

Optimizacija distributivne mreže sa velikim udjelom aktivnih kupaca

Lukić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:200:217538>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**OPTIMIZACIJA DISTRIBUTIVNE MREŽE SA
VELIKIM UDJELOM AKTIVNIH KUPACA**

Diplomski rad

Ivan Lukić

Osijek, 2021.

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

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 04.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime studenta:	Ivan Lukić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1245, 06.10.2019.
OIB studenta:	15709199560
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Član Povjerenstva 2:	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Naslov diplomskog rada:	Optimizacija distributivne mreže sa velikim udjelom aktivnih kupaca
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno dati pregled literature koja obuhvaća temu optimizacije distributivne mreže koja ima velik udio aktivnih kupaca. Navesti i opisati najčešće korištene funkcije cilja. Na primjeru distributivne mreže sa velikim udjelom aktivnih kupaca, napraviti jedan optimizacijski proračun i obraditi dobivene rezultate.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	04.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 10.09.2021.

Ime i prezime studenta:

Ivan Lukić

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1245, 06.10.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

1 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimizacija distributivne mreže sa velikim udjelom aktivnih kupaca**

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

i sumentora

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 studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. PREGLED PODRUČJA ZA OPTIMIZACIJU DISTRIBUTIVNE MREŽE SA NAGLASKOM NA MINIMIZACIJU GUBITAKA	3
2.1. Metode i tehnike za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži koje se temelje na optimalnom smještaju uređaja za regulaciju napona	3
2.1.1. Postavljanje kondenzatora	4
2.1.2. Raspodjela distribuirane proizvodnje	6
2.1.3. Usporedba metoda	7
2.2. Minimizacija gubitaka u pogonu distributivne mreže kada su uređaji za kontrolu napona već postavljeni.....	9
2.2.1. Rekonfiguracija mreže	9
2.2.2. Minimizacija gubitaka pomoću distribuiranih generatora smještenih u pogonu	11
3. MODEL NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE	15
4. ANALIZA MREŽE.....	24
4.1. Scenarij 1	24
4.2. Scenarij 2	33
4.3. Scenarij 3	42
4.4. Scenarij 4	55
4.5. Scenarij 5	63
4.6. Usporedba rezultata	75
5. ZAKLJUČAK	79
LITERATURA.....	81
SAŽETAK.....	87
ABSTRACT	88

1. UVOD

Zbog povećane potrebe za električnom energijom u modernoj distribucijskoj mreži sve veća je upotreba distribuirane proizvodnje (DG). Distribuirana proizvodnja predstavlja proizvodnju električne energije iz manjih postrojenja te je njihovo povezivanje moguće u bilo kojoj točki elektroenergetskog sustava. U prošlosti tok energije je bio jednosmjernan, međutim zbog razvoja današnje tehnologije i prihvatljivije cijene broj aktivnih kupaca raste te tok energije više nije jednosmjernan. Aktivni kupci predstavljaju kupce koji unutar svoga kućanstva i instalacija imaju postrojenje za proizvodnju električne energije te ima mogućnost predaje električne energije u mrežu. Kako je potreba za električnom energijom veća, prijenos i distribucija električne energije je sve veća, stoga su i gubici u prijenosu i distribuciji sve veći. Zbog toga su danas razvijene razne metode i tehnike za optimizaciju mreže te je funkcija cilja ovog rada minimizacija gubitaka to jest ovaj rad se bazira na minimizaciju gubitaka.

Najbolju teorijsku podlogu daje literatura [1]. Literatura [1] navodi i opisuje razne metode i tehnike za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži. Metode za minimizaciju gubitaka koje literatura [1] obrađuje su: postavljanje kondenzatora, raspodjela distribuirane proizvodnje i rekonfiguracija mreže te su te metode ujedno i najčešće upotrebljavane. U literaturi [2] se prikazuje kako se mogu smanjiti gubici snage rekonfiguracijom mreže i proizvodnjom jalove snage putem izmjenjivača. U literaturi [3] prikazana je rasprava o jalovoj snazi koju mogu proizvesti fotonaponski sustavi putem izmjenjivača. Literatura [3] opisuje vektorskim dijagramima i PQ krivuljom kako fotonaponski sustavi pored radne snage mogu proizvoditi i jalovu snagu.

U praktičnom dijelu opisan je model niskonaponske distribucijske mreže, opisani su elementi koji se koriste u modelu te njihove vrijednosti. Modeliranje je izvršeno u programskom alatu DIgSILENT PowerFactory, pomoću kojeg ćemo simulirati nekoliko scenarija koja su moguća u niskonaponskoj distribucijskoj mreži s velikim brojem aktivnih kupaca. Analizirani su tokovi snaga kada nema fotonaponskih sustava, prikazani gubici radne i jalove snage te vrijednosti napona u radijalnim izvodima. Analizirani su tokovi snaga i optimalni tokovi snaga kada fotonaponski sustavi rade sa 75% snage i kad fotonaponski sustavi rade sa 99.9% snage. Također i u ovim slučajevima prikazani su gubici radne i jalove snage, vrijednosti napona u radijalnim izvodima te su na kraju uspoređeni rezultati.

Struktura rada podijeljena je na četiri poglavlja, koja se dijele na nekoliko potpoglavlja. U uvodu definirana je distribuirana proizvodnja, aktivni kupac te je definirana funkcija cilja ovog rada. Također je u uvodu sažeto analizirana struktura rada i opisan zadatak diplomskog rada. U drugom

poglavlju opisana je teorija kako bi se lakše savladala tematika rada, dok je treće i četvrto poglavlje praktični dio. Osim toga rad sadrži i zaključak, sažetak i literaturu.

1.1.Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada je dati teorijski pregled metoda i tehnika za optimizaciju distributivne mreže koja sadrži veliki broj aktivnih kupaca. Na primjeru distributivne mreže s velikim brojem aktivnih kupaca napraviti optimizacijski proračun te analizirati dobivene rezultate.

2. PREGLED PODRUČJA ZA OPTIMIZACIJU DISTRIBUTIVNE MREŽE SA NAGLASKOM NA MINIMIZACIJU GUBITAKA

Gubici u prijenosnim i distributivnim mrežama predstavljaju najveću pojedinačnu potrošnju u bilo kojem elektroenergetskom sustavu. Prijenosni i distributivni sustavi nerijetko rade pod jako opterećenim uvjetima, zbog povećane potražnje za električnom energijom, ekološkim ograničenjima i energetskeg tržišta. Stoga gubici distributivnih sustava sve više zabrinjavaju. Zahtjev za osiguravanjem kvalitetne električne energije i povećane učinkovitosti, za postizanje svih mogućih ekonomskih koristi stvorit će vrlo povoljnu klimu za potrebe tehnika minimiziranja gubitaka i inovativnih radnih praksi. Ukupna snaga isporučena distributivnom sustavu izračunata je prema ukupnoj proizvodnji električne energije i gubitku snage prijenosnog sustava [1].

2.1. Metode i tehnike za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži koje se temelje na optimalnom smještaju uređaja za regulaciju napona

Sljedeća potpoglavlja odnose se na metode i tehnike koje služe za pronalazak optimalne lokacije i veličine uređaja za regulaciju napona i minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži. Kako bi se poboljšala učinkovitost distributivnih sustava, jedina od opcija je minimiziranje gubitaka. Tako je utvrđeno da su se u posljednja tri desetljeća istraživanja u distributivnim sustavima usredotočila na minimiziranje gubitaka u vodovima i regulaciju napona. Dostupne su razne metode smanjenja gubitaka u distributivnom sustavu, ali osnovne tri metode su: postavljanje kondenzatora (općenito primjenjivo u sredjenaponskim distributivnim sustavima), rekonfiguracija mreže (općenito primjenjivo u distributivnim sustavima niskog napona) i raspodjela distribuirane proizvodnje - DG (usredotočeni na postizanje međusobne povezanosti kada postoje mali generatori. Na primjer, kada izolirane vjetroelektrane ili mala fotonaponska postrojenja uđu u distributivnu mrežu). [1]

Tradicionalno se minimiziranje gubitaka usredotočilo na optimizaciju rekonfiguracije mreže ili postavljanjem kondenzatora koji daje jalovu snagu. Iako problemi s planiranjem, regulatorni okvir i dostupnost resursa ograničavaju operatore distributivne mreže i dispečere da prihvate distribuiranu proizvodnju, vlade potiču tehnologije s niskim udjelom ugljika kao način za postizanje okolišnih ciljeva i povećanje energetske sigurnosti. Ulaganjem u DG operatori distributivne mreže mogu postići operativne koristi mreže kroz niže isporučene gubitke. [4]

Autori u literaturi [1] navode da postoje dva tipa pristupa gubicima:

1. Minimiziranje gubitaka snage,
2. Minimiziranje gubitaka energije.

Gubitak energije odnosi se na gorivo koje se sagorijeva za proizvodnju te energije, dok je najveći gubitak snage važan, jer utječe na procjene opreme za podnošenje vršnog opterećenja. [1]

2.1.1. Postavljanje kondenzatora

Ovo potpoglavlje odnosi se na smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži upotrebom tehnike postavljanja kondenzatora za koju autori u literaturi [1] tvrde da je primjenjiva u sredjenaponskim distributivnim sustavima. Kondenzator u elektroenergetskom sustavu može se koristiti za [1]:

1. Za kontrolu tokova snaga,
2. Poboljšanje stabilnosti,
3. Upravljanje naponskim profilom,
4. Korekcija faktora snaga,
5. Smanjenje gubitaka snage i energije.

Dodavanjem paralelnih kondenzatora (kondenzatorskih baterija) kod potrošača, kondenzator postaje izvor kapacitivne jalove snage, koji utječe na smanjenje induktivne jalove snage koja se prenosi opterećenim vodom, te su zbog manjeg prijenosa jalove snage manji gubici jalove snage [1].

Glavni izazovi pri korištenju ove tehnike su [1]:

1. Odabir odgovarajućeg broja kondenzatorskih jedinica,
2. Raspodjela kondenzatora,
3. Dimenzioniranje kondenzatora kako bi se postigao traženi rezultat, tj. (smanjenje gubitka, kontrola napona i kontrola tokova snage).

Utjecaj promjene vrijednosti jalove snage (volt - amper reaktivno) kao reakcija na promjenu opterećenja prepoznate su od 1940-ih. Prije 50-ih prevladavao je trend smanjenja gubitaka postavljanjem kondenzatora u trafostanici, ali od desetljeća 50-ih započet je trend ugradnje kondenzatora bliže opterećenju zbog dostupnosti opreme i ekonomičnosti. [1]

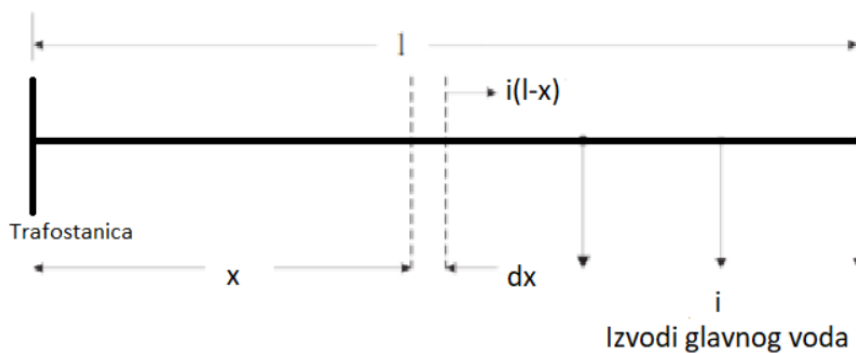
Funkcija cilja optimizacijskog postupka koja traži minimum energije gubitaka dana je jednadžbom [1]:

$$\text{Minimalni ukupni gubici} = \min \int i^2 R dx = \min \int [l(1-x)]^2 R dx \quad (2-1)$$

gdje je:

- i - jalova struja na dovodu,
- R - je ukupni otpor,
- x - udaljenost od izvora,
- l - ukupna duljina glavnog elektroenergetskog voda.

Ova se formula koristi u literaturi, u raznim oblicima za postavljanje i dimenzioniranje kondenzatora kako bi se postigli minimalni gubici [1].



Slika 2.1. Jednoliko opterećeni vod [1].

Stoga su istraživači uključili razne tehnike kako bi posao smanjenja gubitaka postavljanjem kondenzatora učinili učinkovitijim. Optimalni razmještaj kondenzatora izvodi se pomoću sljedećih tehnika [1]:

1. *Mixed-Integer Programming - MIP* (Mješovito - cjelobrojno programiranje),[5]
2. *Linear Programming - LP* (Linearno programiranje),[6]
3. *Nonlinear Programming - NP* (Nelinearno programiranje),[7]-[8]
4. *Genetic Algorithms - GA* (Genetski algoritmi),[9]
5. *Ant Colony Search - ACS* (Pretraga kolonije mrava),[10]
6. *Artificial Neural Networks - ANN* (Umjetne neuronske mreže),[11]
7. *Tabu Search - TS* (Tablično pretraživanje),[12]-[14]

8. *Particle Swarm Optimization - PSO* (Optimizacija roja čestica),[13], [15]–[18]

9. *Fuzzy Set Theory - FST* (Teorija nejasnih skupova),[19]

10. *Simulated Annealing - SA* (Simulirano žarenje).[17,18]

Otkriveno je da se u ovoj metodi postavljanja kondenzatora za postizanje smanjenja gubitaka, zajedno s veličinom, položajem i metodologijom, mora imati u vidu i veličina kabela, broj kondenzatora itd. To povećanje korisnosti stvara dodatne troškove kondenzatora i za tehnike postavljanja kondenzatora. Osim toga, primjena kondenzatora značajno ne mijenja gubitke zbog toga što ne utječe na djelatnu komponentu struje, odnosno bavi se samo jalovom komponentom struje. [1]

2.1.2. Raspodjela distribuirane proizvodnje

Smanjenje gubitaka raspodjelom DG-a (distribuiranih izvora), ovisi o dostupnosti distribuiranih izvora (ako se radi o obnovljivom izvoru). DG se može definirati kao proizvodnja električne energije iz postrojenja koja su dovoljno manja od centralnih proizvodnih postrojenja kako bi se omogućilo međusobno povezivanje u gotovo bilo kojoj točki elektroenergetskog sustava. U posljednje vrijeme prodor distribuirane proizvodnje (DG) u distributivne sustave ubrzano se povećava u mnogim dijelovima svijeta. Integracija DG-a u postojeću mrežu može rezultirati sa nekoliko prednosti kao što su [1]:

1. Smanjeni utjecaj na okoliš,
2. Povećana ukupna energetska učinkovitost,
3. Rasterećenost prijenosa i distribucije,
4. Naponska podrška,
5. Iskorištavanje obnovljivih izvora energije poput vjetra, sunca, vode, biomase, geotermalne energije i energije oceana,
6. Smanjenje gubitaka na vodu.

U usporedbi sa drugim metodama za smanjenje gubitaka, metoda distribuirane proizvodnje je vrlo učinkovita. Glavni razlozi kontinuiranog porasta DG-a u elektroenergetskoj mreži su [1]:

1. Briga za okoliš,
2. Ograničenja u izgradnji novih prijenosnih i distribucijskih vodova,
3. Tehnološki napredak malih generatora,
4. Energetska elektronika i uređaji za pohranu energije za privremenu rezervu,

5. Sve veća želja javnosti za promicanjem „zelenih“ tehnologija temeljenih na obnovljivim izvorima energije.

Također nepravilno raspoređivanje ili određivanje veličine DG može utjecati na sustav. Porast DG-a je promijenio strukturu mreže s tradicionalnih centraliziranih sustava koji su dugo bili osnova za rad mreže. [1,39]

U ovu metodu smanjenja gubitaka raspodjelom DG-a također su istraživači uključili razne napredne tehnike poput algoritma kolonije pčela (*Bee Colony Algorithm - BCA*) [23], mješovito cjelovito nelinearno programiranje (*Mixed Integer Non-Linear Programming - MINP*) [24], metoda iscrpnog toka opterećenja (*Exhaustive Load Flow Method - ELF*) [25], PSO [26]–[29], nejasni - genetički algoritam (*Fuzzy-Genetic algorithm - FGA*) [30], *Hereford Ranch* algoritam - HRA [31], [32], ACS [33]–[36], pristup diferencijalne evolucije (*Differential Evolution Approach - DEA*) [37], heuristička tehnika prilagođena krivulji (*Heuristic Curve-Fitted Technique - HCFT*) [38]. Ova obećavajuća metoda minimiziranja gubitaka privlači široku pozornost zbog toga što minimizira mrežne gubitke zajedno s pružanjem električne energije u razdoblju velike potražnje. Dakle, istraživači pokušavaju istražiti nove tehnike za provedbu ove metode uz maksimalnu korist [1].

2.1.3. Usporedba metoda

U sljedećoj tablici sažeto su prikazane prednosti i nedostaci spomenutih metoda za minimizaciju gubitaka [1].

Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci metoda [1].

Metoda za minimizaciju gubitaka	Prednosti	Nedostaci
Postavljanje kondenzatora	<p>Smanjenje gubitaka voda.</p> <p>Kontrola toka snage.</p> <p>Poboljšanje stabilnosti.</p> <p>Upravljanjem naponskim profilom.</p> <p>Korekcija faktora snage.</p> <p>Izvor jalove snage.</p> <p>Minimizacija gubitaka.</p>	<p>Gubici zbog ispada faznih komponenata struja to jest mogu se smanjiti jalove struje.</p> <p>Uz veličinu, mjesto i metodologiju, također se treba odrediti veličina kabela, broj kondenzatora itd.</p>

		Dodatni troškovi za postavljanje kondenzatora.
Raspodjela distribuirane proizvodnje	<p>Smanjenje gubitaka voda.</p> <p>Izvor energije.</p> <p>Smanjen utjecaj na okoliš.</p> <p>Povećana ukupna energetska učinkovitost.</p> <p>Rasterećeno prijenosno i distribucijsko opterećenje.</p> <p>Naponska podrška.</p> <p>Odgođena ulaganja u nadogradnju postojećih sustava proizvodnje.</p> <p>prijenosa i distribucije.</p>	<p>Nepravilna raspodjela ili određivanje veličine DG-a može utjecati na sustav.</p> <p>Planiranje proizvodnje DG-a.</p> <p>Uzrokuje suprotni tok snage u distributivnim sustavima, koji su tradicionalno dizajnirani za jednosmjernan tok snage.</p>

Metoda postavljanja kondenzatora predstavlja najjednostavniju i najpouzdaniju metodu za minimizaciju gubitaka. Metoda postavljanja kondenzatora ima manje prednosti od raspodjele distribuirane proizvodnje. Značajna prednost ove metode je i to što su izvor jalove snage, te njihovim priključivanjem rastu vrijednosti napona u mreži, odnosno njihovim isključivanjem padaju vrijednosti napona u mreži, jer napon mreže proporcionalno ovisi o jalovoj snazi. Nedostatak ove metode je što stvara dodatne troškove za postavljanje kondenzatore. Metoda raspodjele distribuirane proizvodnje je učinkovitija od metode postavljanja kondenzatora i predstavlja veliki potencijal u budućnosti za minimizaciju gubitaka. Ova metoda minimizacije gubitaka koristi obnovljive izvore energije te se zbog brige za okoliš sve više koristi. Međutim, ukoliko se radi o distribuiranim izvorima kao što su fotonaponski sustavi ili vjetroelektrane, tada distribuirani izvori ovise o nekim vanjskim čimbenicima (npr. Suncu, vjetru) i neće biti na raspolaganju, što predstavlja nedostatak.

Zaključuje se da pomoću gore navedenih tehnika raspodjele distribuirane proizvodnje može se odrediti optimalni smještaj i instalirana snaga distribuirane proizvodnje u distributivnoj mreži. Na taj način investitori mogu dobiti podatke gdje bi bilo optimalno izgraditi distribuiranu proizvodnju. Međutim, u praksi je ograničena upotreba optimalnog smještaja dobivenog pomoću navedenih tehnika, te se optimalni smještaj prema tehnikama raspodjele distribuirane proizvodnje ne uzima uvijek u obzir. Distribuirana proizvodnja se može graditi na bilo kojoj lokaciji distributivne mreže,

ne samo na optimalnim dijelovima. Stoga investitori odlučuju na kojoj lokaciji će izgraditi distribuiranu proizvodnju. Na primjer, ukoliko se neka farma nalazi u nekom ruralnom području, gdje nije optimalni smještaj za distribuiranu proizvodnju, te investitor odluči graditi elektranu na biomasu, investitoru će to biti omogućeno iako to nije optimalan smještaj za distribuiranu proizvodnju.

2.2. Minimizacija gubitaka u pogonu distributivne mreže kada su uređaji za kontrolu napona već postavljeni

Prethodne dvije navedene metode (Postavljanje kondenzatora i Raspodjela distribuirane proizvodnje), odnose se na odabir optimalne lokacije kondenzatora ili DG-a, te na odabir optimalnog iznosa veličine kondenzatora ili DG-a. Sljedeća potpoglavlja odnosit će se na minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži kada su elementi distributivne mreže već postavljeni.

2.2.1. Rekonfiguracija mreže

Smanjenje gubitaka korištenjem rekonfiguracije mreže prema autorima u literaturi [1] utvrđeno je da je općenito primjenjiva u distributivnim mrežama niskog napona. To je vrlo imperativni pristup za uštedu električne energije. Distributivni sustavi sastoje se od skupina međusobno povezanih radijalnih krugova. Konfiguracija se može mijenjati pomoću sklopnih operacija za prijenos opterećenja između elektroenergetskih vodova. Rekonfiguracija mreže je postupak promjene topologije distributivnih sustava promjenom statusa otvorenosti / zatvorenosti prekidača.[1]

Rekonfiguracija se primjenjuje za [1]:

1. Obnova usluge u uvjetima kvara,
2. Uravnoteženje opterećenja (rasteretiti mreže i poboljšati iznos napona),
3. Planiranje prekida zbog održavanja,
4. Minimiziranje gubitaka.

Sklopne operacije su osnovne upravljačke radnje u mreži rekonfiguracija. Sklopne operacije sastoje se od zatvaranja prekidača u otvorenoj grani i otvaranja prekidača u zatvorenoj, održavajući mrežnu konfiguraciju radijalnom. Međutim, budući da u sustavu postoji mnogo sklopnih kombinacija, rekonfiguracija mreže složen je problem. Status prekidača predstavljaju problem za optimizaciju. Svaki prekidač ima dva statusa – otvoren ili zatvoren. Statusi prekidača i ograničenje radijalnosti sprječavaju upotrebu klasičnih tehnika optimizacije za rješavanje problema

rekonfiguracije distributivne mreže. Stoga se većina algoritama temelji na tehnikama pretraživanja koristeći analitičke pristupe ili pristupe utemeljene na znanju. Što se tiče metode za upravljanje postupkom rekonfiguracije, algoritmi se mogu kategorizirati u dvije vrste [1]:

1. Tip zamjene grana (*Branch Exchange Type*) – Sustav djeluje u izvedivoj radijalnoj konfiguraciji, a algoritam otvara i zatvara prekidače u parovima,
2. Tip rezanja petlje (*Loop Cutting Type*) – Sustav je potpuno povezan i algoritam otvara prekidače da bi postigao izvedivu radijalnu konfiguraciju.

Za rekonfiguraciju mreže koriste se razne tehnike, kao što su: PSO [39]–[41], pristup ograničenim odlukama (*Constrained Decision Problems Approach - CDPs*)[42], GA [23,24], TS [25,26], ekspertni sustav zasnovan na znanju (*knowledge based expert system - KBES*) [27,28], SA [49]–[51], optimizacija s jednim krugom (*Single Loop Optimization - SLO*) [52], ACS [7,33], algoritam harmonijskog pretraživanja (*Harmony Search Algorithm - HSA*) [54], [55], mješovito – cjelovito konveksno programiranje (*Mixed Integer Convex Programming - MICP*) [56], mješovito cjelovito linearno programiranje (*Mixed Integer Linear Programming - MILP*) [57].

Metoda rekonfiguracije mreže je složen postupak donošenja odluka koju će dispečeri slijediti, te često zahtijeva opsežna numerička izračunavanja, a utječe i na koordinaciju zaštitnih uređaja. Obično se pretpostavlja da su zaštitni uređaji i dalje pravilno koordinirani kada se mrežne konfiguracije mijenjaju sklopnim operacijama, ali zapravo se planiranje i koordinacija zaštitnih uređaja provode za fiksnu konfiguraciju. Česte promjene u konfiguraciji mogu izazvati prekide ili prolazne probleme. Osim toga, iako tehnike za rekonfiguraciju mreže nemaju dobro svojstvo konvergencije, većina ih se koristi zbog manjeg vremena računanja za manje sustave. Unatoč činjenici da sve metode jamče postizanje optimalnog rješenja, one pružaju visokokvalitetna precizna rješenja ali mogu odstupati u točnosti. Tehnike trpe u određenoj mjeri, od problema skaliranja do konačnog broja prekidača, koji se obično nalaze na realističnim, većim distributivnim sustavima, gdje je vrijeme izračuna je izuzetno veliko i možda nije prikladno za rad u stvarnom vremenu. [1][58]

Tablica 2.2. Prednosti i nedostaci rekonfiguracije mreže.

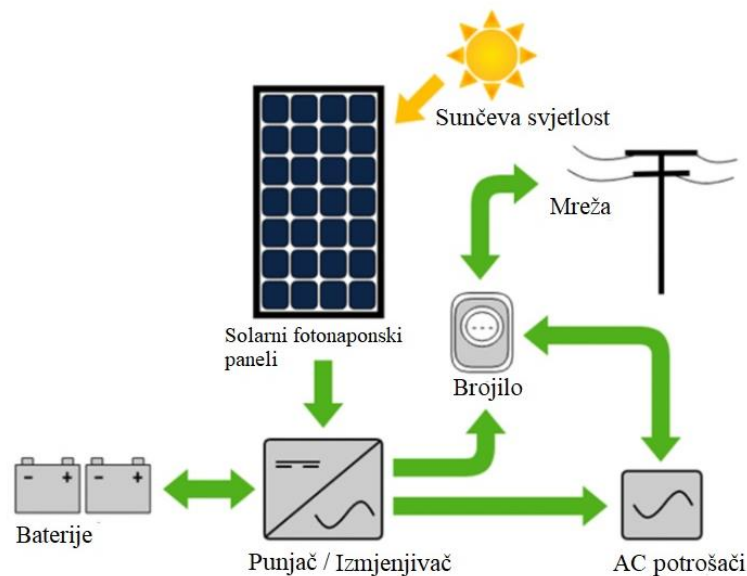
Prednosti	Nedostaci
Smanjenje gubitaka voda.	Složeni postupak donošenja odluka.
Balansiranje opterećenja.	Zahtijeva opsežna numerička izračunavanja.
Pružuje zaštitu od kvara, tako da dio mreže koji je u kvaru rekonfiguracijom izolira, odnosno isključuje.	Utječe na koordinaciju zaštitnih uređaja. Možda nije prikladan za rad u stvarnom vremenu.

Metoda rekonfiguracije mreže ima manje navedenih prednosti od metode postavljanja kondenzatora i raspodjeli distribuiranih generatora, ali je najekonomičnija ako je konfiguracija mreže takva da omogućava preklapanje. Ako je mreža radijalna, gradnja dodatnih vodova u svrhu rekonfiguracije je iznimno skupa.

2.2.2. Minimizacija gubitaka pomoću distribuiranih generatora smještenih u pogonu

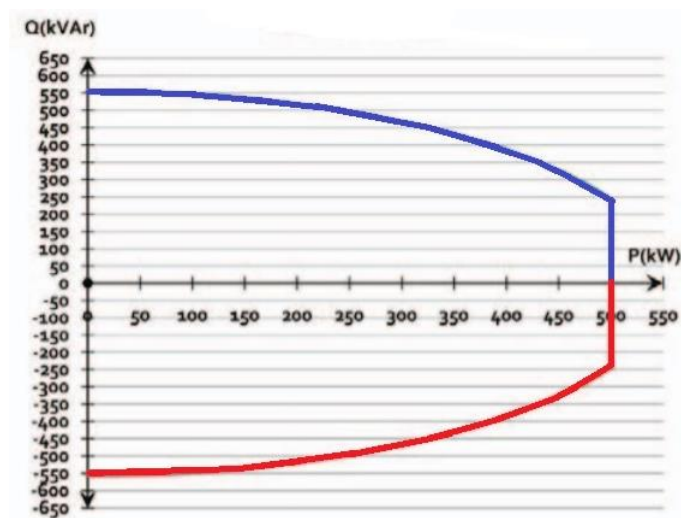
Pojava obnovljivih i distribuiranih izvora energije dovela je do značajnih promjena u radu i planiranju distribucijskih sustava. Povezivanjem distribuiranih izvora energije, potrošač je definiran kao potrošač električne energije koji može lokalno proizvoditi energiju (aktivni kupac - *Prosumer*). Kako se energija proizvodi i troši lokalno, dolazi do promjene protoka snaga u distributivnoj mreži, odnosno moguća pojava suprotnih tokova snaga od potrošača prema mreži. Distribuirana proizvodnja može biti obnovljivi izvor energije (OIE) ili fosilna goriva. U Hrvatskoj se koriste sljedeće vrste obnovljivih izvora energije: sunce, vjetar, biomasa, bioplina, male hidro i geotermalna. Prema [59] u Hrvatskoj 2019. godine iz energije sunca proizvedeno je 83,1 GWh, iz energije vjetra proizvedeno je 1467,3 GWh, iz biomase proizvedeno je 477,1 GWh, iz bioplina 401 GWh, putem malih hidroelektrana 115 GWh, te pomoću geotermalne energije 91,9 GWh električne energije. U ovom slučaju su izuzete velike hidroelektrane. Proizvodnja električne energije u 2019. godini iz OIE iznosi 20,7% ukupne proizvodnje. U slučaju distribuirane proizvodnje iz OIE, na primjer iz energije sunca ili vjetra, radna snaga koja ulazi u mrežu ovisi o nekim vanjskim čimbenicima (sunce, vjetar), stoga je kontrola radne i jalove snage ubrizgane u čvor ograničena. S druge strane, ako distribuirana proizvodnja uključuje fosilna goriva, moguće je kontrolirati i radnu i jalovu snagu koja se ubrizgava u čvor. [57,58]

Nadalje u radu promatrati će se fotonaponski distribuirani izvor, te izmjenjivač i izlazna snaga izmjenjivača. Na slici 2.2. je prikazan primjer fotonaponskog sustava.



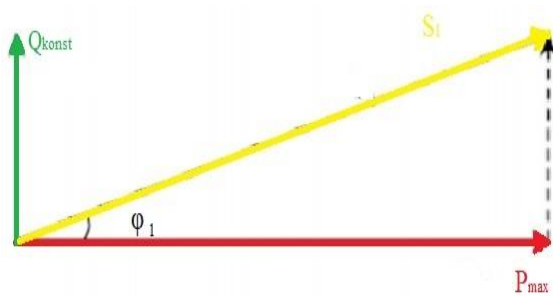
Slika 2.2. Fotonaponski sustav [60]

Osim proizvodnje radne snage, jedna od najvećih prednosti je što aktivni kupci mogu proizvoditi i jalovu snagu uz pomoć uređaja energetske elektronike. Lokalnom proizvodnjom jalove snage moguće je kontrolirati tokove jalove snage u distributivnoj mreži, što omogućuje upravljanje gubicima radne snage u distributivnom sustavu. Rezerve jalove snage nisu neograničene i ovise o trenutnoj proizvodnji radne snage. Slika 2.3. prikazuje primjer dijagrama dopuštene jalove snage ovisno o trenutnoj vrijednosti radne snage izmjenjivača. [2]

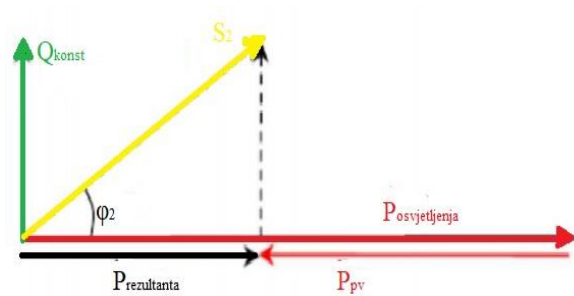


Slika 2.3. Primjer P-Q krivulje [2]

Elektronički izmjenjivači predstavljaju kapacitivne izvore energije. Kontrola jalove snage potrebna je kako bi se gubici radne snage minimizirali. Održavanje vrijednosti napona između gornje i donje granice u bilo kojoj točki distribucijskog sustava i održavanje faktora snage blizu jedinice također se može regulirati pravilnom kontrolom jalove snage. Upravljanje jalovom snagom u distributivnim mrežama je od velike važnosti, jer nema značajnih ulaganja, to se može učiniti s izmjenjivačima, a raspodijeljena snaga generirana iz obnovljivih izvora energije bit će prisutna kako bi se postigla ravnoteža jalove snage. Porast instaliranih fotonaponskih sustava utječe na faktor snage. Na primjer, noću kada fotonaponski sustavi ne daju snagu u mrežu, faktor snage blizu je jedinici zbog potrošnje radne snage. Međutim, kada god postoji snaga koju generiraju fotonaponski sustavi, dio potrošene radne snage daju fotonaponski sustavi, dok jalova snaga ostaje konstantna. To uzrokuje spomenuti pogoršani faktor snage, te je prikazan slikama 2.4. i 2.5. Faktor snage može se poboljšati klasičnim strategijama poput kompenzacijskih uređaja, ali poboljšanje faktora snage pravilnom kontrolom izmjenjivača je isplativije. Bitno je spomenuti da pretvarači napona omogućuju takvu kontrolu jalove snage pomoću softverske strategije upravljanja, dok se pretvarači struje ne mogu kontrolirati. [3]



Slika 2.4. Prikaz Snaga bez fotonaponskog sustava [3]



Slika 2.5. Prikaz snaga s fotonaponskim sustavom [3]

Slika 2.4. prikazuje vektorski dijagram snaga kada nema fotonaponskog sustava, gdje je kut φ mali, a faktor snage dobar. Slika 2.5. prikazuje utjecaj fotonaponskog sustava na faktor snage, gdje je kut φ veliki, a faktor snage loš. [3]

Pojednostavljena strategija upravljanja jalovom snagom svodi se na razmatranje da izmjenični mrežni napon bude stabilnog sinusoidnog valnog oblika, te se metoda temelji na kontroli amplitude I_m i faznog kuta θ izlazne struje i_{ac} izmjenjivača spojenog na mrežu. Slika 2.6. prikazuje ovisnost jalove i radne snage o odgovarajućim komponentama.

Te komponente se mogu izraziti kao [3]:

$$i_p = I_m \cdot \cos \theta_i \quad (2-2)$$

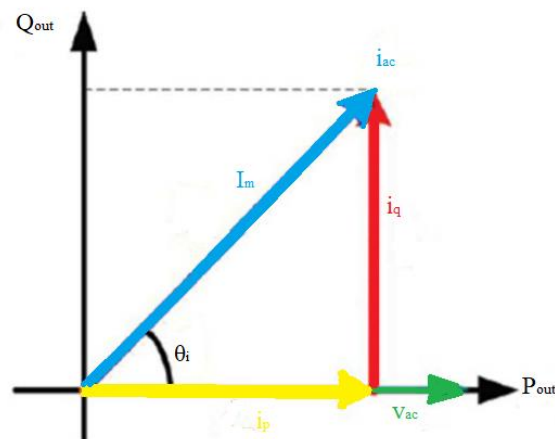
$$i_q = I_m \cdot \sin \theta_i \quad (2-3)$$

$$v_{ac}(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad (2-4)$$

$$i_{ac}(t) = I_m \cdot (\sin \omega t + \theta_i) \quad (2-5)$$

Gdje je:

- i_p - djelatna komponenta struje,
- i_q - jalova komponenta struje,
- v_{ac} - izlazni napon,
- V_m - amplituda izlaznog napona,
- ω - kružna frekvencija.



Slika 2.6. Vektorski dijagram izlaznih veličina izmjenjivača

Radna i jalova snaga na izlazu iz izmjenjivača može se izraziti na sljedeći način [3]:

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_m \cdot I_m \cdot \cos \theta_i \quad (2-6)$$

$$Q_{out} = \frac{1}{2} V_m \cdot I_m \cdot \sin \theta_i \quad (2-7)$$

Stoga, podešavanjem struje izmjenjivača i_{ac} , izmjenjivač može imati poželjne vrijednosti radne snage P_{out} i jalove snage Q_{out} . Radna snaga kontrolira se amplitudom, dok se jalova snaga kontrolira faznim kutom. [3]

3. MODEL NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Nadalje, u ovom poglavlju će se opisati model niskonaponske distribucijske mreže koja će se analizirati u programu DIgSILENT. DIgSILENT – PowerFactory [61] jedan je od vodećih softverskih aplikacija za analizu elektroenergetskih sustava, za analizu proizvodnih, prijenosnih, distribucijskih i industrijskih sustava. DIgSILENT omogućuje cijeli niz funkcija i modula. U ovom radu koristit će se napredni modul optimalnih tokova snaga (*Optimal Power Flow*). Funkcija optimalnih tokova snaga dodaje inteligenciju osnovnoj funkciji tokova snaga. Standardna funkcija proračuna tokova snaga izračunava tokove snaga i napone sabirnica na temelju unaprijed postavljenih vrijednosti točaka, odnosno vrijednosti elemenata (proizvodnja radne i jalove snage, napon generatora, položaj preklopke transformatora), optimalni tokovi snaga izračunavaju najbolje moguće vrijednosti za optimizaciju funkcije cilja korisnika i broja definiranih ograničenja. U programu postoje dvije opcije optimalnih tokova snaga [61]:

- Optimizacija jalove snage (*Reactive Power Optimisation - OPF I*)
- *Economic Dispatch (OPF II)*

Optimizacija jalove snage omogućava [61]:

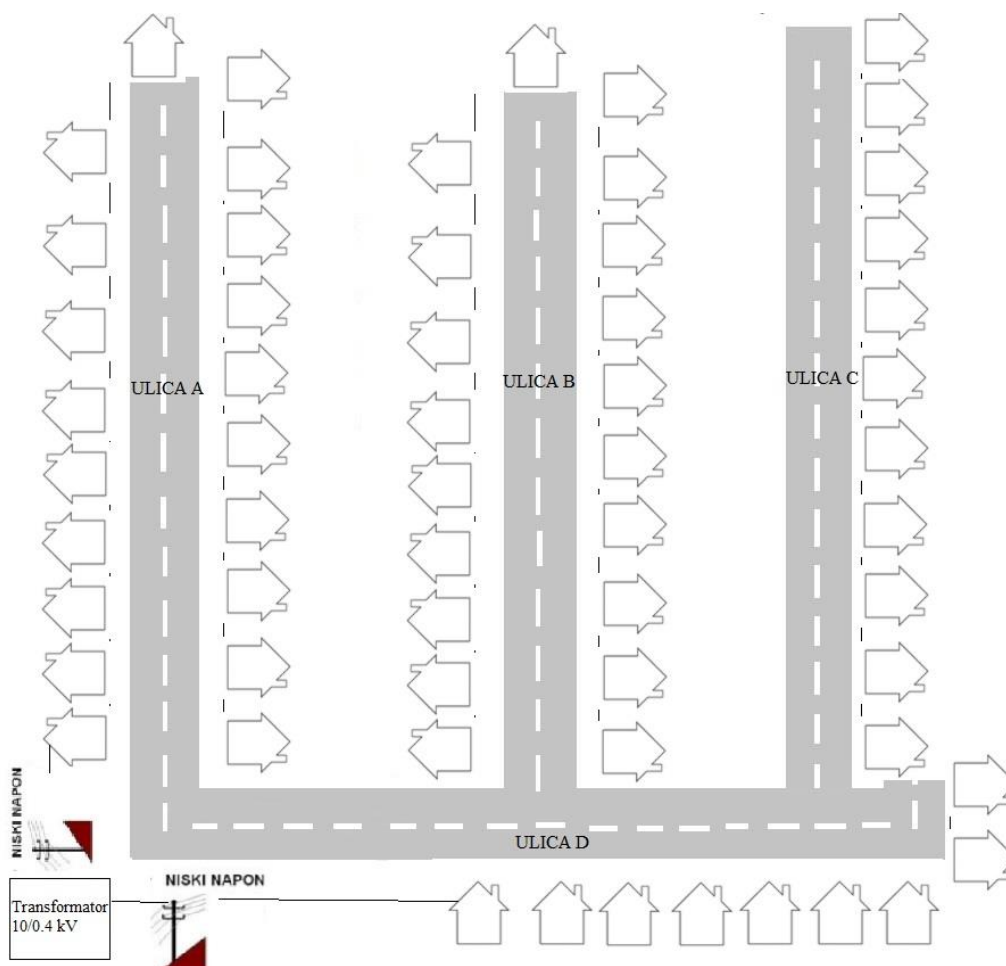
- Minimizaciju ukupnih ili djelomičnih gubitaka u mreži,
- Maksimiziranje rezerve jalove snage,
- Optimizacija jalove snage (metoda unutarnje točke),
- Različite kontrole kao što su: jalova snaga generatora, preklopke transformatora, statički var sustavi,
- Fleksibilna ograničenja kao što su: tokovi snaga i napon pojedinih grana, granice jalove snage generatora, rezerva jalove snage, granični tokovi snaga.

Economic Dispatch (OPF II) nam omogućava [61]:

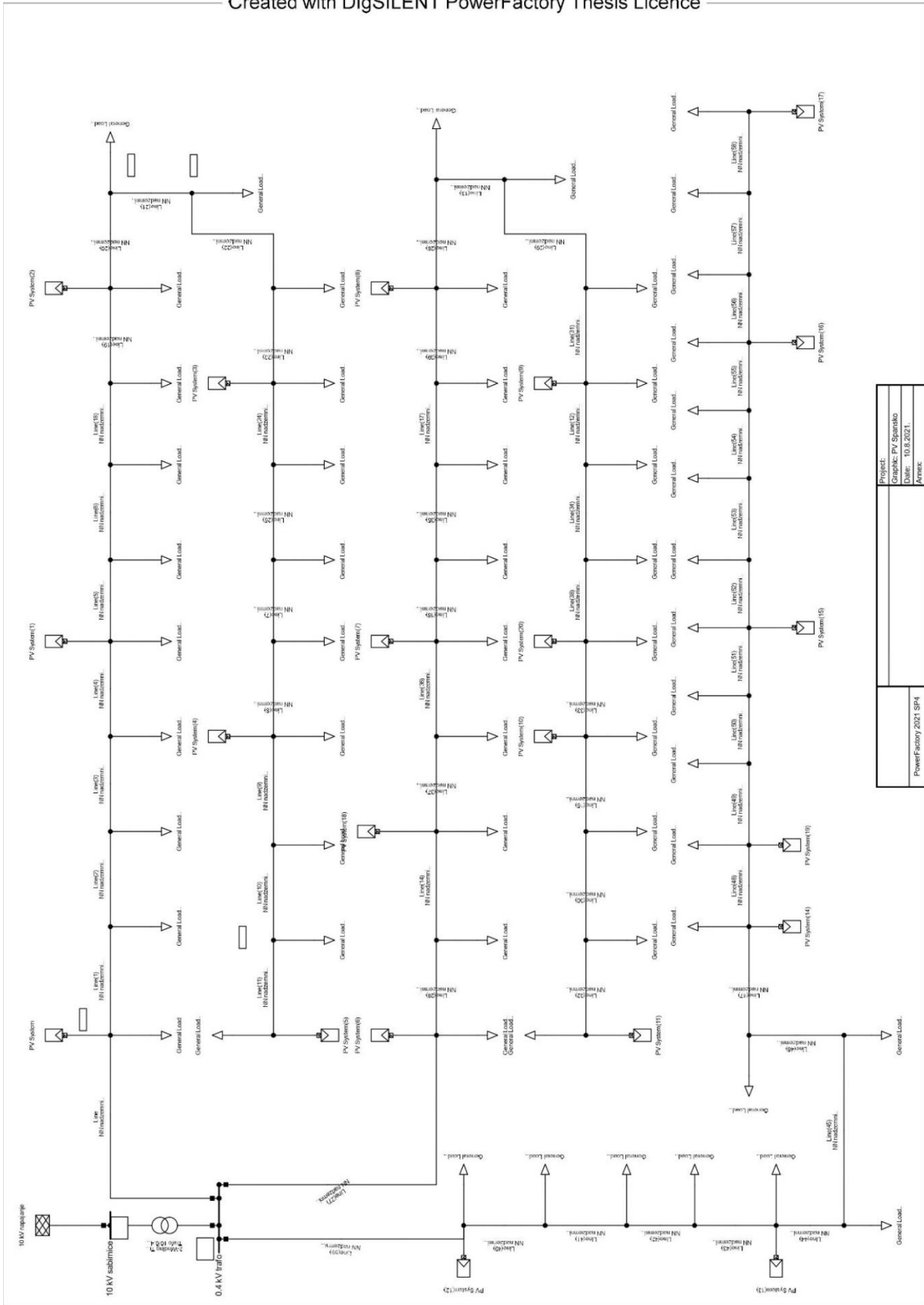
- Različite funkcije cilja kao što su: minimiziranje gubitaka, minimiziranje troškova, minimiziranje opterećenja, optimiziranje postupaka nakon kvara,
- AC optimizacija (metoda unutarnje točke),
- DC optimizacija (metoda unutarnje točke),
- Različite kontrole kao što su: proizvodnja radne i jalove snage, preklopke transformatora, statički var sustavi,
- Fleksibilna ograničenja kao što su: tokovi snaga i napon pojedinih grana, ograničenja aktivne i jalove snage generatora, rezerva radne i jalove snage, granični tokovi snaga,

- Ograničenja za nepredviđene situacije (samo DC).

Nadalje u ovom poglavlju bit će prikazan i opisan primjer distribucijske mreže, pomoću koje će se vršiti simulacije i analizirati dobiveni rezultati. Model se sastoji od vanjske distribucijske mreže, transformatora 10/0,4 kV, te tri radijalna izvoda. Model prikazuje primjer jednog naselja s velikim brojem aktivnih kupaca. Primjer naselja sastoji se od šezdeset kućanstava, koji se napajaju putem tri radijalna izvoda, odnosno svaki radijalni izvod napaja dvadeset kućanstava. Na slici 3.1. prikazan je primjer naselja koji treba modelirati u programu DIgSILENT PowerFactory. Prvi radijalni izvod napaja ulicu A, drugi radijalni izvod napaja ulicu B, dok treći radijalni izvod napaja ulicu C i D. Na slici 3.2. prikazan je model mreže u programu DIgSILENT PowerFactory. Ukupna potrošnja koju zahtjeva šezdeset kućanstava iznosi 258 kW.



Slika 3.1. Primjer naselja koje je potrebno modelirati



Project:	PV Španko
Graphic:	PV Španko
Date:	10.8.2021.
Annex:	

PowerFactory 2021 SP4

Slika 3.2. Model mreže u DlgSILENTU

Vanjska distribucijska mreža je 10 kV mreža i spojena je na 10 kV stranu transformatora, te predstavlja element koji napaja trafostanicu 10/0,4 kV. Podaci koji su uneseni u model vanjske distribucijske mreže vidljivi su na slici 3.3. Maksimalna snaga kratkog spoja iznosi $S_k^{\text{max}} = 50$ MVA, dok minimalna snaga kratkog spoja iznosi $S_k^{\text{min}} = 5,2$ MVA.

Slika 3.3. Podaci vanjske distribucijske mreže

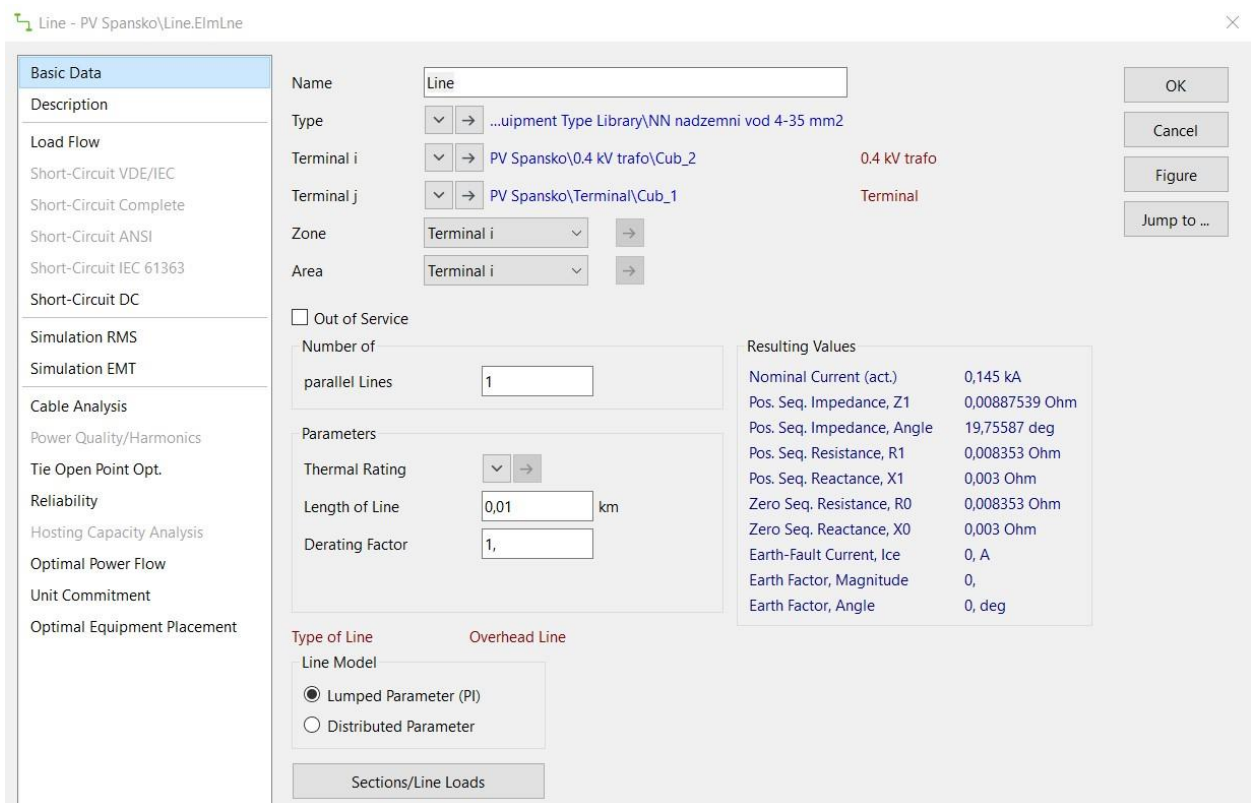
Transformator 10/0,4 kV pretvara naponsku razinu 10 kV na 0,4 kV. Transformator 10/0,4 kV predstavlja vezu između vanjske distribucijske mreže na 10 kV strani i tri radijalna izvoda niskonaponske distribucijske mreže od 230/400 V. Podaci transformatora koji su uneseni u model prikazani su na slici 3.4. Podaci transformatora su: 10/0,4 kV, nazivna prividna snaga $S_n = 400$ kVA, napon kratkog spoja $u_{k\%} = 4\%$. Primarna strana transformatora spojena je u trokut, dok je sekundarna strana spojena u zvijezdu te uzemljena. Na niskonaponskom izlazu iz trafostanice prelazi se na neizolirani nadzemni vod te se vodovi pričvršćuju na krovne nosače ili na stupove.

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library\Trafo 10/0,4 400 kVA.TypTr2

Basic Data	Name	Trafo 10/0,4 400 kVA	OK	
Description	Technology	Three Phase Transformer	Cancel	
Version	Rated Power	0,4 MVA		
Load Flow	Nominal Frequency	50, Hz		
Short-Circuit VDE/IEC	Rated Voltage		Vector Group	
Short-Circuit Complete	HV-Side	10, kV	HV-Side	D
Short-Circuit ANSI	LV-Side	0,4 kV	LV-Side	YN
Short-Circuit IEC 61363	Positive Sequence Impedance		Phase Shift	0, *30deg
Short-Circuit DC	Short-Circuit Voltage uk	4, %	Name	Dyn0
Simulation RMS	Copper Losses	0, kW		
Simulation EMT	Zero Sequence Impedance			
Protection	Short-Circuit Voltage uk0	3, %		
Power Quality/Harmonics	SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0, %		
Reliability				
Hosting Capacity Analysis				
Optimal Power Flow				

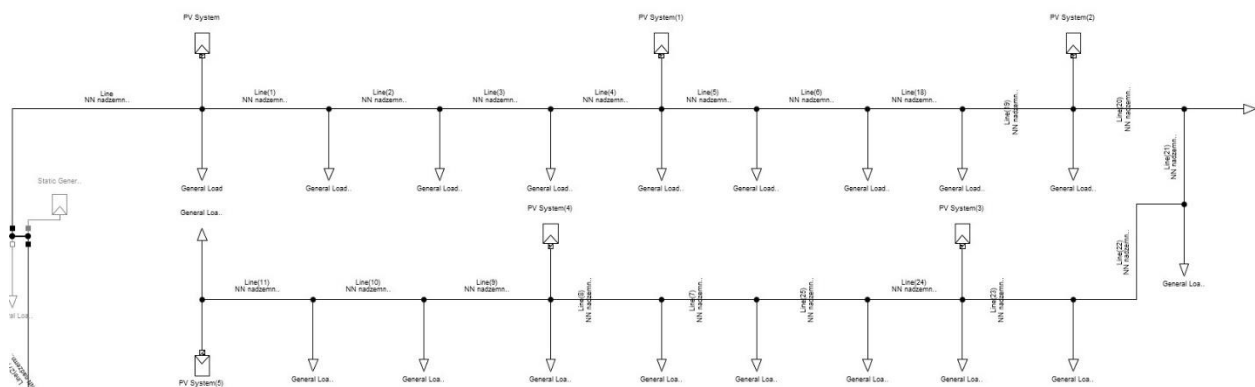
Slika 3.4. Podaci transformatora u DIgSILENTU

Prvi radijalni izvod niskonaponske distribucijske mreže povezan je s nadzemnim vodom ACSR 35 mm². U cijelom radijalnom izvodu korišten je isti vod, koji se koristi kao neizolirani nadzemni vod za prijenos i distribuciju električne energije. Aluminijsko čelično uže sastoji se od jedne ili više namotanih pocinčanih čeličnih žica u sredini te namotanih aluminijskih žica u vanjskom sloju. Neizolirani nadzemni vod ima malu težinu, veliku vodljivost te veliku otpornost na rastezanje čelika. Karakteristike spomenutog voda, koje su unesene u model voda su sljedeće: otpornost voda $R = 0,835 \text{ Ohm/km}$ i reaktancija voda $X = 0,3 \text{ Ohm/km}$, te su prikazane na slici 3.5. Duljina voda od transformatora 10/0,4 kV do prvog potrošača (kućanstva) u prvom radijalnom izvodu iznosi 10 metara te također duljina voda između preostalih potrošača iznosi 10 metara.



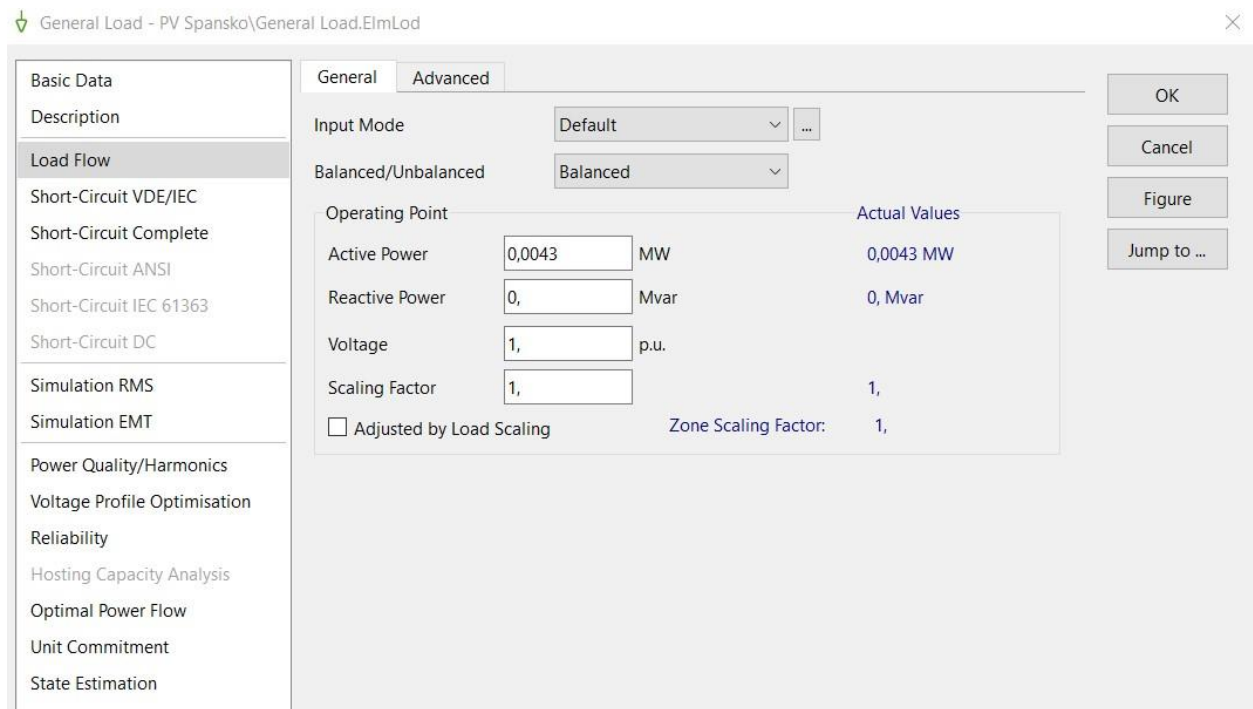
Slika 3.5. Podaci nadzemnog voda

Prvi radijalni izvod prikazan je na slici 3.6. Prvi radijalni izvod sastoji se od dvadeset potrošača, to jest kućanstava, dvadeset nadzemnih vodova prethodno spomenutih karakteristika te šest fotonaponskih sustava koje posjeduju šest potrošača odnosno kućanstava.



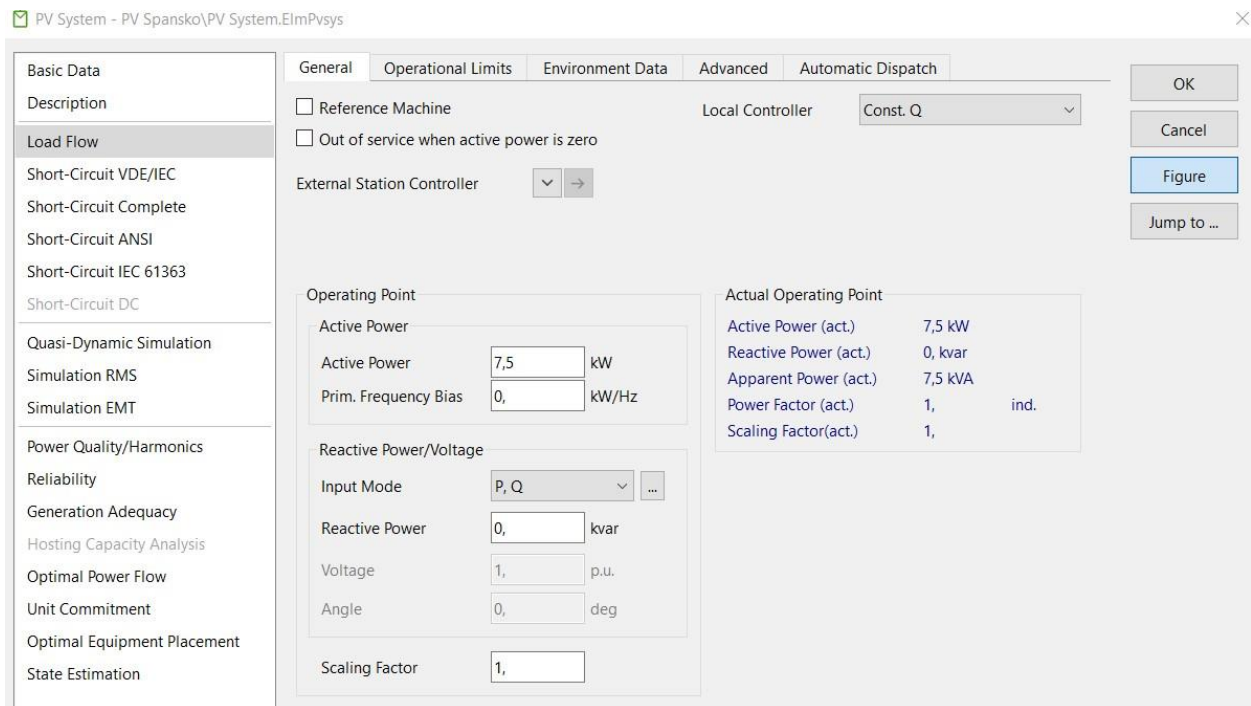
Slika 3.6. Prvi radijalni izvod

Karakteristike potrošača prikazane su na slici 3.7. Svih dvadeset potrošača imaju jednaku snagu potrošnje te ona iznosi $P = 4,3 \text{ kW}$. Radi jednostavnosti uzeto je da su svi potrošači imaju jednake karakteristike te su svi potrošači trofazni.



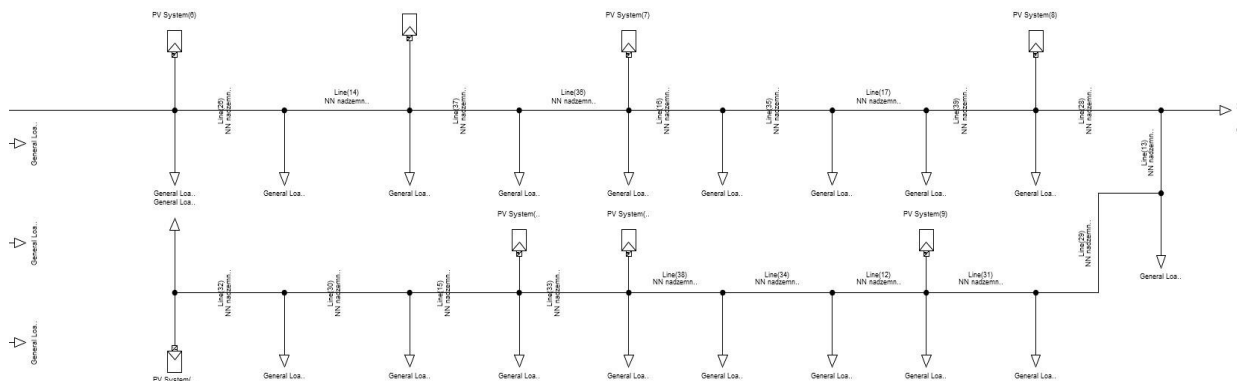
Slika 3.7. Podaci potrošača

U prvom radijalnom izvodu šest kućanstava posjeduje fotonaponske sustave. Na slici 3.8. prikazane su karakteristike fotonaponskih sustava koje su unesene u model. Nazivna prividna snaga fotonaponskih sustava iznosi 10 kVA, nazivni faktor snage iznosi 1.



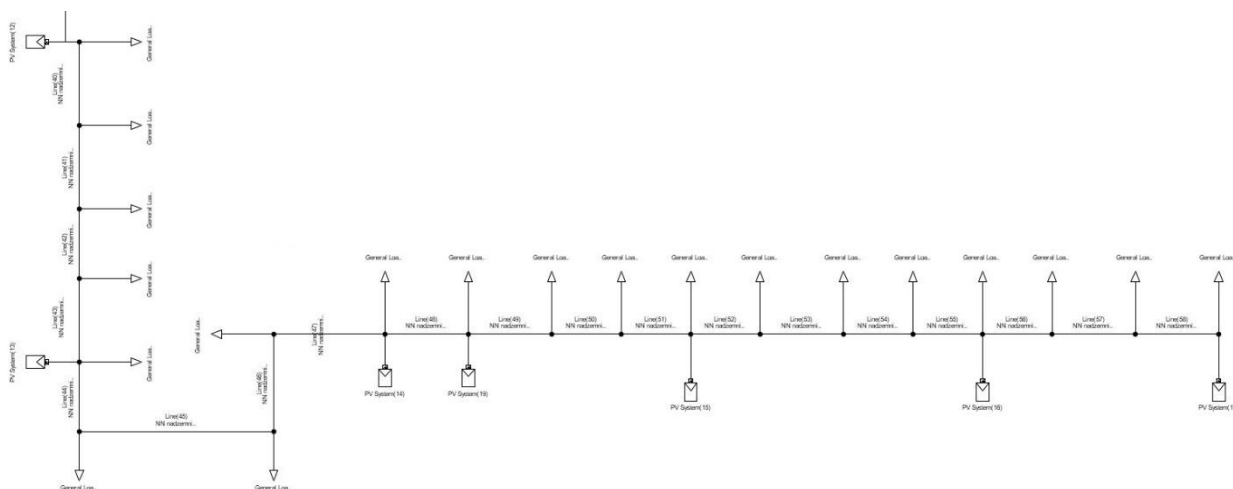
Slika 3.8. Podaci fotonaponskog sustava

Drugi radijalni izvod prikazan je na slici 3.9. Drugi radijalni izvod sastoji se od dvadeset potrošača, to jest kućanstava, dvadeset nadzemnih vodova prethodno spomenutih karakteristika, te osam fotonaponskih sustava koje posjeduju osam potrošača odnosno kućanstava. Drugi radijalni izvod niskonaponske distribucijske mreže povezan je također s nadzemnim vodom ACSR 35 mm² te je za cijeli radijalni izvod korišten isti neizolirani nadzemni vod. Karakteristike neizoliranog nadzemnog voda već su spomenute i prikazane na slici 3.5. Duljina voda od transformatora 10/0,4 kV do prvog potrošača (kućanstva) u drugom radijalnom izvodu iznosi 15 metara, dok je duljina voda između preostalih potrošača u drugom radijalnom izvodu 10 metara. Karakteristike potrošača prikazane su na slici 3.7. Svih dvadeset potrošača i u drugom radijalnom izvodu imaju jednaku snagu potrošnje te ona iznosi $P = 4,3 \text{ kW}$. Osam fotonaponskih sustava u drugom radijalnom izvodu imaju iste karakteristike kao i fotonaponski sustavi u prvom radijalnom izvodu te su te karakteristike prikazane na slici 3.8.



Slika 3.9. Drugi radijalni izvod

Treći radijalni izvod prikazan je na slici 3.10. Treći radijalni izvod sastoji se od dvadeset potrošača, to jest kućanstava, dvadeset nadzemnih vodova prethodno spomenutih karakteristika te sedam fotonaponskih sustava koje posjeduju sedam potrošača odnosno kućanstava. Treći radijalni izvod niskonaponske distribucijske mreže povezan je također s nadzemnim vodom ACSR 35 mm² te je za cijeli radijalni izvod korišten isti neizolirani nadzemni vod. Karakteristike neizoliranog nadzemnog voda već su spomenute i prikazane na slici 3.5. Duljina voda od transformatora 10/0,4 kV do prvog potrošača (kućanstva) u trećem radijalnom izvodu iznosi 20 metara, dok je duljina voda između preostalih potrošača u trećem radijalnom izvodu 10 metara. Karakteristike potrošača prikazane su na slici 3.7. Svih dvadeset potrošača i u trećem radijalnom izvodu imaju jednaku snagu potrošnje te ona iznosi $P = 4,3 \text{ kW}$. Sedam fotonaponskih sustava u trećem radijalnom izvodu imaju iste karakteristike kao i fotonaponski sustavi u prvom i drugom radijalnom izvodu te su te karakteristike prikazane na slici 3.8.



Slika 3.10. Treći radijalni izvod

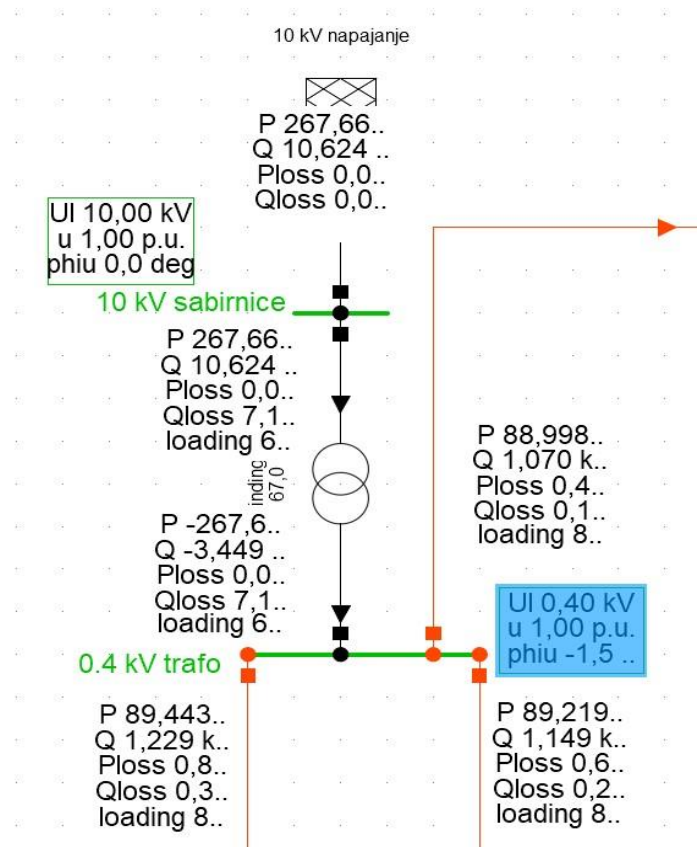
4. ANALIZA MREŽE

Nadalje u ovom poglavlju će se analizirati tokovi snaga i optimalne tokove snage koji za funkciju cilja imaju minimizaciju gubitaka. Da bi se došlo do tokova snaga te da bi ih se moglo analizirati, koristit će se prethodno opisani model u programu DIgSILENT PowerFactory. Prikazat će se nekoliko scenarija u kojima se može naći niskonaponska distribucijska mreža:

- Scenarij 1 - prikazat će se tokovi snaga kada je maksimalno opterećenje i fotonaponski sustavi nisu u funkciji,
- Scenarij 2 - prikazat će se tokovi snaga kada je maksimalno opterećenje i kada su fotonaponski sustavi u funkciji te rade sa 7,5 kW radne snage,
- Scenarij 3 - prikazat će se optimalni tokovi snaga kada je maksimalno opterećenje, fotonaponski sustavi daju 7,5 kW radne snage te se optimizira jalova snaga sa ciljem smanjenja gubitaka,
- Scenarij 4 - prikazat će se tokovi snaga kada je maksimalno opterećenje i fotonaponski sustavi daju 9,99 kW radne snage,
- Scenarij 5 - prikazat će se optimalni tokovi snaga kada je maksimalno opterećenje, fotonaponski sustavi daju 9,99 kW radne snage te se optimizira jalova snaga sa ciljem smanjenja gubitaka,

4.1. Scenarij 1

U prvom scenariju pretpostavlja se da fotonaponski sustavi nisu u funkciji i da je opterećenje maksimalno. U prvom scenariju pretpostavlja se da će svi potrošači raditi sa svojom maksimalnom snagom koja iznosi 4,3 kW, što ukupno iznosi 258 kW. Bez fotonaponskih sustava na pojedinim kućanstvima, sva kućanstva se napajaju samo iz vanjske 10 kV distribucijske mreže. Na slici 4.1. prikazani su tokovi snaga koje daje vanjska distribucijska mreža. Strelice na slici 4.1. prikazuju smjer radne i jalove snage.



Slika 4.1. Tokovi snaga vanjske distribucijske mreže u scenariju 1

Budući da se svi potrošači odnosno kućanstva napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, vanjska 10 kV distribucijska mreža daje 267,660 kW radne snage kako bi potrošnja bila zadovoljena. Vanjska 10 kV distribucijska mreža daje jalovu snagu od 10,624 kVAr-a. Prilikom transformacije naponske razine na transformatoru dolazi do gubitaka jalove snage od 7,175 kVAr-a jer su transformatori potrošači jalove snage. U niskonaponskoj distribucijskoj mreži s tri radijalna izvoda nema potrošača jalove snage, međutim u tri radijalna izvoda odlazi ukupno 3,449 kVAr-a koja se postepeno gube prilikom distribucije energije. U ovom slučaju opterećenje transformatora iznosi 67%.

Slika 4.2. prikazuje tokove snaga u prvom radijalnom izvodu kada je opterećenje maksimalno i kada fotonaponski sustavi na kućanstvima ne rade. Strelice na slici 4.2. prikazuju smjer radne i jalove snage.



Slika 4.2. Tokovi snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 1

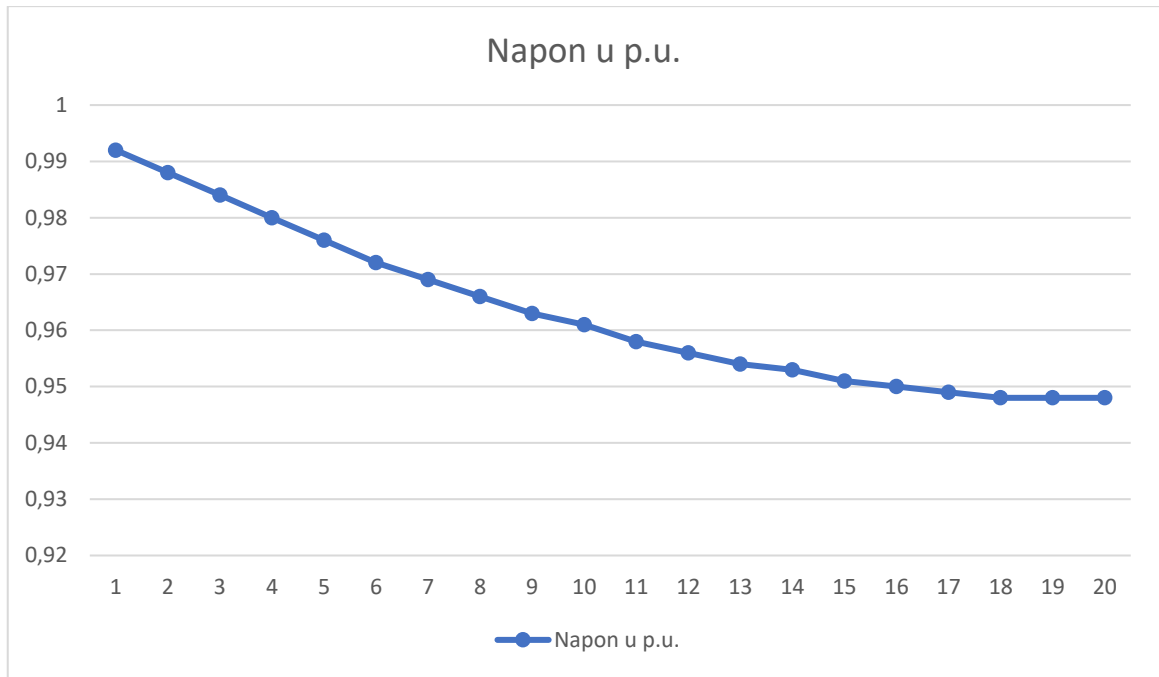
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na prvom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.1. Prikaz tokova snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 1

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	88,998 / 88.583	1,070 / 0,921	0,414	0,149
Snaga na 2. vodu	84,283 / 83.908	0,921 / 0,787	0,375	0,135
Snaga na 3. vodu	79,608 / 79,271	0,787 / 0,666	0,337	0,121
Snaga na 4. vodu	74,971 / 74,669	0,666 / 0,558	0,302	0,108
Snaga na 5. vodu	70,369 / 70,101	0,558 / 0,462	0,268	0,096
Snaga na 6. vodu	65,801 / 65,565	0,462 / 0,377	0,236	0,085
Snaga na 7. vodu	61,265 / 61,059	0,377 / 0,303	0,206	0,074
Snaga na 8. vodu	56,759 / 56,581	0,304 / 0,240	0,178	0,064
Snaga na 9. vodu	52,281 / 52,129	0,240 / 0,186	0,152	0,055
Snaga na 10. vodu	47,829 / 47,701	0,186 / 0,140	0,128	0,046
Snaga na 11. vodu	43,402 / 43,296	0,141 / 0,103	0,106	0,038
Snaga na 12. vodu	38,996 / 38,910	0,103 / 0,072	0,086	0,031
Snaga na 13. vodu	34,661 / 34,543	0,073 / 0,048	0,068	0,024
Snaga na 14. vodu	30,243 / 30,191	0,049 / 0,030	0,052	0,019

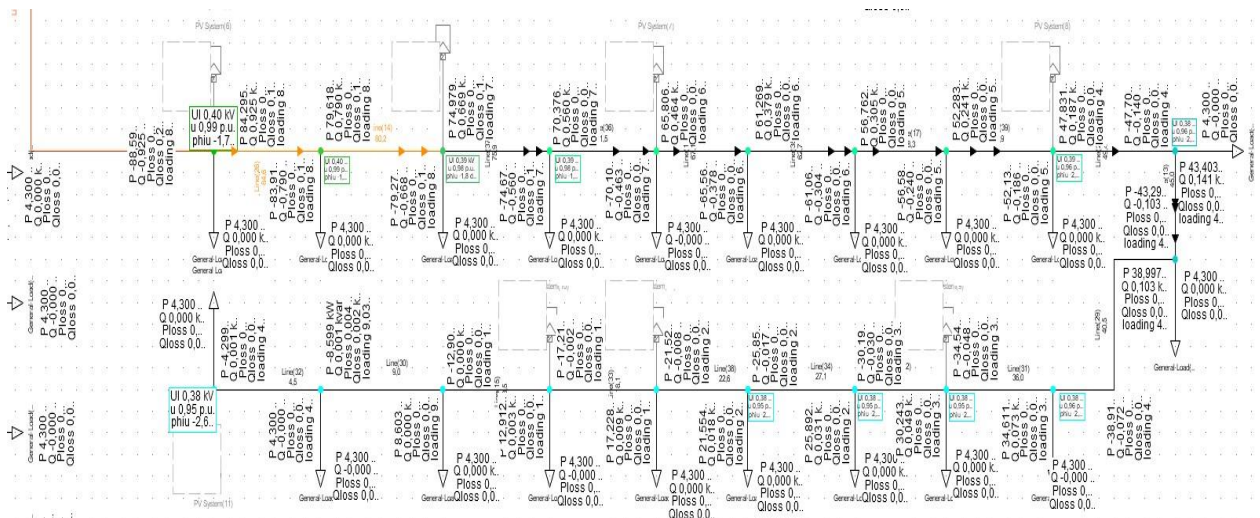
Snaga na 15. vodu	25,892 / 25,854	0,031 / 0,017	0,038	0,014
Snaga na 16. vodu	21,554 / 21,528	0,018 / 0,008	0,027	0,010
Snaga na 17. vodu	17,229 / 17,211	0,009 / 0,003	0,017	0,006
Snaga na 18. vodu	12,912 / 12,903	0,003 / 0	0,010	0,003
Snaga na 19. vodu	8,604 / 8,599	0,001 / 0,001	0,004	0,002
Snaga na 20. vodu	4,300 / 4,299	0,000 / 0,001	0,001	0
Σ			3,005	1,08

U tablici 4.1. prikazani su rezultati prve simulacije. Snaga koju vanjska distribucijska mreža 10 kV daje u prvi radijalni izvod iznosi 88,998 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,414 kW, stoga kad se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u prvi radijalni izvod dobije se 88,583 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Nakon što se oduzme snaga prvog potrošača koja iznosi 4,3 kW, dobije se snaga 84,283 kW koja je i ujedno snaga na početku drugog nadzemnog voda. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 1,070 kVAr, zbog gubitaka od 0,149 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,921 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Na slici 4.2. vidljivo je da prvi neizolirani nadzemni vod, koji povezuje trafostanicu 10/0,4 kV i prvo kućanstvo u prvom radijalno izvodu, crvene boje. Prvi neizolirani nadzemni vod je opterećen 88,7% te je zbog toga crvene boje. Budući da putem prvog nadzemnog voda prolazi sva snaga koja opskrbljuje sve potrošače (kućanstva), dolazi do toga da je prvi vod najopterećeniji. Drugi neizolirani nadzemni vod je žute boje te je on opterećen 84,4%, treći vod je 80% opterećen te je također žute boje, dok je četvrti nadzemni vod opterećen manje od 80% te je to prihvatljivo. Na slici 4.2. je vidljivo da su neke sabirnice zelene, a neke plave. Zelene sabirnice predstavljaju normalnu odnosno zadanu razinu napona sabirnica, plavom bojom su označene sabirnice nižeg napona od podešenog, dok crvenom bojom su označene sabirnice većeg napona od podešenog. Na sabirnicama dolazi do pada napona s povećanjem udaljenosti. Napon na prvoj sabirnici iznosi 400 V (0,99 p.u.) te se s udaljenosti smanjuje. Napon na četvrtom potrošaču već pada na 390 V (0,98 p.u.), napon na jedanaestom potrošaču iznosi 380 V (0,96 p.u.), napon na četrnaestom potrošaču pada na 0,95 p.u. te na kraju radijalnog izvoda pada ispod 0,95 p.u. Ukupni gubici radne snage u prvom radijalnom izvodu iznose 3,005 kW, dok gubici jalove snage iznose 1,08 kVAr-a.



Grafikon 4.1. Vrijednosti napona prvog radijalnog izvoda u scenariju 1

Slika 4.3. prikazuje tokove snaga u drugom radijalnom izvodu kada je opterećenje maksimalno i kada fotonaponski sustavi na kućanstvima ne rade. Strelice na slici 4.3. prikazuju smjer radne i jalove snage.



Slika 4.3. Tokovi snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 1

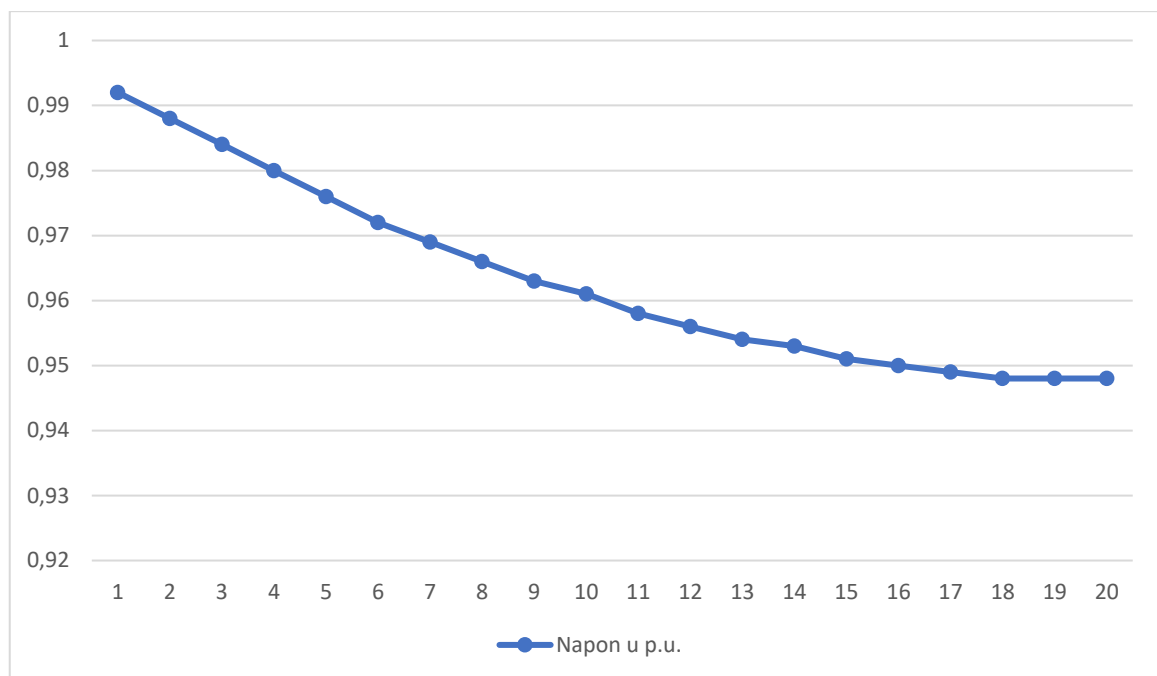
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na drugom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.2. Prikaz tokova snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 1

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	89,219 / 88,595	1,149 / 0,925	0,624	0,224
Snaga na 2. vodu	84,295 / 83,918	0,925 / 0,790	0,377	0,135
Snaga na 3. vodu	79,618 / 79,279	0,790 / 0,668	0,339	0,122
Snaga na 4. vodu	74,979 / 74,676	0,669 / 0,560	0,303	0,109
Snaga na 5. vodu	70,376 / 70,106	0,560 / 0,463	0,269	0,097
Snaga na 6. vodu	65,806 / 65,569	0,464 / 0,378	0,237	0,085
Snaga na 7. vodu	61,269 / 61,062	0,379 / 0,304	0,207	0,074
Snaga na 8. vodu	56,762 / 56,583	0,305 / 0,240	0,179	0,064
Snaga na 9. vodu	52,283 / 52,131	0,241 / 0,186	0,153	0,055
Snaga na 10. vodu	47,831 / 47,702	0,187 / 0,140	0,129	0,046
Snaga na 11. vodu	43,403 / 43,296	0,141 / 0,103	0,107	0,038
Snaga na 12. vodu	38,997 / 38,910	0,103 / 0,072	0,086	0,031
Snaga na 13. vodu	34,611 / 34,543	0,073 / 0,048	0,068	0,025
Snaga na 14. vodu	30,243 / 30,191	0,049 / 0,030	0,052	0,019
Snaga na 15. vodu	25,892 / 25,853	0,031 / 0,017	0,039	0,014
Snaga na 16. vodu	21,554 / 21,527	0,018 / 0,008	0,027	0,010
Snaga na 17. vodu	17,228 / 17,211	0,009 / 0,002	0,017	0,006
Snaga na 18. vodu	12,912 / 12,902	0,003 / 0	0,010	0,003
Snaga na 19. vodu	8,603 / 8,599	0,001 / 0,001	0,004	0,002
Snaga na 20. vodu	4,300 / 4,299	0,000 / 0,001	0,001	0
Σ			3,228	1,159

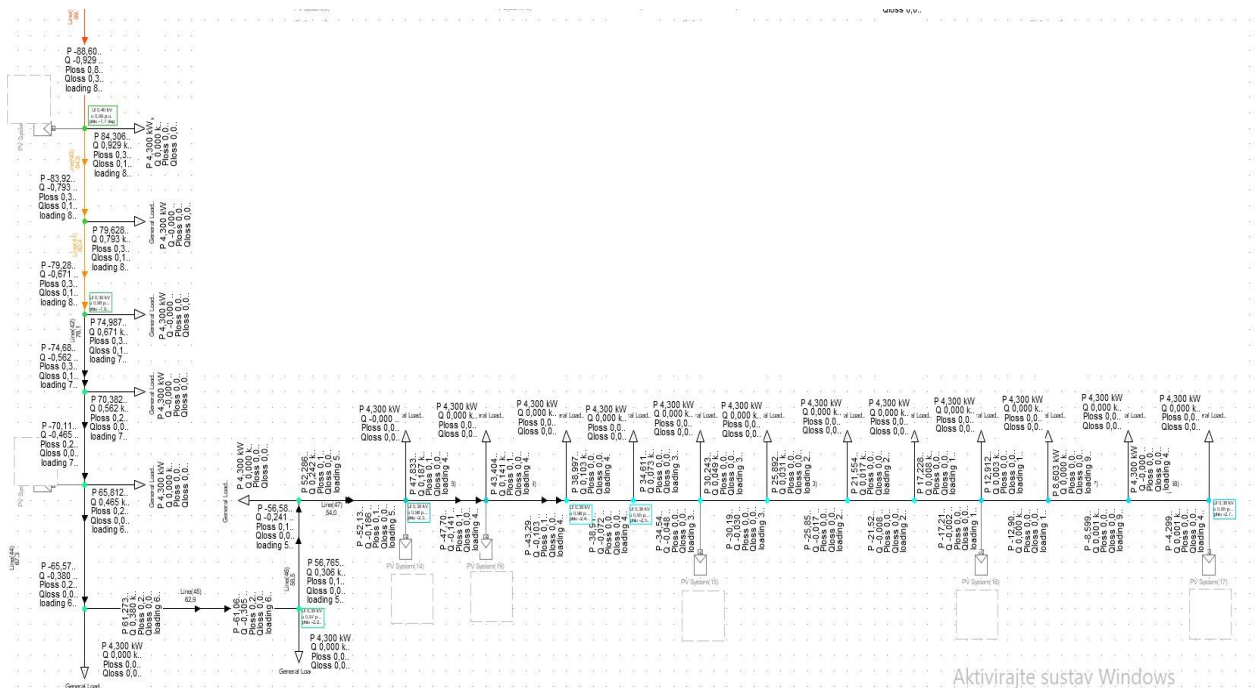
U tablici 4.2. prikazani su rezultati prve simulacije za drugi radijalni izvod. Snaga koju vanjska distribucijska mreža 10 kV daje u drugi radijalni izvod iznosi 89,219 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,624 kW, stoga kad se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u drugi radijalni izvod dobije se

88,595 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Nakon što se oduzme snaga prvog potrošača koja iznosi 4,3 kW, dobije se snaga 84,295 kW koja je i ujedno snaga na početku drugog nadzemnog voda. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 1,149 kVAr, zbog gubitaka od 0,224 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,925 kVAr. Na slici 4.3. vidljivo je da prvi neizolirani nadzemni vod, koji povezuje trafostanicu 10/0,4 kV i prvo kućanstvo u drugom radijalno izvodu, kao i u prvom radijalnom izvodu, crvene boje. Prvi neizolirani nadzemni vod je opterećen 88,9% te je zbog toga crvene boje. Budući da putem prvog nadzemnog voda prolazi sva snaga koja opskrbljuje sve potrošače (kućanstva), dolazi do toga da je prvi vod najopterećeniji. Drugi neizolirani nadzemni vod je žute boje te je on opterećen 84,6%, treći vod je opterećen 80,2% te je također žute boje, dok je četvrti nadzemni vod opterećen manje od 80% te je to prihvatljivo. Kao i u prvom radijalnom izvodu, na početku izvoda nalaze se zelene sabirnice, dok su na kraju plave sabirnice. Na sabirnicama dolazi do pada napona s povećanjem udaljenosti. Napon na prvoj sabirnici iznosi 400 V (0,99 p.u.) te se s udaljenosti smanjuje. Napon na trećem potrošaču već pada na 390 V (0,98 p.u.), napon na desetom potrošaču iznosi 380 V (0,96 p.u.), napon na trinaestom potrošaču pada na 0,95 p.u. te na kraju radijalnog izvoda pada ispod 0,95 p.u. Ukupni gubici radne snage u drugom radijalnom izvodu iznose 3,228 kW, dok gubici jalove snage iznose 1,159 kVAr-a.



Grafikon 4.2. Vrijednosti napona drugog radijalnog izvoda u scenariju 1

Slika 4.4. prikazuje tokove snaga u trećem radijalnom izvodu kada je opterećenje maksimalno i kada fotonaponski sustavi na kućanstvima ne rade. Strelice na slici 4.4. prikazuju smjer radne i jalove snage.



Slika 4.4. Tokovi snaga trećeg radijalnog izvoda

Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na trećem radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasniti će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

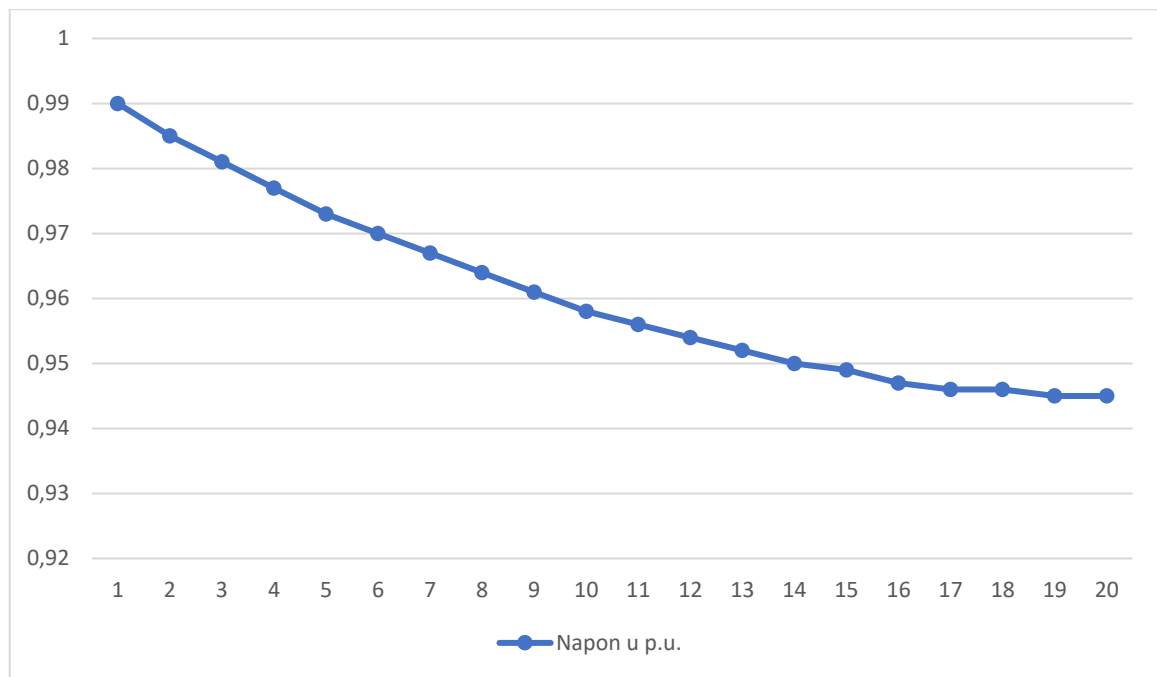
Tablica 4.3. Prikaz tokova snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 1

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	89,443 / 88,607	1,229 / 0,929	0,837	0,300
Snaga na 2. vodu	84,306 / 83,928	0,929 / 0,793	0,379	0,136
Snaga na 3. vodu	79,628 / 79,287	0,793 / 0,671	0,341	0,122
Snaga na 4. vodu	74,987 / 74,682	0,671 / 0,562	0,305	0,110
Snaga na 5. vodu	70,382 / 70,111	0,562 / 0,465	0,271	0,097
Snaga na 6. vodu	65,812 / 65,573	0,465 / 0,380	0,239	0,086
Snaga na 7. vodu	61,273 / 61,065	0,380 / 0,305	0,208	0,075

Snaga na 8. vodu	56,765 / 56,585	0,306 / 0,241	0,180	0,065
Snaga na 9. vodu	52,286 / 52,132	0,242 / 0,186	0,154	0,055
Snaga na 10. vodu	47,833 / 47,703	0,187 / 0,141	0,129	0,046
Snaga na 11. vodu	43,404 / 43,297	0,141 / 0,103	0,107	0,038
Snaga na 12. vodu	38,997 / 38,910	0,103 / 0,072	0,087	0,031
Snaga na 13. vodu	34,611 / 34,543	0,073 / 0,048	0,069	0,025
Snaga na 14. vodu	30,243 / 30,191	0,049 / 0,030	0,053	0,019
Snaga na 15. vodu	25,892 / 25,853	0,031 / 0,017	0,039	0,014
Snaga na 16. vodu	21,554 / 21,527	0,017 / 0,008	0,027	0,010
Snaga na 17. vodu	17,228 / 17,211	0,009 / 0,002	0,017	0,006
Snaga na 18. vodu	12,912 / 12,902	0,003 / 0	0,010	0,003
Snaga na 19. vodu	8,603 / 8,599	0,000 / 0,001	0,004	0,002
Snaga na 20. vodu	4,300 / 4,299	0,000 / 0,001	0,001	0
Σ			3,457	1,24

U tablici 4.3. prikazani su rezultati prve simulacije za treći radijalni izvod. Snaga koju vanjska distribucijska mreža 10 kV daje u treći radijalni izvod iznosi 89,443 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,837 kW, stoga kad se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u treći radijalni izvod dobije se 88,607 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Nakon što se oduzme snaga prvog potrošača koja iznosi 4,3 kW, dobije se snaga 84,306 kW koja je i ujedno snaga na početku drugog nadzemnog voda. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 1,229 kVAr, zbog gubitaka od 0,300 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,929 kVAr. Na slici 4.4. vidljivo je da prvi neizolirani nadzemni vod, koji povezuje trafostanicu 10/0,4 kV i prvo kućanstvo u trećem radijalno izvodu, kao u prvom i drugom radijalnom izvodu, crvene boje. Prvi neizolirani nadzemni vod je opterećen 89,1% te je zbog toga crvene boje. Budući da putem prvog nadzemnog voda prolazi sva snaga koja opskrbljuje sve potrošače (kućanstva), dolazi do toga da je prvi vod najopterećeniji. Drugi neizolirani nadzemni vod je žute boje te je on opterećen 84,8%, treći vod je opterećen 80,4% te je također žute boje, dok je četvrti nadzemni vod opterećen manje od 80% te je to prihvatljivo. Kao u prvom i drugom radijalnom izvodu, na početku izvoda nalaze se zelene sabirnice, dok su na kraju plave sabirnice. Na sabirnicama dolazi do pada napona s povećanjem udaljenosti. Napon na prvoj sabirnici iznosi 400 V (0,99 p.u.) te se s udaljenosti smanjuje. Napon na trećem potrošaču već pada na 390 V (0,98 p.u.), napon na devetom potrošaču

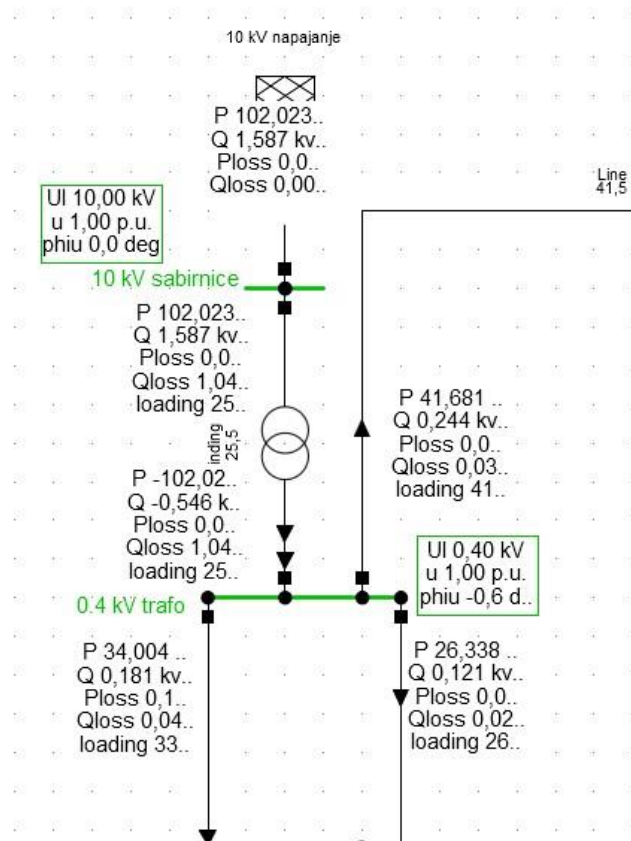
iznosi 380 V (0,96 p.u.), napon na dvanaestom potrošaču pada na 0,95 p.u. te na kraju radijalnog izvoda pada ispod 0,95 p.u. Ukupni gubici radne snage u trećem radijalnom izvodu iznose 3,457 kW, dok gubici jalove snage iznose 1,24 kVAr-a.



Grafikon 4.3. Vrijednosti napona trećeg radijalnog izvoda

4.2. Scenarij 2

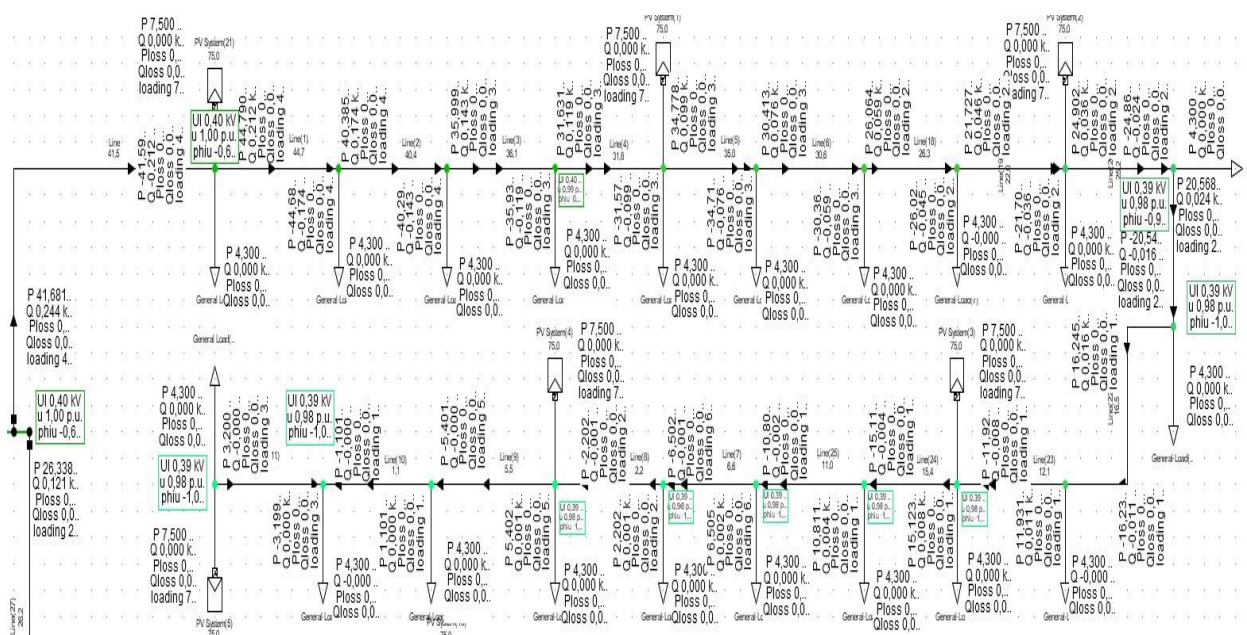
U drugom scenariju pretpostavlja se da je dan te da ima sunčeve energije. Budući da ima sunčeve energije svi fotonaponski sustavi su u funkciji. Kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično pomoću fotonaponskih sustava koje se nalaze na pojedinim kućanstvima. U drugom scenariju pretpostavlja se da će svi potrošači raditi sa svojom maksimalnom snagom koja iznosi 4,3 kW te će fotonaponski sustavi proizvoditi 7,5 kW i biti opterećeni 75%. Na slici 4.5. Prikazani su tokovi snaga koje daje vanjska distribucijska mreža. Strelice na slici 4.5. prikazuju smjer radne i jalove snage.



Slika 4.5. Tokovi snaga vanjske distribucijske mreže u scenariju 2

Budući da se potrošači to jest kućanstva djelomično napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, vanjska 10 kV distribucijska mreža daje 102,023 kW radne snage kako bi potrošnja bila zadovoljena. Vanjska distribucijska mreža daje jalovu snagu od 1,587 kVAr-a. Prilikom transformacije naponske razine na transformatoru dolazi do gubitaka jalove snage od 1,041 kVAr-a jer su transformatori potrošači jalove snage. Niti u ovom slučaju u niskonaponskoj distribucijskoj mreži s tri radijalna izvoda nema potrošača jalove snage, međutim u tri radijalna izvoda odlazi ukupno 0,546 kVAr-a koja se postepeno gube prilikom distribucije energije. U ovom slučaju opterećenje transformatora iznosi 25,5%.

Slika 4.5. prikazuje tokove snaga u prvom radijalnom izvodu kada je dan te svih šest fotonaponskih sustava su u funkciji i rade s 75% opterećenosti. Strelice na slici 4.6. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.6. Tokovi snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 2

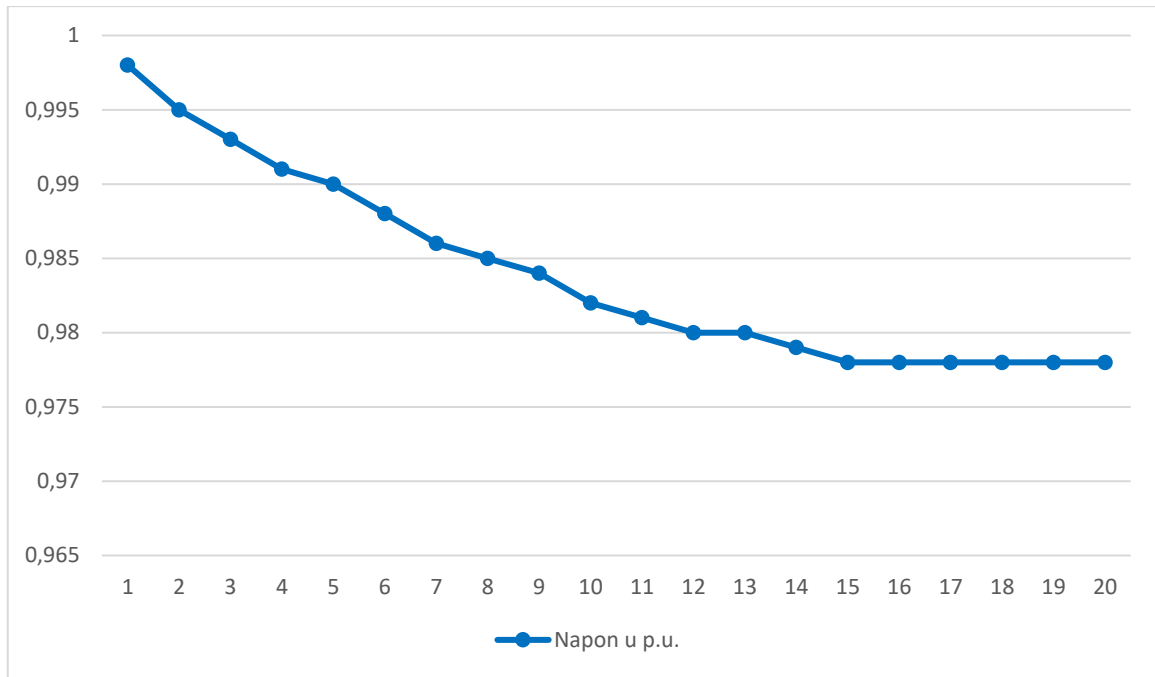
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na prvom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.4. Prikaz tokova snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 2

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	41,681 / 41,590	0,244 / 0,212	0,091	0,033
Snaga na 2. vodu	44,790 / 44,685	0,212 / 0,174	0,105	0,038
Snaga na 3. vodu	40,385 / 40,299	0,174 / 0,143	0,086	0,031
Snaga na 4. vodu	35,999 / 35,931	0,143 / 0,119	0,069	0,025
Snaga na 5. vodu	31,631 / 31,578	0,119 / 0,099	0,053	0,019
Snaga na 6. vodu	34,778 / 34,713	0,099 / 0,076	0,064	0,023
Snaga na 7. vodu	30,413 / 30,364	0,076 / 0,059	0,049	0,018
Snaga na 8. vodu	26,064 / 26,027	0,059 / 0,045	0,036	0,013
Snaga na 9. vodu	21,727 / 21,702	0,046 / 0,036	0,025	0,009
Snaga na 10. vodu	24,902 / 24,868	0,036 / 0,024	0,033	0,012
Snaga na 11. vodu	20,568 / 20,545	0,024 / 0,016	0,023	0,008

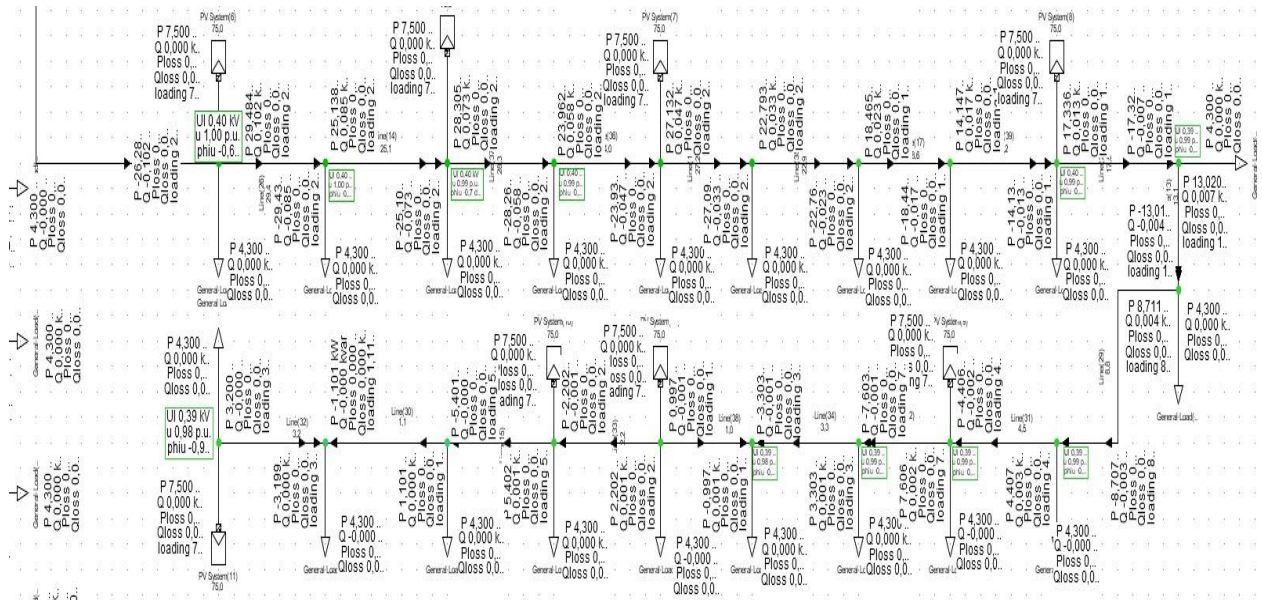
Snaga na 12. vodu	16,245 / 16,231	0,016 / 0,011	0,014	0,005
Snaga na 13. vodu	11,931 / 11,923	0,011 / 0,008	0,008	0,003
Snaga na 14. vodu	15,123 / 15,111	0,008 / 0,004	0,012	0,004
Snaga na 15. vodu	10,811 / 10,805	0,004 / 0,002	0,006	0,002
Snaga na 16. vodu	6,505 / 6,502	0,002 / 0,001	0,002	0,001
Snaga na 17. vodu	2,202 / 2,202	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 18. vodu	5,402 / 5,401	0,001 / 0	0,002	0,001
Snaga na 19. vodu	1,101 / 1,101	0 / 0	0	0
Snaga na 20. vodu	3,199 / 3,200	0 / 0	0,001	0
Σ			0,679	0,245

U tablici 4.4. prikazani su rezultati druge simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u prvi radijalni izvod iznosi 41,681 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,091 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u prvi radijalni izvod dobije se 41,590 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 7,5 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 3,2 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 3,2 kW radne snage na 41,590 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 44,790 kW radne snage koja je ujedno i snage na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U prvom radijalnom izvodu nalazi se šest fotonaponskih sustava te svih šest daje 7,5 kW radne snage, što je ukupno 45 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,244 kVAr, zbog gubitaka od 0,033 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,212 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i šest fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te najveće opterećenje izmjereno je na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 44,7%. U ovom slučaju sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,978 p.u. (380 V). Ukupni gubici radne snage u prvom radijalnom izvodu iznose 0,679 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,245 kVAr-a.



Grafikon 4.4. Vrijednosti napona prvog radijalnog izvoda u scenariju 2

Slika 4.7. prikazuje tokove snaga u drugom radijalnom izvodu kada je dan te svih osam fotonaponskih sustava su u funkciji i rade s 75% opterećenosti. Strelice na slici 4.7. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.7. Tokovi snaga drugog radijalnog izvoda

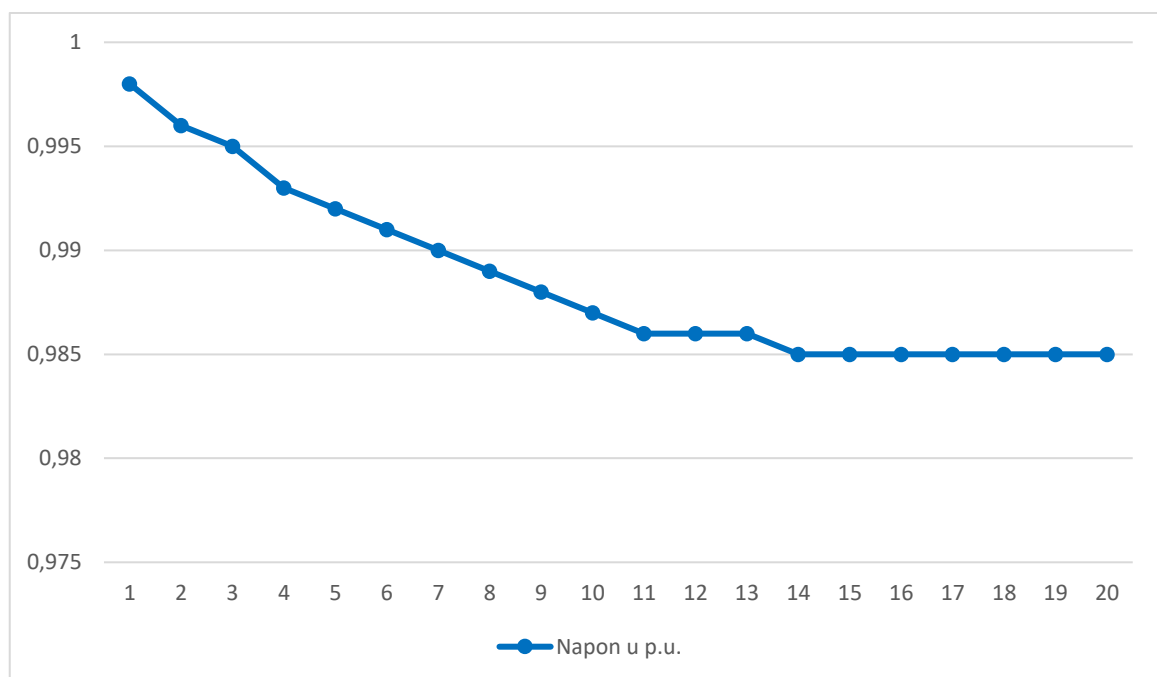
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na drugom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.5. Prikaz tokova snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 2

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	26,338 / 26,284	0,121 / 0,102	0,054	0,020
Snaga na 2. vodu	29,484 / 29,438	0,102 / 0,085	0,046	0,016
Snaga na 3. vodu	25,138 / 25,105	0,085 / 0,073	0,033	0,012
Snaga na 4. vodu	28,305 / 28,262	0,073 / 0,058	0,042	0,015
Snaga na 5. vodu	23,962 / 23,932	0,058 / 0,047	0,030	0,011
Snaga na 6. vodu	27,132 / 27,093	0,047 / 0,033	0,039	0,014
Snaga na 7. vodu	22,793 / 22,765	0,033 / 0,023	0,028	0,010
Snaga na 8. vodu	18,465 / 18,447	0,023 / 0,017	0,018	0,007
Snaga na 9. vodu	14,147 / 14,137	0,017 / 0,013	0,011	0,004
Snaga na 10. vodu	17,336 / 17,320	0,013 / 0,007	0,016	0,006
Snaga na 11. vodu	13,020 / 13,011	0,007 / 0,004	0,009	0,003
Snaga na 12. vodu	8,711 / 8,707	0,004 / 0,003	0,004	0,001
Snaga na 13. vodu	4,407 / 4,406	0,003 / 0,002	0,001	0
Snaga na 14. vodu	7,606 / 7,603	0,002 / 0,001	0,003	0,001
Snaga na 15. vodu	3,303 / 3,303	0,001 / 0,001	0,001	0
Snaga na 16. vodu	0,997 / 0,997	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 17. vodu	2,202 / 2,202	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 18. vodu	5,402 / 5,401	0,001 / 0	0,002	0,001
Snaga na 19. vodu	1,101 / 1,101	0 / 0	0	0
Snaga na 20. vodu	3,199 / 3,200	0 / 0	0,001	0
Σ			0,338	0,121

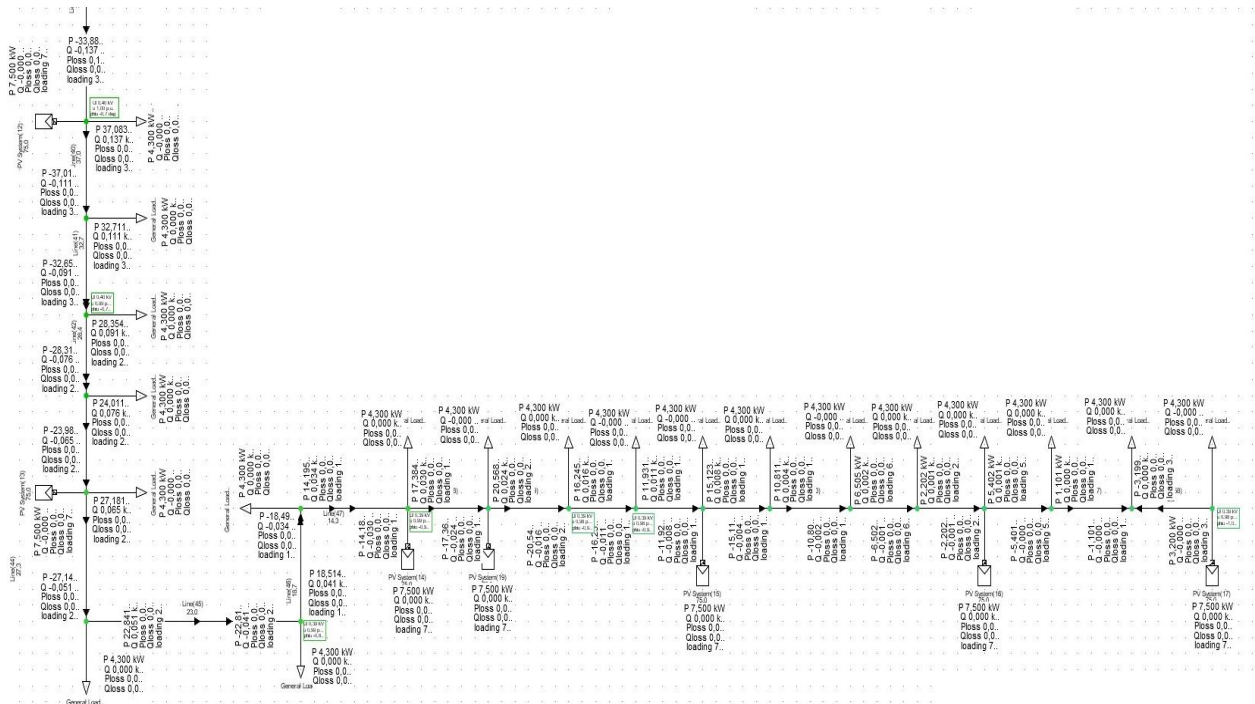
U tablici 4.4. prikazani su rezultati druge simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u drugi radijalni izvod iznosi 26,338 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,054 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u drugi radijalni izvod dobije se 26,284 kW te se

ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 7,5 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 3,2 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 3,2 kW radne snage na 26,284 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 29,484 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U drugom radijalnom izvodu nalazi se osam fotonaponskih sustava te svih osam daje 7,5 kW radne snage, što je ukupno 60 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,121 kVAr, zbog gubitaka od 0,020 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,102 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i osam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje izmjereno kao i kod prvog radijalnog izvoda, na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 29,4%. U ovom slučaju sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,985 p.u. (390 V). Ukupni gubici radne snage u drugom radijalnom izvodu iznose 0,338 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,121 kVAr-a.



Grafikon 4.4. Vrijednosti napona drugog radijalnog izvoda u scenariju 2

Slika 4.8. prikazuje tokove snaga u trećem radijalnom izvodu kada je dan te svih sedam fotonaponskih sustava su u funkciji i rade s 75% opterećenosti. Strelice na slici 4.8. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.8. Tokovi snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 2

Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na trećem radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

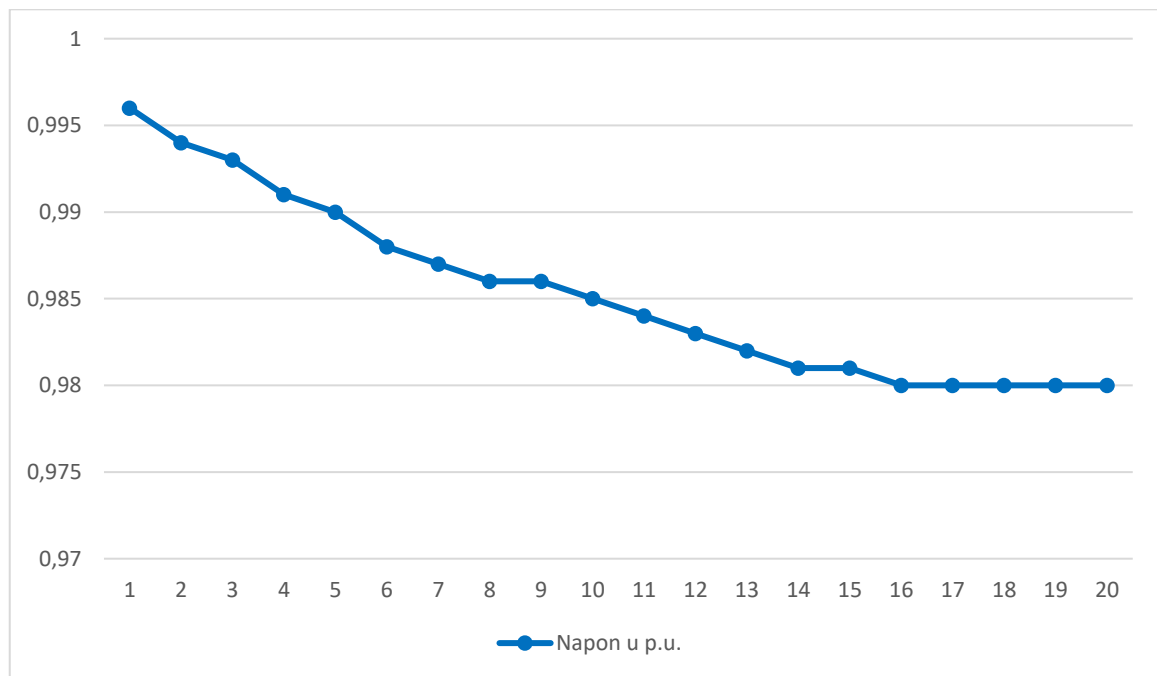
Tablica 4.6. Prikaz tokova snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 2

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	34,004 / 33,883	0,181 / 0,137	0,121	0,043
Snaga na 2. vodu	37,083 / 37,011	0,137 / 0,111	0,072	0,026
Snaga na 3. vodu	32,711 / 32,654	0,111 / 0,091	0,056	0,020
Snaga na 4. vodu	28,354 / 28,311	0,091 / 0,076	0,043	0,015
Snaga na 5. vodu	24,011 / 23,981	0,076 / 0,065	0,031	0,011

Snaga na 6. vodu	27,181 / 27,141	0,065 / 0,051	0,039	0,014
Snaga na 7. vodu	22,841 / 22,814	0,051 / 0,041	0,028	0,010
Snaga na 8. vodu	18,514 / 18,495	0,041 / 0,034	0,018	0,007
Snaga na 9. vodu	14,195 / 14,184	0,034 / 0,030	0,011	0,004
Snaga na 10. vodu	17,384 / 17,368	0,030 / 0,024	0,016	0,006
Snaga na 11. vodu	20,568 / 20,545	0,024 / 0,016	0,023	0,008
Snaga na 12. vodu	16,245 / 16,231	0,016 / 0,011	0,014	0,005
Snaga na 13. vodu	11,931 / 11,923	0,011 / 0,008	0,008	0,003
Snaga na 14. vodu	15,123 / 15,111	0,008 / 0,004	0,012	0,004
Snaga na 15. vodu	10,811 / 10,805	0,004 / 0,002	0,006	0,002
Snaga na 16. vodu	6,505 / 6,502	0,002 / 0,001	0,002	0,001
Snaga na 17. vodu	2,202 / 2,202	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 18. vodu	5,402 / 5,401	0,001 / 0	0,002	0,001
Snaga na 19. vodu	1,101 / 1,101	0 / 0	0	0
Snaga na 20. vodu	3,199 / 3,200	0 / 0	0,001	0
Σ			0,503	0,18

U tablici 4.4. prikazani su rezultati druge simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u treći radijalni izvod iznosi 34,004 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,121 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u treći radijalni izvod dobije se 33,883 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 7,5 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 3,2 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 3,2 kW radne snage na 33,883 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 37,083 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U trećem radijalnom izvodu nalazi se sedam fotonaponskih sustava te svih sedam daje 7,5 kW radne snage, što je ukupno 52,5 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,181 kVAr, zbog gubitaka od 0,043 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,137 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i sedam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje kao u prvom i drugom radijalnom

izvodu, izmjereno je na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 37%. U trećem radijalnom izvodu su kao u prvom i drugom sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,98 p.u. (390 V). Ukupni gubici radne snage u trećem radijalnom izvodu iznose 0,503 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,18 kVAr-a.

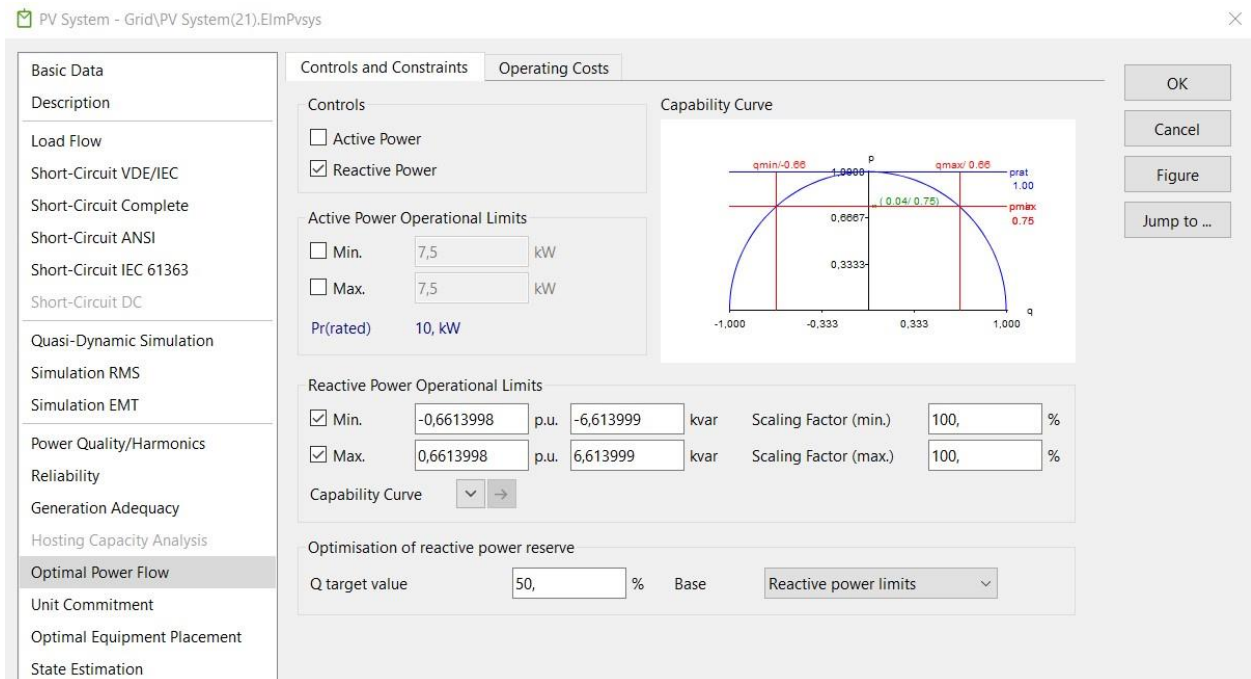


Grafikon 4.5. Vrijednosti napona trećeg radijalnog izvoda u scenariju 2

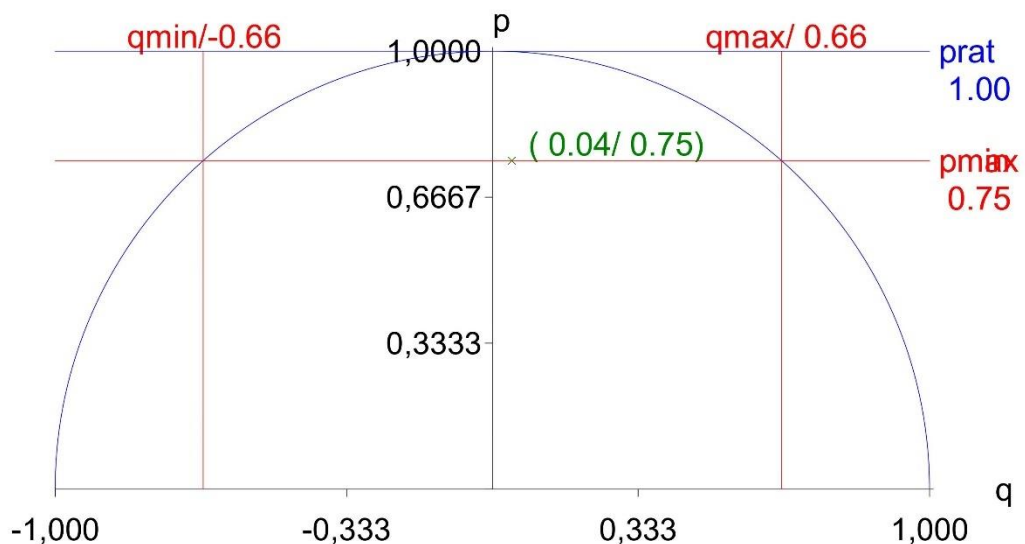
4.3. Scenarij 3

U trećem scenariju kao i u drugom pretpostavlja se da je dan, da ima sunčeve energije i da su svi fotonaponski sustavi su u funkciji. Kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično pomoću fotonaponskih sustava koje se nalaze na pojedinim kućanstvima. Također i u trećem scenariju pretpostavlja se da će svi potrošači raditi sa svojom maksimalnom snagom koja iznosi 4,3 kW, dok će se jalova snaga koju daju fotonaponski sustavi razlikovati, a radna snaga fotonaponskih sustava će ostati 7,5 kW. U ovom scenariju koristiti će se modul optimalnih tokova snaga u programu DIgSILENT PowerFactory te će u modulu optimalnih tokova snaga biti omogućeno da upravlja jalovom snagom fotonaponskih sustava. Pomoću modula optimalnih tokova snaga dobiti će se najbolje moguće vrijednosti snaga fotonaponskih sustava, kako bi distribucijska mreža imala što manje gubitke. U modelu fotonaponskog sustava pod karticom *optimal power flow*, prikazanoj na slici 4.9., dopušta se kontrola jalove snage fotonaponskog sustava. Nadalje, potrebno je definirati i granice jalove snage, minimalna jalova snaga iznosi -6,614 kVAr-a, dok maksimalna jalova snaga iznosi 6,614 kVAr-

a. nakon što su unesene minimalne i maksimalne snage dobije se PQ krivulja izmjenjivača koja je prikazana na slici 4.10.



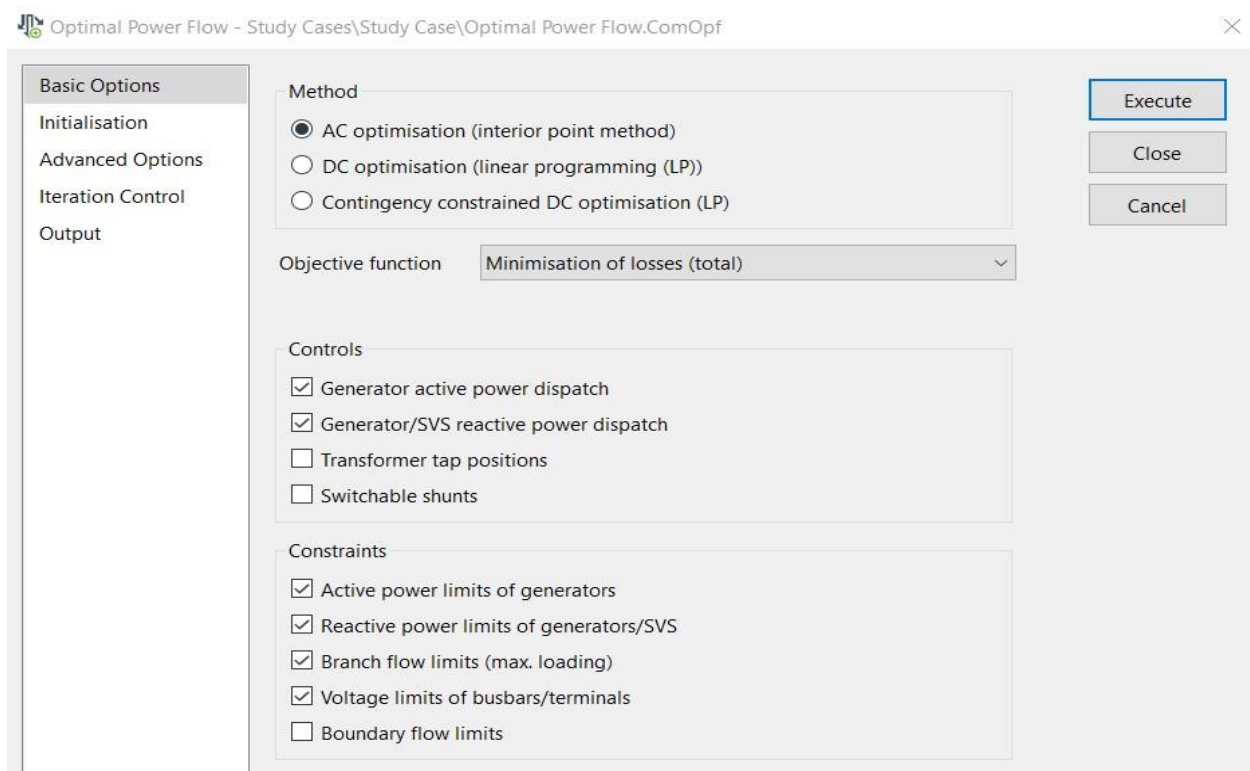
Slika 4.9. Kartica optimalnih tokova snaga u scenariju 3



Slika 4.10. PQ krivulja u scenariju 3

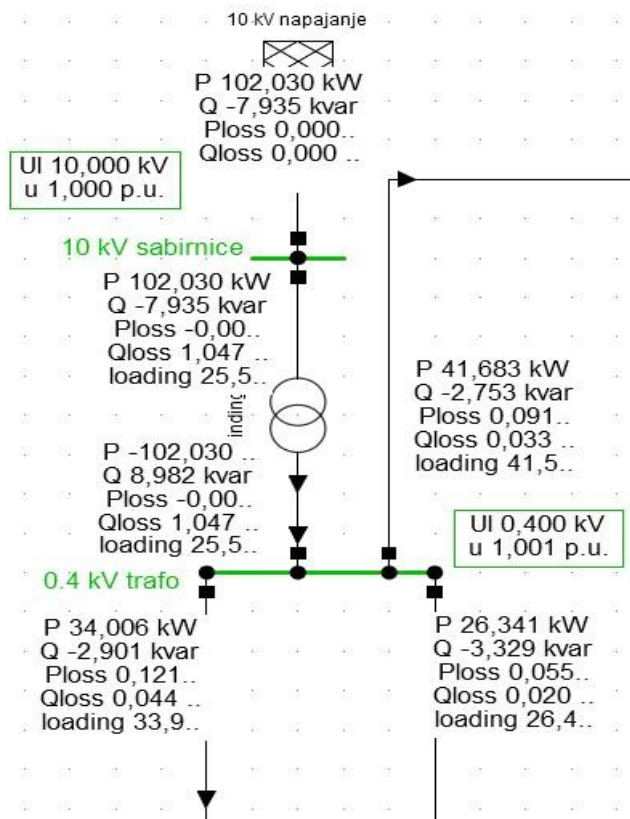
Created with Digsilent PowerFactory Thesis Licence

Na slici 4.10. zeleno označeno je optimalna radna točka kojom će izmjenjivači raditi i ona iznosi $q= 0,04$ p.u., $p= 0,75$ p.u. Svi fotonaponski sustavi imaju iste granice i istu PQ krivulju. Na slici 4.11. prikazana je kartica nakon pokretanja optimalnih tokova snaga. Prilikom pokretanja moguće je odabrati tri metode, u ovom slučaju odabrana je metoda optimizacije izmjenične struje. Funkcije cilja koje optimalni tokovi snaga omogućavaju su minimizacija gubitaka (ukupnih), minimizacija gubitaka (odabranih), minimizacija troškova, minimizacija rasterećenjem, maksimiziranje rezerve jalove snage, minimizacija varijabilnih odstupanja regulacije. U ovom slučaju odabrana je minimizacija ukupnih gubitaka. Varijable koje su omogućene da program kontrolira su radna snaga generatora i jalova snaga generatora. Program omogućuje kontrolu preklopke transformatora i kontrolu kompenzacijskih uređaja, međutim u ovom slučaju oni se ne koriste. Ograničenja koja su postavljena prilikom pokretanja optimalnih tokova snaga su: granice radnih snaga generatora, granice jalovih snaga generatora, granice opterećenja distribucijskog voda i granice napona sabirnica.



Slika 4.11. Opcije optimalnih tokova snaga

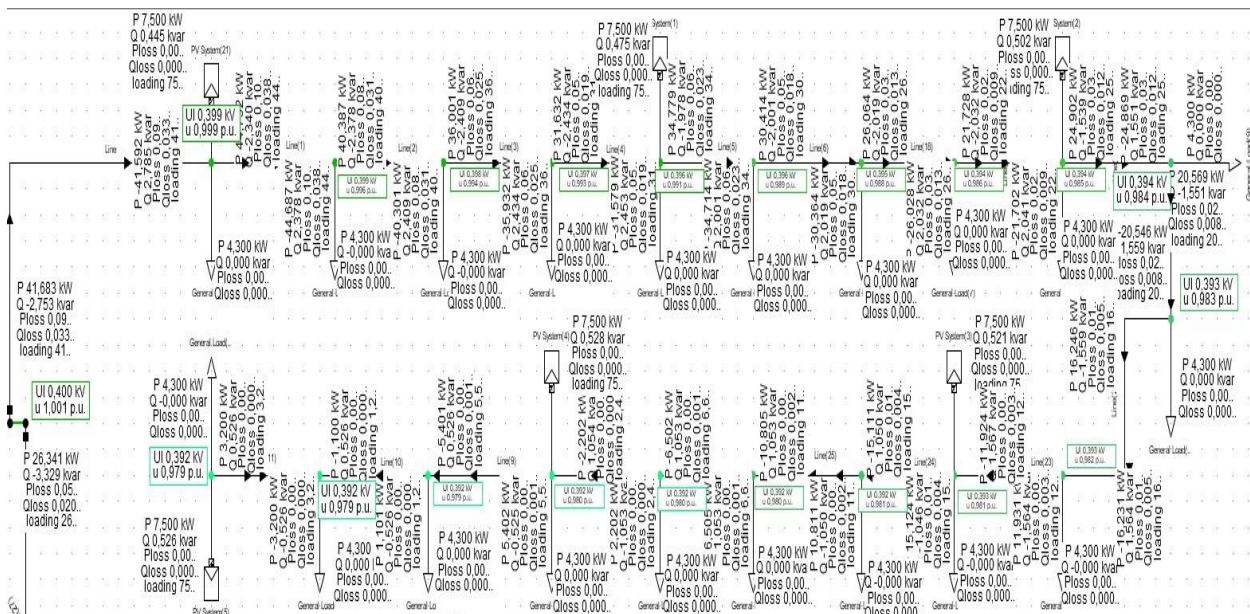
Na slici 4.12. prikazani su tokovi snaga koje daje vanjska 10 kV distribucijska mreža. Strelice na slici 4.12. prikazuju smjer radne snage. Smjer jalove snage u ovom slučaju nije u smjeru radne, već u suprotnom smjeru.



Slika 4.12. Tokovi snaga vanjske distribucijske mreže u scenariju 3

Budući da se potrošači odnosno kućanstva djelomično napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, vanjska 10 kV distribucijska mreža daje 102,030 kW radne snage kako bi potrošnja bila zadovoljena. U ovom slučaju vanjska 10 kV distribucijska mreža ne daje jalovu snagu. Budući da izmjenjivači daju i jalovu snagu, sva tri radijalna izvoda prema transformatoru daju ukupno 8,982 kVAr-a. Prilikom transformacije naponske razine na transformatoru dolazi do gubitaka jalove snage od 1,047 kVAr-a jer su transformatori potrošači jalove snage. Prema vanjskoj 10 kV distribucijskoj mreži odlazi 7,935 kVAr-a koja se u 10 kV distribucijskoj mreži mogu iskoristiti za smanjivanje gubitaka ili za napajanje potrošača koji zahtijevaju jalovu snagu. U ovom slučaju opterećenje transformatora iznosi 25,585%.

Slika 4.13. prikazuje tokove snaga u prvom radijalnom izvodu kada su pokrenuti optimalni tokovi snaga i svih šest fotonaponskih sustava daju različite iznose jalove snage. Strelice na slici 4.13. prikazuju smjer radne snage, dok je smjer jalove snage suprotan.



Slika 4.13. Tokovi snaga prvog radijalnog izvoda

Budući da su jalove snage fotonaponskih sustava različite, pomoću tablice će se prikazati radne i jalove snage koje proizvode fotonaponski sustavi.

Tablica 4.7. Radna i jalova snaga fotonaponskih sustava prvog radijalnog izvoda u scenariju 3

	Radna snaga kW	Jalova snaga kVAr
Fotonaponski sustav na 1. kućanstvu	7,5	0,445
Fotonaponski sustav na 5. kućanstvu	7,5	0,475
Fotonaponski sustav na 9. kućanstvu	7,5	0,502
Fotonaponski sustav na 13. kućanstvu	7,5	0,521
Fotonaponski sustav na 17. kućanstvu	7,5	0,528
Fotonaponski sustav na 20. kućanstvu	7,5	0,526
Σ	45	2,997

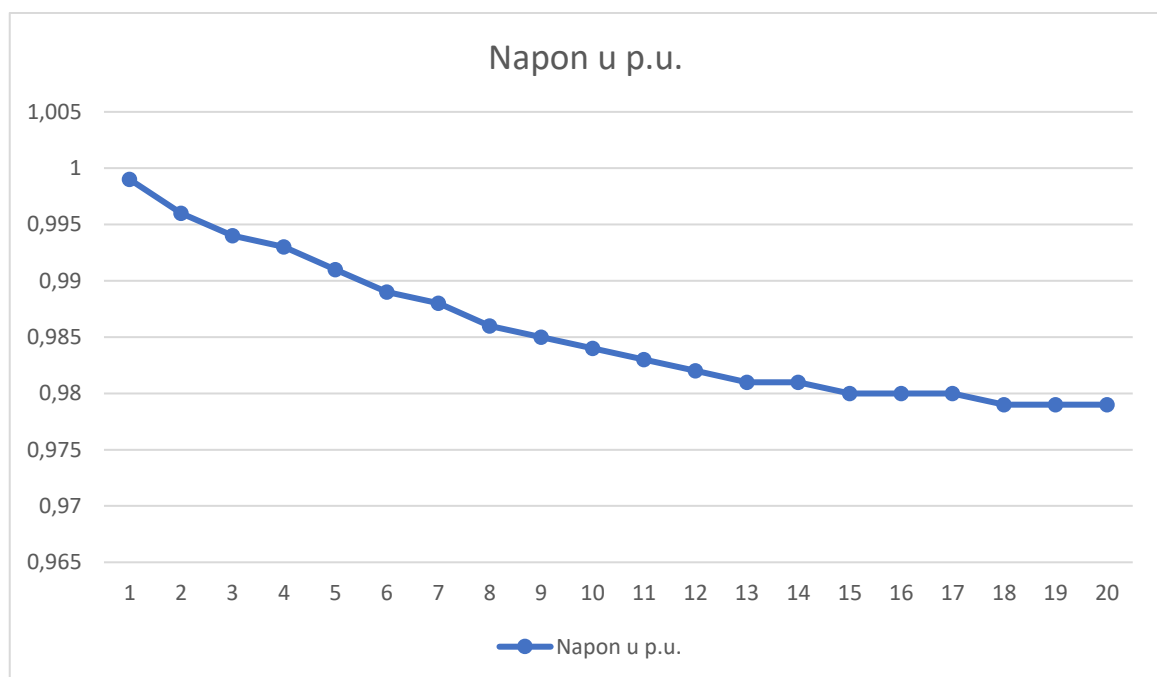
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na prvom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasniti će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.8. Prikaz tokova snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 3

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	41,683 / 41,592	-2,753 / 2,785	0,091	0,033
Snaga na 2. vodu	44,792 / 44,687	-2,340 / 2,378	0,105	0,038
Snaga na 3. vodu	40,387 / 40,301	-2,378 / 2,409	0,086	0,031
Snaga na 4. vodu	36,001 / 35,932	-2,409 / 2,434	0,069	0,025
Snaga na 5. vodu	31,632 / 31,579	-2,434 / 2,453	0,053	0,019
Snaga na 6. vodu	34,779 / 34,714	-1,978 / 2,001	0,065	0,023
Snaga na 7. vodu	30,414 / 30,364	-2,001 / 2,019	0,050	0,018
Snaga na 8. vodu	26,064 / 26,028	-2,019 / 2,032	0,037	0,013
Snaga na 9. vodu	21,728 / 21,702	-2,032 / 2,041	0,026	0,009
Snaga na 10. vodu	24,902 / 24,869	-1,539 / 1,551	0,033	0,012
Snaga na 11. vodu	20,569 / 20,546	-1,551 / 1,559	0,023	0,008
Snaga na 12. vodu	16,246 / 16,231	-1,559 / 1,564	0,014	0,005
Snaga na 13. vodu	11,931 / 11,924	-1,564 / 1,567	0,008	0,003
Snaga na 14. vodu	15,124 / 15,111	-1,046 / 1,050	0,012	0,004
Snaga na 15. vodu	10,811 / 10,805	-1,050 / 1,053	0,006	0,002
Snaga na 16. vodu	6,503 / 6,502	-1,053 / 1,053	0,002	0,001
Snaga na 17. vodu	2,202 / 2,202	-1,053 / 1,054	0	0
Snaga na 18. vodu	5,402 / 5,401	-0,525 / 0,526	0,002	0,001
Snaga na 19. vodu	1,101 / 1,100	-0,526 / 0,526	0	0
Snaga na 20. vodu	3,200 / 3,200	-0,526 / 0,526	0,001	0
Σ			0,683	0,245

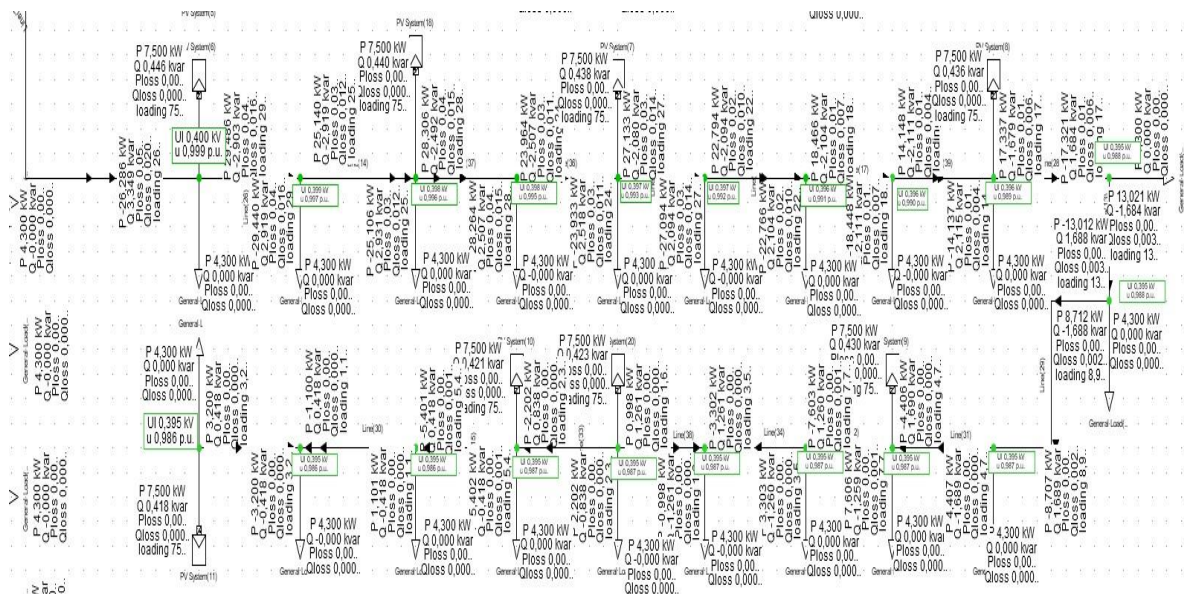
U tablici 4.8. prikazani su rezultati treće simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u prvi radijalni izvod iznosi 41,683 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,091 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u prvi radijalni izvod dobije se 41,592 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 7,5 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 3,2 kW radne snage

daje u mrežu. Kada se doda 3,2 kW radne snage na 41,592 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 44,792 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U prvom radijalnom izvodu nalazi se šest fotonaponskih sustava te svih šest daje iste vrijednosti radne snage, koje su prikazane u tablici 4.5. Ukupna radna snaga koju daje šest fotonaponskih sustava iznosi 45 kW. Na kraju prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 2,785 kVAr, zbog gubitaka od 0,033 kVAr prema transformatoru odlazi -2,753 kVAr. Minus u tablici jalovih snaga označava da fotonaponski sustavi putem izmjenjivača proizvode jalovu snagu te jalova snaga ima suprotan smjer od smjera radne snage, to jest jalova snaga ide prema transformatoru. Ukupna jalova snaga koju daje šest fotonaponskih sustava iznosi 2,997 kVAr-a. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i šest fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje izmjereno na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 44,705%. U prvom radijalnom izvodu su sve sabirnice zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,979 p.u. (392 V). Ukupni gubici radne snage u prvom radijalnom izvodu iznose 0,683 kW, dok ukupni gubici jalove snage u prvom radijalnom izvodu iznose 0,245 kVAr-a.



Grafikon 4.6. Vrijednosti napona prvog radijalnog izvoda u scenariju 3

Slika 4.14. prikazuje tokove snaga u drugom radijalnom izvodu kada su pokrenuti optimalni tokovi snaga i svih osam fotonaponski sustava daju različite iznose jalove snage. Strelice na slici 4.14. prikazuju smjer radne snage, dok je smjer jalove snage suprotan.



Slika 4.14. Tokovi snaga drugog radijalnog izvodu u scenariju 3

Budući da su jalove snage fotonaponskih sustava različite, pomoću tablice će se prikazati radne i jalove snage koje proizvode fotonaponski sustavi.

Tablica 4.9. Radna i jalova snaga fotonaponskih sustava drugog radijalnog izvodu u scenariju 3

	Radna snaga kW	Jalova snaga kVar
Fotonaponski sustav na 1. kućanstvu	7,5	0,446
Fotonaponski sustav na 3. kućanstvu	7,5	0,440
Fotonaponski sustav na 5. kućanstvu	7,5	0,438
Fotonaponski sustav na 9. kućanstvu	7,5	0,436
Fotonaponski sustav na 13. kućanstvu	7,5	0,430
Fotonaponski sustav na 16. kućanstvu	7,5	0,423
Fotonaponski sustav na 17. kućanstvu	7,5	0,421
Fotonaponski sustav na 20. kućanstvu	7,5	0,418
Σ	60	3,452

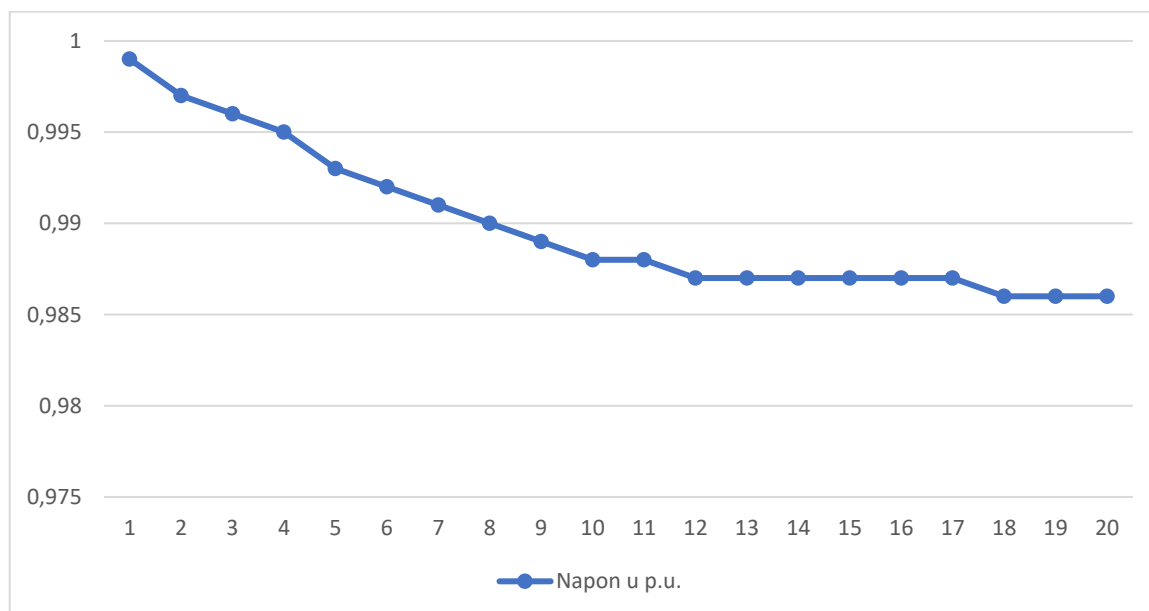
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na drugom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.10. Prikaz tokova snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 3

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	26,341 / 26,286	-3,329 / 3,349	0,055	0,020
Snaga na 2. vodu	29,486 / 29,440	-2,903 / 2,919	0,046	0,016
Snaga na 3. vodu	25,140 / 25,106	-2,919 / 2,931	0,034	0,012
Snaga na 4. vodu	28,306 / 28,264	-2,492 / 2,507	0,042	0,015
Snaga na 5. vodu	23,964 / 23,933	-2,057 / 2,518	0,031	0,011
Snaga na 6. vodu	27,133 / 27,094	-2,080 / 2,094	0,039	0,014
Snaga na 7. vodu	22,794 / 22,763	-2,094 / 2,104	0,028	0,010
Snaga na 8. vodu	18,466 / 18,448	-2,104 / 2,111	0,018	0,007
Snaga na 9. vodu	14,148 / 14,137	-2,111 / 2,015	0,011	0,004
Snaga na 10. vodu	17,337 / 17,321	-1,679 / 1,684	0,016	0,006
Snaga na 11. vodu	13,021 / 13,012	-1,684 / 1,688	0,009	0,003
Snaga na 12. vodu	8,712 / 8,707	-1,688 / 1,689	0,004	0,002
Snaga na 13. vodu	4,407 / 4,406	-1,689 / 1,690	0,001	0
Snaga na 14. vodu	7,606 / 7,603	-1,259 / 1,260	0,003	0,001
Snaga na 15. vodu	3,303 / 3,302	-1,260 / 1,261	0,001	0
Snaga na 16. vodu	0,998 / 0,998	-1,261 / 1,261	0	0
Snaga na 17. vodu	2,202 / 2,202	-0,838 / 0,838	0	0
Snaga na 18. vodu	5,402 / 5,401	-0,418 / 0,418	0,002	0,001
Snaga na 19. vodu	1,101 / 1,100	-0,418 / 0,418	0	0
Snaga na 20. vodu	3,200 / 3,200	-0,418 / 0,418	0,001	0
Σ			0,341	0,122

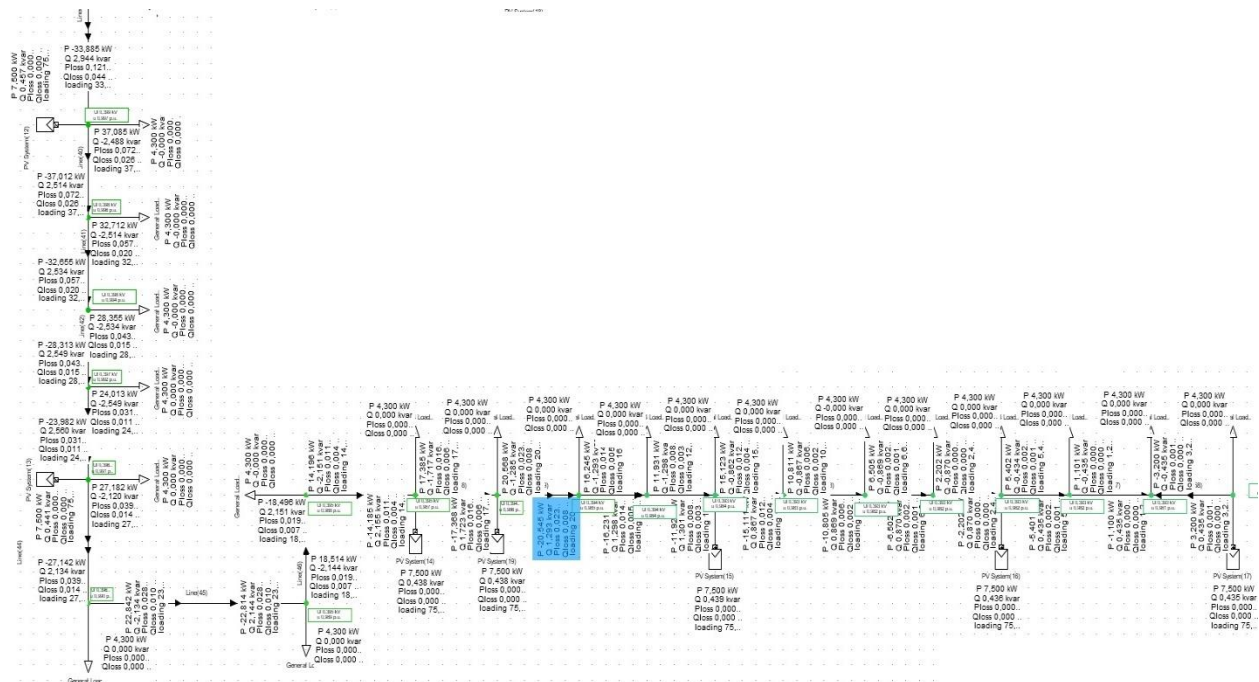
U tablici 4.10. prikazani su rezultati treće simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u drugi radijalni izvod iznosi 26,341 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,055 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u drugi radijalni izvod dobije se 26,286 kW te se

ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 7,5 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 3,2 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 3,2 kW radne snage na 26,286 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 29,486 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U drugom radijalnom izvodu nalazi se osam fotonaponskih sustava te svih osam daje iste vrijednosti radne snage, koje su prikazane u tablici 4.7. Ukupna radna snaga koju daje osam fotonaponskih sustava iznosi 60 kW. Na kraju prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 3,349 kVAr, zbog gubitaka od 0,020 kVAr prema transformatoru odlazi -3,329 kVAr. Minus u tablici jalovih snaga označava da fotonaponski sustavi putem izmjenjivača proizvode jalovu snagu te jalova snaga ima suprotan smjer od smjera radne snage, to jest jalova snaga ide prema transformatoru. Ukupna jalova snaga koju daje osam fotonaponskih sustava iznosi 3,452 kVAr-a. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i osam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje izmjereno na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 29,526%. U drugom radijalnom izvodu su kao i u prvom sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,986 p.u. (395 V). Ukupni gubici radne snage u drugom radijalnom izvodu iznose 0,341 kW, dok ukupni gubici jalove snage u drugom radijalnom izvodu iznose 0,122 kVAr-a.



Grafikon 4.7. Vrijednosti napona drugog radijalnog izvoda u scenariju 3

Slika 4.15. prikazuje tokove snaga u trećem radijalnom izvodu kada su pokrenuti optimalni tokovi snaga i svih sedam fotonaponski sustava daju različite iznose jalove snage. Strelice na slici 4.15. prikazuju smjer radne snage, dok je smjer jalove snage suprotan.



Slika 4.15. Tokovi snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 3

Budući da su jalove snage fotonaponskih sustava različite, pomoću tablice će se prikazati radne i jalove snage koje proizvode fotonaponski sustavi.

Tablica 4.11. Radna i jalova snaga fotonaponskih sustava trećeg radijalnog izvoda u scenariju 3

	Radna snaga kW	Jalova snaga kVAr
Fotonaponski sustav na 1. kućanstvu	7,5	0,457
Fotonaponski sustav na 5. kućanstvu	7,5	0,441
Fotonaponski sustav na 9. kućanstvu	7,5	0,438
Fotonaponski sustav na 10. kućanstvu	7,5	0,438
Fotonaponski sustav na 13. kućanstvu	7,5	0,435
Fotonaponski sustav na 17. kućanstvu	7,5	0,436
Fotonaponski sustav na 20. kućanstvu	7,5	0,435
Σ	52,5	3,08

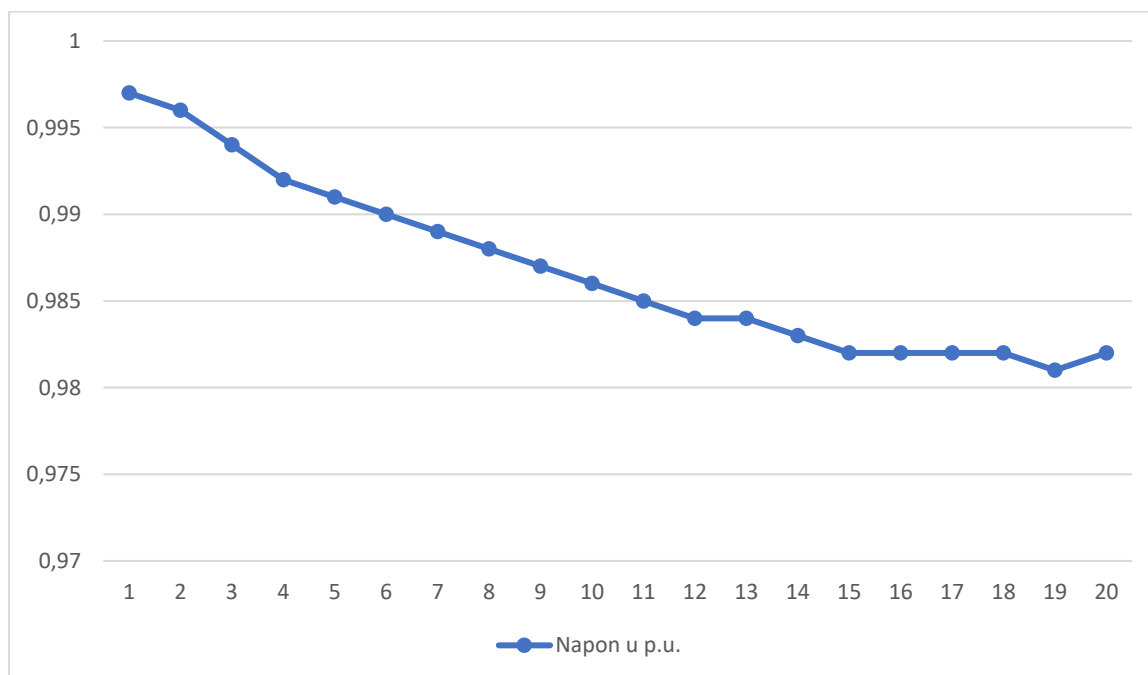
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na trećem radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.12. Prikaz tokova snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 3

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	34,006 / 33,885	-2,901 / 2,944	0,121	0,044
Snaga na 2. vodu	37,085 / 37,012	-2,488 / 2,514	0,072	0,026
Snaga na 3. vodu	32,712 / 32,655	-2,514 / 2,534	0,057	0,020
Snaga na 4. vodu	28,355 / 28,313	-2,534 / 2,549	0,043	0,015
Snaga na 5. vodu	24,013 / 23,982	-2,549 / 2,560	0,031	0,011
Snaga na 6. vodu	27,182 / 27,142	-2,120 / 2,134	0,039	0,014
Snaga na 7. vodu	22,842 / 22,814	-2,134 / 2,144	0,028	0,010
Snaga na 8. vodu	18,514 / 18,496	-2,144 / 2,151	0,019	0,007
Snaga na 9. vodu	14,196 / 14,185	-2,151 / 2,155	0,011	0,004
Snaga na 10. vodu	17,385 / 17,368	-1,717 / 1,723	0,016	0,006
Snaga na 11. vodu	20,568 / 20,545	-1,285 / 1,293	0,023	0,008
Snaga na 12. vodu	16,245 / 16,231	-1,296 / 1,298	0,014	0,005
Snaga na 13. vodu	11,931 / 11,923	-1,298 / 1,301	0,008	0,003
Snaga na 14. vodu	15,123 / 15,111	-0,862 / 0,867	0,012	0,004
Snaga na 15. vodu	10,811 / 10,805	-0,867 / 0,869	0,006	0,002
Snaga na 16. vodu	6,505 / 6,502	-0,869 / 0,870	0,002	0,001
Snaga na 17. vodu	2,202 / 2,202	-0,870 / 0,870	0	0
Snaga na 18. vodu	5,402 / 5,401	-0,434 / 0,435	0,002	0,001
Snaga na 19. vodu	1,101 / 1,100	-0,435 / 0,435	0	0
Snaga na 20. vodu	3,200 / 3,200	-0,435 / 0,435	0,001	0
Σ			0,505	0,19

U tablici 4.12. prikazani su rezultati treće simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u treći radijalni izvod iznosi 34,006 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,121 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u treći radijalni izvod dobije se 33,885 kW te se

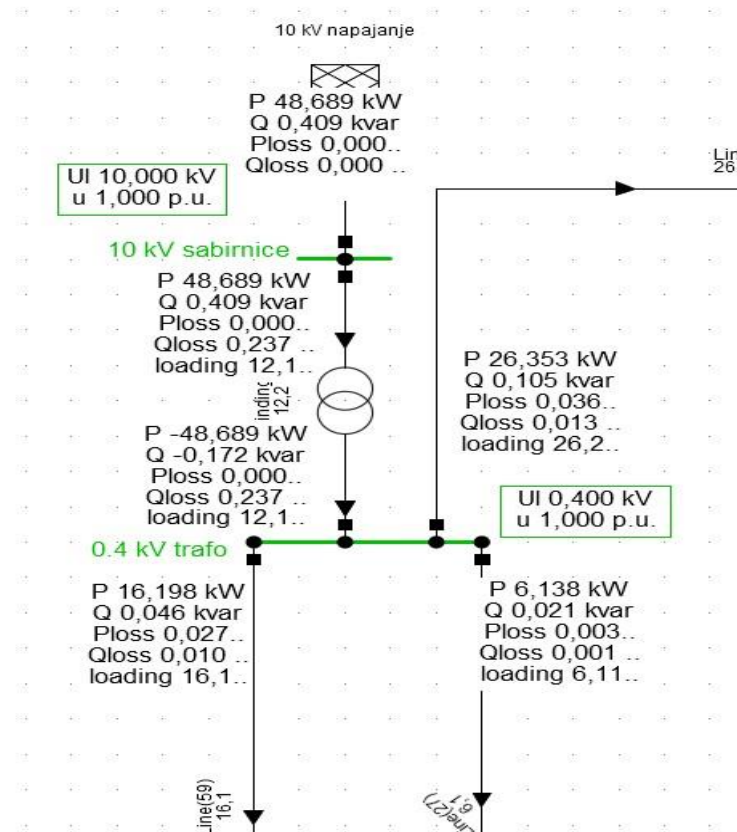
ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 7,5 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 3,2 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 3,2 kW radne snage na 33,885 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 37,085 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U trećem radijalnom izvodu nalazi se sedam fotonaponskih sustava te svih sedam daje iste vrijednosti radne snage, koje su prikazane u tablici 4.9. Ukupna radna snaga koju daje sedam fotonaponskih sustava iznosi 52,5 kW. Na kraju prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 2,944 kVAr, zbog gubitaka od 0,044 kVAr prema transformatoru odlazi -2,901 kVAr. Minus u tablici jalovih snaga označava da fotonaponski sustavi putem izmjenjivača proizvode jalovu snagu te jalova snaga ima suprotan smjer od smjera radne snage, to jest jalova snaga ide prema transformatoru. Ukupna jalova snaga koju daje sedam fotonaponskih sustava iznosi 3,08 kVAr-a. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i sedam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje izmjereno na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 37,094 %. U trećem radijalnom izvodu su kao u prvom i drugom sve sabirnice zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,981 p.u. (393 V). Ukupni gubici radne snage u trećem radijalnom izvodu iznose 0,505 kW, dok ukupni gubici jalove snage u trećem radijalnom izvodu iznose 0,19 kVAr.



Grafikon 4.8. Vrijednosti napona trećeg radijalnog izvoda u scenariju 3

4.4. Scenarij 4

U četvrtom scenariju pretpostavlja se da kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično pomoću fotonaponskih sustava koje se nalaze na pojedinim kućanstvima. U četvrtom scenariju pretpostavlja se da će svi potrošači raditi sa svojom maksimalnom snagom koja iznosi 4,3 kW te će fotonaponski sustavi proizvoditi približno maksimalnu vrijednost radne snage koja iznosi 9,99 kW. Na slici 4.16. Prikazani su tokovi snaga koje daje vanjska distribucijska mreža. Strelice na slici 4.16. prikazuju smjer radne i jalove snage.

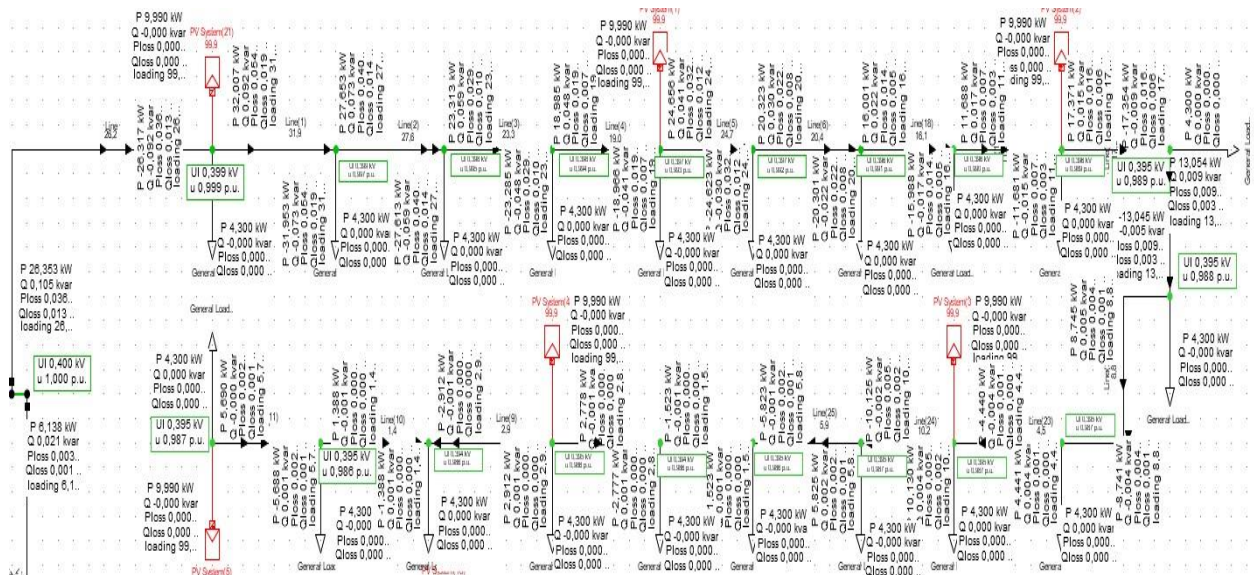


Slika 4.16. Tokovi snaga vanjske distribucijske mreže u scenariju 4.

Budući da se potrošači to jest kućanstva djelomično napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, vanjska 10 kV distribucijska mreža daje 48,689 kW radne snage kako bi potrošnja bila zadovoljena. Vanjska distribucijska mreža daje jalovu snagu od 0,409 kVAr-a. Prilikom transformacije naponske razine na transformatoru dolazi do gubitaka jalove snage od 0,237 kVAr-a jer su transformatori potrošači jalove snage. Niti u ovom slučaju u niskonaponskoj distribucijskoj mreži s tri radijalna izvoda nema potrošača jalove snage, međutim u tri radijalna izvoda odlazi

ukupno 0,172 kVAr-a koja se postepeno gube prilikom distribucije energije. U ovom slučaju opterećenje transformatora iznosi 12,173%.

Slika 4.17. prikazuje tokove snaga u prvom radijalnom izvodu kada je svih šest fotonaponskih sustava su u funkciji i daju 9,99 kW radne snage. Strelice na slici 4.6. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.17. Tokovi snaga prvog radijalnog izvodu u scenariju 4.

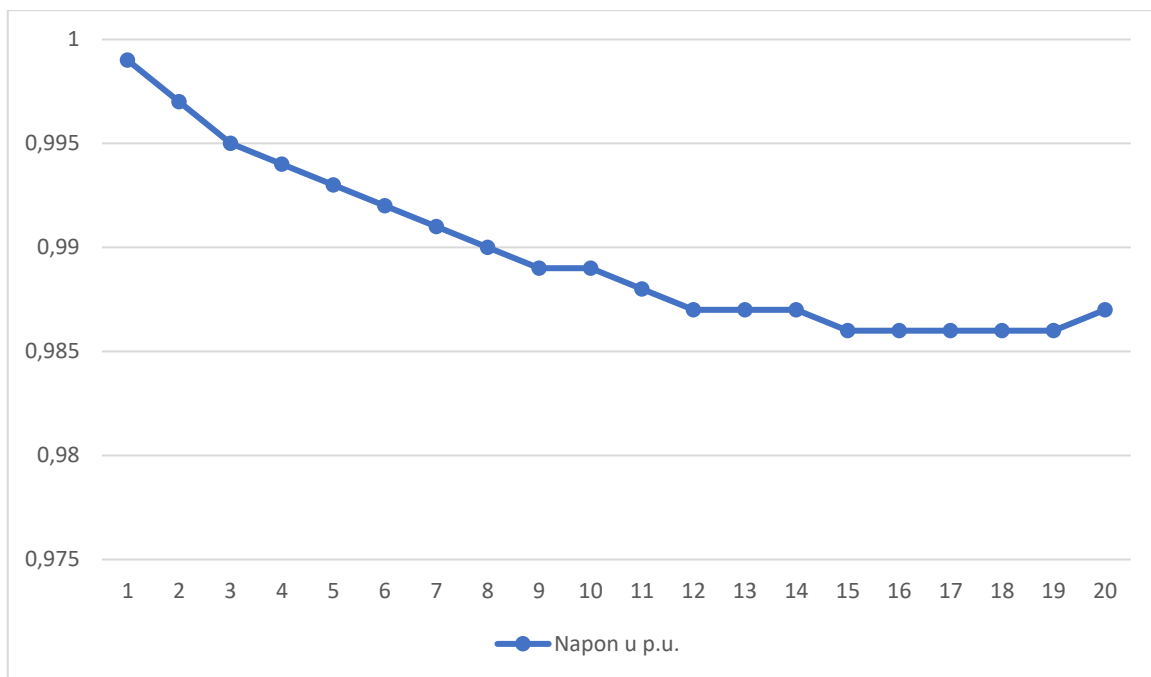
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na prvom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.13. Prikaz tokova snaga prvog radijalnog izvodu u scenariju 4

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	26,353 / 26,317	0,105 / 0,092	0,036	0,013
Snaga na 2. vodu	32,007 / 31,953	0,092 / 0,073	0,054	0,019
Snaga na 3. vodu	27,653 / 27,613	0,073 / 0,059	0,040	0,014
Snaga na 4. vodu	23,313 / 23,285	0,059 / 0,048	0,029	0,010
Snaga na 5. vodu	18,985 / 18,966	0,048 / 0,041	0,019	0,007
Snaga na 6. vodu	24,656 / 24,623	0,041 / 0,030	0,032	0,012
Snaga na 7. vodu	20,323 / 20,301	0,030 / 0,022	0,022	0,008
Snaga na 8. vodu	16,001 / 15,988	0,022 / 0,017	0,014	0,005

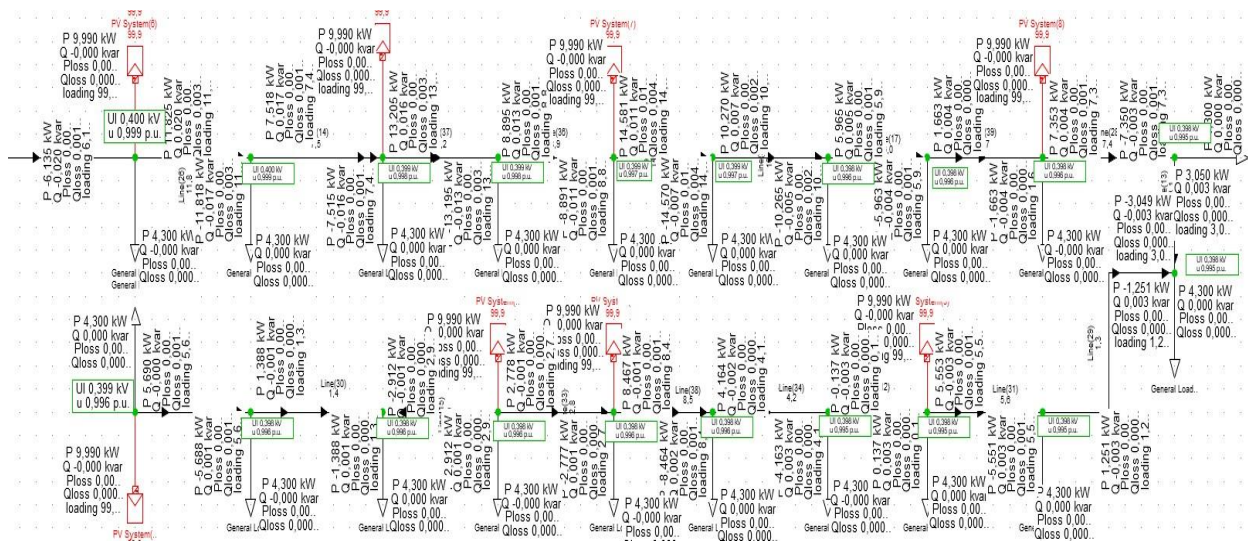
Snaga na 9. vodu	11,688 / 11,681	0,017 / 0,015	0,007	0,003
Snaga na 10. vodu	17,371 / 17,354	0,015 / 0,009	0,016	0,006
Snaga na 11. vodu	13,054 / 13,045	0,009 / 0,005	0,009	0,003
Snaga na 12. vodu	8,745 / 8,741	0,005 / 0,004	0,004	0,001
Snaga na 13. vodu	4,441 / 4,440	0,004 / 0,004	0,001	0
Snaga na 14. vodu	10,130 / 10,125	0,004 / 0,002	0,005	0,002
Snaga na 15. vodu	5,825 / 5,823	0,002 / 0,001	0,002	0,001
Snaga na 16. vodu	1,523 / 1,523	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 17. vodu	2,777 / 2,278	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 18. vodu	2,912 / 2,912	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 19. vodu	1,388 / 1,388	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 20. vodu	5,688 / 5,690	0,001 / 0	0,002	0,001
Σ			0,292	0,105

U tablici 4.13. prikazani su rezultati četvrte simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u prvi radijalni izvod iznosi 26,353 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,036 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u prvi radijalni izvod dobije se 26,317 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 9,99 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 5,69 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 5,69 kW radne snage na 26,317 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 32,007 kW radne snage koja je ujedno i snage na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U prvom radijalnom izvodu nalazi se šest fotonaponskih sustava te svih šest daje 9,99 kW radne snage, što je ukupno 59,94 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,105 kVAr, zbog gubitaka od 0,013 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,092 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i šest fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te najveće opterećenje izmjereno je na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 31,906%. U ovom slučaju sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,986 p.u. (394 V). Ukupni gubici radne snage u prvom radijalnom izvodu iznose 0,292 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,125 kVAr-a.



Grafikon 4.9. Vrijednosti napona prvog radijalnog izvoda u scenariju 4

Slika 4.18. prikazuje tokove snaga u drugom radijalnom izvodu kada svih osam fotonaponskih sustava su u funkciji i daju 9,99 kW radne snage. Strelice na slici 4.7. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.18. Tokovi snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 4

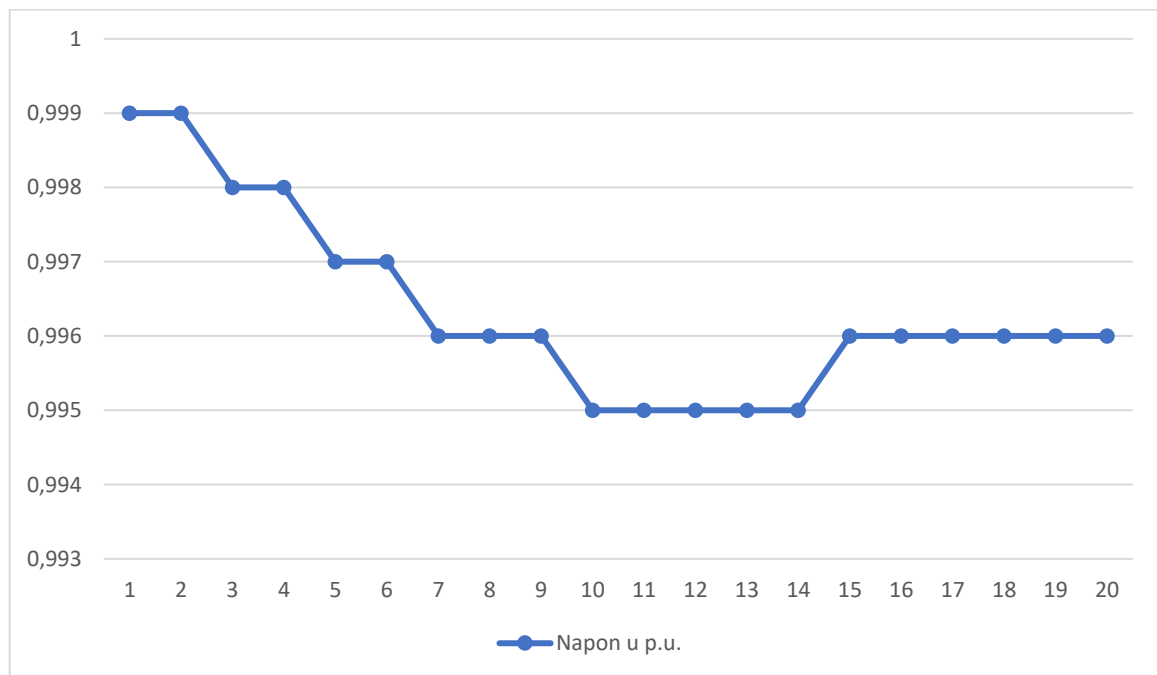
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na drugom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasniti će se tok snage na prvomvodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.14. Prikaz tokova snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 4

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	6,138 / 6,135	0,021 / 0,020	0,003	0,001
Snaga na 2. vodu	11,825 / 11,818	0,020 / 0,017	0,007	0,003
Snaga na 3. vodu	7,518 / 7,515	0,017 / 0,016	0,003	0,001
Snaga na 4. vodu	13,205 / 13,195	0,016 / 0,013	0,009	0,003
Snaga na 5. vodu	8,895 / 8,891	0,013 / 0,011	0,004	0,001
Snaga na 6. vodu	14,581 / 14,570	0,011 / 0,007	0,011	0,004
Snaga na 7. vodu	10,270 / 10,265	0,007 / 0,005	0,006	0,002
Snaga na 8. vodu	5,965 / 5,963	0,005 / 0,004	0,002	0,001
Snaga na 9. vodu	1,663 / 1,663	0,004 / 0,004	0	0
Snaga na 10. vodu	7,353 / 7,350	0,004 / 0,003	0,003	0,001
Snaga na 11. vodu	3,050 / 3,049	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 12. vodu	1,251 / 1,251	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 13. vodu	5,551 / 5,553	0,003 / 0,003	0,002	0,001
Snaga na 14. vodu	0,137 / 0,137	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 15. vodu	4,163 / 4,164	0,003 / 0,002	0,001	0
Snaga na 16. vodu	8,464 / 8,467	0,002 / 0,001	0,004	0,001
Snaga na 17. vodu	2, 777 / 2, 778	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 18. vodu	2,912 / 2,912	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 19. vodu	1,388 / 1,388	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 20. vodu	5,688 / 5,690	0,001 / 0	0,002	0,001
Σ			0,047	0,02

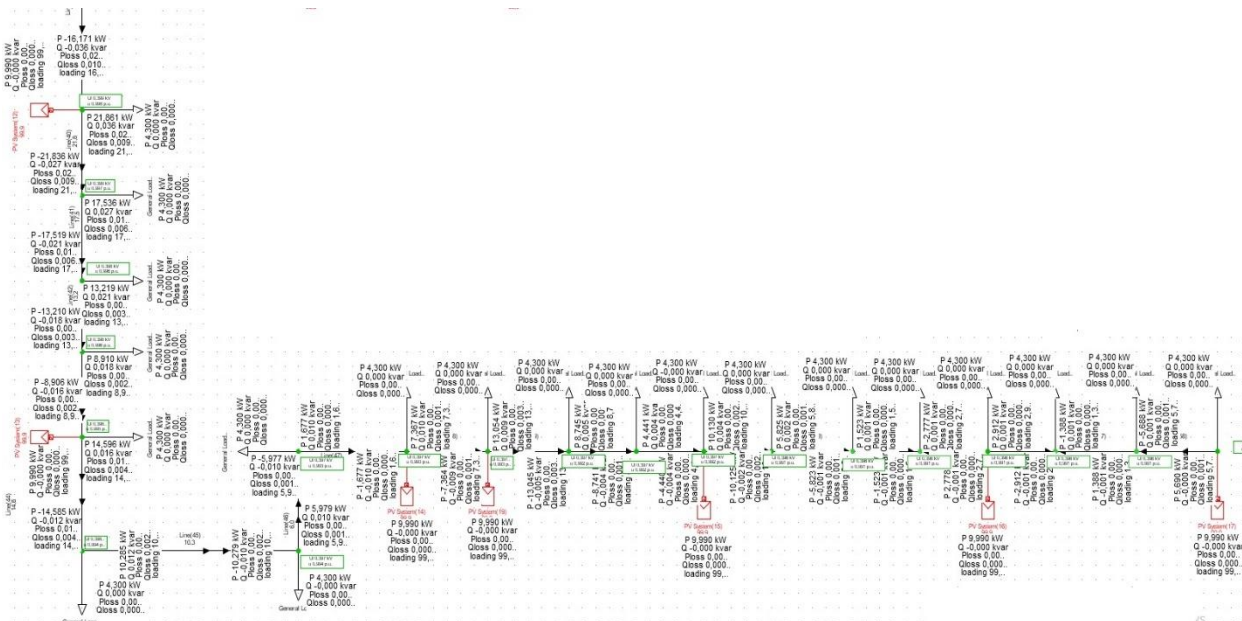
U tablici 4.14. prikazani su rezultati četvrte simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u drugi radijalni izvod iznosi 6,138 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,003 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u drugi radijalni izvod dobije se 6,135 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 9,99 kW radne snage. Kućanstvo ima

potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 5,69 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 5,69 kW radne snage na 6,135 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 11,825 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U drugom radijalnom izvodu nalazi se osam fotonaponskih sustava te svih osam daje 9,99 kW radne snage, što je ukupno 79,92 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,021 kVAr, zbog gubitaka od 0,001 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,020 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i osam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje izmjereno kao i kod prvog radijalnog izvoda, na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 11,777%. U ovom slučaju sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,995 p.u. (398 V). Ukupni gubici radne snage u drugom radijalnom izvodu iznose 0,047 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,02 kVAr-a.



Grafikon 4.10. Vrijednosti napona drugog radijalnog izvoda u scenariju 4.

Slika 4.19. prikazuje tokove snaga u trećem radijalnom izvodu kada svih sedam fotonaponskih sustava su u funkciji i daju 9,99 kW radne snage. Strelice na slici 4.8. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.19. Tokovi snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 4.

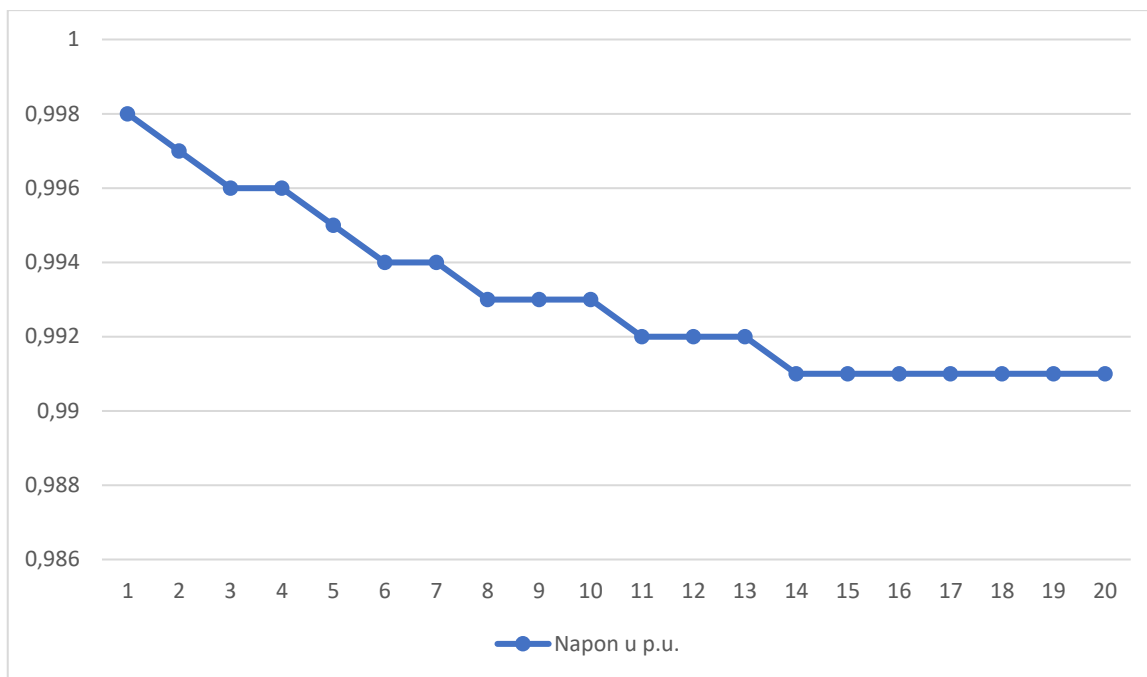
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na trećem radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.15. Prikaz tokova snaga trećeg izvoda u scenariju 4

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	16,198 / 16,171	0,046 / 0,036	0,027	0,010
Snaga na 2. vodu	21,861 / 21,836	0,036 / 0,027	0,025	0,009
Snaga na 3. vodu	17,536 / 17,519	0,027 / 0,021	0,016	0,006
Snaga na 4. vodu	13,219 / 13,210	0,021 / 0,018	0,009	0,003
Snaga na 5. vodu	8,910 / 8,906	0,018 / 0,016	0,004	0,002
Snaga na 6. vodu	14,596 / 14,585	0,016 / 0,012	0,011	0,004
Snaga na 7. vodu	10,285 / 10,279	0,012 / 0,010	0,006	0,002
Snaga na 8. vodu	5,979 / 5,977	0,010 / 0,010	0,002	0,001
Snaga na 9. vodu	1,677 / 1,677	0,010 / 0,010	0	0
Snaga na 10. vodu	7,367 / 7,364	0,010 / 0,009	0,003	0,001

Snaga na 11. vodu	13,054 / 13,045	0,009 / 0,005	0,009	0,003
Snaga na 12. vodu	8,745 / 8,741	0,005 / 0,004	0,004	0,001
Snaga na 13. vodu	4,441 / 4,440	0,004 / 0,004	0,001	0
Snaga na 14. vodu	10,130 / 10,125	0,004 / 0,002	0,005	0,002
Snaga na 15. vodu	5,825 / 5,823	0,002 / 0,001	0,002	0,001
Snaga na 16. vodu	1,523 / 1,523	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 17. vodu	2,777 / 2,778	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 18. vodu	2,912 / 2,912	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 19. vodu	1,388 / 1,388	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 20. vodu	5,688 / 5,690	0,001 / 0	0,002	0,001
Σ			0,126	0,046

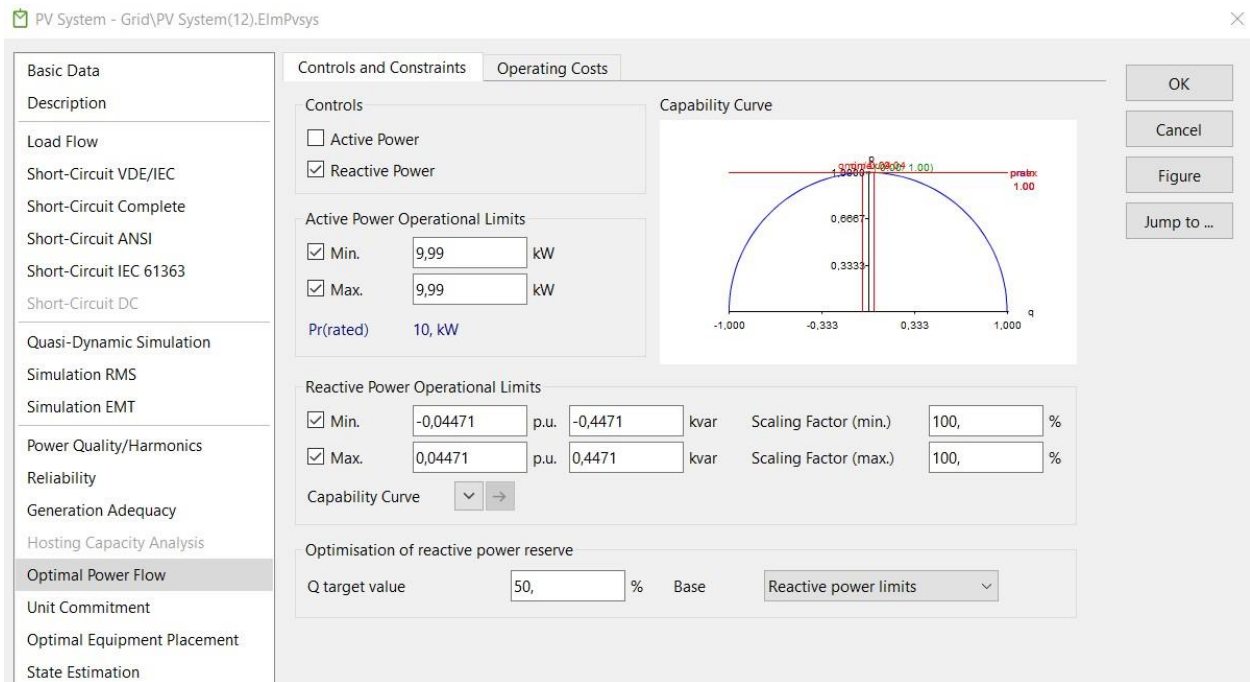
U tablici 4.15. prikazani su rezultati četvrte simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u treći radijalni izvod iznosi 16,198 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,027 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u treći radijalni izvod dobije se 16,171 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 9,99 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 5,69 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 5,69 kW radne snage na 16,171 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 21,861 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U trećem radijalnom izvodu nalazi se sedam fotonaponskih sustava te svih sedam daje 9,99 kW radne snage, što je ukupno 69,93 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,046 kVAr, zbog gubitaka od 0,010 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,036 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i sedam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje kao u prvom i drugom radijalnom izvodu, izmjereno je na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 21,798%. U trećem radijalnom izvodu su kao u prvom i drugom sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,991 p.u. (396 V). Ukupni gubici radne snage u trećem radijalnom izvodu iznose 0,126 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,046 kVAr-a.



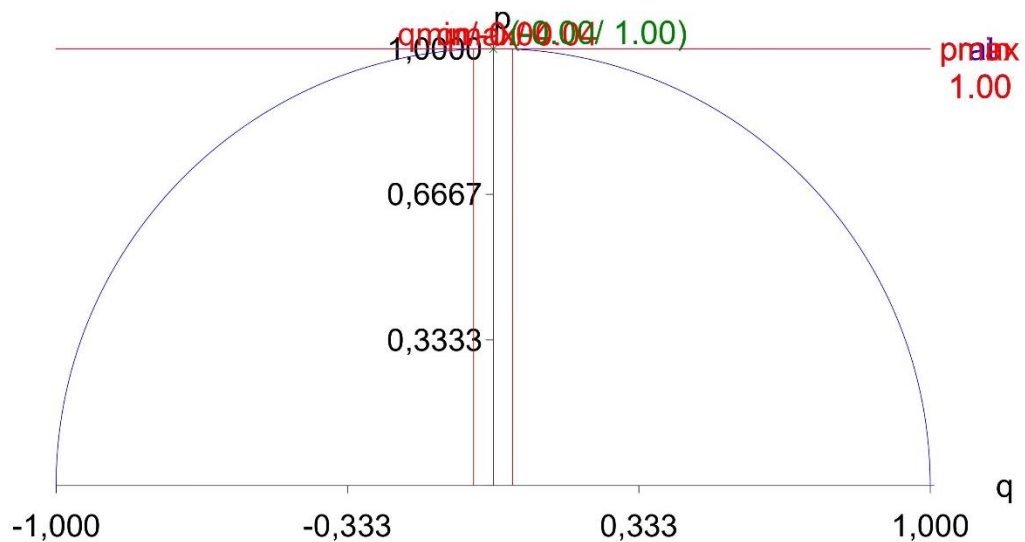
Grafikon 4.11. Vrijednosti napona trećeg radijalnog izvoda u scenariju 4.

4.5. Scenarij 5

U petom scenariju pretpostavlja se da kućanstva u radijalnim izvodima djelomično se napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, a djelomično pomoću fotonaponskih sustava koje se nalaze na pojedinim kućanstvima. Također i u petom scenariju pretpostavlja se da će svi potrošači raditi sa svojom maksimalnom snagom koja iznosi 4,3 kW, dok će se jalova snaga koju daju fotonaponski sustavi razlikovati, a radna snaga fotonaponskih sustava će ostati 9,99 kW kao u scenariju 4. U ovom scenariju koristiti će se modul optimalnih tokova snaga u programu DIgSILENT PowerFactory te će u modulu optimalnih tokova snaga biti omogućeno da upravlja jalovom snagom fotonaponskih sustava. Pomoću modula optimalnih tokova snaga dobiti će se najbolje moguće vrijednosti snaga fotonaponskih sustava, kako bi distribucijska mreža imala što manje gubitke. U modelu fotonaponskog sustava pod karticom *optimal power flow*, prikazanoj na slici 4.20., dopušta se kontrola jalove snage fotonaponskog sustava. Nadalje, potrebno je definirati i granice jalove snage, minimalna jalova snaga iznosi -0,4471 kVAr-a, dok maksimalna jalova snaga iznosi 0,4471 kVAr. nakon što su unesene minimalne i maksimalne snage dobije se PQ krivulja izmjenjivača koja je prikazana na slici 4.10.

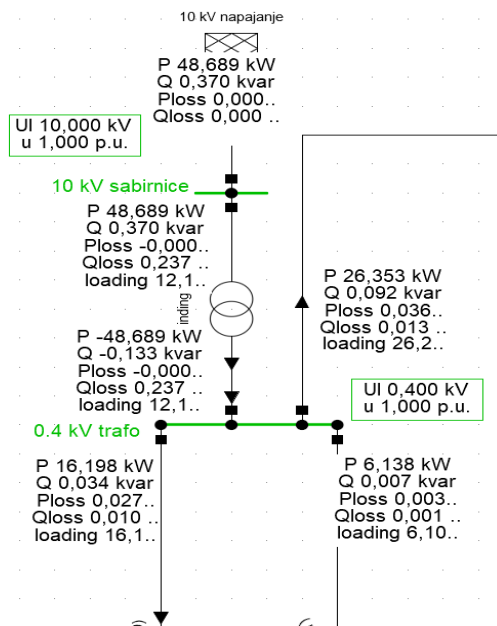


Slika 4.20. Kartica optimalnih tokova snaga u scenariju 5.



Slika 4.21. PQ krivulja u scenariju 5.

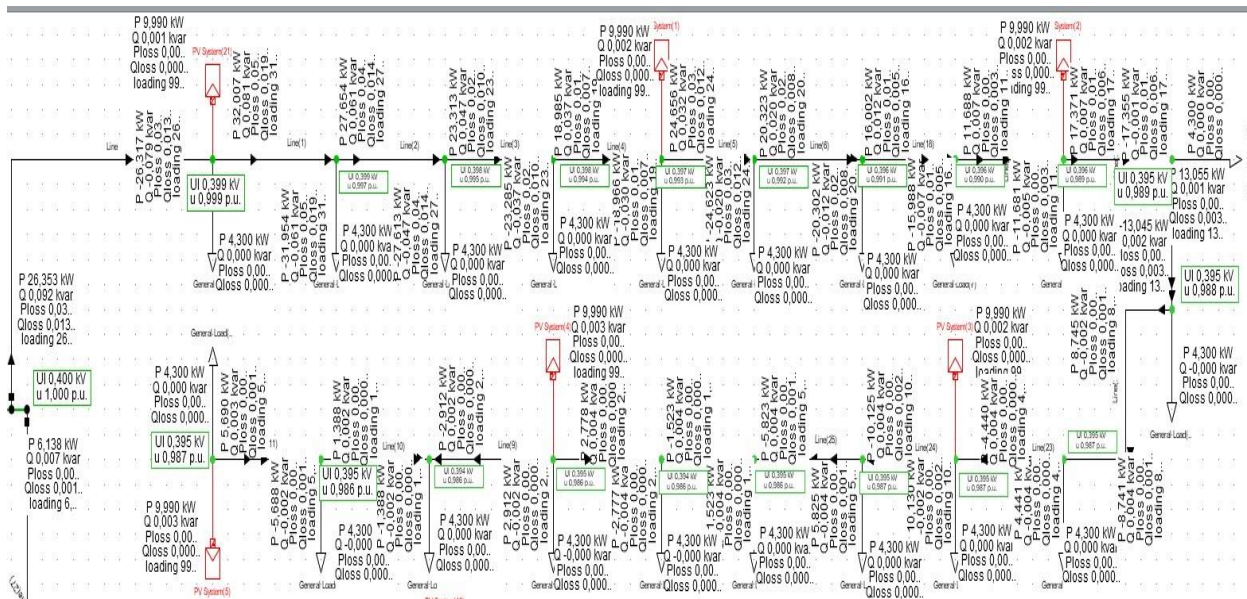
Na slici 4.22. Prikazani su tokovi snaga koje daje vanjska 10 kV distribucijska mreža. Strelice na slici 4.22. prikazuju smjer radne i jalove snage.



Slika 4.22. Tokovi snaga vanjske distribucijske mreže u scenariju 5.

Budući da se potrošači odnosno kućanstva djelomično napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže, vanjska 10 kV distribucijska mreža daje 48,689 kW radne snage kako bi potrošnja bila zadovoljena. Vanjska distribucijska mreža daje jalovu snagu od 0,370 kVAr-a. Prilikom transformacije naponske razine na transformatoru dolazi do gubitaka jalove snage od 0,237 kVAr-a jer su transformatori potrošači jalove snage. Niti u ovom slučaju u niskonaponskoj distribucijskoj mreži s tri radijalna izvoda nema potrošača jalove snage, međutim u tri radijalna izvoda odlazi ukupno 0,133 kVAr-a koja se postepeno gube prilikom distribucije energije. U ovom slučaju opterećenje transformatora iznosi 12,172%.

Slika 4.23. prikazuje tokove snaga u prvom radijalnom izvodu kada su pokrenuti optimalni tokovi snaga i svih šest fotonaponskih sustava daju različite iznose jalove snage. Strelice na slici 4.13. prikazuju smjer radne snage, dok je smjer jalove snage suprotan.



Slika 4.23. Tokovi snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 5.

Budući da su jalove snage fotonaponskih sustava različite, pomoću tablice će se prikazati radne i jalove snage koje proizvode fotonaponski sustavi.

Tablica 4.16. Radna i jalova snaga fotonaponskih sustava u scenariju 5

	Radna snaga kW	Jalova snaga kVAr
Fotonaponski sustav na 1. kućanstvu	9,99	0,001
Fotonaponski sustav na 5. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 9. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 13. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 17. kućanstvu	9,99	0,003
Fotonaponski sustav na 20. kućanstvu	9,99	0,003
Σ	59,94	0,013

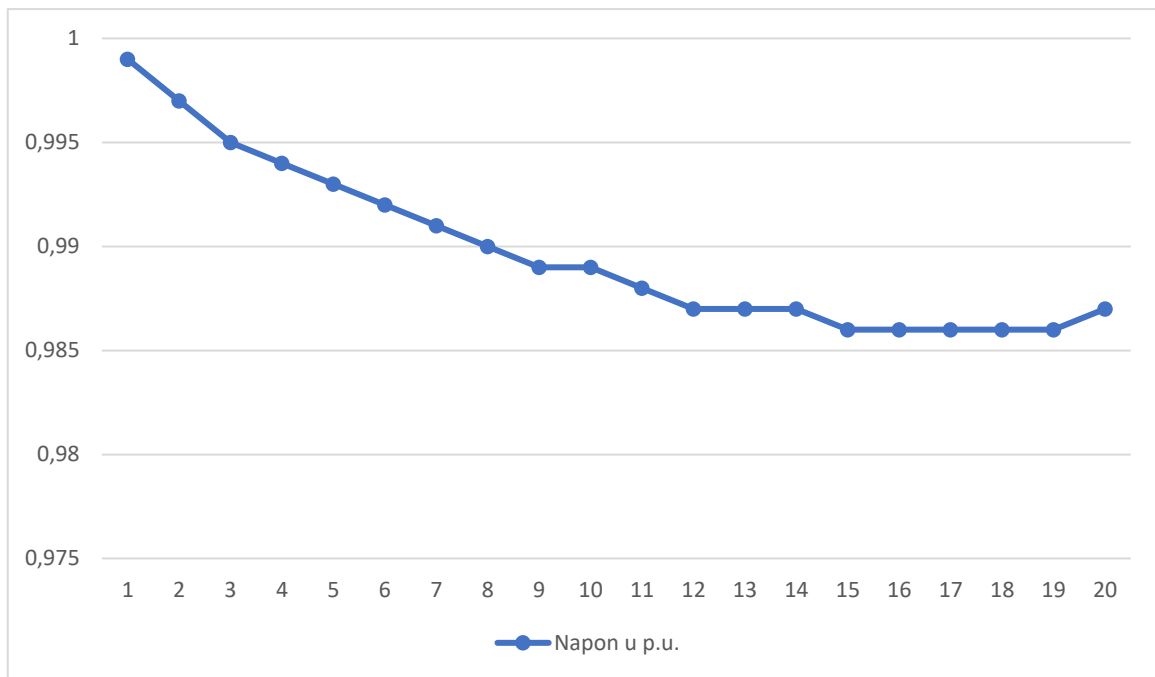
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na prvom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvomvodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.17. Prikaz tokova snaga prvog radijalnog izvoda u scenariju 5

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	26,353 / 26,317	0,092 / 0,079	0,036	0,013
Snaga na 2. vodu	32,007 / 31,954	0,081 / 0,061	0,054	0,019
Snaga na 3. vodu	27,654 / 27,613	0,061 / 0,047	0,040	0,014
Snaga na 4. vodu	23,313 / 23,285	0,047 / 0,037	0,029	0,010
Snaga na 5. vodu	18,985 / 18,966	0,037 / 0,030	0,019	0,007
Snaga na 6. vodu	24,656 / 24,623	0,020 / 0,012	0,032	0,012
Snaga na 7. vodu	20,323 / 20,302	0,020 / 0,012	0,022	0,008
Snaga na 8. vodu	16,002 / 15,988	0,012 / 0,007	0,014	0,005
Snaga na 9. vodu	11,688 / 11,681	0,007 / 0,005	0,007	0,003
Snaga na 10. vodu	17,371 / 17,355	0,007 / 0,001	0,016	0,006
Snaga na 11. vodu	13,055 / 13,045	0,001 / 0,002	0,009	0,003
Snaga na 12. vodu	8,745 / 8,741	0,002 / 0,004	0,004	0,001
Snaga na 13. vodu	4,441 / 4,440	0,004 / 0,004	0,001	0
Snaga na 14. vodu	10,130 / 10,125	0,002 / 0,004	0,005	0,002
Snaga na 15. vodu	5,825 / 5,823	0,004 / 0,004	0,002	0,001
Snaga na 16. vodu	1,523 / 1,523	0,004 / 0,004	0	0
Snaga na 17. vodu	2,777 / 2,278	0,004 / 0,004	0	0
Snaga na 18. vodu	2,912 / 2,912	0,002 / 0,002	0	0
Snaga na 19. vodu	1,388 / 1,388	0,002 / 0,002	0	0
Snaga na 20. vodu	5,688 / 5,690	0,002 / 0,003	0,002	0,001
Σ			0,292	0,105

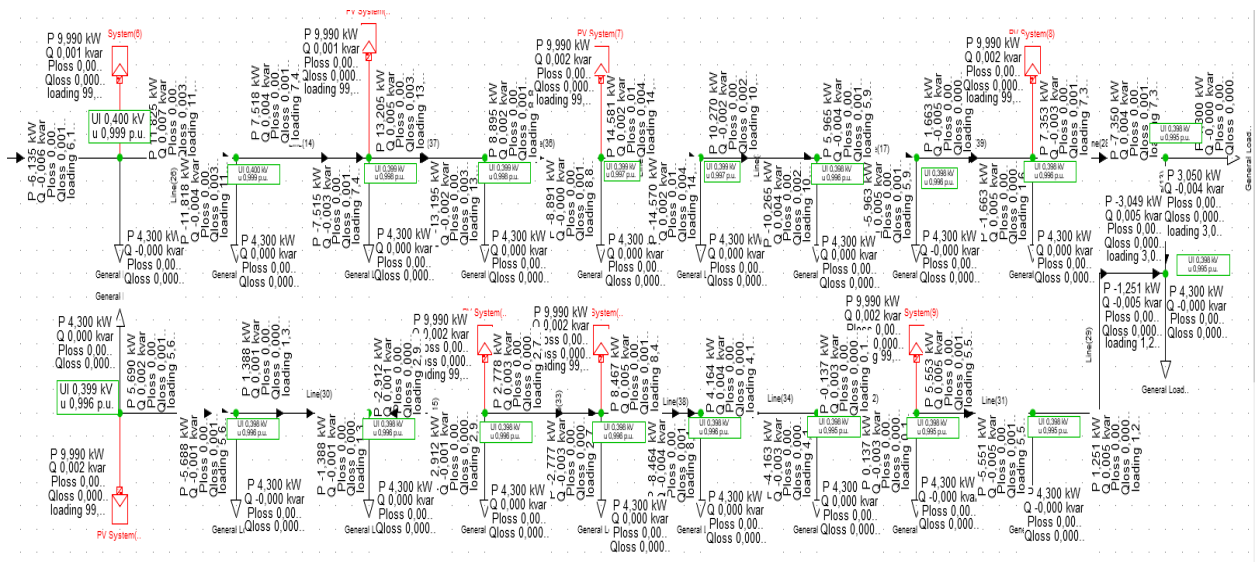
U tablici 4.17. prikazani su rezultati pete simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u prvi radijalni izvod iznosi 26,353 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,036 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u prvi radijalni izvod dobije se 26,317 kW te se ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 9,99 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te

5,69 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 5,69 kW radne snage na 26,317 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 32,007 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U prvom radijalnom izvodu nalazi se šest fotonaponskih sustava te svih šest daje 9,99 kW radne snage, što je ukupno 59,94 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,092 kVAr, zbog gubitaka od 0,013 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,079 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i šest fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te najveće opterećenje izmjereno je na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 31,905%. U ovom slučaju sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,986 p.u. (394 V). Ukupni gubici radne snage u prvom radijalnom izvodu iznose 0,292 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,125 kVAr-a.



Grafikon 4.12. Vrijednosti napona prvog radijalnog izvoda u scenariju 5.

Slika 4.24. prikazuje tokove snaga u drugom radijalnom izvodu kada su pokrenuti optimalni tokovi snaga i svih osam fotonaponski sustava daju različite iznose jalove snage.



Slika 4.24. Tokovi snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 5

Budući da su jalove snage fotonaponskih sustava različite, pomoću tablice će se prikazati radne i jalove snage koje proizvode fotonaponski sustavi.

Tablica 4.18. Radna i jalova snaga fotonaponskih sustava u scenariju 5

	Radna snaga kW	Jalova snaga kVar
Fotonaponski sustav na 1. kućanstvu	9,99	0,001
Fotonaponski sustav na 3. kućanstvu	9,99	0,001
Fotonaponski sustav na 5. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 9. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 13. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 16. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 17. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 20. kućanstvu	9,99	0,002
Σ	79,92	0,014

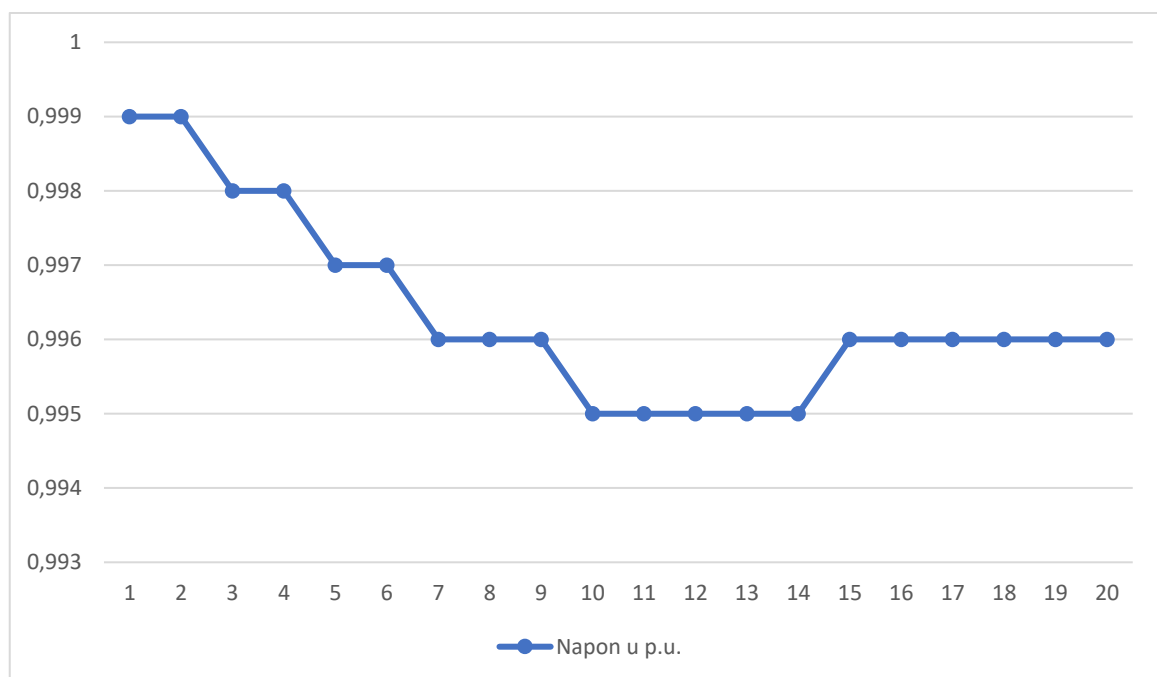
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na drugom radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.19. Prikaz tokova snaga drugog radijalnog izvoda u scenariju 5

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	6,138 / 6,135	0,007 / 0,006	0,003	0,001
Snaga na 2. vodu	11,825 / 11,818	0,007 / 0,004	0,007	0,003
Snaga na 3. vodu	7,518 / 7,515	0,004 / 0,003	0,003	0,001
Snaga na 4. vodu	13,205 / 13,195	0,005 / 0,002	0,009	0,003
Snaga na 5. vodu	8,895 / 8,891	0,002 / 0,000	0,004	0,001
Snaga na 6. vodu	14,581 / 14,570	0,002 / 0,002	0,011	0,004
Snaga na 7. vodu	10,270 / 10,265	0,002 / 0,004	0,006	0,002
Snaga na 8. vodu	5,965 / 5,963	0,004 / 0,005	0,002	0,001
Snaga na 9. vodu	1,663 / 1,663	0,005 / 0,005	0	0
Snaga na 10. vodu	7,353 / 7,350	0,003 / 0,004	0,003	0,001
Snaga na 11. vodu	3,050 / 3,049	0,004 / 0,005	0	0
Snaga na 12. vodu	1,251 / 1,251	0,005 / 0,005	0	0
Snaga na 13. vodu	5,551 / 5,553	0,005 / 0,005	0,002	0,001
Snaga na 14. vodu	0,137 / 0,137	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 15. vodu	4,163 / 4,164	0,003 / 0,004	0,001	0
Snaga na 16. vodu	8,464 / 8,467	0,004 / 0,005	0,004	0,001
Snaga na 17. vodu	2, 777 / 2, 778	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 18. vodu	2,912 / 2,912	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 19. vodu	1,388 / 1,388	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 20. vodu	5,688 / 5,690	0,001 / 0,002	0,002	0,001
Σ			0,047	0,02

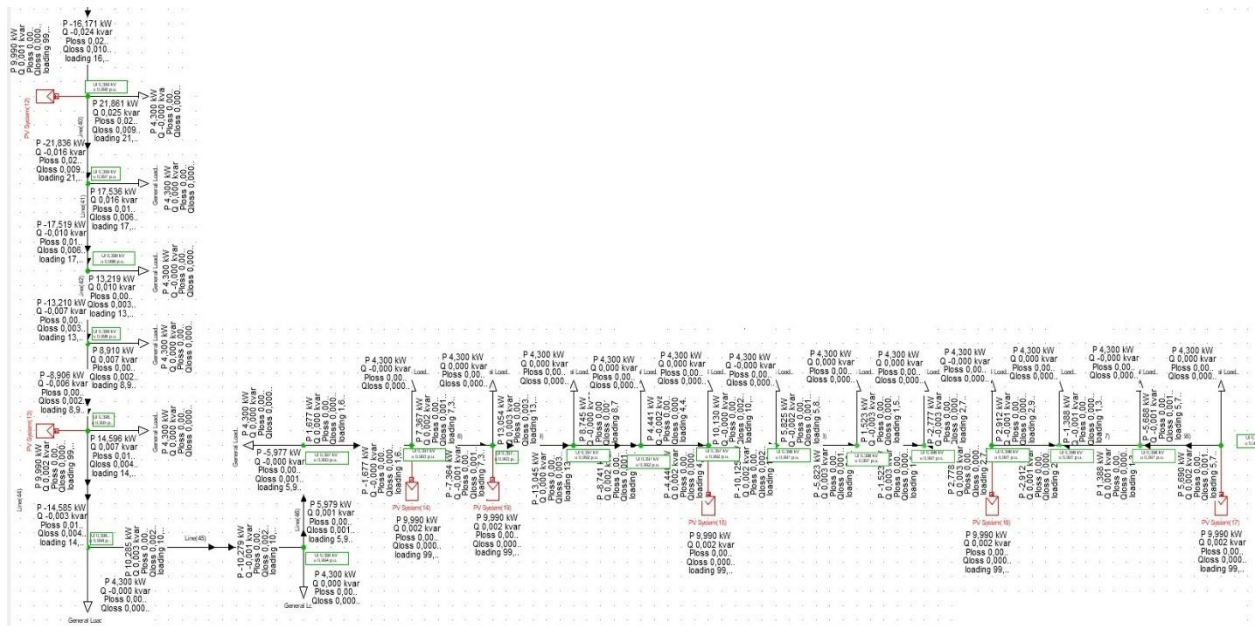
U tablici 4.19. prikazani su rezultati pete simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u drugi radijalni izvod iznosi 6,138 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,003 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u drugi radijalni izvod dobije se 6,135 kW te se

ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 9,99 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 5,69 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 5,69 kW radne snage na 6,135 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 11,825 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U drugom radijalnom izvodu nalazi se osam fotonaponskih sustava te svih osam daje 9,99 kW radne snage, što je ukupno 79,92 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,007 kVAr, zbog gubitaka od 0,001 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,006 kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i osam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje izmjereno kao i kod prvog radijalnog izvoda, na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 11,777%. U ovom slučaju sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,995 p.u. (398 V). Ukupni gubici radne snage u drugom radijalnom izvodu iznose 0,047 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,02 kVAr-a.



Grafikon 4.13. Vrijednosti napona drugog radijalnog izvoda u scenariju 5.

Slika 4.25. prikazuje tokove snaga u trećem radijalnom izvodu kada su pokrenuti optimalni tokovi snaga i svih sedam fotonaponski sustava daju različite iznose jalove snage. Strelice na slici 4.15. prikazuju smjer radne snage.



Slika 4.25. Tokovi snaga trećeg radijalnog izvoda u scenariju 5.

Budući da su jalove snage fotonaponskih sustava različite, pomoću tablice će se prikazati radne i jalove snage koje proizvode fotonaponski sustavi.

Tablica 4.20. Radna i jalova snaga fotonaponskih sustava u scenariju 5

	Radna snaga kW	Jalova snaga kVAr
Fotonaponski sustav na 1. kućanstvu	9,99	0,001
Fotonaponski sustav na 5. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 9. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 10. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 13. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 17. kućanstvu	9,99	0,002
Fotonaponski sustav na 20. kućanstvu	9,99	0,002
Σ	69,93	0,013

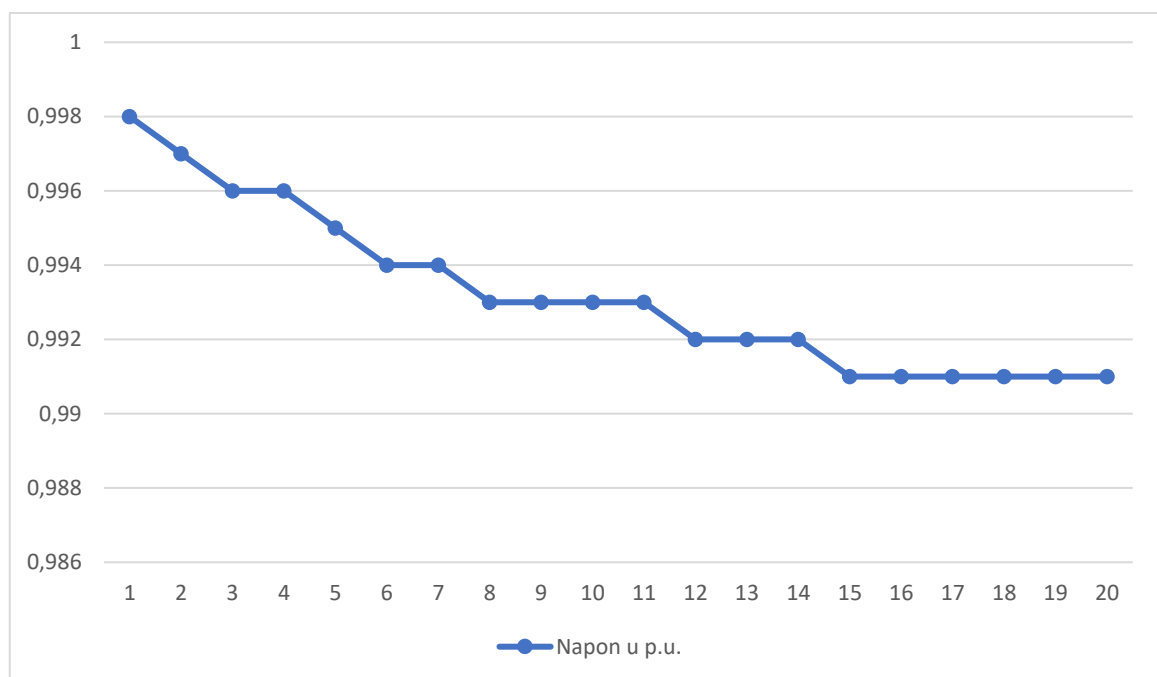
Nadalje pomoću tablice prikazat će se tokovi snaga na trećem radijalnom izvodu te kako bi tablica bila jasnija objasnit će se tok snage na prvom vodu i prvom potrošaču.

Tablica 4.21. Prikaz tokova snaga trećeg izvoda u scenariju 5

	Radna snaga na početku / kraju voda kW	Jalova snaga na početku / kraju voda kVAr	Gubici radne snage kW	Gubici jalova snaga kVAr
Snaga na 1. vodu	16,198 / 16,171	0,034 / 0,024	0,027	0,010
Snaga na 2. vodu	21,861 / 21,836	0,025 / 0,016	0,025	0,009
Snaga na 3. vodu	17,536 / 17,519	0,016 / 0,010	0,016	0,006
Snaga na 4. vodu	13,219 / 13,210	0,010 / 0,007	0,009	0,003
Snaga na 5. vodu	8,910 / 8,906	0,007 / 0,006	0,004	0,002
Snaga na 6. vodu	14,596 / 14,585	0,007 / 0,003	0,011	0,004
Snaga na 7. vodu	10,285 / 10,279	0,003 / 0,001	0,006	0,002
Snaga na 8. vodu	5,979 / 5,977	0,001 / 0,001	0,002	0,001
Snaga na 9. vodu	1,677 / 1,677	0 / 0	0	0
Snaga na 10. vodu	7,367 / 7,364	0,002 / 0,001	0,003	0,001
Snaga na 11. vodu	13,054 / 13,045	0,003 / 0	0,009	0,003
Snaga na 12. vodu	8,745 / 8,741	0 / 0,002	0,004	0,001
Snaga na 13. vodu	4,441 / 4,440	0,002 / 0,002	0,001	0
Snaga na 14. vodu	10,130 / 10,125	0 / 0,002	0,005	0,002
Snaga na 15. vodu	5,825 / 5,823	0,002 / 0,003	0,002	0,001
Snaga na 16. vodu	1,523 / 1,523	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 17. vodu	2,777 / 2,778	0,003 / 0,003	0	0
Snaga na 18. vodu	2,912 / 2,912	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 19. vodu	1,388 / 1,388	0,001 / 0,001	0	0
Snaga na 20. vodu	5,688 / 5,690	0,001 / 0,002	0,002	0,001
Σ			0,126	0,046

U tablici 4.21. prikazani su rezultati pete simulacije. Snaga koju vanjska 10 kV distribucijska mreža daje u treći radijalni izvod iznosi 16,198 kW. Prilikom distribucije do prvog kućanstva dolazi do gubitaka na neizoliranom nadzemnom vodu koji iznosi 0,027 kW, stoga kada se oduzme gubitak na nadzemnom vodu od snage koja ulazi u treći radijalni izvod dobije se 16,171 kW te se

ta snaga nalazi na kraju prvog nadzemnog voda odnosno kod prvog potrošača. Na prvom kućanstvu nalazi se fotonaponski sustav koji proizvodi 9,99 kW radne snage. Kućanstvo ima potrošnju od 4,3 kW što znači da fotonaponski sustav napaja prvog potrošača to jest kućanstvo te 5,69 kW radne snage daje u mrežu. Kada se doda 5,69 kW radne snage na 16,171 kW koji dolaze iz vanjske distribucijske mreže dobije se 21,861 kW radne snage koja je ujedno i snaga na početku drugog voda te ta radna snaga služi za napajanje drugih potrošača to jest kućanstva koja nemaju fotonaponske sustave. U trećem radijalnom izvodu nalazi se sedam fotonaponskih sustava te svih sedam daje 9,99 kW radne snage, što je ukupno 69,93 kW radne snage. Na početku prvog nadzemnog voda jalova snaga iznosi 0,034 kVAr, zbog gubitaka od 0,010 kVAr prema drugom vodu odlazi 0,024kVAr, što je ujedno jalova snaga na početku drugog voda. Budući da se kućanstva napajaju dijelom iz vanjske 10 kV distribucijske mreže i sedam fotonaponskih sustava, neizolirani nadzemni vodovi nisu preopterećeni te je najveće opterećenje kao u prvom i drugom radijalnom izvodu, izmjereno je na drugom neizoliranom nadzemnom vodu i ono iznosi 21,798%. U trećem radijalnom izvodu su kao u prvom i drugom sve sabirnice su zelene boje te najmanje izmjereni napon na sabirnici iznosi 0,991 p.u. (396 V). Ukupni gubici radne snage u trećem radijalnom izvodu iznose 0,126 kW, dok gubici jalove snage iznose 0,046 kVAr-a.



Grafikon 4.14. Vrijednosti napona trećeg radijalnog izvoda u scenariju 5.

4.6. Usporedba rezultata

U ovom potpoglavlju će se analizirati i usporediti rezultati dobiveni u prethodno obrađenim primjerima. U svih pet scenarija ukupna potrošnja svih šezdeset kućanstava iznosi 258 kW. U prvom scenariju kao što je već spomenuto sva trošila dobivaju snagu iz vanjske 10 kV distribucijske mreže. Ukupna radna snaga koju daje vanjska 10 kV mreža iznosi 267,660 kW, dok ukupna jalova snaga iznosi 10,624 kVAr-a. U prvom scenariju snaga koju daje vanjska 10 kV mreža je veća nego u ostalim scenarijima. Budući da su tokovi snaga u ovom slučaju najveći, posljedica toga je da su i gubici u ovom scenariju najveći. Ukupni gubici radne snage iznose 9,69 kW, dok ukupni gubici jalove snage iznose 10,624 kVAr-a.

U drugom scenariju svi fotonaponski sustavi rade s 75% snage i proizvode ukupno 157,5 kW radne snage. Budući da se potrošači napajaju iz fotonaponskih sustava i vanjske 10 kV mreže, radna snaga koja dolazi iz vanjske 10 kV distribucijske mreže iznosi 102,023 kW, dok jalova snaga iznosi 1,587 kVAr-a. Ukupni gubici radne snage u drugom scenariju iznose 1,520 kW. Ukupni gubici jalove snage u drugom scenariju iznose 1,587 kVAr-a.

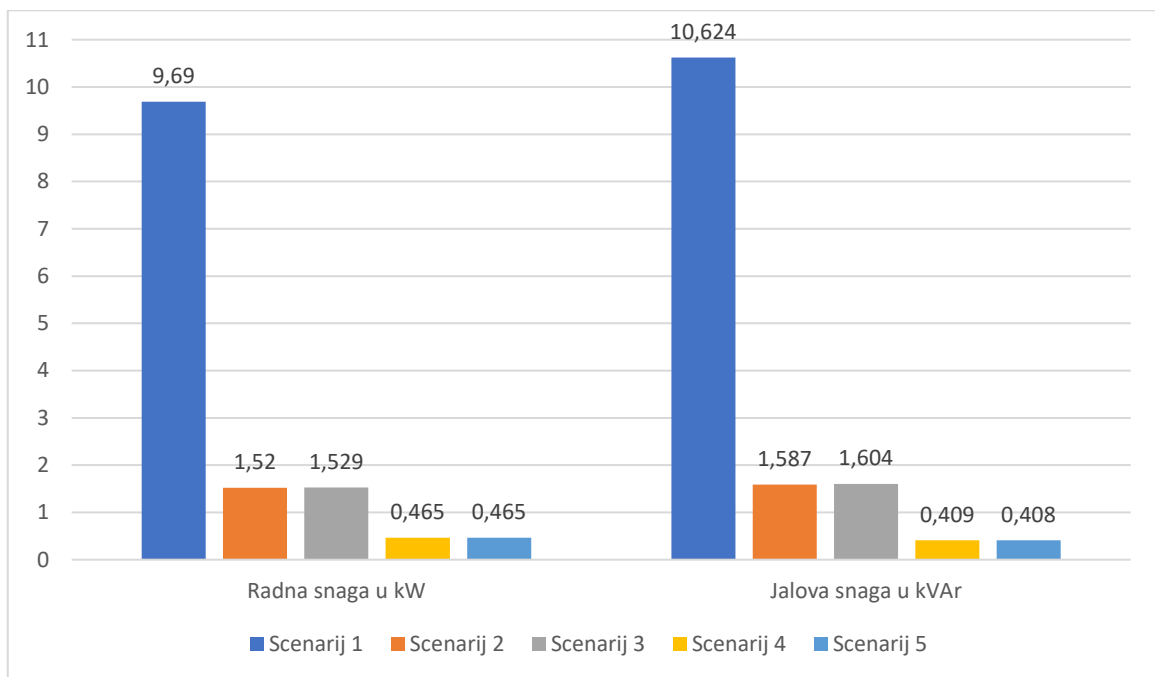
U trećem scenariju je omogućeno programu da sam odabere iznos jalove snage, koju proizvode fotonaponski sustavi putem izmjenjivača, tako da tokovi snaga budu optimalni uz što manje gubitke. U trećem scenariju svi fotonaponski sustavi također daju 7,5 kW radne snage što je ukupno 157,5 kW i ukupno 9,529 kVAr-a jalove snage. Radna snaga koju daje vanjska 10 kV mreža iznosi 102,30 kW. Ukupni gubici radne snage u trećem scenariju iznose 1,529 kW. Ukupni gubici jalove snage u trećem scenariju iznose 1,604 kVAr-a. U scenariju 3 gubici su približno jednaki kao u scenariju 2, međutim prednost trećeg scenarija je što iz mreže ne uzima jalovu snagu za transformaciju i distribuciju energije, nego u mrežu daje 7,935 kVAr-a koja se može iskoristiti za minimizaciju gubitaka u 10 kV mreži ili za napajanje nekog potrošača jalove snage.

U četvrtom scenariju fotonaponski sustavi rade sa približno maksimalnom radnom snagom koja iznosi 9,99 kW, što ukupno daje 209,79 kW radne snage. Budući da se potrošači napajaju iz fotonaponskih sustava i vanjske 10 kV mreže, radna snaga koja dolazi iz vanjske 10 kV distribucijske mreže iznosi 48,689 kW, dok jalova snaga iznosi 0,409 kW. Ukupni gubici radne snage u četvrtom scenariju iznose 0,465 kW. Ukupni gubici jalove snage u četvrtom scenariju iznose 0,409 kVAr-a.

U petom scenariju je kao i u trećem omogućeno da uz radnu snagu, fotonaponski sustavi putem izmjenjivači proizvode jalovu snagu, kako bi tokovi snaga bili optimalni. Svi fotonaponski sustavi proizvode 9,99 kW radne snage, što je ukupno 209,79 kW radne snage, dok ukupna jalova snaga

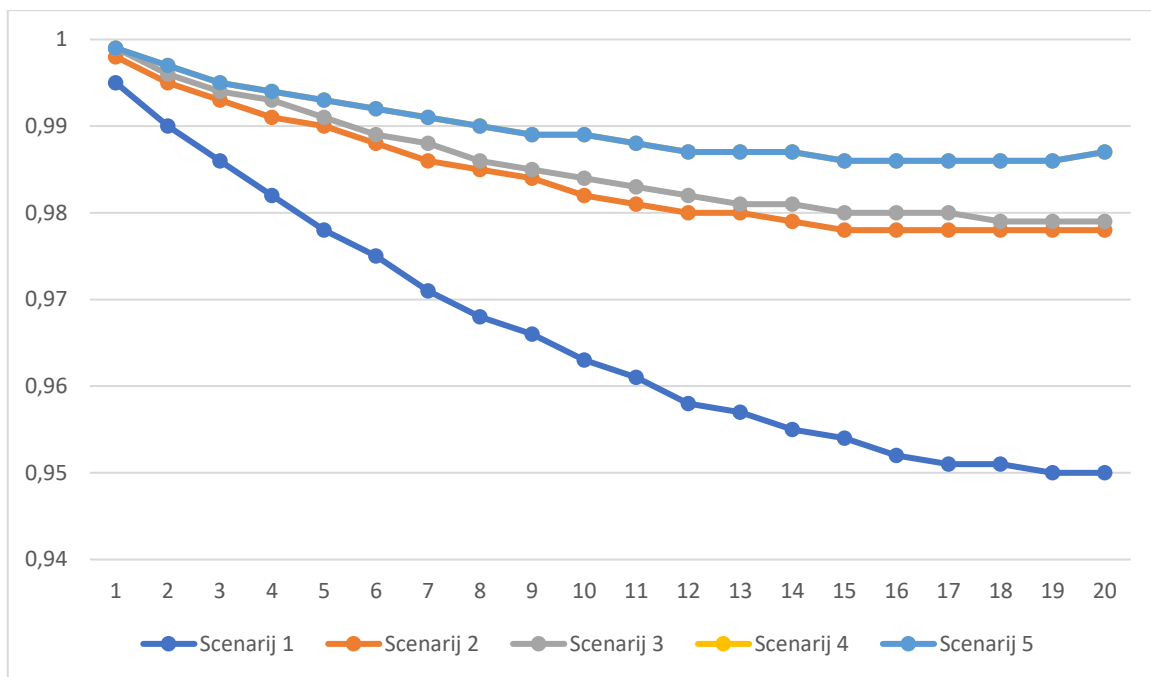
iznosi 0,04 kVAr-a. Radna snaga koju daje vanjska 10 kV mreža iznosi 48,689 kW, dok jalova snaga koju daje 10 kV mreža iznosi 0,37 kVAr. Ukupni gubici radne snage u petom scenariju iznose 0,465 kW. Ukupni gubici jalove snage u petom scenariju iznose 0,408 kVAr-a. Gubici u petom i četvrtom scenariju su jednaki, međutim prednost scenarija 5 je što iz mreže uzima 0,37 kVAr jalove snage, što je manje u odnosu na scenarij 4.

Grafikon 4.15. prikazuje gubitke radne i jalove snage svih scenarija. Prema grafikonu 4.15. vidljivo je da su gubici najveći u scenariju 1, a najmanji u scenariju 5.



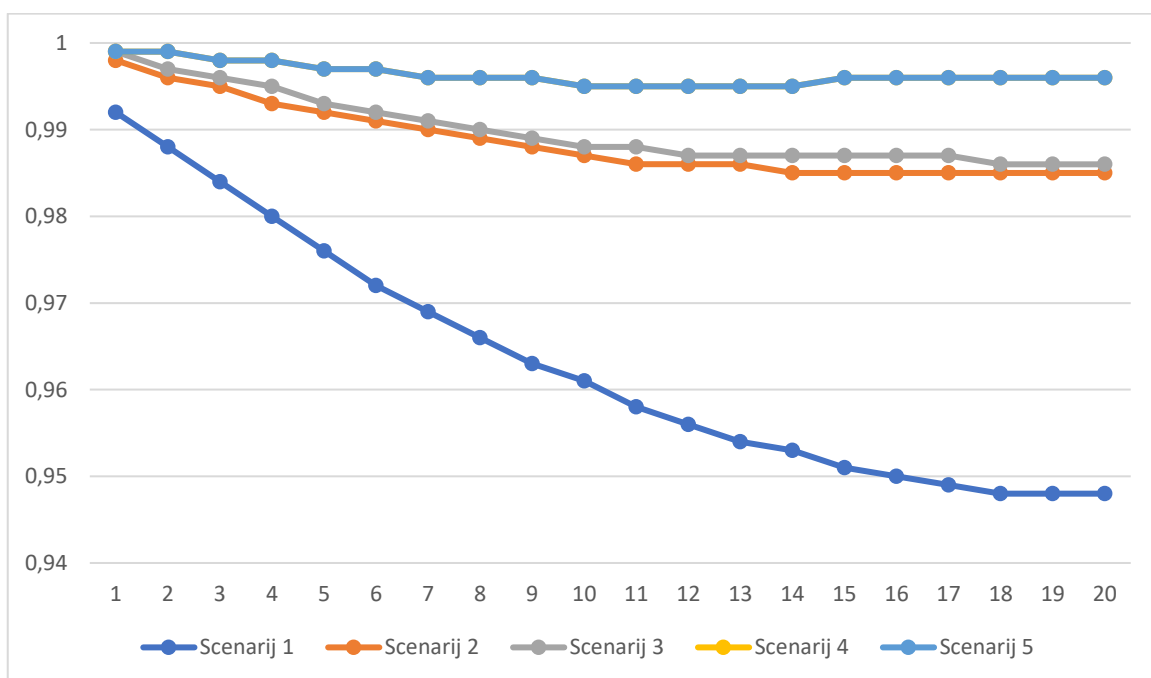
Grafikon 4.15. usporedba gubitaka radne i jalove snage

Grafikon 4.16. prikazuje naponske prilike u prvom radijalnom izvodu svih scenarija. Prema grafikonu 4.16. vidljivo je da su naponske prilike u scenariju 1 najlošije. U tom scenariju kućanstva se napajaju samo iz vanjske 10 kV distribucijske mreže te je vidljivo da napon na zadnjem kućanstvu pada ispod 0,95 p.u., iako je to i dalje u dozvoljenim granicama. Najbolje vrijednosti napona dobivene su u scenariju 4 i 5 kada fotonaponski sustavi daju približno maksimalnu vrijednost radne snage (9,99 kW). Usporedbom scenarija 2 i 3 prikazano je kako optimizacijom mreže i proizvodnjom jalove snage putem izmjenjivača fotonaponskih sustava, dobivene su bolje vrijednosti napona. Stoga je u scenariju 3 vidljiva prednost optimizacije mreže.



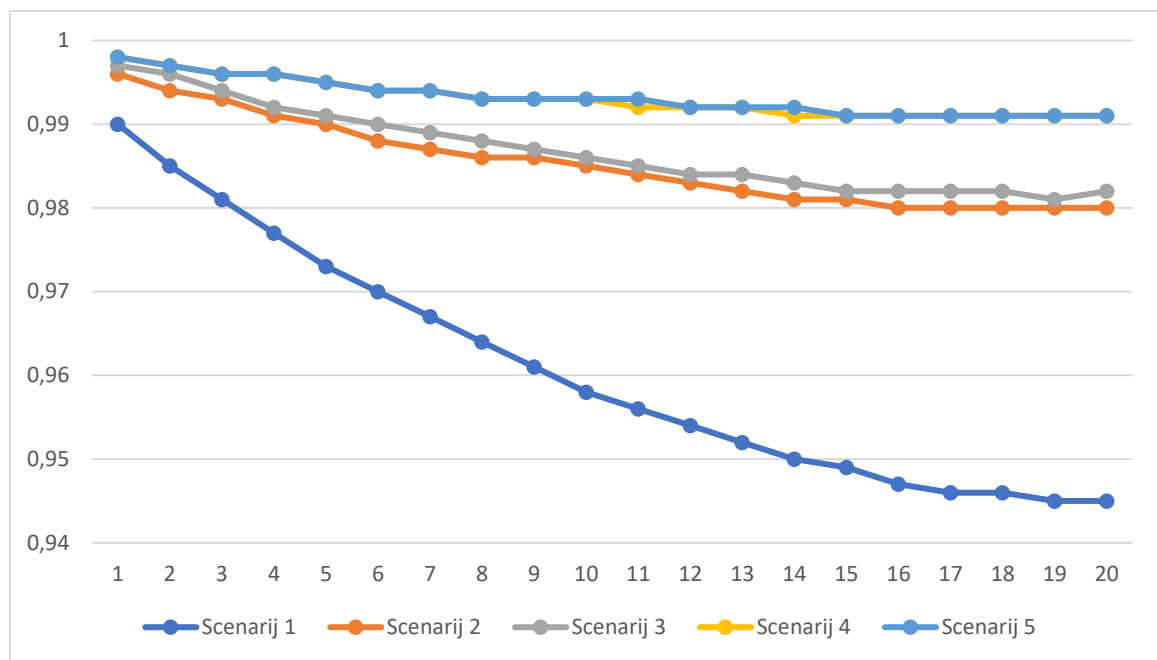
Grafikon 4.16. Usporedba napona prvog radijalnog izvoda

Grafikon 4.17. prikazuje naponske prilike u drugom radijalnom izvodu svih scenarija. Prema grafikonu 4.17. vidljivo je da su kao i u prethodnom grafikonu naponske prilike u scenariju 1 najlošije, a najbolje u scenariju 4 i 5. Također i u ovom grafikonu vidljiva je prednost scenarija 3 kada je mreža optimizirana i fotonaponski sustavi proizvode jalovu snagu. Vrijednosti napona u scenariju 3 su bolje nego u scenariju 2.



Grafikon 4.17. Usporedba napona drugog radijalnog izvoda

Grafikon 4.18. prikazuje naponske prilike u trećem radijalnom izvodu svih scenarija. Kao i u prethodna dva izvoda, najlošije vrijednosti napona su u prvom scenariju kada se kućanstva napajaju samo iz vanjske 10 kV distributivne mreže, te napon na zadnjem kućanstvu pada ispod 0,95 p.u. U ovom grafikonu je vidljivo kako optimizacija mreže u scenariju 5 donosi poboljšanje vrijednosti napona u odnosu na scenarij 4. Vrijednosti napona trećeg radijalnog izvoda u scenariju 5 su najbolje. Kao i u prethodna dva izvoda scenarij 3 ima bolje vrijednosti napona u odnosu na scenarij 2, jer je mreža optimizirana te fotonaponski sustavi proizvode jalovu snagu.



Grafikon 4.18. Usporedba napona trećeg radijalnog izvoda

5. ZAKLJUČAK

Budući da se tehnologija razvija jako brzo, fotonaponski sustavi će postati sve pristupačniji te će u budućnosti rasti broj aktivnih kupaca. Porast broja aktivnih kupaca pozitivno će utjecati na okoliš te će se smanjiti emisije štetnih plinova koje proizvode elektrane na fosilna goriva. Prednost aktivnih kupaca je što pored radne snage mogu proizvoditi jalovu snagu te na taj način smanjiti gubitke u mreži te poboljšati vrijednosti napona. Funkcija cilja diplomskog rada je minimizacija gubitaka. Modelirana je niskonaponska distribucijska mreža s velikim brojem aktivnih kupaca te je simulirano i analizirano pet scenarija. Prikazani su tokovi snaga, optimalni tokovi snaga, gubici radne i jalove snage te vrijednosti napona u sva tri radijalna izvoda.

S obzirom na rezultate dobivene u simulacijama zaključuje se da su najveći gubici u niskonaponskoj distributivnoj mreži kada se sve kućanstva odnosno potrošači napajaju iz vanjske 10 kV distribucijske mreže. U tom slučaju radna i jalova snaga za napajanje svih potrošača dolazi iz 10 kV distribucijske mreže te su tokovi snaga u ovom scenariju najveći. Također u ovom scenariju su vrijednosti napona najlošije ta na krajevima radijalnih izvoda napon padne ispod 0,95 p.u.

Kada su fotonaponski sustavi u funkciji te rade s 75% snage, gubicu radne snage su čak 84,31% manji u odnosu na scenarij 1, a gubici jalove snage su manji za 85,06%, što je svakako prednost scenarija 2 u odnosu na scenarij 1. Također prednost scenarija 2 u odnosu na scenarij 1 je ta što iz vanjske 10 kV distribucijske mreže uzima 61,88% manje radne snage te 85,06% manje jalove snage. U sva tri radijalna izvoda vrijednosti napona su bolje u odnosu na scenarij 1.

Kada fotonaponski sustavi rade s 75% snage te proizvode jalovu snagu, gubici radne snage u odnosu na scenarij 1 su 84,22% manji te su 84,9% manji jalovi gubici. Gubici scenarija 2 i scenarija 3 su približno jednaki, međutim prednost scenarija 3 je što fotonaponski sustavi proizvode jalovu snagu, pokrivaju gubitke jalove snage u radijalnim izvodima i transformatoru te u 10 kV mrežu daju 7,935 kVAr-a jalove snage. Također prednost scenarija 3 je što uzimaju manje radne snage iz 10 kV mreže nego u scenariju 1. Vrijednosti napona u scenariju 3 su bolje nego u prethodna dva scenarija.

U scenariju 4 kada fotonaponski sustavi rade s 99,9% snage, gubici radne snage su manji za 95,2% u odnosu na scenarij 1, te za 69,4% manje u odnosu na scenarij 2 i 3. Gubici jalove snage su manji za 96% u odnosu na scenarij 1 i manji za 74,2% u odnosu na scenarij 2 i 3. također prednost u scenariju 4 je što iz vanjske 10 kV distribucijske mreže uzima 81,8% manje radne snage i 96%

manje jalove snage u odnosu na scenarij 1. Vrijednosti napona u scenariju 4 su bolje nego u prethodnim scenarijima.

U scenariju 5 kada fotonaponski sustavi rade s 99,9% snage te proizvode male vrijednosti jalove snage, gubici su isti kao u scenariju 4, međutim kako fotonaponski sustavi proizvode jedan dio jalove snage, prednost je što u scenariju 5 iz 10 kV distribucijske mreže dolazi 9,5% manje jalove snage nego u scenariju 4. Zaključuje se da su gubici najmanji u scenariju 5 te su vrijednosti napona također najbolje u scenariju 5.

Generalno se zaključuje da u ovom primjeru niskonaponske distribucijske mreže, optimizacijom jalove snage koju daju fotonaponski sustavi, nije ispunjen cilj minimizacije gubitaka jer su gubici približno jednaki kada se mreža ne optimizira. Međutim prednosti optimizacije vidljivi su u vrijednostima napona te su vrijednosti napona nakon optimizacije bolje. Prednost prilikom optimizacije jalove snage koju proizvode fotonaponski sustavi putem izmjenjivača je i ta što dijelom ili potpuno pokrivaju gubitke jalove snage u niskonaponskoj distribucijskoj mreži. Kao što je i prikazano u scenariju 4 kada fotonaponski sustavi proizvode jalovu snagu putem izmjenjivača te u vanjsku 10 kV mrežu daju jalovu snagu i pokrivaju gubitke jalove snage za transformaciju i distribuciju energije. U scenariju 5 je prikazano kako fotonaponski sustavi pokrivaju dio gubitaka za distribuciju energije, stoga iz vanjske 10 kV mreže dolazi manje jalove energije nego u scenariju 4.

LITERATURA

- [1] S. Kalambe and G. Agnihotri, “Loss minimization techniques used in distribution network: Bibliographical survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 184–200, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.075.
- [2] D. Kotur and N. Rajaković, “Optimal reconfiguration of distribution network with participation of distributed electricity prosumers,” in *IET Conference Publications*, 2016, vol. 2016, no. CP711, doi: 10.1049/cp.2016.1018.
- [3] D. Ibram and V. Gueorgiev, “Control of Reactive Power of a Single-Phase Photovoltaic Inverter,” *2020 12th Electr. Eng. Fac. Conf. BuleEF 2020*, 2020, doi: 10.1109/BuleEF51036.2020.9326067.
- [4] L. F. Ochoa and G. P. Harrison, “Minimizing energy losses: Optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 198–205, Feb. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2049036.
- [5] R. N. Adams and M. A. Laughton, “OPTIMAL PLANNING OF POWER NETWORKS USING MIXED-INTEGER PROGRAMMING.,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 121, no. 2, pp. 139–147, 1974, doi: 10.1049/piee.1974.0024.
- [6] R. Bacher and H. Glavitsch, “Loss reduction by network switching,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 447–454, 1988, doi: 10.1109/59.192895.
- [7] J. J. Grainger and S. H. Lee, “Capacity release by shunt capacitor placement on distribution feeders: A new voltage-dependent model,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 5, pp. 1236–1244, 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317385.
- [8] S. Civanlar and J. J. Grainger, “Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part II: The Solution Method,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3284–3290, 1985, doi: 10.1109/TPAS.1985.318843.
- [9] J. Rubinovitz and G. Levitin, “Genetic algorithm for assembly line balancing,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 41, no. 1–3, pp. 343–354, Oct. 1995, doi: 10.1016/0925-5273(95)00059-3.
- [10] C. T. Su, C. F. Chang, and J. P. Chiou, “Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 75, no. 2–3, pp.

- 190–199, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.epsr.2005.03.002.
- [11] N. P. Dash PK, Saha S, “No Title,” *Artif. neural net approach Capacit. Place. power Syst. Proceeding 1st Int. forum Appl. neural networks to power Syst.*, 1991.
- [12] H. T. Yang, Y. C. Huang, and C. L. Huang, “Solution to capacitor placement problem in a radial distribution system using Tabu search method.” Dec. 01, 1995, Accessed: Apr. 16, 2021. [Online]. Available: <https://researchoutput.ncku.edu.tw/zh/publications/solution-to-capacitor-placement-problem-in-a-radial-distribution->.
- [13] Yann-Chang, H. H. T. Yang, and C. L. Huang, “Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 1868–1873, 1996, doi: 10.1109/59.544656.
- [14] O. Y. Mori H, “No Title,” *Parallel tabu search Capacit. Place. radial Distrib. Syst.*, 2000.
- [15] A. A. Eajal and M. E. El-Hawary, “Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 3, pp. 1734–1741, Jul. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2035425.
- [16] K. Prakash and M. Sydulu, “Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems,” 2007, doi: 10.1109/PES.2007.386149.
- [17] I. Ziari, G. Ledwich, and A. Ghosh, “Optimal voltage support mechanism in distribution networks,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 1, pp. 127–135, Jan. 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0277.
- [18] A. M. A. Haidar, H. A. Aziz, K. M. G. Noman, and R. A. Al-Jawfi, “An intelligent placement of distributed capacitance based on loss minimization,” in *2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation, CEC 2011*, Jan. 2011, vol. 2011-January, p. 1, doi: 10.1109/CEC.2011.5949998.
- [19] L. W. Chin HC, “No Title,” *Capacit. placements Distrib. Syst. with fuzzy algorithm. IEEE Reg. 10’s ninth Annu. Int. Conf. vol. 2*, 1994.
- [20] T. E. McDermott, I. Drezga, and R. P. Broadwater, “A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 478–483, 1999, doi: 10.1109/59.761869.

- [21] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon, and M. I. Buhari, "A novel method for loss minimization in distribution networks," Nov. 2002, pp. 251–256, doi: 10.1109/drpt.2000.855672.
- [22] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, "Distributed generation: A definition," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [23] F. S. Abu-Mouti and M. E. El-Hawary, "Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2090–2101, Oct. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2158246.
- [24] A. Kumar, "The question of the poor," in *Third Sector Research*, Springer New York, 2010, pp. 281–298.
- [25] A. Keane and M. O'Malley, "Optimal allocation of embedded generation on distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1640–1646, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.852115.
- [26] A. A. A. Esmín, G. Lambert-Torres, and A. C. Zambroni de Souza, "A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 859–866, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846049.
- [27] A. Moradi and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 1, pp. 271–279, Jan. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905428.
- [28] A. M. El-Zonkoly, "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimisation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 7, pp. 760–771, Jul. 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0676.
- [29] K. Zou, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, and S. Perera, "Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 112–123, Jan. 2012, doi: 10.1109/TSTE.2011.2166281.
- [30] Y. S. Kim KH, Lee YJ, Rhee SB, Lee SK, "No Title," *Dispersed Gener. Place. using fuzzy-GA Distrib. Syst. Proc. IEEE power Eng. Soc. summer Meet.*, vol. 3;p.
- [31] N. Mithulananthan and L. Van Phu, "Distributed Generator Placement in Power Distribution System Using Genetic Algorithm to Reduce Losses," 2004. Accessed: Apr.

- 18, 2021. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/41639>.
- [32] J. O. Kim, S. W. Nam, S. K. Park, and C. Singh, "Dispersed generation planning using improved Hereford ranch algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 47, no. 1, pp. 47–55, Oct. 1998, doi: 10.1016/s0378-7796(98)00038-8.
- [33] Y. K. Wu, C. Y. Lee, L. C. Liu, and S. H. Tsai, "Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 3, pp. 1678–1685, Jul. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2046339.
- [34] L. Wang and C. Singh, "Population-based intelligent search in reliability evaluation of generation systems with wind power penetration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1336–1345, 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.922642.
- [35] C. F. Chang, "Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 1747–1755, 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2002169.
- [36] L. Zamboni and L. H. A. Monteiro, "Optimization of the topology of electric energy distribution networks by using algorithm inspired on ant behaviors," in *IEEE Latin America Transactions*, 2009, vol. 7, no. 1, pp. 85–91, doi: 10.1109/TLA.2009.5173469.
- [37] I. Hussain and A. K. Roy, "Optimal size and location of distributed generations using Differential Evolution (DE)," in *Proceedings - 2012 2nd National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing, CISP 2012*, 2012, pp. 57–61, doi: 10.1109/NCCISP.2012.6189708.
- [38] F. S. Abu-Mouti and M. E. El-Hawary, "Heuristic curve-fitted technique for distributed generation optimisation in radial distribution feeder systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 2, pp. 172–180, Feb. 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0739.
- [39] R. A. Hooshmand and S. Soltani, "Fuzzy optimal phase balancing of radial and meshed distribution networks using BF-PSO algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 47–57, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2167991.
- [40] H. T. Yang, Y. Te Tzeng, and M. S. Tsai, "Loss-minimized distribution system reconfiguration by using improved multi-agent based particle swarm optimization," 2010, doi: 10.1109/APPEEC.2010.5448157.

- [41] B. M. Xiong Ning, Cheng Haozhong, Yao Liangzhong, “No Title,” *Switch Gr. based Tabu search algorithm Distrib. Netw. reconfiguration. Proc. third Int. Conf. Electr. Util. Deregul. Restruct. power Technol.*, 2008.
- [42] K. N. de-Oliveira CCB, “No Title,” *Heuristic Model Sel. Alloc. shunt Capacit. Volt. Regul. Electr. power Distrib. Syst.*, 1999.
- [43] K. Prasad, R. Ranjan, N. C. Sahoo, and A. Chaturvedi, “Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated genetic algorithm,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 1211–1213, Apr. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2005.844245.
- [44] S. Naka, T. Genji, T. Yura, and Y. Fukuyama, “A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation,” *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 11. p. 57, 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4311821.
- [45] D. Zhang, Z. Fu, and L. Zhang, “An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 5–6, pp. 685–694, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.epsr.2006.06.005.
- [46] Y. Hayashi and J. Matsuki, “Loss Minimum Configuration of Distribution System Considering N-1 Security of Dispersed Generators,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 636–642, Feb. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2003.821438.
- [47] C. C. Liu, S. J. Lee, and S. S. Venkata, “An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 619–626, 1988, doi: 10.1109/59.192914.
- [48] T. Taylor and D. Lubkeman, “Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 1, pp. 239–246, 1990, doi: 10.1109/61.107279.
- [49] H. C. Chang and C. C. Kuo, “Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 227–238, 1994, doi: 10.1016/0378-7796(94)90018-3.
- [50] M. A. Matos and P. Melo, “Multiobjective Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration Using Simulated Annealing.”
- [51] V. Parada, “Optimization of Electrical Distribution Feeders Using Simulated Annealing,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, Accessed: Apr. 18, 2021. [Online]. Available:

https://www.academia.edu/19377072/Optimization_of_Electrical_Distribution_Feeders_Using_Simulated_Annealing.

- [52] J. Y. Fan, L. Zhang, and J. D. McDonald, "Distribution network reconfiguration: Single loop optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1643–1647, 1996, doi: 10.1109/59.535709.
- [53] A. Y. Abdelaziz, R. A. Osama, and S. M. El-Khodary, "Reconfiguration of distribution systems for loss reduction using the hyper-cube ant colony optimisation algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 2, pp. 176–187, Feb. 2012, doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0281.
- [54] Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim, and G. V. Loganathan, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search," *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60–68, Feb. 2001, doi: 10.1177/003754970107600201.
- [55] M. Mahdavi, M. Fesanghary, and E. Damangir, "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems," *Appl. Math. Comput.*, vol. 188, no. 2, pp. 1567–1579, May 2007, doi: 10.1016/j.amc.2006.11.033.
- [56] R. A. Jabr, R. Singh, and B. C. Pal, "Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1106–1115, May 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2180406.
- [57] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 9, no. 4, pp. 101–102, 1989, doi: 10.1109/MPER.1989.4310642.
- [58] H. W. Hong, C. T. Sun, V. M. Mesa, and S. Ng, "Protective device coordination expert system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 1, pp. 359–365, Jan. 1991, doi: 10.1109/61.103759.
- [59] Dr. sc. Branko Vuk i sur., "Energija u Hrvatskoj 2017 - Energy in Croatia 2017," *REPUBLIKA Hrvat. MININSTARSTVO Gospod. I ODRŽIVOG Razvoj.*, 2020.
- [60] "PHOTOVOLTAIC SYSTEM – FIMA Technology." dostupno na linku: <https://fimatechnology.com/photovoltaic-system/> (accessed Jul. 11, 2021).
- [61] DigSILENT službene internetske stranice, dostupno na navedenom linku: <https://www.digsilent.de/en/>. Datum pristupa: 20.8.2021.

SAŽETAK

U ovom radu definirani su pojmovi distribuirane proizvodnje (DG) i aktivnih kupaca. Funkcija cilja u ovom diplomskom radu je minimizacija gubitaka te su opisane metode i tehnike za minimizaciju gubitaka u distributivnoj mreži. Teorijski je objašnjeno kako fotonaponski sustavi mogu proizvoditi jalovu snagu pomoću izmjenjivača. U radu je analizirana jedna niskonaponska distributivna mreža s velikim brojem aktivnih kupaca. Niskonaponska distributivna mreža s tri radijalna izvoda modelirana je pomoću programa DIgSILENT PowerFactory. U programu su korišteni tokovi snaga, u kojima fotonaponski sustavi proizvode samo radnu snagu te je korišten modul optimalnih tokova snaga, pomoću kojega sam program određuje iznos jalove snage koju će proizvoditi fotonaponski sustavi, kako bi gubici bili što manji. Analizirani su tokovi snaga u slučaju kada fotonaponski sustavi nisu u funkciji. Također su analizirani tokovi snaga i optimalni tokovi snaga kada fotonaponski sustavi rade s 75% snage i 99,9% snage. Za sve scenarije prikazani su gubici radne i jalove snage, vrijednosti napona te su uspoređeni rezultati.

Ključne riječi: Aktivni kupac, minimizacija gubitaka, distribuirana proizvodnja, fotonaponski sustavi

OPTIMIZATION OF PROSUMER-RICH DISTRIBUTION NETWORK

ABSTRACT

This paper defines the concepts of distributed generation (DG) and prosumers. The objective function in this thesis is to minimize losses, and methods and techniques for minimizing losses in the distribution network are described. It is theoretically explained how photovoltaic system can produce reactive power using inverters. The paper analyses a low voltage prosumer-rich distribution network. The low voltage distribution network with three radial terminals was modelled using the DIgSILENT PowerFactory program. The program uses power flows, in which photovoltaic system produce only active power, and uses the module of optimal power flows, with which the program itself determines the amount of reactive power that will be produced by photovoltaic system, to minimize losses. Power flows in the case of photovoltaic system are not in operation are analysed. Power flows and optimal power flows when photovoltaic system operate at 75% power and 99.9% power were also analysed. For all scenarios, active and reactive power losses, voltage values are presented, and the results are compared.

Key words: Prosumers, minimization losses, distributed generation, photovoltaic systems

ŽIVOTOPIS

Ivan Lukić

Matije Gupca 83, 33517 Mikleuš

Mob: 095/917-5016

Email: illukic@etfos.hr

Ivan Lukić rođen je 1996. godine u Frankfurtu. Završio je osnovnu školu u Mikleuš-u. Potom se upisuje u srednju školu Marka Marulića u Slatini, smjer elektrotehnika. Srednju školu završio je 2015. sa vrlo dobrim uspjehom. 2015. godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2019. godine kada upisuje i diplomski studij elektrotehnike.