp.create_sgen(net, bus=b04kv4, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=3,
324: name="DP4", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
325: pp.create_sgen(net, bus=b04kv5, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=4,
326: name="DP5", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
327: pp.create_sgen(net, bus=b04kv6, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=5,
328: name="DP6", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
329: pp.create_sgen(net, bus=b04kv7, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=6,
330: name="DP7", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
331: pp.create_sgen(net, bus=b04kv8, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=7,
332: name="DP8", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
333: pp.create_sgen(net, bus=b04kv9, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=8,
334: name="DP9", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
335:
336: pp.create_sgen(net, bus=b04kv10, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=9,
337: name="DP10", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
338: pp.create_sgen(net, bus=b04kv11, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=10,
339: name="DP11", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
340: pp.create_sgen(net, bus=b04kv12, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=11,
341: name="DP12", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
342: pp.create_sgen(net, bus=b04kv13, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=12,
343: name="DP13", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
344: pp.create_sgen(net, bus=b04kv14, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=13,
345: name="DP14", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
346: pp.create_sgen(net, bus=b04kv15, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=14,
347: name="DP15", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
348: pp.create_sgen(net, bus=b04kv16, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=15,
349: name="DP16", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
350: pp.create_sgen(net, bus=b04kv17, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=16,
351: name="DP17", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
352: pp.create_sgen(net, bus=b04kv18, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=17,
353: name="DP18", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
354: pp.create_sgen(net, bus=b04kv19, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=18,
355: name="DP19", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
356: pp.create_sgen(net, bus=b04kv20, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=19,
357: name="DP20", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
358: pp.create_sgen(net, bus=b04kv21, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=20,
359: name="DP21", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
360: pp.create_sgen(net, bus=b04kv22, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=21,
361: name="DP22", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
362: pp.create_sgen(net, bus=b04kv23, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=22,
363: name="DP23", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
```

Linija Kod

```
364: pp.create_sgen(net, bus=b04kv24, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=23,
365:                 name="DP24", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
366: pp.create_sgen(net, bus=b04kv25, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=24,
367:                 name="DP25", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
368:
369: pp.create_sgen(net, bus=b04kv26, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=25,
370:                 name="DP26", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
371: pp.create_sgen(net, bus=b04kv27, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=26,
372:                 name="DP27", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
373: pp.create_sgen(net, bus=b04kv28, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=27,
374:                 name="DP28", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
375: pp.create_sgen(net, bus=b04kv29, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=28,
376:                 name="DP29", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
377: pp.create_sgen(net, bus=b04kv30, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=29,
378:                 name="DP30", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
379:
380: pp.create_sgen(net, bus=b04kv31, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=30,
381:                 name="DP31", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
382: pp.create_sgen(net, bus=b04kv32, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=31,
383:                 name="DP32", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
384: pp.create_sgen(net, bus=b04kv33, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=32,
385:                 name="DP33", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
386: pp.create_sgen(net, bus=b04kv34, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=33,
387:                 name="DP34", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
388: pp.create_sgen(net, bus=b04kv35, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=34,
389:                 name="DP35", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
390: pp.create_sgen(net, bus=b04kv36, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=35,
391:                 name="DP36", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
392: pp.create_sgen(net, bus=b04kv37, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=36,
393:                 name="DP37", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
394: pp.create_sgen(net, bus=b04kv38, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=37,
395:                 name="DP38", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
396: pp.create_sgen(net, bus=b04kv39, p_mw=0.005, sn_mva=0.005, index=38,
397:                 name="DP39", scaling=1.0, type='wye', in_service=True)
398:
399: #Prikaz modelirane mreže
400: plot.simple_plot(net, bus_size=1.0, ext_grid_size=2.0,
401:                 trafo_size=2.5, plot_loads="True", plot_sgens="True",
402:                 load_size=2.5, sgen_size=2.0)
403:
404: #Definiranje potrebnih ograničenja
405: #Mogućnost upravljanja opterećenjima i DG
406: net.load['controllable'] = False
407: net.sgen['controllable'] = True
408:
409: #Ograničenja distribuirane proizvodnje
410: net.sgen["max_p_mw"] = net.sgen.p_mw.values
411: net.sgen["min_p_mw"] = 0
412: net.sgen["max_q_mvar"] = net.sgen.p_mw.values * 0.323
413: net.sgen["min_q_mvar"] = -net.sgen.p_mw.values * 0.323
414:
```

Linija Kod

```
415:    #Ograničenja napona na sabirnicama
416:    net.bus["max_vm_pu"] = 1.05
417:    net.bus["min_vm_pu"] = 0.95
418:
419:    #Ograničenja vanjske mreže
420:    net.ext_grid["max_q_mvar"] = 1000.0
421:    net.ext_grid["min_q_mvar"] = -1000.0
422:    net.ext_grid["max_p_mw"] = 1000.0
423:    net.ext_grid["min_p_mw"] = -1000.0
424:
425:    #Najveće opterećenje vodova i transformatora
426:    net.trafo["max_loading_percent"] = 100.0
427:    net.line["max_loading_percent"] = 100.0
428:
429:    #Definiranje svih vodova koji ulaze u proračun ukupnih gubitaka
430:    net.line["pm_param/target_branch"] = True
431:
432:    #Tokovi snaga
433:    #pp.runpp(net)
434:
435:    #Optimalni tokovi snaga
436:    pp.runpm_ploss(net)
437:
438:    #Ispis rezultata
439:    print("Naponi na sabirnicama:")
440:    print(net.res_bus.vm_pu)
441:    print()
442:    print("Opterećenje vodova:")
443:    print(net.res_line.loading_percent)
444:    print()
445:    print("Opterećenje transformatora:")
446:    print(net.res_trafo.loading_percent)
447:    print()
448:    print("Snaga iz vanjske mreže:")
449:    print(net.res_ext_grid)
450:    print()
451:    print("Proizvodnja DG:")
452:    print(net.res_sgen)
453:    print()
454:    print("Gubici vodova:", net.res_line.pl_mw.values.sum())
455:    print("Gubici transformatora:", net.res_trafo.pl_mw.values.sum())
456:    print("Ukupni djelatni gubici:", net.res_line.pl_mw.values.sum() +
net.res_trafo.pl_mw.values.sum())
```