

Integracija fotonaponskih elektrana u niskonaponsku distribucijsku mrežu

Barić, Anđela

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:193013>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

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



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

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**INTEGRACIJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U
NISKONAPONSKU DISTRIBUCIJSKU MREŽU**

Završni rad

Anđela Barić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Andela Barić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. pristupnika, god.	4786, 28.07.2020.
JMBAG:	0165086733
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Integracija fotonaponskih elektrana u niskonaponsku distribucijsku mrežu
Znanstvena grana završnog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	U radu je potrebno istražiti dostupnu literaturu i objasniti kako priključenje fotonaponskih elektrana utječe na niskonaponsku distribucijsku mrežu. Na primjeru niskonaponske distribucijske mreže, koristeći se računalnim programom, ispitati kolika je maksimalna integracija fotonaponskih elektrana, a da se ne naruše pogonska ograničenja mreže. Tema rezervirana za: Andela Barić
Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:	04.07.2024.
Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:	15.07.2024.
Ocjena završnog rada nakon obrane:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:	15.07.2024.

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

Osijek, 15.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Anđela Barić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4786, 28.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Integracija fotonaponskih elektrana u niskonaponsku distribucijsku mrežu**

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 pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA RADA	2
3. FOTONAPONSKI SUSTAVI I ELEKTRANE	4
3.1. Fotonaponska ćelija.....	4
3.2. Fotonaponski modul i niz	5
3.3. Fotonaponski sustavi (elektrane)	6
4. INTEGRACIJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U DISTRIBUCIJSKU MREŽU	9
4.1. Struktura niskonaponskih mreža	9
4.2. Utjecaj priključka i rada FN elektrane na mrežu	11
4.3. Prednosti i problemi FN sustava povezanih na mrežu	11
4.4. Utjecaj FN na napon niskonaponske mreže	12
5. SIMULACIJA UTJECAJA FN SUSTAVA NA NN MREŽU	16
5.1. Prikaz mreže korištene za simulaciju	16
5.2. Provođenje simulacije	20
5.3. Rezultati simulacije za radijalnu mrežu	21
5.3.1. Osnovni slučaj.....	21
5.3.2. Djelomična integracija FN (5 kW)	22
5.3.4. Potpuna integracija FN (7,5 kW)	24
5.3.5. Potpuna integracija FN (7,5 kW) i 50% manji teret	25
5.3.6. Usporedba svih scenarija radijalne mreže	26
5.4. Rezultati simulacije za zamkastu mrežu.....	28
5.4.1. Osnovni slučaj.....	28
5.4.2. Djelomična integracija FN (5 kW)	30
5.4.3. Potpuna integracija FN (5 kW)	30
5.4.4. Potpuna integracija FN (7,5 kW)	32
5.4.5. Potpuna integracija FN (7,5 kW) i 50% manji teret	33
5.4.6. Usporedba svih simulacija zamkaste mreže.....	35
5.5. Usporedba rezultata simulacija radijalne i zamkaste mreže	36
6. ZAKLJUČAK	41
LITERATURA	42
SAŽETAK	43
ABSTRACT	43

1. UVOD

Sve češća primjena fotonaponskih elektrana rezultira većim brojem testiranja i analiziranja njihovih utjecaja na distribucijsku mrežu. Posebno se analiziraju negativni utjecaji poput primjerice utjecaj na promjenu napona u mreži, snage u mreži i gubitaka u mreži. No zbog toga što je solarna energija jako isplativa i ekološki prihvatljiva, traže se rješenja za maksimalnu iskoristivost i probleme koje stvara integracija fotonaponskih elektrana. Ovaj rad bavi se testiranjem utjecaja fotonaponskih elektrana na dvije različite strukture niskonaponske distribucijske mreže i analizom dobivenih rezultata.

U drugom poglavlju, ukratko se opisuju radovi slične tematike, te je strukturirano kao uvod u područje ovog rada. Nakon toga slijedi treće poglavlje u kojem je teorijski opisan način rada fotonaponskih modula, te strukture i vrste fotonaponskih elektrana. Zatim u četvrtom poglavlju prikazuju se i opisuju strukture mreža na kojima se provode simulacije i teorijski se opisuju utjecaji fotonapona na niskonaponsku mrežu, te integracija fotonapona u mrežu. U posljednjem poglavlju, poglavlju pet, provedena je simulacija na dvije različite strukture mreže raznim scenarijima. Nakon simulacije obavlja se analiza i usporedba dobivenih rezultata na osnovu kojih se donosi zaključak ovog rada.

1.1. Zadatak završnog rada

U radu je potrebno istražiti dostupnu literaturu i objasniti kako priključenje fotonaponskih elektrana utječe na niskonaponsku distribucijsku mrežu. Na primjeru niskonaponske distribucijske mreže, koristeći se računalnim programom, ispitati kolika je maksimalna integracija fotonaponskih elektrana, a da se ne naruše pogonska ograničenja mreže.

2. PREGLED PODRUČJA RADA

Fotonaponske (FN) elektrane su se u posljednjem desetljeću vrlo brzo razvile i dalje se razvijaju zbog praktičnosti i ekonomičnosti. Međutim, susreću se s nekolicinom problema kada se radi o integraciji fotonaponske elektrane na distribucijsku mrežu. Kako fotonaponske elektrane utječu na distribucijsku mrežu i koje posljedice stvaraju opisano je u raznim znanstvenim, diplomskim, te završnim radovima, neke od njih ćemo i ukratko navesti te opisati.

U literaturi [1] autorica kroz svoj rad prikazuje napredak obnovljivih izvora u Hrvatskoj, te kroz simulaciju opisuje utjecaje priključenja FN sustava i distribuiranih izvora na mrežu. Svaka simulacija prikazuje tokove snaga i naponske promjene u mreži za slučajeve kada se FN elektrana uključuje na drugim izvodima mreže.

Zatim u literaturi [2] autori malo detaljnije testiraju utjecaj FN sustava ne samo na napon nego i na faktor snage te strujne harmonike. Simuliran je tipični niskonaponski razvodni vod s instaliranim solarnim fotonaponskim uređajima. To testiranje provodilo se u Jordanu te su podatci o tom dovodu dobiveni od Jordanske elektroprivrede. Nakon detaljne analize utjecaja autori su grafovima i formulama prikazali te opisali kako integracijom FN elektrane na niskonaponsku mrežu dolazi do porasta napona, smanjenja faktora snage i povećanja THD-a („Total harmonic distortion“) u niskonaponskim distribucijskim vodovima.

Za razliku do prethodne literature, u sljedećoj literaturi [3] osim što se analizira naponska stabilnost tuniške prijenosne mreže s fotonaponskom integracijom, tu se opisuje i strategija za regulaciju napona u prijenosnom sustavu. Prijenosni sustav koristi STATCOM modul za rješavanje pada napona i utjecaja na napon i stabilnost u prijenosnoj mreži. Ovaj rad također analizira i utjecaj STATCOM upravljačkog sustava na sprječavanje kombinacije napona ubrizgavanja s harmonicima da postignu čistu kompenzaciju napona. Rezultati simulacije pokazuju da postoji značajno poboljšanje parametara i stacionarne stabilnosti sustava sa umetanjem STATCOM-a.

Slično kao u prethodnoj literaturi tako se i u literaturi [4] prikazuje i problematika i rješenje. Problematika u toj literaturi je utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije, kao i problematika rješavanja projekta i proračuna solarne elektrane za dobivanje što bolje proizvodnje električne energije i smanjenje negativnih posljedica u točki priključenja na elektroenergetsku mrežu. Sve je bazirano na stvarnim podacima i mjerenjima te se preko proračuna i simulacije dobije na kraju točan broj modula koji bi se postavljali na krov te se prema ukupnoj snazi FN modula određuje snaga izmjenjivača.

Nadalje, literatura [5] bavi se analizom utjecaja FN sustava na mrežu koja se nalazi u postrojenju za preradu soli u Indoneziji. Učinak dodavanja FN sustava u postrojenje za preradu soli kao drugog izvora električne energije na kupca ima značajan utjecaj u pogledu kvalitete energije i dugoročne uštede te se preko simulacije dokazuje da se napajanje može podijeliti i da se može povećati napon kako bi nazivni napon ostao unutar navedenih granica. Ušteda energije također se može postići kada FN dobije optimalnu apsorpciju sunčeve svjetlosti koja utječe na izlaznu FN snagu.

S obzirom na prethodne literature u ovom radu će se analizirati utjecaj FN elektrana na niskonaponsku (NN) distribucijsku mrežu tako što ćemo promatrati promjene napona i ostale utjecaje na različite strukture NN distribucijskih mreža.

3. FOTONAPONSKI SUSTAVI I ELEKTRANE

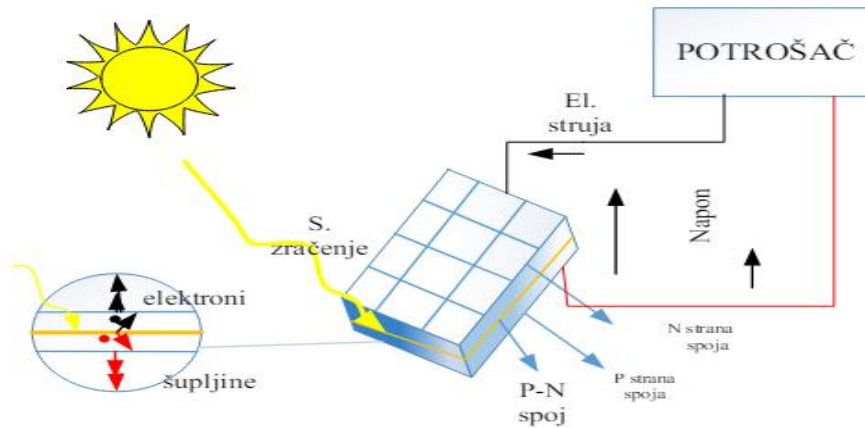
Solarna energija trenutno je jedna od najvažnijih oblika čiste i obnovljive energije te će u budućnosti biti još važnija jer se ona nažalost još ne upotrebljava u mjeri u kojoj je to potrebno kako bi se počele spriječavati ozbiljnije posljedice globalnog zatopljenja. Sunčeva energija može se direktno pretvarati u električnu te u toplinsku energiju. Električnu energiju dobivamo fotonaponskom pretvorbom, a fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba sunčeve svjetlosti u električnu struju putem fotonaponskih ćelija. Nakon što fotoni pogode odnosno padnu na fotonaponsku ćeliju, oni se mogu reflektirati od ćeliju, proći kroz nju ili biti apsorbirani te samo fotoni koji su apsorbirani mogu dati energiju za oslobađanje elektrona i proizvodnju električne struje.

3.1. Fotonaponska ćelija

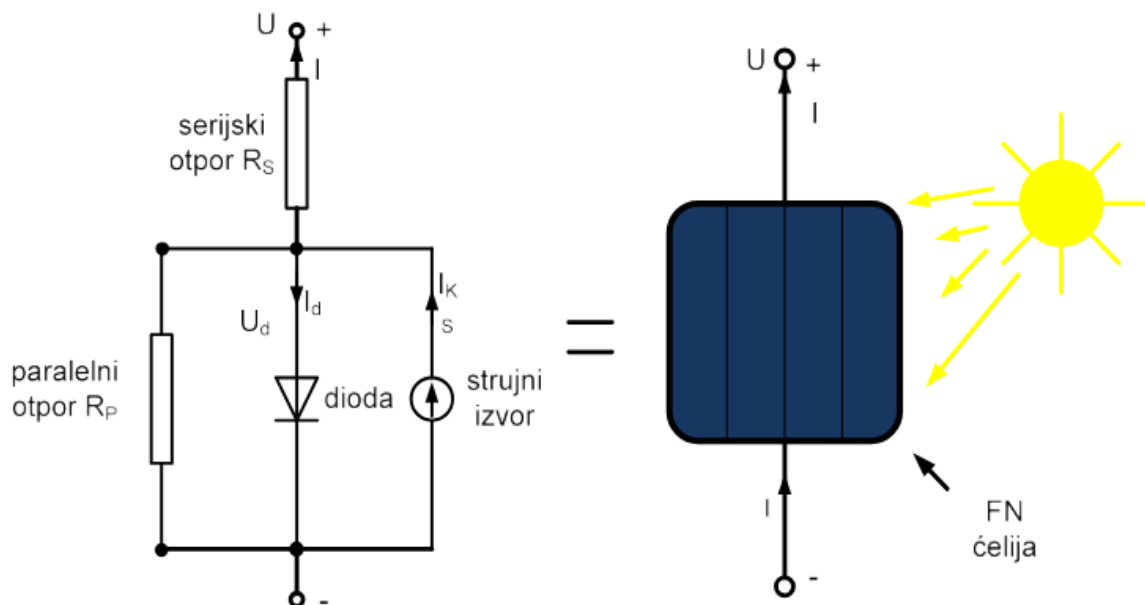
Uređaji za upijanje fotona i uređaji koji provode fotonaponsku pretvorbu nazivaju se fotonaponskim ili solarnim ćelijama i one su glavni element fotonaponskog modula. Ona je pasivan fotokemijski pretvarač koji za gibanje oslobođenih elektrona zahtjeva vanjski izvor energije. U praktičnim su primjenama sunčane ćelije međusobno povezane u veće cjeline koje se zovu fotonaponski moduli. Fotonaponski moduli osiguravaju mehaničku čvrstoću te štite sunčane ćelije i kontakte od korozije i vanjskih utjecaja. Materijali koji se danas najčešće koriste za proizvodnju FN ćelija su [6]:

- Kristalni silicij (monokristalni, polikristalni i trakasti silicij)
- Tankoslojni materijali (amorfni silicij, bakar indij diselenid, kadmij telurid)

Struktura FN ćelije sastoji se od metalnih kontakata koji su postavljeni na obje strane ploče za prikupljanje struje koja je inducirana fotonima na ćelijama. Kontakt je omogućen preko tamne odnosno donje površine i na jednom bridu svijetle odnosno gornje površine te se još sastoji od tanke vodljive očiće na preostaloj gornjoj površini za skupljanje struje i za puštanje prolaza svjetla. Osim toga ćelija se još sastoji od anti-reflektirajućeg sloja da se što više umanjí refleksija dok je mehanička zaštita staklo s prozirnim ljepilom. Ćelije uglavnom funkcioniraju tako što se elektroni kreću po ćeliji što rezultira stvaranje električnog polja, a takav spoj omogućava struji tok samo u jednom smjeru (isto vrijedi i za elektrone) nakon što je ćelija izložena svjetlu, što je vidljivo na slici 3.1 dok je na slici 3.2. prikazana nadomjesna shema FN ćelije.



Slika 3.1. Prikaz funkcije FN ćelije [1]



Slika 3.2. Nadomjesna shema FN ćelije [1]

3.2. Fotonaponski modul i niz

FN ćelija je temeljni gradivni blok FN sustava, no jedna ćelija proizvodi samo 1-5 W uz napon od oko 0,6 V što je premalo za većinu primjena i zato ih se električno povezuje u modul (serijsko paralelni spoj ćelija) koji je zaštićen od atmosferskih utjecaja. No da bi se dobila određena snaga FN sustava potrebno je spojiti nekoliko FN modula i spajanjem nekoliko FN modula dobije FN niz. Moduli se mogu spajati u niz paralelno što znači da napon raste u odnosu na broj modula, te se mogu spajati i serijski što znači da struja raste u odnosu na broj modula. Slika 3.3. prikazuje nam primjer fotonaponskih modula povezanih u niz na stambenoj kući.



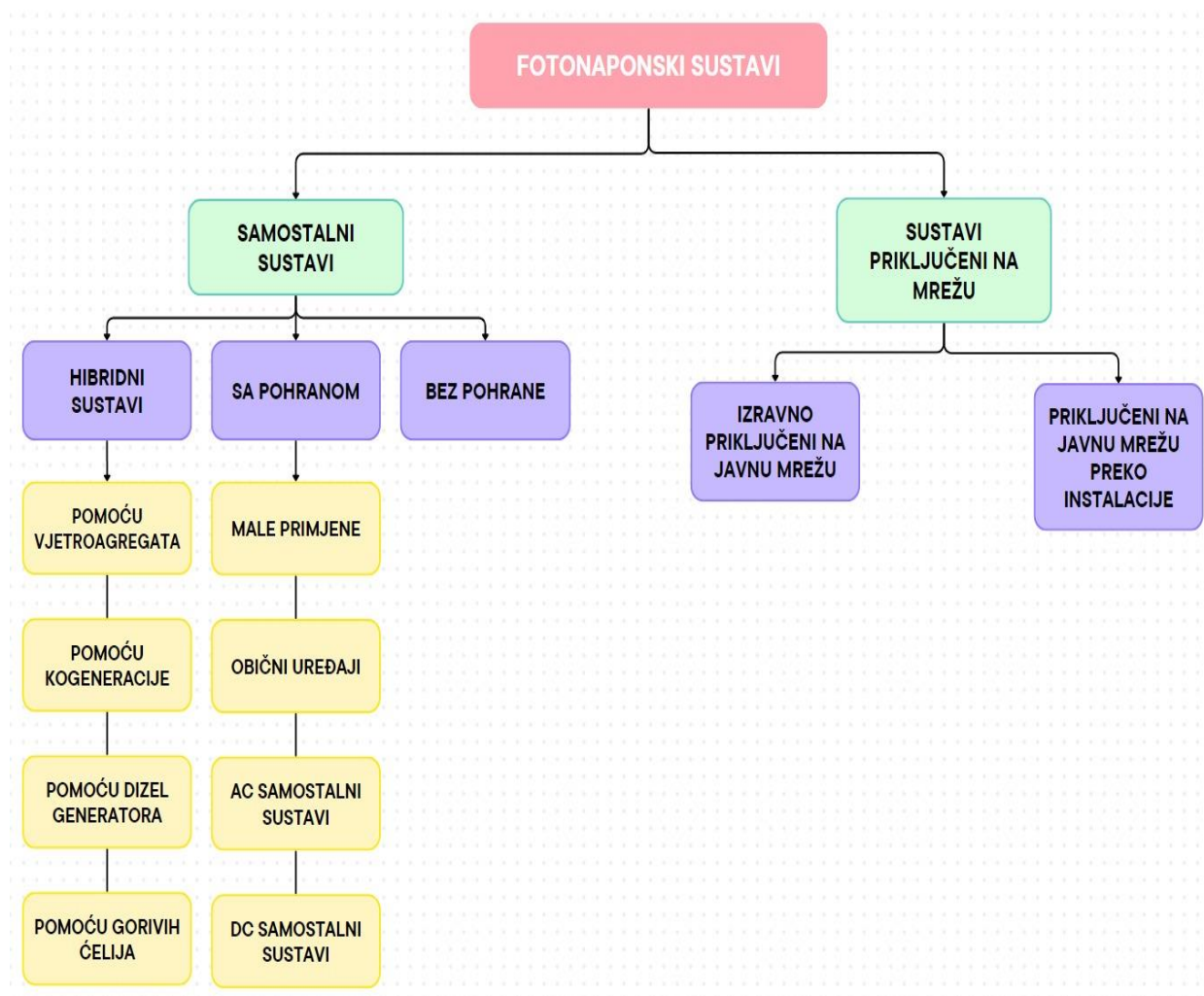
Slika 3.3. Polikristalni fotonaponski moduli/fotonaponski niz na krovu kuće (Vinkovci)

3.3. Fotonaponski sustavi (elektrane)

Osim modula i nizova, fotonaponski sustav čine još i drugi elementi koji su nužni za raspoloživost električne energije potrošaču. Ključni element u FN sustavu su energetske pretvarači koji služe za pretvaranje proizvedene istosmjerne struje u izmjeničnu struju koju koristi korisnik ili mreža. Osim pretvarača također su važni i uređaji za pohranu energije kojima se omogućava konstantna prisutnost električne energije. Fotonaponski sustavi dijele se u dvije skupine, a to su:

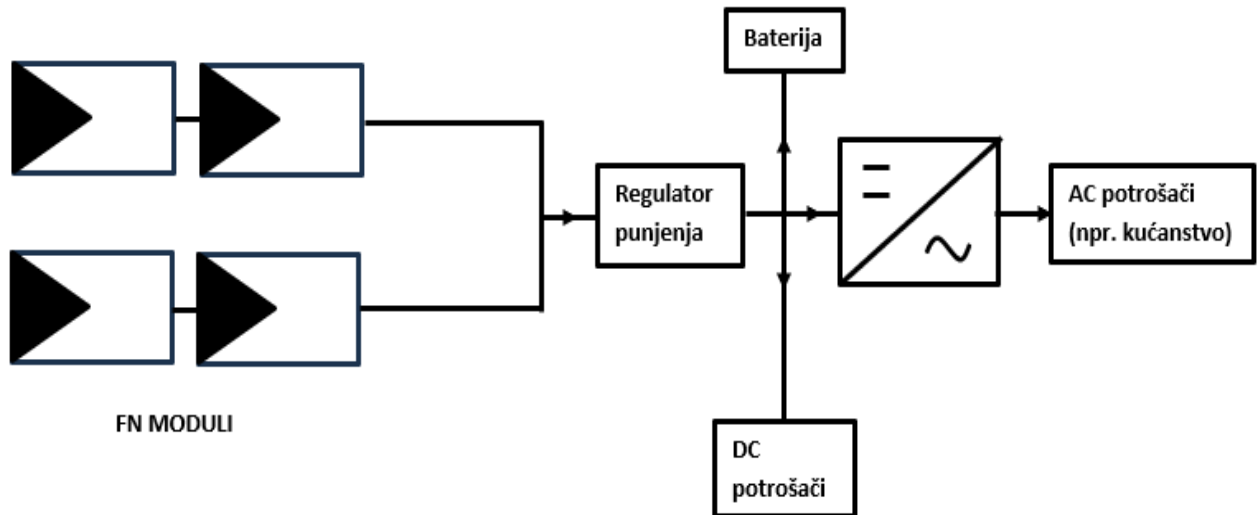
- Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu odnosno autonomni FN sustavi (eng. off-grid)
- Fotonaponski sustavi koji su priključeni na mrežu odnosno umreženi sustavi (eng. on-grid)

Detaljnija podjela može se vidjeti na slici 3.4 [7].



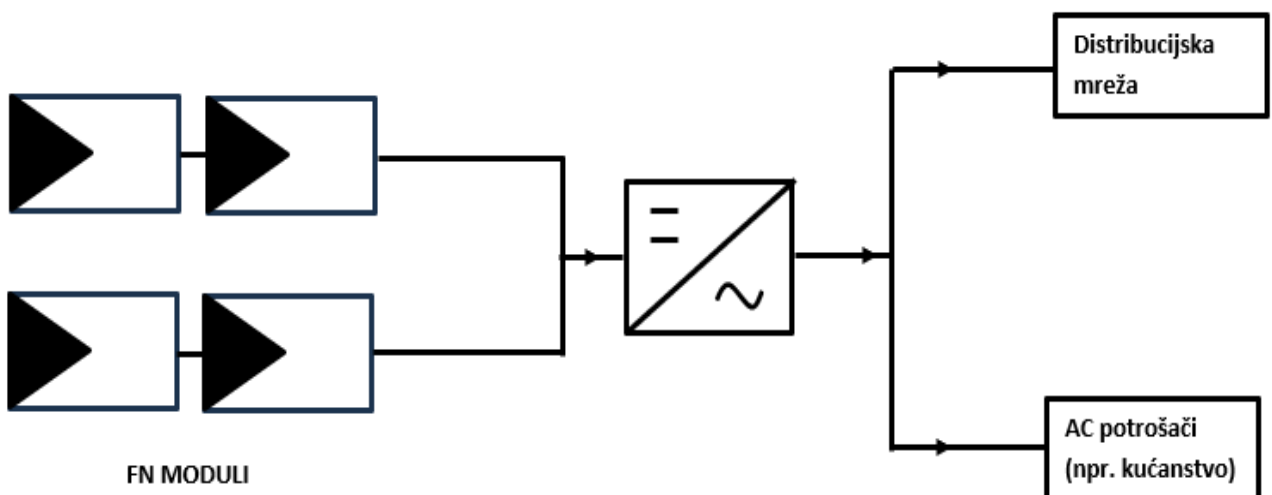
Slika 3.4. Podjela fotonaponskih sustava

Off-grid tj. autonomni sustavi su postrojenja koja nisu povezana na mrežu i sastoje se od FN modula i sustava za skladištenje koji osigurava opskrbu električnom energijom čak i kada je osvjetljenje slabo ili kada je mrak, što je prikazano blok shemom na slici 3.5. Budući da struja koju isporučuje FN elektrana daje jednosmjernu struju (DC), a ako postrojenje korisnika zahtijeva izmjeničnu struju (AC), potreban je inverter. Takva postrojenja su povoljna s tehničkog i financijskog aspekta jer mogu zamijeniti motor-generator setove kad god električna mreža nije prisutna ili kad god ju je teško dosegnuti. Osim toga, u off-grid konfiguraciji, FN polje je predimenzionirano tako da se tijekom sati insolacije može osigurati i opskrba opterećenja kao i punjenje skladišnih baterija s određenom sigurnosnom marginom uzimajući u obzir dane sa slabom insolacijom, što je navedeno u literaturi [8].



Slika 3.5. Blok shema off-grid odnosno autonomnog FN sustava

Postrojenja trajno povezana na mrežu (on-grid) crpe energiju iz mreže tijekom sati kada FN elektrana ne može proizvesti energiju potrebnu za zadovoljavanje potreba potrošača, čija je blok shema prikazana na slici 3.6. Nasuprot tome, ako FN sustav proizvodi višak električne energije, višak se stavlja u mrežu, koja stoga može funkcionirati kao veliki akumulator: kao posljedica toga, sustavi povezani na mrežu ne trebaju uređaje za pohranu energije. Naime, energija proizvedena blizu područja potrošnje ima veću vrijednost od one proizvedene u tradicionalnim velikim elektranama jer su prijenosni gubici ograničeni i smanjuju se troškovi velikih transportnih i distribucijskih sustava. Osim toga, proizvodnja energije tijekom sati insolacije omogućuje smanjenje zahtjeva za mrežom tijekom dana, kada je potražnja najveća [8].



Slika 3.6. Blok shema on-grid odnosno mrežno povezanog FN sustava

4. INTEGRACIJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U DISTRIBUCIJSKU MREŽU

Električna energija iz prijenosne mreže ili iz manjih elektrana koji su priključeni na distribucijsku mrežu distribuiraju se do krajnjih potrošača (malih ili srednjih) koji su također priključeni na distribucijsku mrežu. Distribucijska mreža sastoji se od zračnih i kabljskih vodova (ali manjih nazivnih napona, najčešće ispod 110 kV) i rasklopnih postrojenja (također manjih nazivnih napona u odnosu na prijenosnu mrežu). Distribucijska mreža obično se dijeli na dvije cjeline [9]:

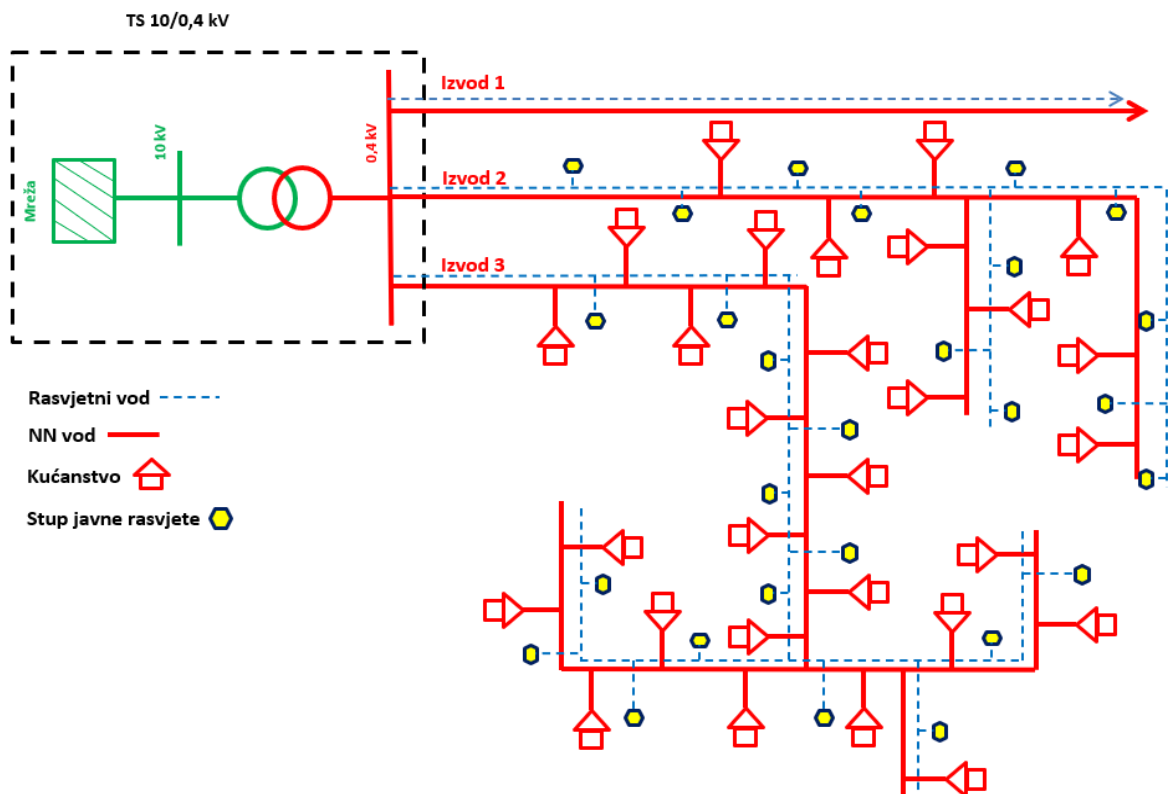
- Sredjenaponska (SN) distribucijska mreža (najčešće nazivnih napona 10 kV, 20kV, 35kV)
- Niskonaponska (NN) distribucijska mreža (najčešće nazivnog napona 0.4 kV)

4.1. Struktura niskonaponskih mreža

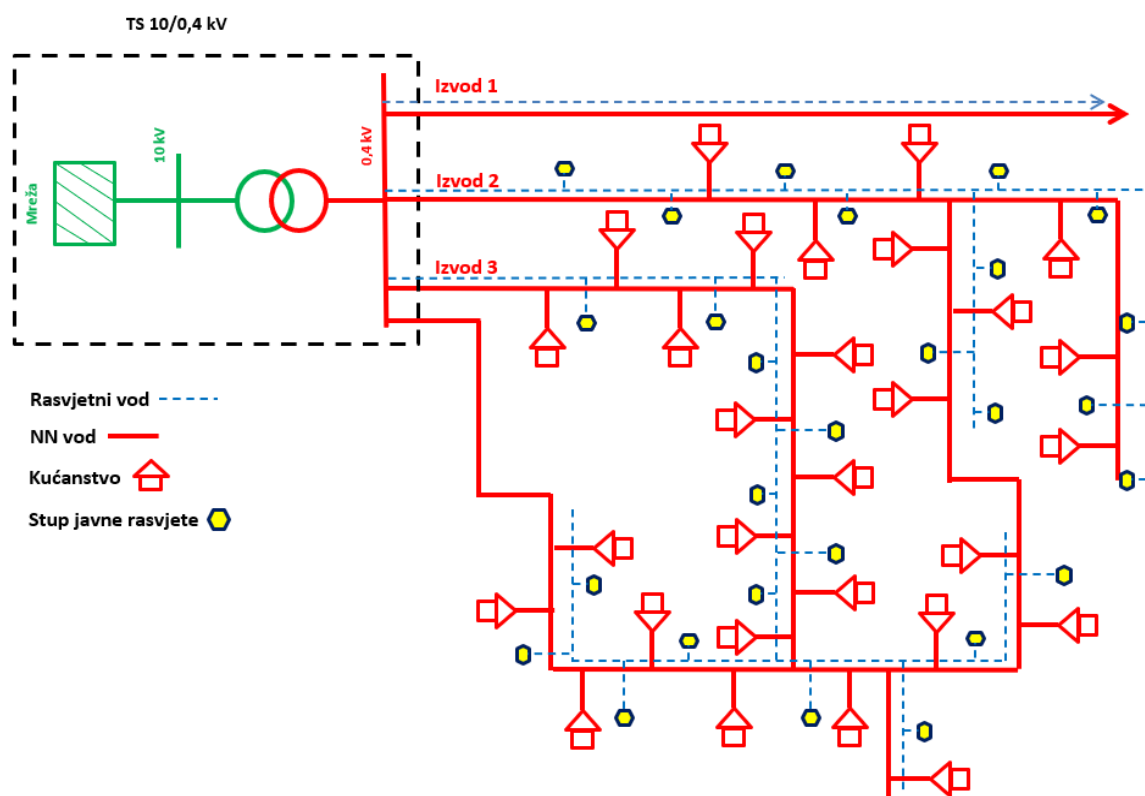
Niskonaponske distribucijske mreže najčešće su zrakaste, eventualno sa potpornom točkom. U gradovima su moguće i prstenaste i linijske mreže (više pojmih točaka s mogućnošću rezervnog napajanja), ali su redovito u radijalnom pogonu, također su moguće i uzamčene mreže (sa jednim ili više izvora, tj. trafostanica (TS) 10(20)/0.4 kV) [9]:

- **Radialne niskonaponske mreže** primjenjuju se najčešće upravo zbog svoje izvedbe i konfiguracije, najekonomičnije su. U slučaju kvara, nemaju mogućnost rezervnog napajanja te dolazi do prekida kompletnog izvoda.
- **Zamkasta (petljasta) niskonaponska mreža** koristi se u područjima gdje su opterećenja velika i gdje su veliki zahtjevi za pouzdanost isporuke električne energije. Potrošač ili grupa potrošača može se priključiti u svaki čvor mreže, a u nekim čvorovima se priključuju trafostanice.

Na slici 4.1. prikazan je primjer radialne NN mreže, dok je na slici 4.2. prikazan primjer zamkaste NN mreže.



Slika 4.1. Primjer radijalne NN distribucijske mreže



Slika 4.2. Primjer zamkaste NN distribucijske mreže

4.2. Utjecaj priključka i rada FN elektrane na mrežu

Literatura [10] navodi kako nakon priključenja fotonaponske elektrane na distribucijsku mrežu, pojavljuje se promjena smjera tokova snaga i može se reći da distributivni vodovi postaju dvostrano napajani. Ukoliko je priključenje fotonaponske elektrane blizu točke velike potrošnje, onda će se proizvedena snaga potrošiti, smanjit će se put koji energija treba proći do potrošača, a time se smanjuju i gubitci u mreži, te popravljaju naponske prilike. Međutim, ako je izvor električne energije priključen na kraju slaboopterećenog radijalnog voda, što je praksi uglavnom najčešći slučaj, tada postoji mogućnost da izvor proizvede više energije nego što je potrošačima potrebno što rezultira predajom snage na višu naponsku razinu (tok snage u suprotnom smjeru) [10].

U slučaju kada potrošnja električne energije nije dovoljno velika što se događa često za vrijeme ljeta kada su ljudi odnosno potrošači na godišnjem odmoru, proizvedena energija ne bi se potrošila na mjestu proizvodnje te bi došla skroz do sabirnica niskog napona i utjecala bi na naponske prilike u ostalim vodnim poljima ili bi prešla na višu naponsku razinu [10].

Smanjeni gubitci u mreži i manje opterećenje transformatora pozitivne su strane promjene tokova snaga. Posljedica nesimetričnih opterećenja prilikom priključenja distribuirane proizvodnje i nesimetričnih tokova snaga u oba smjera je nesimetrija napona i struje što ima za posljedicu i nepoželjne pojave kao što su povećanje gubitaka snage, gubitak energije i grijanje namota transformatora, preopterećenje pojedinih faza i dr. [10]

4.3. Prednosti i problemi FN sustava povezanih na mrežu

Autori rada [2] navode kako rast instalacija FN sustava eksponencijalno se povećao zbog opadajućeg trenda troškova generacije fotonapona. Nadalje, instalacija FN elektrana pridonjela je smanjenju emisija CO₂ i ovisnosti o tradicionalnim elektranama. Prema izvješću iz ankete koju je izdala IEA (Međunarodna energetska agencija) 2013. godine, 99% fotonaponskih sustava instaliranih na međunarodnoj razini je bilo povezano na mrežu. Moderni FN sustavi povezani na mrežu su evoluirali kao izvor aktivne i reaktivne snage koji također mogu obavljati mnoge zadatke za podršku mreže, uključujući kontrolu reaktivne snage te otpornost na niske napone i frekvenciju. Fotonaponski generatori distribuirane proizvodnje (FNDG) mogu se uvesti kao alternativa za nadogradnju mreže, a njihova učinkovitost može se dodatno poboljšati korištenjem lokalne pohrane energije. Međutim, mogu se pojaviti višestruki problemi zbog integracije FNDG-a kao

što su prenapon, treperenje, harmonici, povećani gubici, neuravnoteženost faza, izolacija, fluktuacija snage, varijacije frekvencije i drugo. Nasuprot tome, doprinos kratkog spoja zbog penetracije solarnih FN postrojenja vrlo je mali [2].

4.4. Utjecaj FN na napon niskonaponske mreže

Jedan od glavnih utjecaja FN elektrane na NN mrežu naveden u literaturi [2] je fluktuacija napona i porast napona. Uobičajeno, distribucijske mreže razvijaju se kao sustavi jednosmjernog toka snage, od trafostanice do opterećenja, s nekoliko vodova u distribucijskom transformatoru napajanih iz jednog izvora. Stoga napon u distribucijskoj mreži postupno opada od trafostanice (početna točka) do priključne točke (krajnja točka). Međutim, zbog velike snage iz FNDG-a tijekom dana, dolazi do obrnutog toka snage od priključne točke prema trafostanici u distribucijskim mrežama, što dovodi do porasta napona na priključnoj točki. Stoga distribucijske mreže postaju sustavi dvosmjernog toka snage [2].

Odstupanje napona na točki zajedničkog spajanja odnosno priključnoj točki FNDG-a na distribucijsku mrežu dano je formulom [2]:

$$\Delta V = \frac{(P_g - P_L) \cdot R + (Q_g - Q_L) \cdot X}{V_s}$$

$$\Delta V = V_r - V_s$$

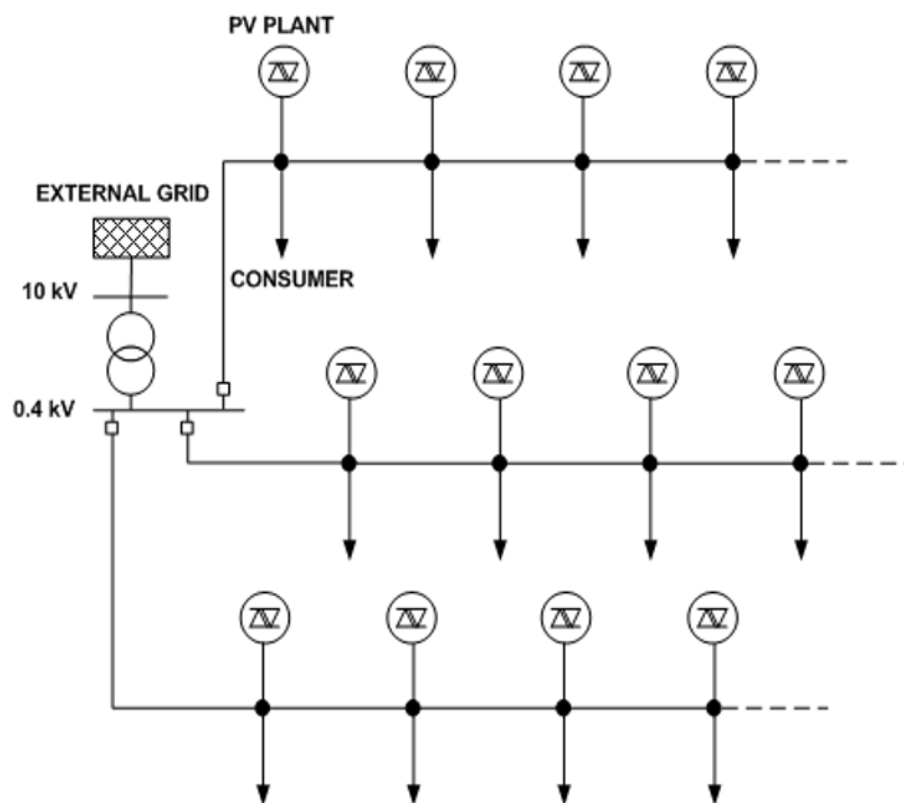
Gdje je:

- P_g – djelatna snaga generirana FNDG-om
- Q_g – reaktivna snaga generirana FNDG-om
- P_L – djelatna snaga konzumirana teretom
- Q_L – reaktivna snaga konzumirana teretom
- R – otpor
- X – reaktancija
- V_s – napon na početnoj točki
- V_r – napon na krajnjoj točki

Vrijednost ΔV će se povećavati s rastom P_g i Q_g te smanjenjem P_L i Q_L . Stoga će napon na krajnjoj (priključnoj) točki postati viši od napon na početnoj (strana trafostanice) točki. Ova razina napona

je posebno izražena u slučaju kada nema opterećenja, a u slučaju visoke proizvodnje FN-a oko podne (uglavnom najtoplije doba dana) će doći do porasta napona [2].

U literaturi [11] provedeno je istraživanje koje nam prikazuje kako FN sustav utječe na radijalnu niskonaponsku distribucijsku mrežu u Hrvatskoj. Izrađen je model prikazan na slici 4.3. proširenog stambenog fotonaponskog sustava i lokalne distribucijske mreže kako bi se ispitalo prekoračenje naponskih ograničenja postavljenih u internom hrvatskom mrežnom kodeksu. Kroz rad se provjerava utjecaj napona s obzirom na ovisnost količine proizvodnje energije FN sustava i količine potražnje energije potrošača. Prihvatljivo odstupanje napona u distribucijskim niskonaponskim mrežama Hrvatske je $\pm 10\%$ [11].



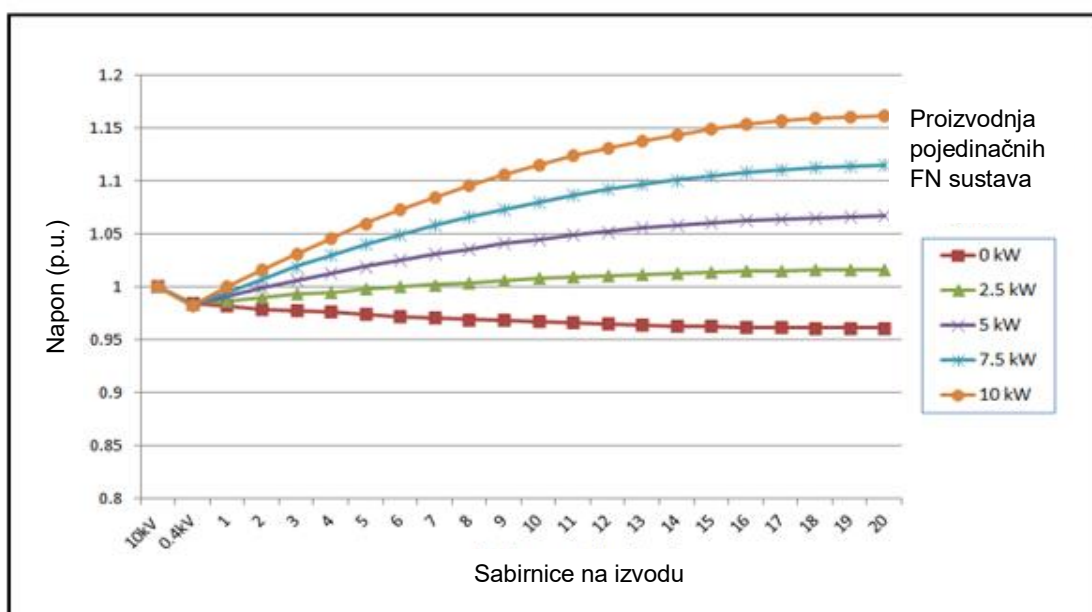
Slika 4.3. Model sustava na kojemu je provedeno ispitivanje [11]

Slika 4.4. prikazuje nam tablicu s rezultatima provedene analize napona za različite scenarije. Oznaka „X“ označava scenarij u kojemu su naponska ograničenja prekoračena [11].

Stambena potrošnja (kW)	Proizvodnja pojedinačnih FN sustava (kW)				
	0	2,5	5	7,5	10
1	✓	✓	✓	✗	✗
2	✓	✓	✓	✓	✗
3	✓	✓	✓	✓	✗
4	✗	✓	✓	✓	✗
5	✗	✓	✓	✓	✓

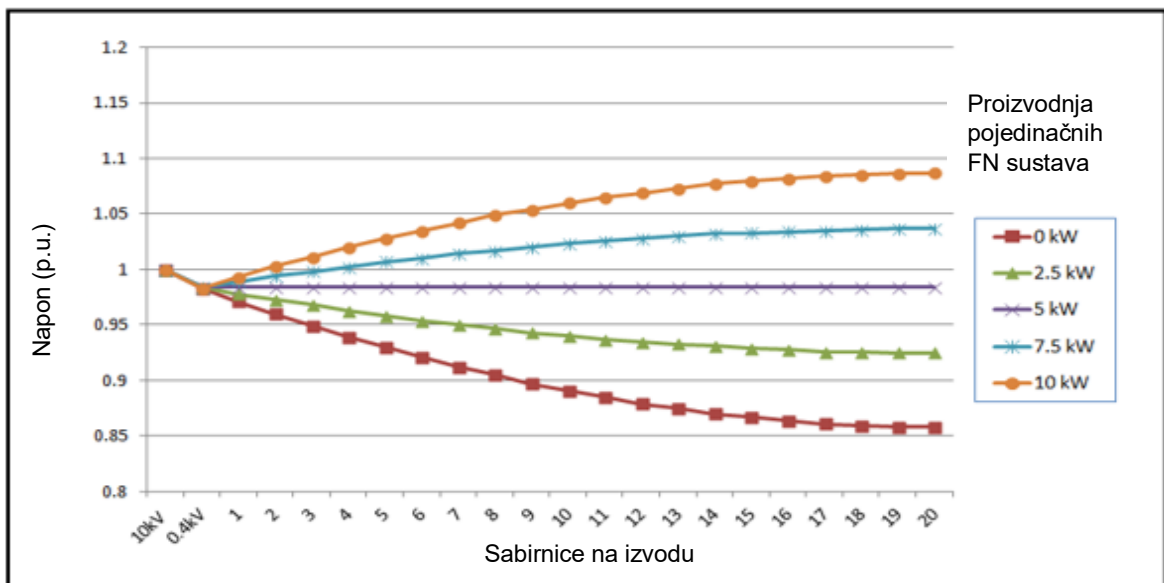
Slika 4.4. Rezultati simulacije za svaki scenarij [11]

Slika 4.5. prikazuje naponske profile gdje potrošnja iznosi 1 kW i u njoj se može vidjeti kako u dvije situacije dolazi do prekoračenja dozvoljenog napona od 1.1 p.u. (odnosno prelazi granicu od +10%). Najveća vrijednost napona iznosi 1,162 p.u. za slučaj kada je proizvodnja 10 kW, a druga najveća vrijednost izmjerena je za slučaj kada je proizvodnja 7,5 kW [11].



Slika 4.5. Naponski profili za različite razine proizvodnje dok je potrošnja jednaka 1 kW [11]

Slika 4.6. prikazuje naponske profile gdje potrošnja FN iznosi 5 kW te se na njoj može vidjeti kako u jednoj situaciji dolazi do prekoračenja dozvoljenog napona u ovome slučaju od 0,9 p.u. (odnosno prelazi granicu od -10%). Najmanja vrijednost napona iznosi 0,858 p.u. za slučaj kada je proizvodnja 0 kW [11].



Slika 4.6. Naponski profili za različite razine proizvodnje dok je potrošnja jednaka 5 kW [11]

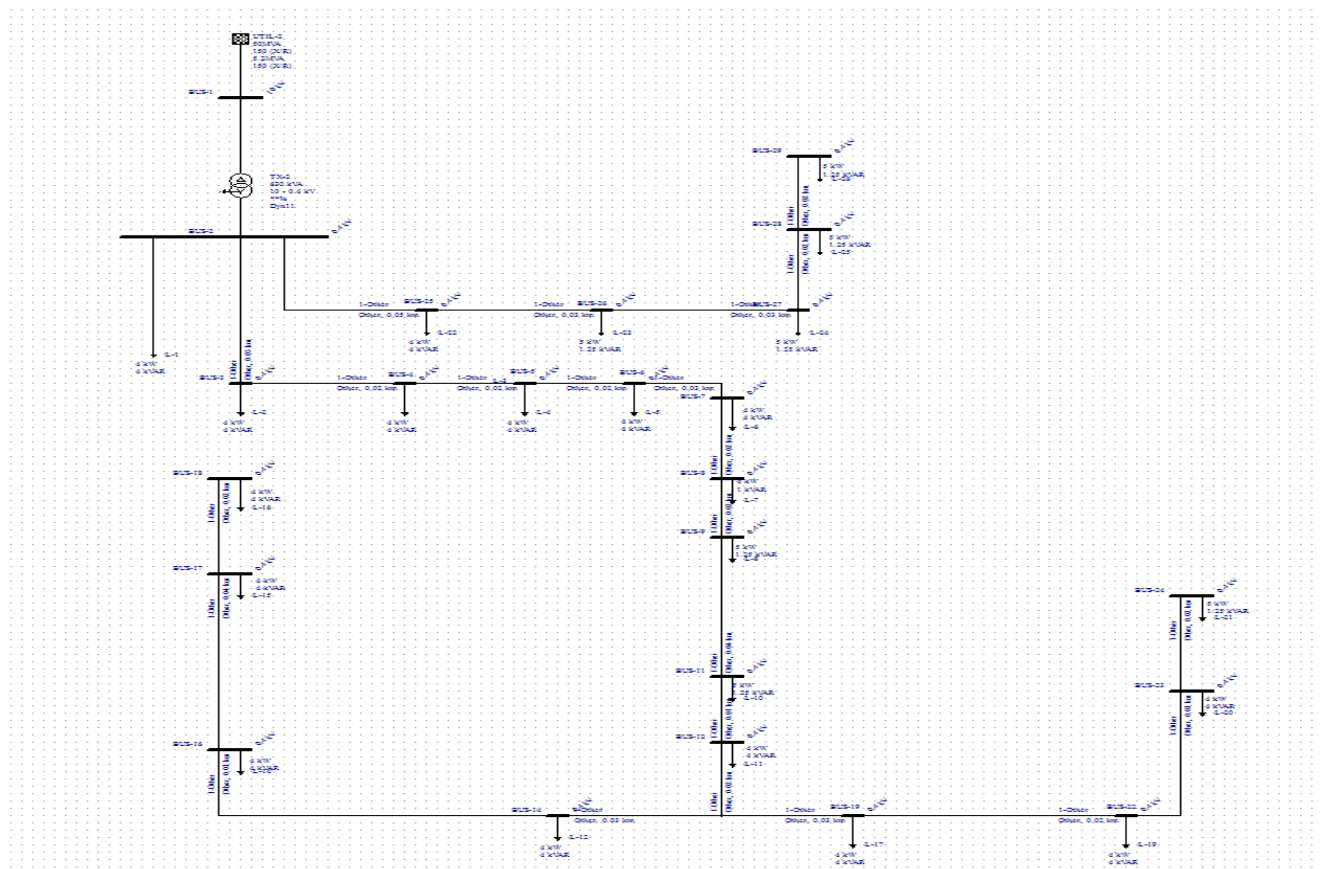
Iz prethodnih grafova može se zaključiti da pri većoj potrošnji, a manjoj proizvodnji dolazi do pada napona dok pri manjoj potrošnji, a većoj proizvodnji dolazi do porasta napona. Kada potrošnja i proizvodnja nisu usklađeni dolazi do problema u kojem energija krene teći u suprotnom smjeru što loše utječe na mrežu. Kako bi se taj problem izbjegao u radu se navodi da umjesto običnog transformatora treba uvesti transformator s mogućnošću regulacije napona pod opterećenjem („on load tap changing transformer“, odnosno OLTC transformator). Uvođenjem OLTC transformatora, napon se smanjuje odnosno povećava (ovisno o slučaju) nazad u dozvoljene granice od $\pm 10\%$ [11].

5. SIMULACIJA UTJECAJA FN SUSTAVA NA NN MREŽU

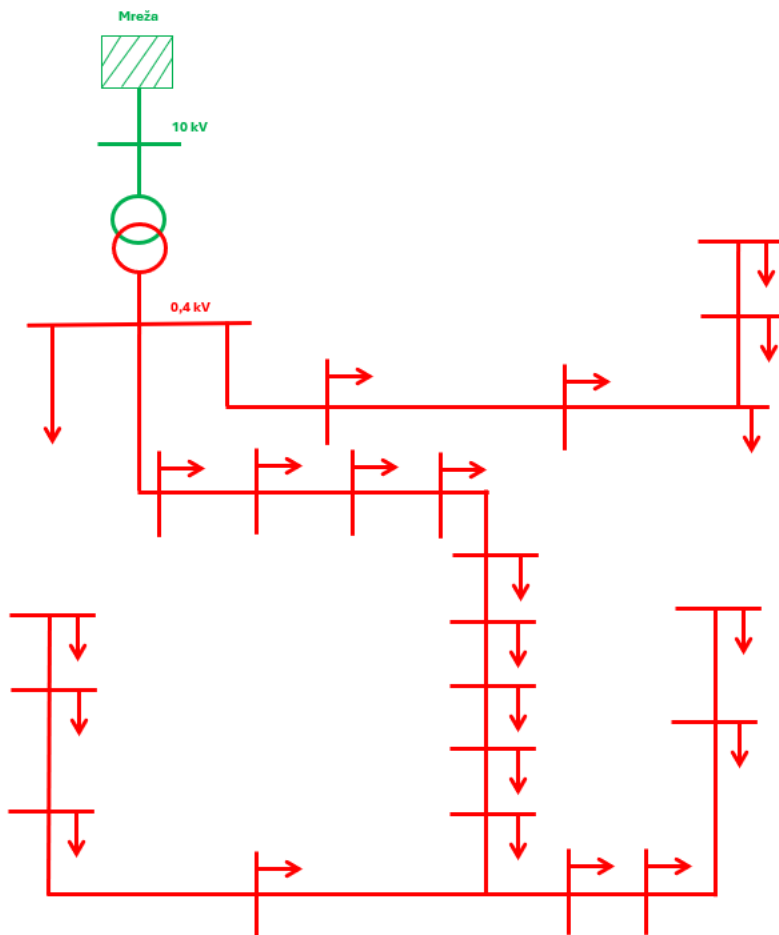
5.1. Prikaz mreže korištene za simulaciju

Simulaciju provodimo u programskom paketu EasyPower te koristimo model na osnovu mreža koje su prikazane skicom na slikama 4.1. i 4.2.

Na slici 5.1. a) prikazana je radijalna shema mreže u programu EasyPower na kojoj je provedeno 5 različitih simulacija dok je na slici 5.1. b) prikazan model radijalne mreže

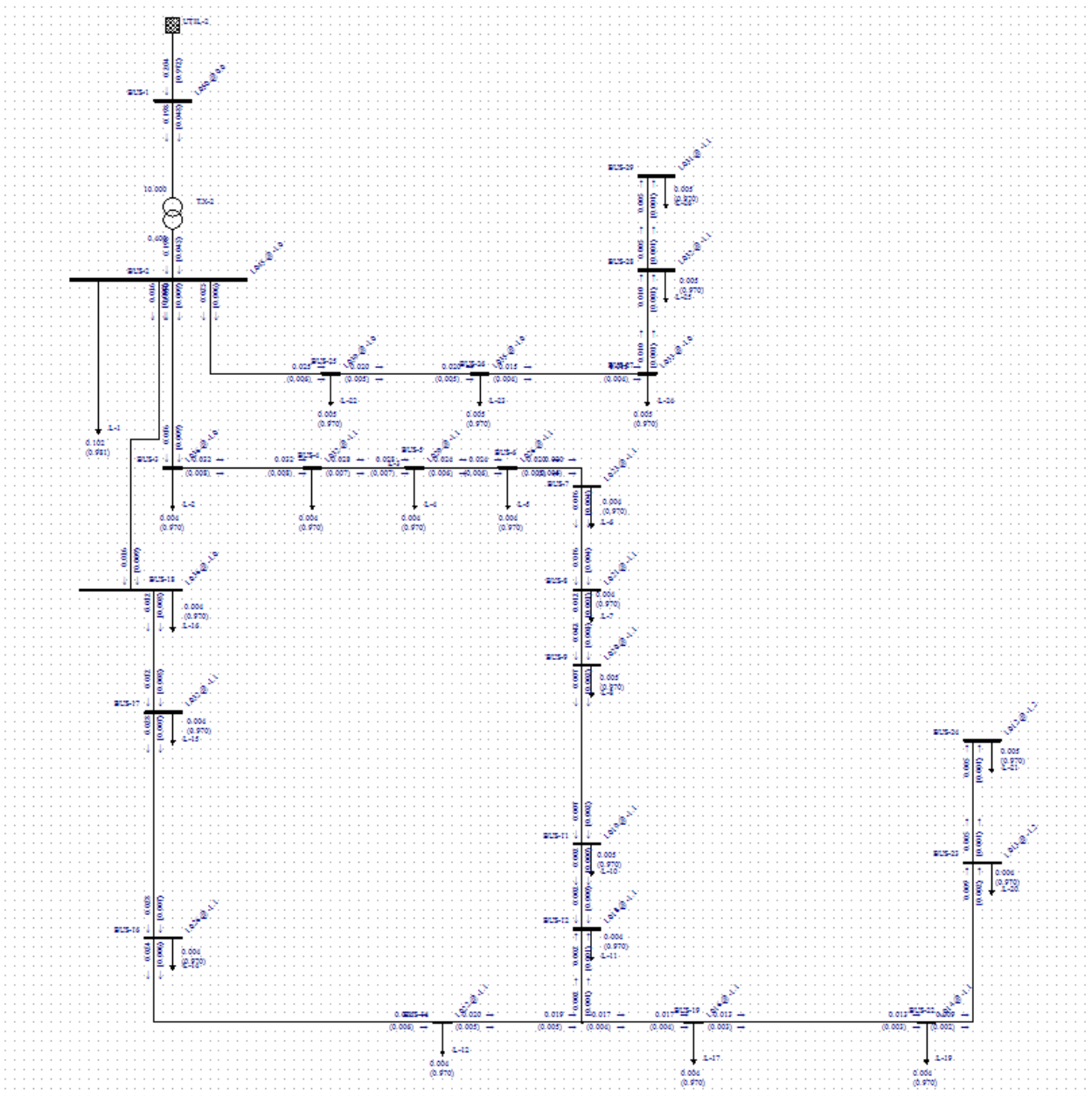


Slika 5.1. a) Shema radijalne mreže korištene za simulaciju

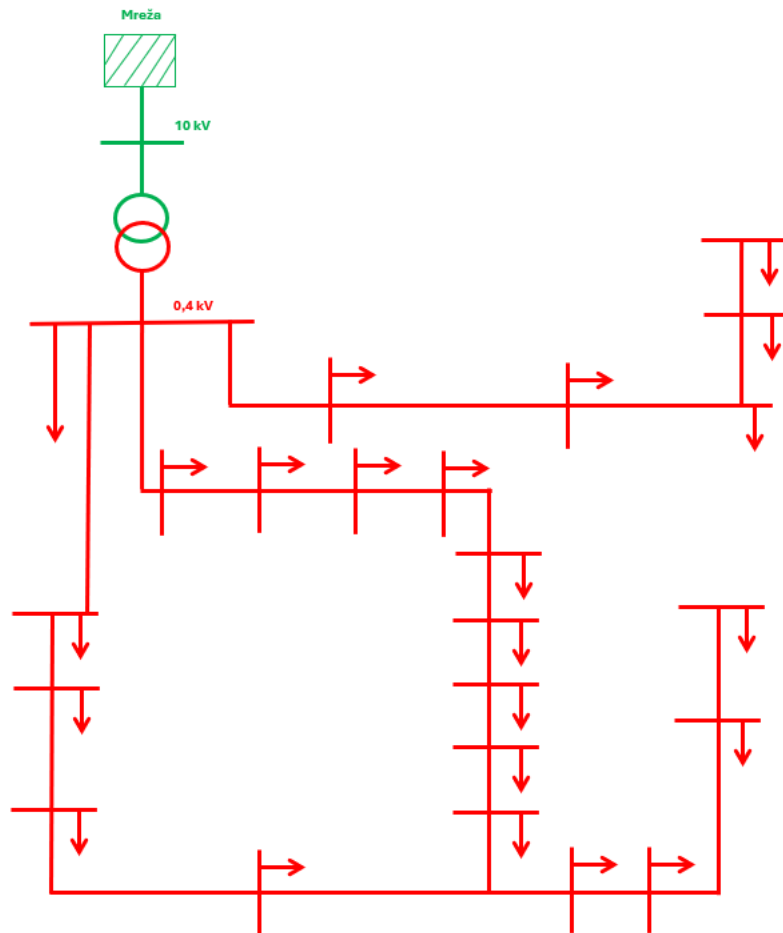


Slika 5.1. b) Model radijalne mreže korištene za simulaciju

Slika 5.2. a) prikazuje zamkastu shemu mreže u programu EasyPower na kojoj je provedeno 5 različitih simulacija dok je na slici 5.2. b) prikazan model zamkaste mreže



Slika 5.2. a) Shema zamkaste mreže korištene za simulaciju



Slika 5.2. b) Model zamkaste mreže korištene za simulaciju

Mreža i radijalni izvodi povezani su transformatorskom stanicom 10/0.4 kV te se sastoji od 25 sabirnica. Na kućanstva kasnije kroz simulacije dodajemo FN sustave (u našem slučaju generatore zbog ograničenosti programom EasyPower) ovisno o tome koji scenarij simuliramo.

5.2. Provođenje simulacije

Postupak simulacije dijeli se na dva slučaja po pet scenarija, a to su:

- **Radialna mreža:**
 1. Osnovni slučaj (bez integracije FN)
 2. Djelomična integracija FN (5 kW)
 3. Potpuna integracija FN (5 kW)
 4. Potpuna integracija FN (7,5 kW)
 5. Potpuna integracija FN (7,5 kW) i 50% manji teret
- **Zamkasta mreža:**
 1. Osnovni slučaj (bez integracije FN)
 2. Djelomična integracija FN (5 kW)
 3. Potpuna integracija FN (5 kW)
 4. Potpuna integracija FN (7,5 kW)
 5. Potpuna integracija FN (7,5 kW) i 50% manji teret

Ovakvu raspodjelu scenarija koristimo jer nam takva raspodjela najbolje prikazuje razlike u naponskim prilikama te gubitke na sabirnicama za obje mreže.

U prvom scenariju očekuju se padovi napona na sabirnicama pri krajevima mreže te nešto veći gubitci. Zatim u drugom i trećem scenariju postepeno integriramo FN sustav u kućanstva (sabitnice), odnosno u drugom slučaju stavljamo FN module na svako drugo kućanstvo, a u trećem slučaju na svako kućanstvo te možemo očekivati značajno smanjenje gubitaka i promjene u naponu ovisno o količini integracije FN sustava. Pri potpunoj integraciji možemo očekivati i pojavu promjene tokova snage. U zadnja dva scenarija mijenjamo snagu FN sustava te mijenjamo i potrošnju jer onda očekujemo mogući prelazak dozvoljene granice napona na sabirnicama od $\pm 10\%$.

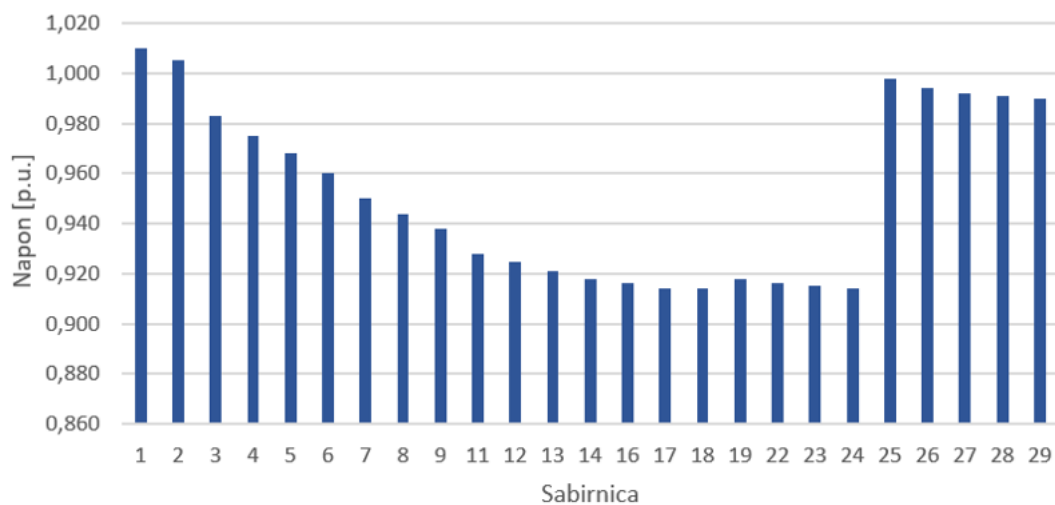
U sljedećim poglavljima detaljno prikazujemo svaku simulaciju grafički i opisom.

5.3. Rezultati simulacije za radijalnu mrežu

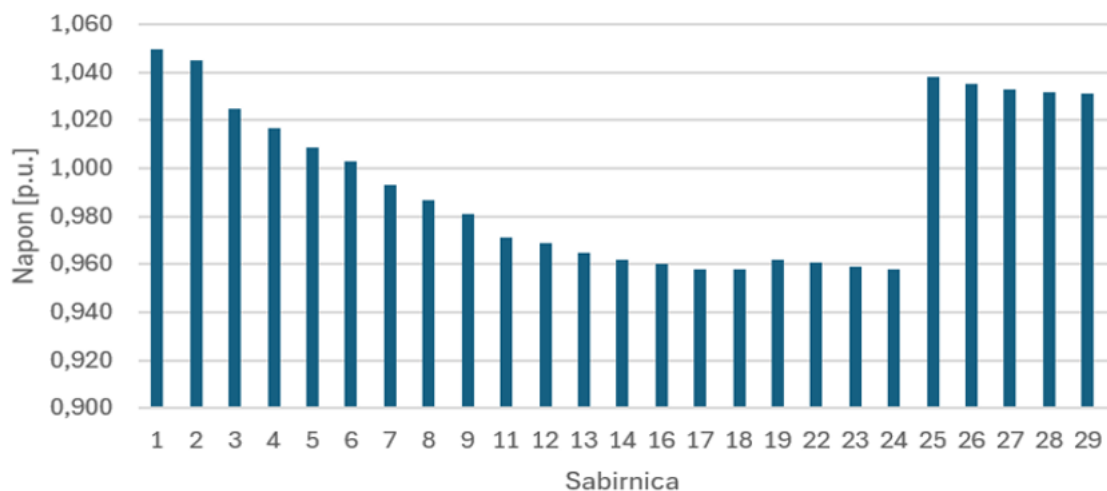
5.3.1. Osnovni slučaj

U ovom scenariju nemamo integrirane FN sustave na kućanstvima, potrošnja jednog dijela kućanstava iznosi 4 kW, a drugog dijela 5 kW.

Na slici 5.3. grafički su prikazani naponi na sabirnicama radijalne mreže za osnovni slučaj kada je napon 1,01 p.u., dok su na slici 5.4. grafički prikazani naponi na sabirnicama kada je napon 1,05 p.u.



Slika 5.3. Grafički prikaz napona na sabirnicama osnovnog slučaja za 1,01 p.u.



Slika 5.4. Grafički prikaz napona na sabirnicama osnovnog slučaja za 1,05 p.u.

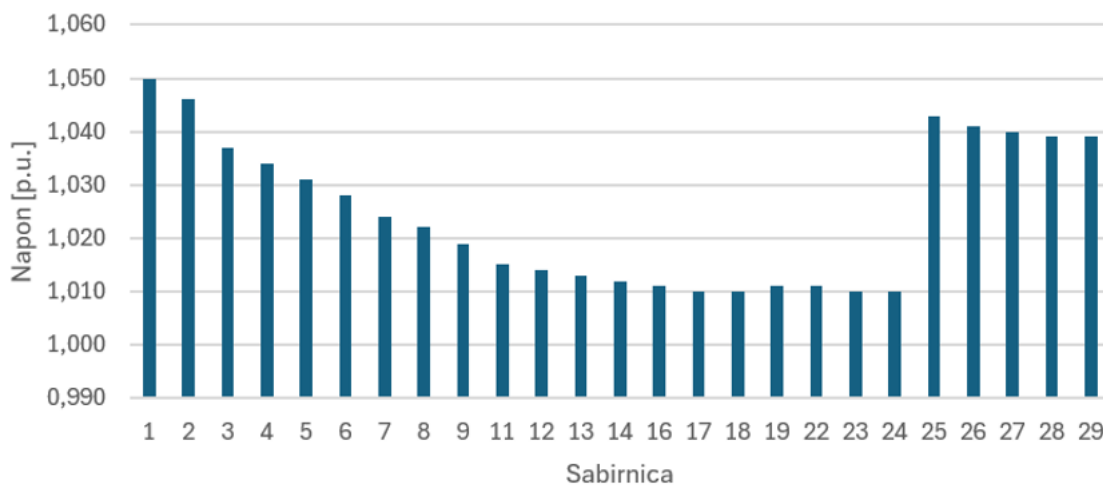
Iz grafa se vidi kako napon na izvodu 1 (od sabirnice 2 do sabirnice 24) postepeno pada što se više udaljavamo od transformatorske stanice, dok isto vrijedi i za izvod 2 (od sabirnice 25 do sabirnice 29), ali je pad blaži s obzirom da je izvod puno kraći i ima manje potrošača.

Također treba napomenuti da gubici pri naponu 1,01 p.u. iznose 5,6 kW, a pri naponu 1,05 p.u. iznose 5,1 kW te zbog toga u sljedećim scenarijima nastavljamo koristiti napon od 1,05 p.u. jer pri tom naponu, naponi su nešto veći, a gubici su manji. Rezultati simulacije su očekivani s obzirom na uvjete mreže i njenu strukturu.

5.3.2. Djelomična integracija FN (5 kW)

U ovom scenariju integriramo FN sustav snage 5 kW na svako drugo kućanstvo u mreži, a tereti ostaju nepromijenjeni.

Na slici 5.5. grafički su prikazani naponi na sabirnicama s djelomičnom integracijom FN sustava (5 kW).



Slika 5.5. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s djelomičnom integracijom FN (5 kW)

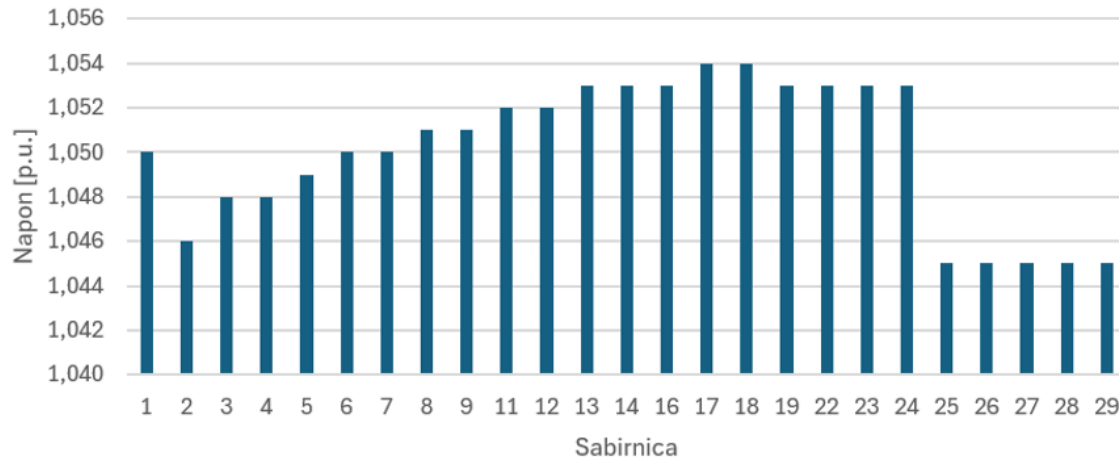
U ovom scenariju naponi na prvom i drugom izvodu su ponovno postepeni što se više udaljavamo od transformatorske stanice, ali su malo veći nego u slučaju bez FN sustava.

Velika razlika između prva dva slučaja je u tome što su gubici drastično pali te iznose 0,9 kW. Rezultati simulacije su potpuno očekivani jer sada imamo integrirane FN sustave koji služe kao dodatni izvori ravnomjerno raspoređeni kroz mrežu i zbog toga su gubici znatno manji, a napon nešto veći.

5.3.3 Potpuna integracija FN (5 kW)

U ovom scenariju integriramo FN sustav čija je proizvodnja i dalje 5 kW na svako kućanstvo u mreži, tereti ostaju nepromijenjeni.

Slika 5.6 grafički prikazuje napone na sabirnicama s potpunom integracijom FN sustava (5 kW).



Slika 5.6. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s potpunom integracijom FN (5 kW)

Naponi su postepeno viši, ali i dalje u dopuštenim granicama od $\pm 10\%$. Ovaj scenarij je specifičan jer smo dodavanjem FN postigli višak proizvodnje i energija se vraća u mrežu, odnosno imamo obrnut tok snaga. Iz slike 5.7. možemo vidjeti kako 14 kW snage ide u obrnutom smjeru odnosno vraća se iz NN mreže u SN mrežu.

Gubitci iznose 0.4 kW što je dosta manje u odnosu na prvi scenarij i također je manje nego u drugom scenariju što se moglo i očekivati s obzirom da smo znatno povećali proizvodnju u mreži.

Generation Summary Report

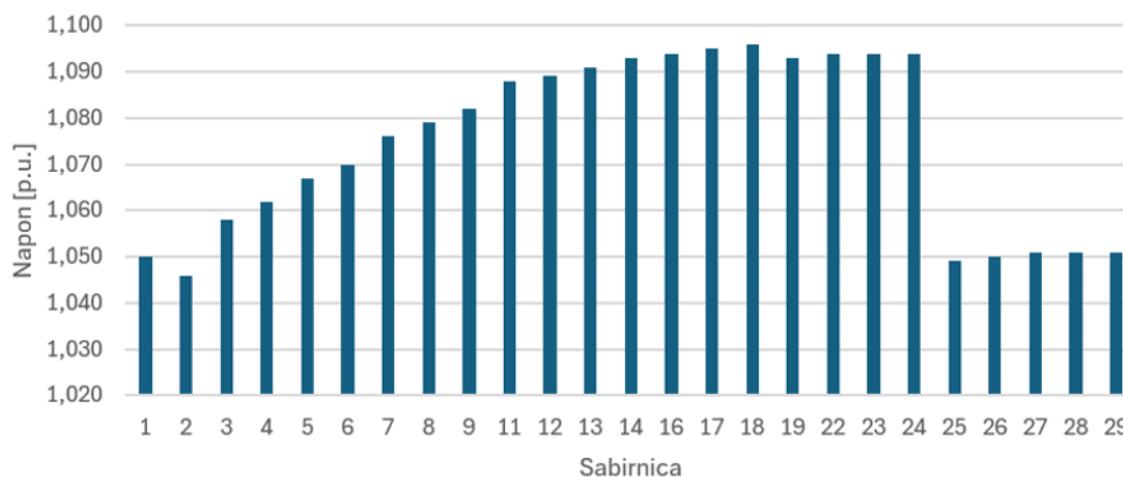
ACDC	Source			Scheduled			Limits		Solution							
	Name	Type	Rated kVA	kW	kVAR	Vpu	kVARMin	kVARMax	kW	kVAR	kVA	PF	Vpu	Deg	Eqpu	Deg
AC	GEN1	PQG	100	100	0				100	0	100	1.000	1.046	0.07	1.060	5.25
AC	GEN2	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.045	0.16	1.059	5.34
AC	GEN3	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.045	0.23	1.059	5.41
AC	GEN4	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.045	0.25	1.059	5.44
AC	GEN5	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.048	0.38	1.062	5.54
AC	GEN6	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.049	0.61	1.063	5.75
AC	GEN7	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.050	0.85	1.064	5.98
AC	GEN8	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.051	1.02	1.065	6.14
AC	GEN9	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.052	1.19	1.066	6.31
AC	GEN10	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.053	1.33	1.067	6.43
AC	GEN11	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.054	1.37	1.067	6.47
AC	GEN12	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.053	1.32	1.067	6.43
AC	GEN13	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.053	1.34	1.067	6.45
AC	GEN14	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.045	0.20	1.059	5.38
AC	GEN15	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.045	0.24	1.059	5.43
AC	GEN16	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.048	0.50	1.062	5.65
AC	GEN17	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.050	0.71	1.063	5.85
AC	GEN18	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.051	0.94	1.065	6.07
AC	GEN19	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.052	1.16	1.066	6.28
AC	GEN20	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.053	1.30	1.067	6.40
AC	GEN21	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.054	1.36	1.067	6.46
AC	GEN22	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.053	1.30	1.067	6.40
AC	GEN23	PQG	5	5	0				5	0	5	1.000	1.053	1.34	1.067	6.45
AC	UTIL2	Sw				1.050			-14	44	46	0.293	1.050	0.00	1.051	-0.01

Slika 5.7. Izvještaj proizvodnje električne energije u scenariju s potpunom integracijom FN (5 kW)

5.3.4. Potpuna integracija FN (7,5 kW)

U ovom smo scenariju proizvodnju FN povisili na 7,5 kW, ali tereti ostaju nepromjenjeni.

Slika 5.8. prikazuje grafički napone na sabirnicama s potpunom integracijom FN sustava (7,5 kW).



Slika 5.8. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s potpunom integracijom FN (7,5 kW)

Naponi na izvodima postepeno rastu, ali i daje se nalaze u dozvoljenim granicama. Ovo je scenarij u kojem imamo veliku proizvodnju, ali i potrošnju. Većina energije se troši lokalno na kućanstva dok dio energije odlazi u mrežu i stvara gubitke koji iznose 2.6 kW.

Na slici 5.9. vidimo kako 116 kW snage ide u mrežu, dakle i u ovom scenariju kao i u scenariju 3 imamo obrnut tok snaga.

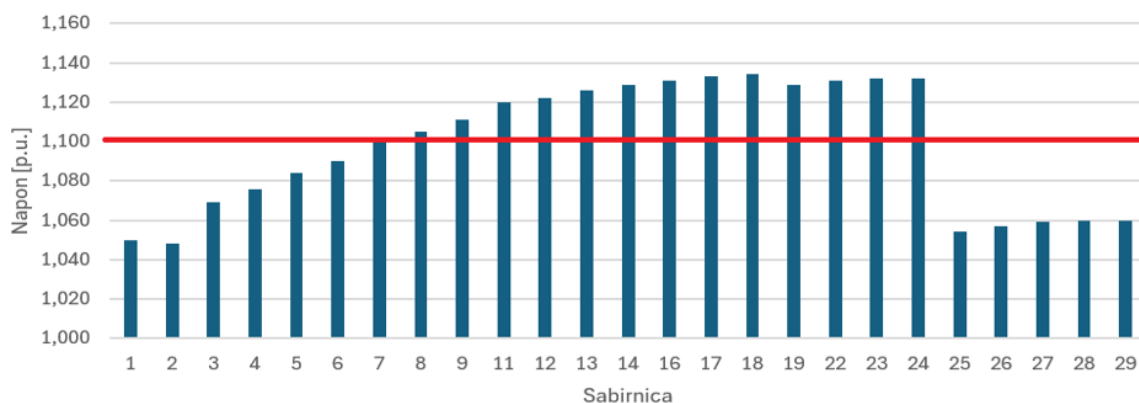
Generation Summary Report																
AC/DC	Source		Scheduled			Limits			Solution							
	Name	Type	Rated kVA	kW	kVAR	V _{low}	kVAR Min	kVAR Max	kW	kVAR	kVA	PF	V _{low}	Deg	Bočarski	Deg
AC	GEN-1	PQG	150	150	0				150	0	150	1.000	1.046	0.58	1.060	5.76
AC	GEN-2	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.049	0.73	1.062	5.88
AC	GEN-3	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.051	0.85	1.065	5.98
AC	GEN-4	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.051	0.89	1.065	6.01
AC	GEN-5	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.058	1.10	1.072	6.16
AC	GEN-6	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.067	1.46	1.080	6.44
AC	GEN-7	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.076	1.85	1.089	6.75
AC	GEN-8	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.082	2.12	1.095	6.96
AC	GEN-9	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.089	2.40	1.102	7.18
AC	GEN-10	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.094	2.61	1.107	7.34
AC	GEN-11	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.096	2.66	1.109	7.38
AC	GEN-12	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.094	2.59	1.106	7.33
AC	GEN-13	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.094	2.63	1.107	7.36
AC	GEN-14	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.050	0.80	1.064	5.94
AC	GEN-15	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.051	0.88	1.065	6.00
AC	GEN-16	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.062	1.29	1.076	6.31
AC	GEN-17	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.070	1.63	1.084	6.57
AC	GEN-18	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.079	1.99	1.092	6.86
AC	GEN-19	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.088	2.35	1.101	7.14
AC	GEN-20	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.093	2.55	1.106	7.30
AC	GEN-21	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.095	2.65	1.108	7.37
AC	GEN-22	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.093	2.55	1.106	7.30
AC	GEN-23	PQG	7	7	0				7	0	7	1.000	1.094	2.62	1.107	7.35
AC	UTIL-2	Sw.				1.050			-116	46	125	0.929	1.050	0.00	1.051	-0.12

Slika 5.9. Izvještaj proizvodnje električne energije u slučaju s potpunom integracijom FN (7,5 kW)

5.3.5. Potpuna integracija FN (7,5 kW) i 50% manji teret

U posljednjem scenariju proizvodnju FN smo ostavili na 7,5 kW, a terete smo smanjili za pola, odnosno na 2 kW i na 2.5 kW. S ovim scenarijem pokušavamo predstaviti primjer gdje u praksi nije uobičajeno da se proizvodnja FN-a i potrošnja u kućanstvu pojavljuju u isto vrijeme.

Slika 5.10. grafički prikazuje napone na sabirnicama s potpunom integracijom FN sustava (7,5 kW) i 50% manjim teretom.



Slika 5.10. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s potpunom integracijom FN (7,5 kW) i 50% manjim teretom

Iz grafa je vidljivo kako od sabirnice 7 pa do sabirnice 24 imamo nedozvoljene napone (granica označena crvenom linijom), tj. napone koji prelaze granicu od +10%. Dakle, možemo integrirati puno FN u mrežu, međutim ako je naša potrošnja mala javlja se prevelik napon, ali taj je problem rješiv uvođenjem transformatora koji će regulirati napon.

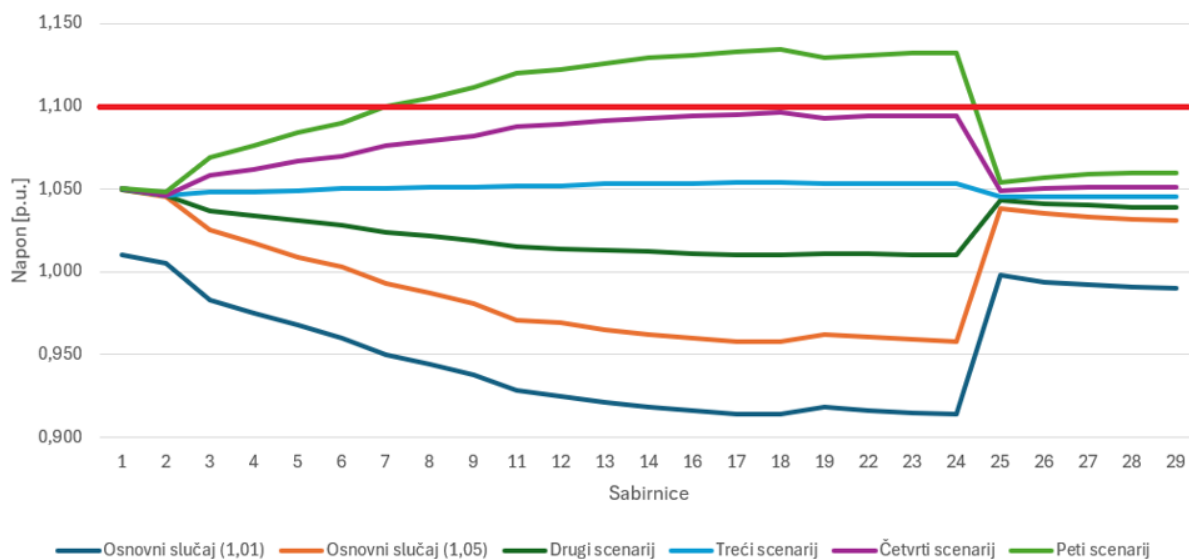
Gubitci iznose 6 kW što je dosta u odnosu na prethodna dva scenarija što je i očekivano zbog prelaska ograničenja napona i viška proizvodnje gubitci su veći i također kao u prethodnom slučaju zbog viška proizvodnje dolazi do obrnutih tokova snaga te se još više energije vraća u mrežu, a ta energija iznosi 211 kW što možemo vidjeti na slici 5.11.

Generation Summary Report											
Source			Scheduled				Limits				
Name	Type	Rated kVA	kW	kVAR	Vpu	kVAR Min	kVAR Max	kW	kVAR	kVA	
A GEN-1	PQG	150	150	0				150	0	150	
A GEN-2	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-3	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-4	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-5	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-6	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-7	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-8	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-9	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-10	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-11	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-12	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-13	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-14	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-15	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-16	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-17	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-18	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-19	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-20	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-21	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-22	PQG	7	7	0				7	0	7	
A GEN-23	PQG	7	7	0				7	0	7	
A UTIL-2	Sw				1.050			-211	28	213	

5.11. Izvještaj proizvodnje električne energije u slučaju s potpunom integracijom FN (7,5 kW) i 50% manjim teretom

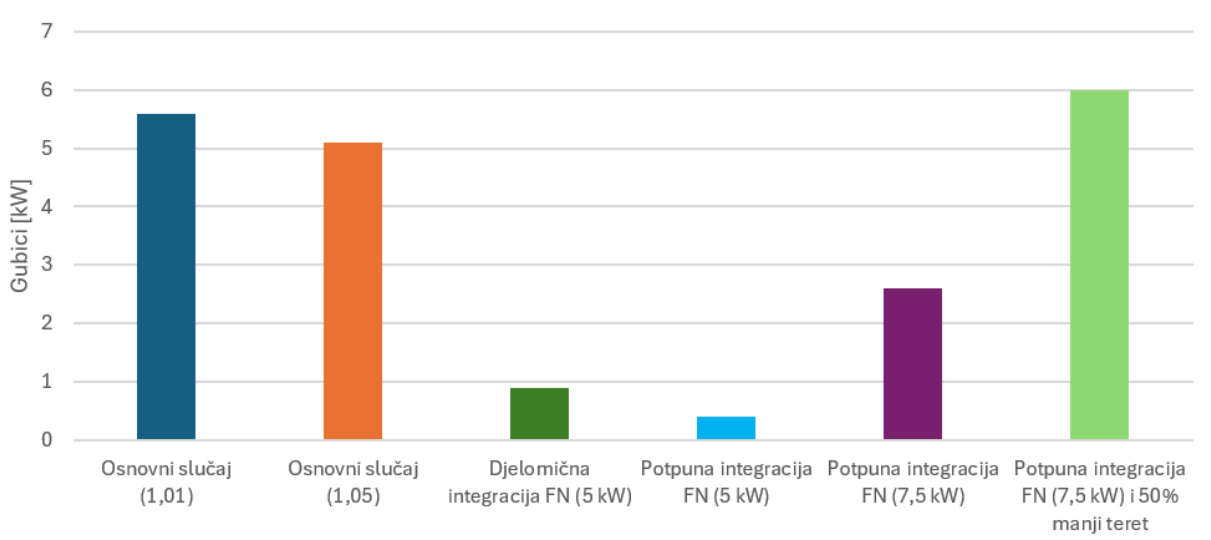
5.3.6. Usporedba svih scenarija radijalne mreže

Nakon što su sve simulacije i scenariji za radijalnu mrežu grafički prikazani i opisani, na slici 5.12. se grafički prikazuju naponi svih scenarija jedan do drugog kako bismo ih mogli bolje usporediti, a na slici 5.13. se grafički pokazuju gubitci za sve scenarije.



Slika 5.12. Grafički prikaz usporedbe napona na sabirnicama u svim simulacijama radijalne mreže

Na grafu su linijski prikazani naponi svih scenarija, od sabirnice 1 do sabirnice 24 prikazani su naponi na prvom izvodu, a od sabirnice 25 do 29 prikazani su naponi na drugom izvodu te zbog toga postoji dio koji izgleda poput naglog skoka odnosno pada napona.



Slika 5.13. Grafički prikaz usporedbe gubitaka u svim simulacijama radijalne mreže

Iz grafova i rezultata vidi se kako je najstabilniji i najidealniji treći scenarij kada se simulira potpuna integracija FN snage 5 kW. U tom scenariju su najmanje promjene napona, vrijednosti se ne približavaju kritičnima i gubitci su najmanji. No ipak postoji problem s trećim scenarijem, a to

je pojava obrnutih tokova snage gdje zbog viška proizvodnje dio električne energije vraća se nazad u SN mrežu. S obzirom na to, pravi najidealniji scenarij bi bio drugi scenarij odnosno scenarij sa djelomičnom integracijom FN od 5 kW gdje su gubitci malo veći nego u trećem scenariju, a promjene napona su također slične kao u trećem scenariju, no nema viška proizvodnje i ne pojavljuju se obrnuti tokovi snaga.

Na grafovima se vidi da je najgori peti scenarij iz razloga što jedini prelazi dozvoljenu naponsku granicu od +10% i ima najveće gubitke. To je scenarij u kojemu potražnja ne odgovara proizvodnji odnosno scenarij gdje smanjujemo terete kućanstava, a FN integracija od 7,5 kW je potpuna. To nam prikazuje realan scenarij gdje bi npr. u 12:00 h proizvodnja bila maksimalna, a potrošnja energije relativno mala s obzirom da kućanstva tada u većini slučajeva ne zahtijevaju veće količine energije.

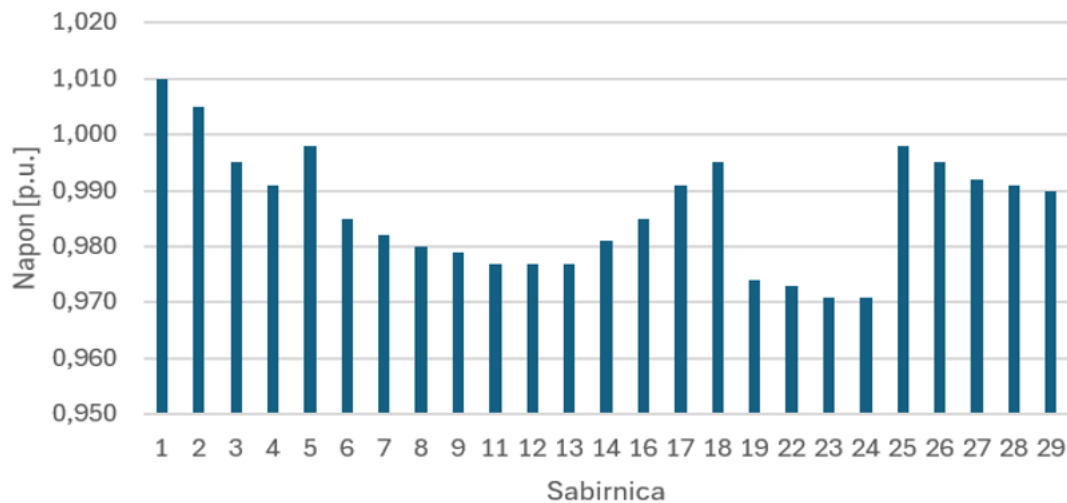
Također vidimo kako se naponi na sabirnicama u osnovnom slučaju kada je napon 1,01 p.u. približavaju donjoj graničnoj vrijednosti od -10%. Bez obzira što ne prelaze granicu to svejedno nije poželjno za mrežu i zbog toga mijenjamo napon na 1,05 p.u. kako bi se naponi na sabirnicama popravili te kako bi gubitci bili manji. Ta promjena napona se inače radi regulacijskim transformatorom i jedan takav transformator je uglavnom najčešće i najbolje rješenje za probleme s porastima i padovima napona na sabirnicama u mreži koje su izazvane integracijom FN sustava.

5.4. Rezultati simulacije za zamkastu mrežu

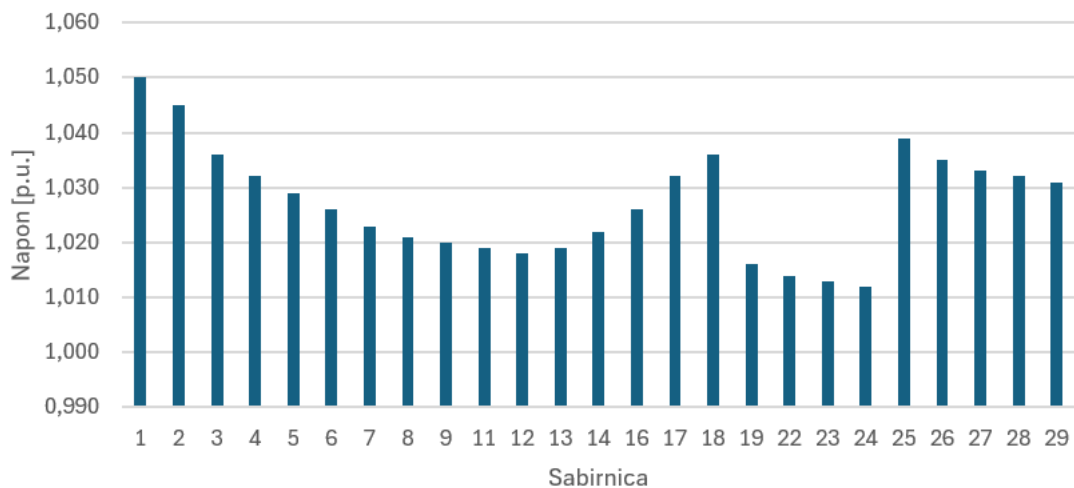
5.4.1. Osnovni slučaj

Kao i u prethodnom poglavlju za zamkastu mrežu koristimo iste parametre potrošnje kućanstava od 4 kW i 5 kW.

Na slici 5.14. grafički su prikazani naponi na sabirnicama zamkaste mreže bez integriranog FN sustava kada je napon 1,01 p.u., a na slici 5.15. prikazani su naponi na sabirnicama kada je napon 1,05 p.u.



Slika 5.14. Grafički prikaz napona na sabirnicama osnovnog slučaja za 1,01 p.u.



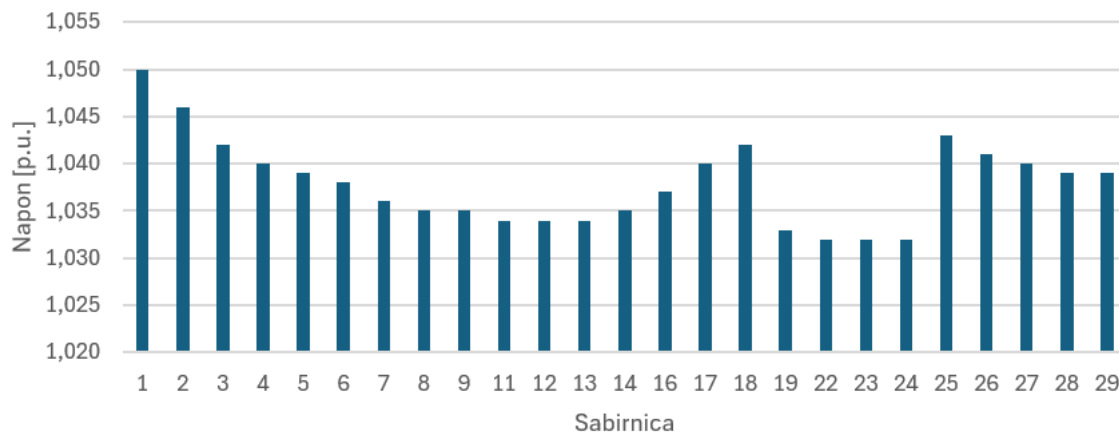
Slika 5.15. Grafički prikaz napona na sabirnicama osnovnog slučaja za 1,05 p.u.

U ovom scenariju može se vidjeti iz grafa da napon na sabirnicama postepeno pada kako se udaljavamo od transformatorske stanice te ponovno rastu od sabirnica 13 do 18 jer su to sabirnice koje su zamkasto spojene novim vodom na transformatorsku stanicu. Prvo postavljamo napon mreže na 1,01 p.u. i promatramo napone i gubitke za takav slučaj. Kada je napon 1,01 p.u. gubitci iznose 2 kW, a naponi su nešto niži no niti jedan napon na sabirnici ne prelazi granične vrijednosti niti pada dovoljno nisko da bude nepoželjno za mrežu. Nakon što napon postavimo na 1,05 p.u. gubitci su nešto manji i iznose 1,9 kW a naponi su također stabilni samo imaju malo više iznose. Promjena napona u zamkastoj mreži nije toliko značajna kao kada to radimo u radijalnoj, odnosno promjene napona i gubitaka su manje.

5.4.2. Djelomična integracija FN (5 kW)

Za ovaj scenarij integriramo FN snage 5 kW na svako drugo kućanstvo u mreži, a tereti odnosno potrošnja ostaje nepromijenjena.

Na slici 5.16. grafički su prikazani naponi na sabirnicama s djelomičnom integracijom FN sustava (5 kW) za zamkastu mrežu.



Slika 5.16. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s djelomičnom integracijom FN (5 kW)

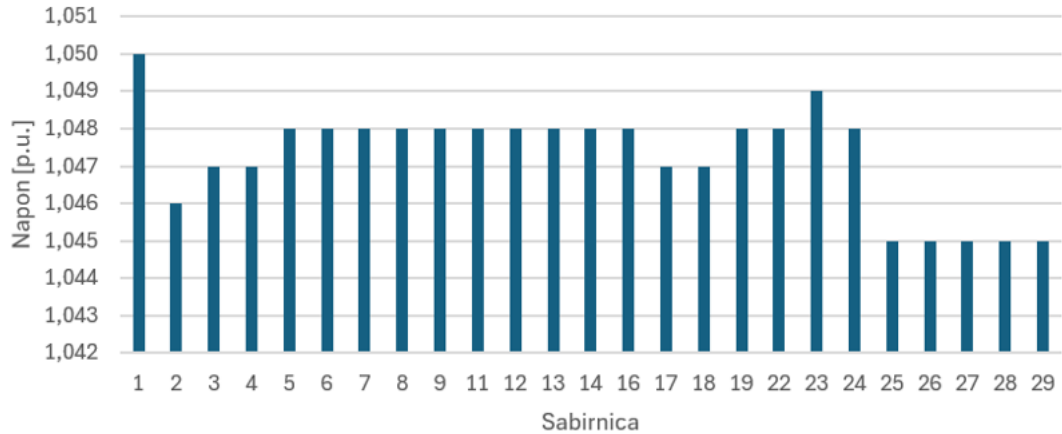
U ovom scenariju može se vidjeti iz grafa da se napon na sabirnicama nije značajno mijenjao s obzirom na prethodni slučaj gdje nemamo integriran FN.

Jedina osjetna razlika između prva dva slučaja je smanjenje gubitaka gdje u ovom slučaju gubitci iznose 0,4 kW. Rezultati simulacije su očekivani jer novi izvori energije smanjuju gubitke u mreži kao i u radialnom slučaju.

5.4.3. Potpuna integracija FN (5 kW)

Integriramo FN sustav na svako kućanstvo u mreži, proizvodnja FN je 5 kW, a tereti ostaju isti.

Iz slike 5.17 grafički su vidljivi naponi na sabirnicama s potpunom integracijom FN sustava (5 kW).



Slika 5.17. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s potpunom integracijom FN (5 kW)

Naponi na sabirnicama relativno su stabilni te nema nekih značajnih odstupanja u naponu među sabirnicama, također su svi naponi u dozvoljenim granicama. Ponovno se događa ista situacija kada potpuno integriramo FN sustav, odnosno dolazi do promjene tokova snaga te na slici 5.18. možemo vidjeti kako 14 kW snage ide u obrnutom smjeru tj. vraća se u SN mrežu.

Gubitci iznose 0,2 kW što je još manje nego u prethodnim scenarijima i ovo su najmanji gubitci koje smo uspjeli dobiti u svim simulacijskim vježbama što je i za očekivati s obzirom da smo ponovno povećali proizvodnju u mreži.

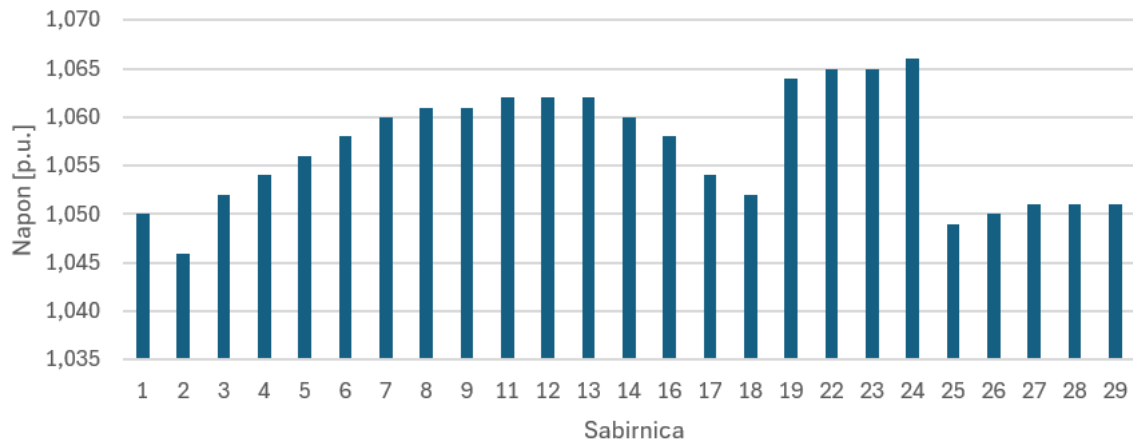
Generation Summary Report											
Source			Scheduled				Limits				
	Name	Type	Rated kVA	kW	kVAR	Vpu	kVAR Min	kVAR Max	kW	kVAR	kVA
A	GEN-1	PQG	100	100	0				100	0	100
C	GEN-2	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-3	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-4	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-5	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-6	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-7	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-8	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-9	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-10	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-11	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-12	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-13	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-14	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-15	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-16	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-17	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-18	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-19	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-20	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-21	PQG	5	5	0				5	0	5
C	GEN-22	PQG	5	5	0				5	0	5
A	GEN-23	PQG	5	5	0				5	0	5
C	UTIL-2	Sw				1,050			-14	44	46

Slika 5.18. Izvještaj proizvodnje električne energije u scenariju s potpunom integracijom FN (5 kW)

5.4.4 Potpuna integracija FN (7,5 kW)

Sada povisujemo proizvodnju FN sa 5 kW na 7,5 kW, no tereti ostaju i dalje 4 kW i 5 kW.

Na slici 5.19. nalazi se grafički prikaz napona na sabirnicama s potpunom integracijom FN sustava od 7,5 kW.



Slika 5.19. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s potpunom integracijom FN (7,5 kW)

Napon na sabirnicama u ovom slučaju postepeno raste što se više udaljavamo od transformatorske stanice te postepeno pada kako joj se ponovno nazad približavamo zbog dodanog voda. Također vidimo skok napona na sabirnicama koju su najudaljenije od transformatorske stanice (od 19 do 24).

Gubitci su ponovno porasli s obzirom na zadnji slučaj jer na istu potrošnju imamo još veću proizvodnju što dovodi do porasta gubitaka koji sada iznose 1 kW. Osim porasta gubitaka imamo i porast energije koji se vraća u mrežu radi pojave promjene tokova koja iznosi 118 kW što je vidljivo na slici 5.20. To je sve bilo za očekivati u ovome scenariju jer na nepromijenjenu potrošnju povećavamo proizvodnju.

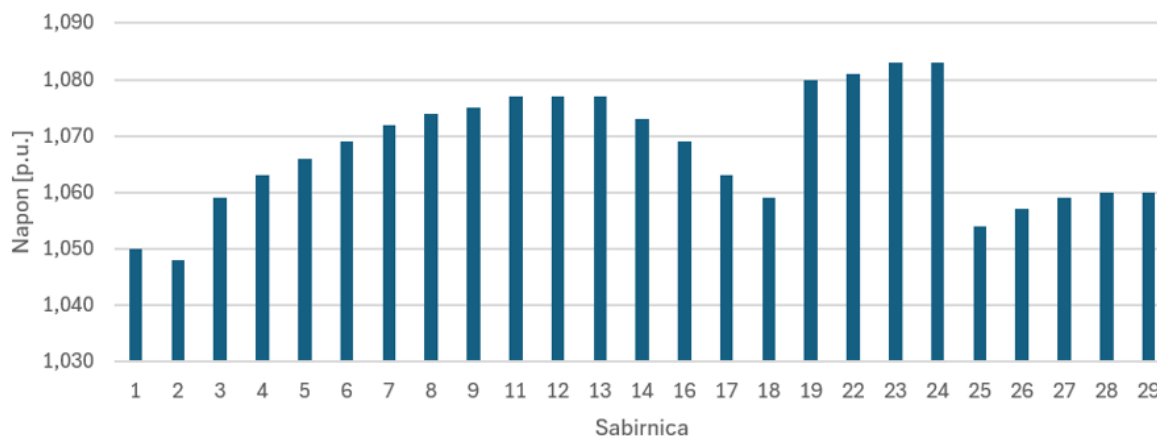
Generation Summary Report											
Source			Scheduled				Limits				
Name	Type	Rated kVA	kW	kVAR	Vpu	kVAR Min	kVAR Max	kW	kVAR	kVA	
A GEN-1	PQG	150	150	0				150	0	150	
A GEN-2	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-3	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-4	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-5	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-6	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-7	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-8	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-9	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-10	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-11	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-12	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-13	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-14	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-15	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-16	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-17	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-18	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-19	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-20	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-21	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-22	PQG	7	8	0				8	0	8	
A GEN-23	PQG	7	8	0				8	0	8	
A UTIL-2	Sw				1.050			-118	46	127	

Slika 5.20. Izvještaj proizvodnje električne energije u slučaju s potpunom integracijom FN (7,5 kW)

5.4.5. Potpuna integracija FN (7,5 kW) i 50% manji teret

Ovo je posljednji scenarij zamkaste mreže u kojem snaga FN ostaje 7,5 kW, ali terete smanjujemo za pola njihove vrijednosti, odnosno na 2 kW i na 2,5 kW. Kao i za radijalnu mrežu, s ovim scenarijem predstavljamo kritičnu situaciju gdje je proizvodnja znatno veća od potrošnje te promatramo kako će se naponi ponašati u slučaju dodavanja novog voda koji povezuje mrežu u zamkastu.

Slika 5.21. grafički prikazuje napone na sabirnicama s potpunom integracijom FN od 7,5 kW i 50% manjim teretom.



Slika 5.21. Grafički prikaz napona na sabirnicama slučaja s potpunom integracijom FN (7,5 kW) i 50% manjim teretom

Iz grafa vidimo kako bez obzira na veliku proizvodnju, a malu potrošnju naponi svejedno ne prelaze granični napon od +10%. Naponi jesu malo veći i približavaju se graničnim vrijednostima što nije uvijek idealno za mrežu, ali bitno je da ne prelaze dozvoljenu granicu.

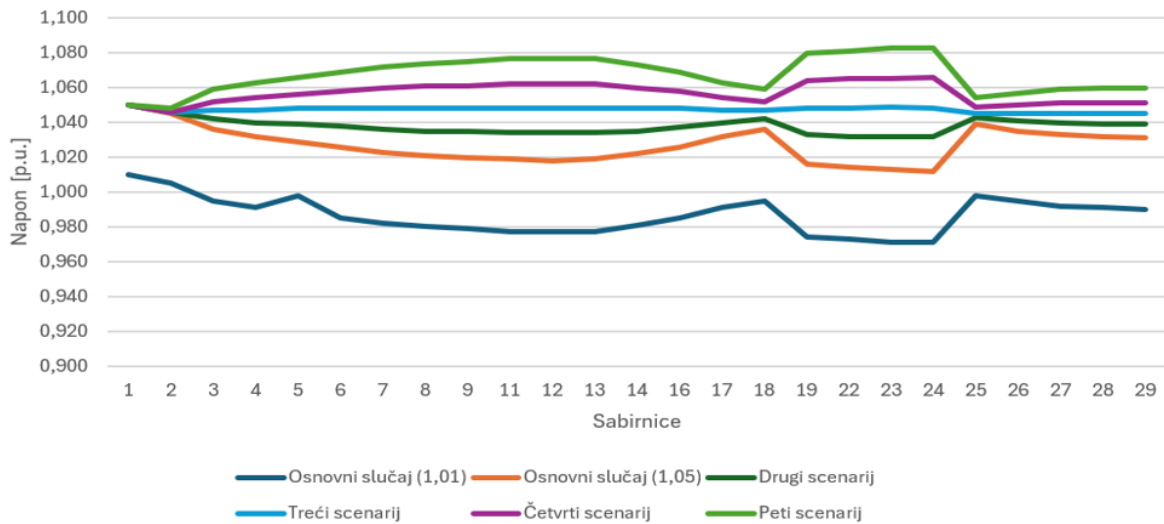
No zbog prevelike proizvodnje možemo ponovno očekivati još veće gubitke i više energije koja se vraća u mrežu. Gubitci u ovom scenariju iznose 2,5 kW što je znatno više nego u prethodnom scenariju, a veći gubitci su direktan rezultat porasta energije koja se vraća u mrežu zbog obrnutih tokova snage. Energija vraćena u mrežu iznosi 215 kW što je vidljivo na slici 5.22.

Generation Summary Report											
Source			Scheduled				Limits				
	Name	Type	Rated kVA	kW	kVAR	Vpu	kVAR Min	kVAR Max	kW	kVAR	kVA
A	GEN-1	PQG	150	150	0				150	0	150
C	GEN-2	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-3	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-4	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-5	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-6	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-7	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-8	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-9	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-10	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-11	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-12	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-13	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-14	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-15	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-16	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-17	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-18	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-19	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-20	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-21	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-22	PQG	7	8	0				8	0	8
C	GEN-23	PQG	7	8	0				8	0	8
C	UTIL-2	Sw				1.050			-215	27	216

Slika 5.22. Izvještaj proizvodnje električne energije u slučaju s potpunom integracijom FN (7,5 kW) i 50% manjim teretom

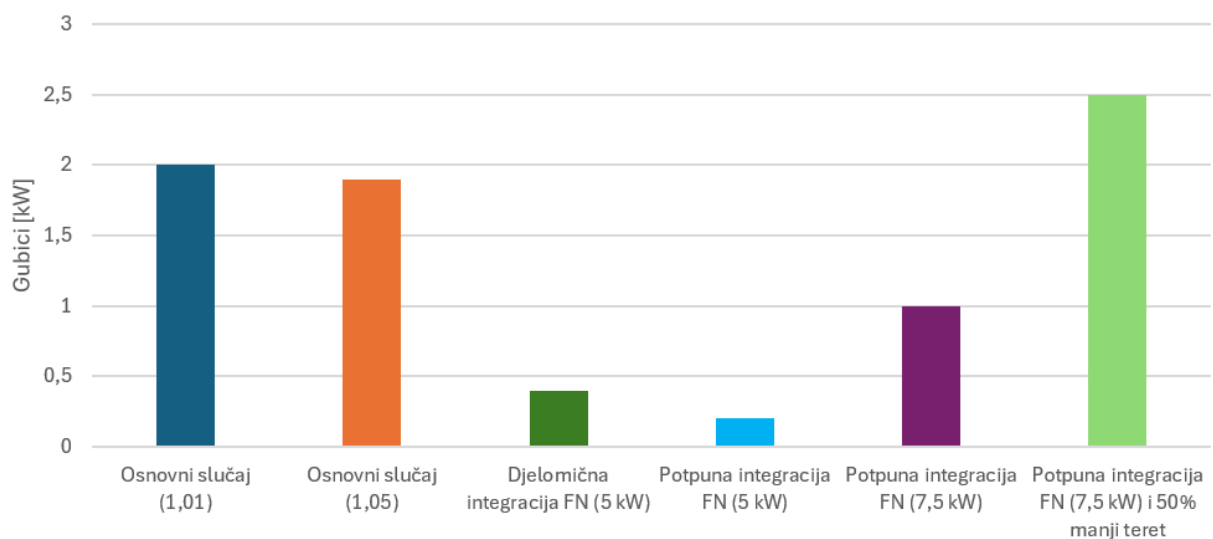
5.4.6. Usporedba svih simulacija zamkaste mreže

Nakon izvođenja svih simulacija i scenarija za zamkastu mrežu na slici 5.23. prikazana je grafička usporedba svih scenarija, a slika 5.24. grafički prikazuje gubitke svih scenarija.



Slika 5.23. Grafički prikaz usporedbe napona na sabirnicama u svim simulacijama zamkaste mreže

Kao i u prethodnoj usporedbi na grafu su naponi prikazani linjski za svaki scenarij te od sabirnice 1 do sabirnice 24 prikazani su naponi na prvom izvodu, a od sabirnice od 25 do 29 prikazani su naponi sabirnica na drugom izvodu.



Slika 5.24. Grafički prikaz usporedbe gubitaka u svim simulacijama zamkaste mreže

Iz grafova možemo zaključiti kako je ponovno najstabilniji treći scenarij kada se simulira potpuna integracija FN snage 5 kW. U tom scenariju promjene napona su minimalne, nisu blizu kritičnim vrijednostima te ne prelaze dozvoljene granice. Gubitci su također svedeni na minimum u trećem scenariju, no ponovno problem je u tome što dolazi do pojave obrnutih tokova snaga iz razloga što nam je proizvodnja veća od potrošnje. Zbog toga drugi scenarij odnosno scenarij gdje je FN integriran na svako drugo kućanstvo bi ponovno bio najidealniji jer nema promjene tokova snaga. Gubitci u drugom scenariju su malo veći nego u trećem scenariju no i dalje su zadovoljavajuće mali, a promjene napona na sabirnicama su također minimalne no nešto veće.

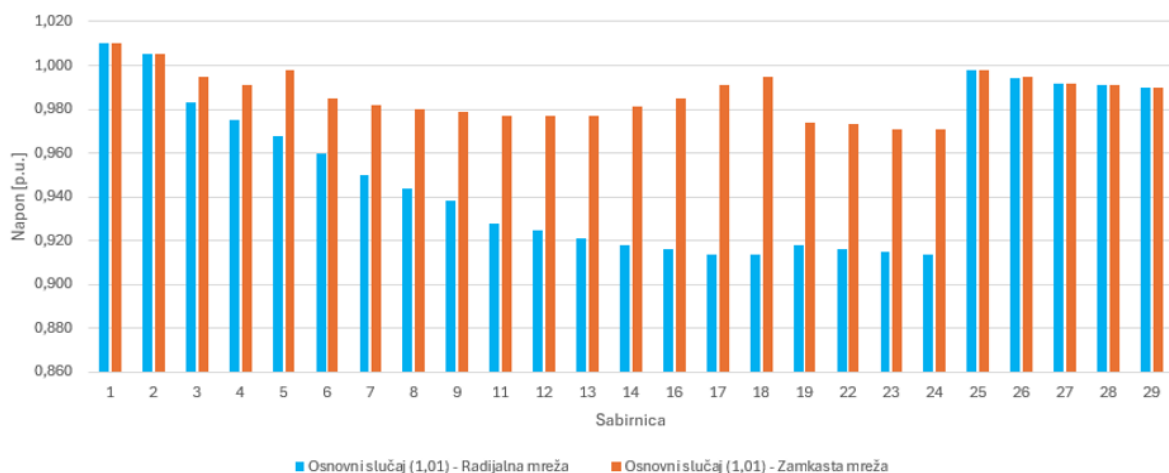
Na grafovima se vidi da je peti scenarij najgori po gubitcima i po tome što napon na sabirnicama doseže više vrijednosti nego što bi to bilo idealno za mrežu. Zbog znatno veće proizvodnje od potrošnje gubitci se povećavaju, napon doseže više vrijednosti i količina energije koja se vraća u mrežu je velika.

U simulacijama za zamkastu mrežu razlika između postavljanja napona na 1,01 p.u. i 1,05 p.u. je manja. Razlika u gubitcima je minimalna, a promjene napona su skoro identične. Jedina razlika je što za napon od 1,01 p.u. vrijednosti napona na sabirnicama niže.

5.5. Usporedba rezultata simulacija radijalne i zamkaste mreže

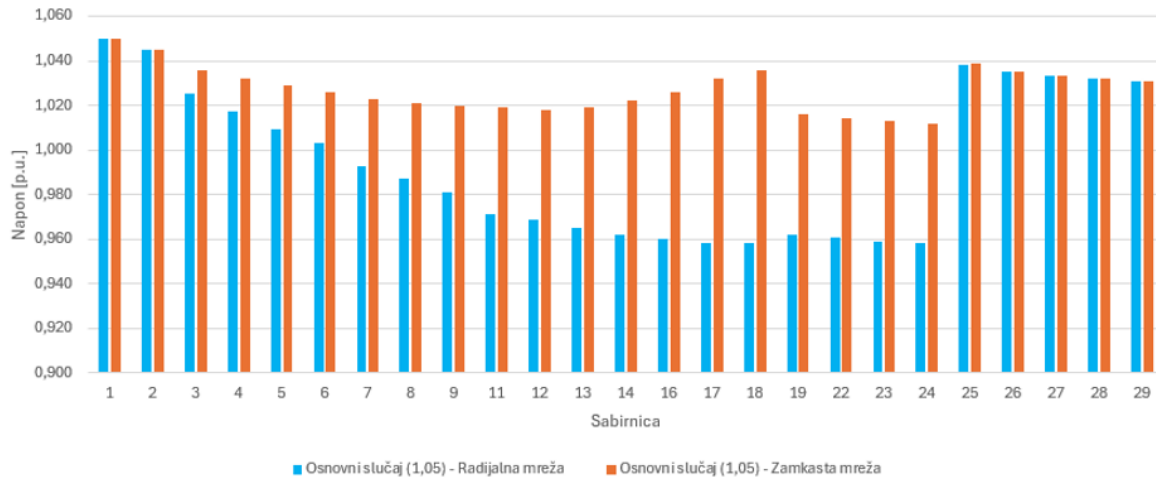
U ovome poglavlju uspoređujemo scenarij po scenarij za obje mreže odnosno promatramo razlike u naponima na sabirnicama i gubitke.

Na slici 5.25. prikazana je usporedba osnovnih slučajeva kada je napon postavljen na 1,01 p.u., a na slici 5.26. prikazana je usporedba osnovnih slučajeva kada je napon postavljen na 1,05 p.u.



Slika 5.25. Usporedba napona na sabirnicama za osnovni slučaj (1,01) radijalne i zamkaste mreže

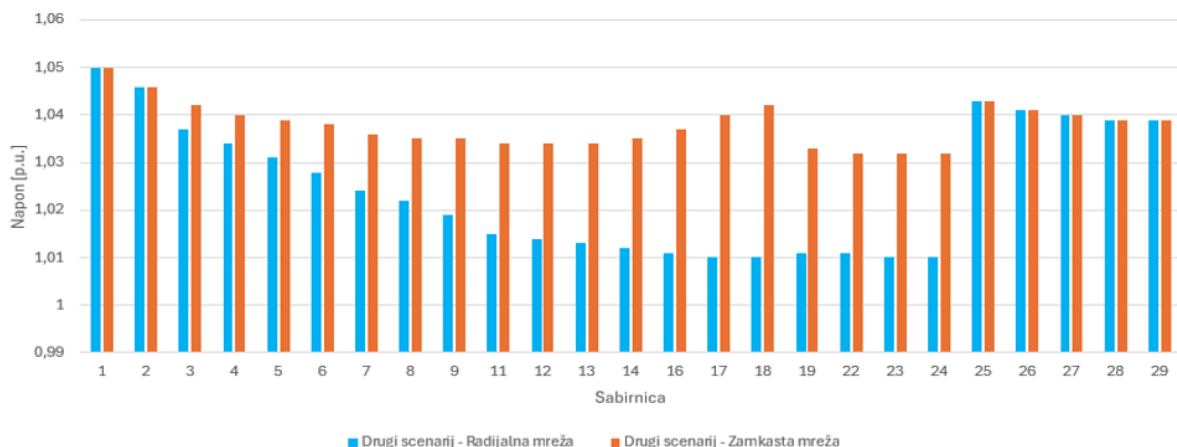
Iz grafa je vidljivo da naponi na sabirnici radijalne mreže puno više padaju nego u zamkastoj mreži odnosno padaju do tih vrijednosti koje, iako ne prelaze granicu, nisu dobre za mrežu. Iz tog razloga napon dižemo na 1,05 p.u. kako bismo izbjegli pad napona na te vrijednosti.



Slika 5.26. Usporedba napona na sabirnicama za osnovni slučaj (1,05) radijalne i zamkaste mreže

Iz ovog grafa vidljivo je kako su vrijednosti napona na sabirnicama radijalne mreže popravljene podizanjem napona na 1,05 p.u. Također je vidljivo kako za zamkastu mrežu nije toliko bitno kakav je napon postavljen na početku jer naponi na sabirnicama u oba slučaja i za napon od 1,01 p.u. i 1,05 p.u. se ne mijenjaju značajno.

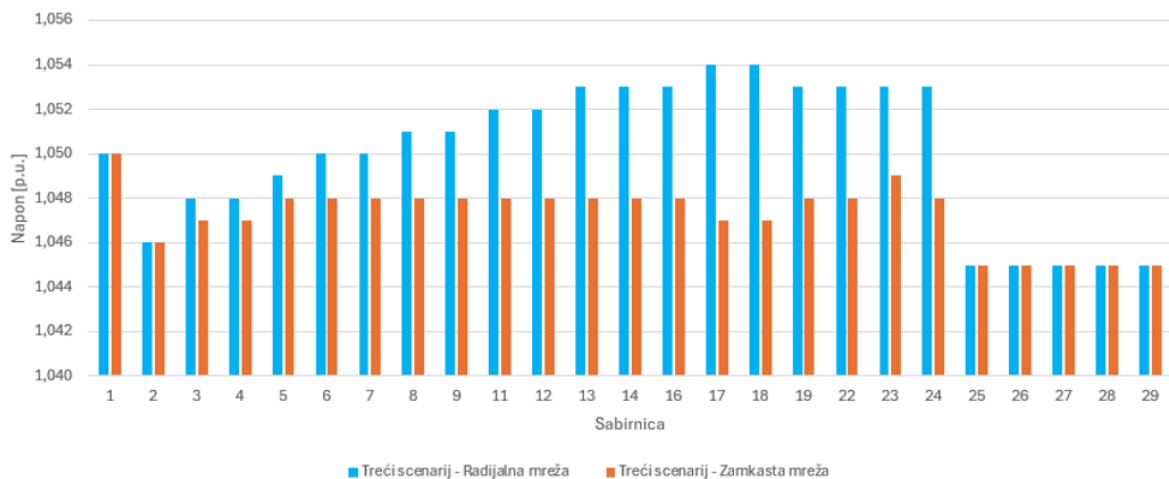
Na slici 5.27. prikazana je usporedba radijalne i zamkaste mreže nakon što smo integrirali FN od 5 kW na svako drugo kućanstvo.



Slika 5.27. Usporedba napona na sabirnicama za drugi scenarij radijalne i zamkaste mreže

Iz grafa vidimo kako naponi u radijalnoj mreži padaju udaljavanjem od transformatorske stanice dok kod zamkaste mreže naponi na sabirnicama imaju puno manje promjene jer je sabirnica 18 također spojena na transformatorsku stanicu. Zbog dodavanja tog voda, zamkasta mreža ima stabilnije promjene napona na sabirnicama jer potrošači koji su u radijalnoj mreži bili udaljeni u zamkastoj mreži su blizu transformatorske stanice.

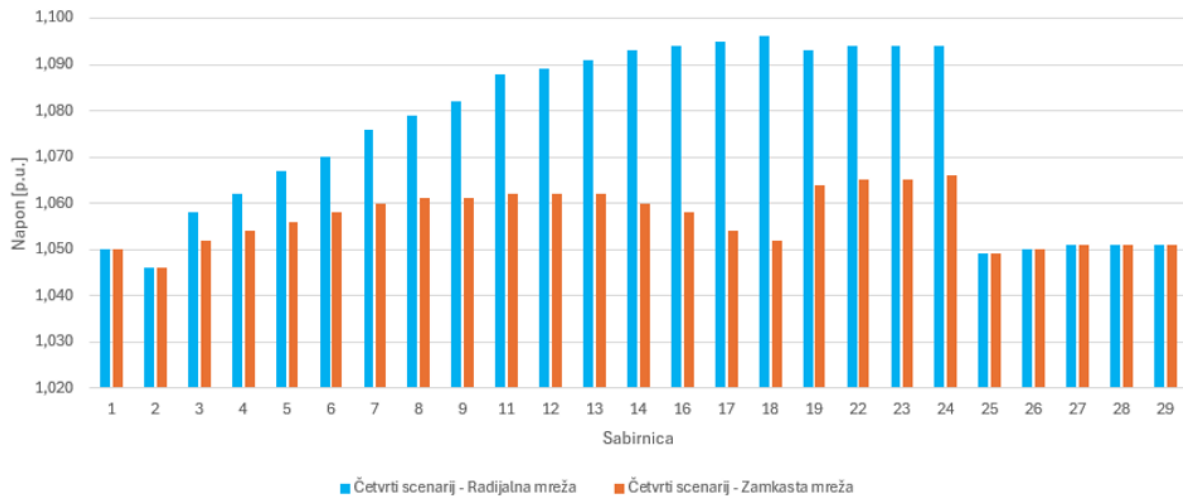
Slika 5.28. prikazuje usporedbu napona na sabirnicama u scenariju kada FN od 5 kW integriramo na svako kućanstvo.



Slika 5.28. Usporedba napona na sabirnicama za treći scenarij radijalne i zamkaste mreže

Ovaj graf prikazuje nam kako su naponi na sabirnicama potpunom integracijom FN u obje mreže najstabilniji u ovom scenariju. Promjene su minimalne za obje mreže iako su u zamkastoj mreži promjene stabilnije nego u radijalnoj. Također u zamkastoj mreži nema porasta napona udaljavanjem od transformatorske stanice zbog dodavanja novog voda i spajanja mreže u petlju.

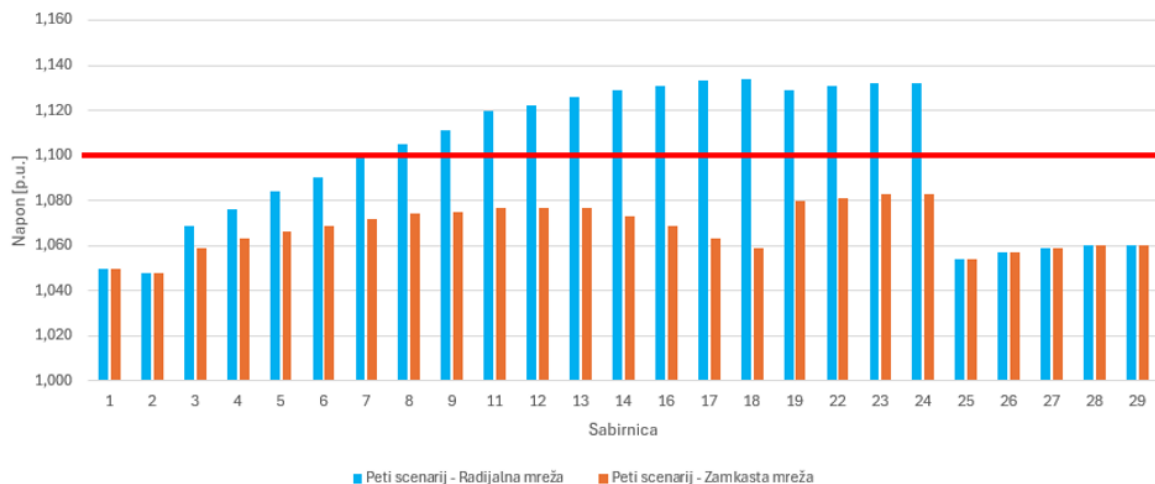
Nadalje, slika 5.29. prikazuje usporedbu napona na sabirnicama za scenarij kada povisujemo proizvodnju FN-a na 7,5 kW.



Slika 5.29. Usporedba napona na sabirnicama za četvrti scenarij radijalne i zamkaste mreže

U ovom se grafu do sada najbolje vidi razlika između zamkaste i radijalne mreže jer kako povisujemo proizvodnju tako promjene napona na sabirnicama radijalne mreže više rastu. U radijalnoj mreži naponi na sabirnicama skoro prelaze dozvoljenu granicu napona što nije dobro za mrežu dok u zamkastoj izvedbi tog problema nema.

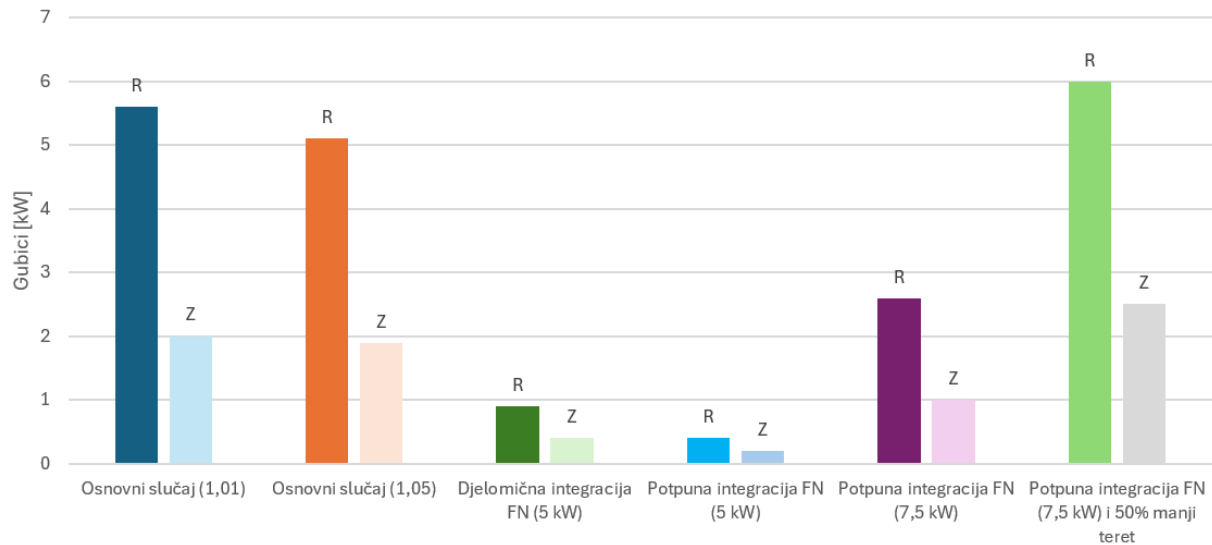
Slika 5.30. prikazuje nam usporedbu napona na sabirnicama posljednjeg scenarija gdje na proizvodnju FN-a od 7,5 kW smanjujemo potrošnju za pola.



Slika 5.30. Usporedba napona na sabirnicama za peti scenarij radijalne i zamkaste mreže

Iz grafa posljednjeg scenarija bolje vidimo razliku kako je zamkasta izvedba mreže bolja za integraciju FN elektrane. Napon na sabirnicama radijalne mreže prelazi dozvoljene granice napona što se u stvarnoj mreži nikako ne smije dogoditi.

Osim usporedbe napona u svim scenarijima, jednako je bitno usporediti i gubitke za svaki scenarij obje mreže koji su prikazani slikom 5.31.



Slika 5.31. *Usporedba gubitaka radijalne i zamkaste mreže za sve scenarije*

Iz grafa gubitaka vidljivo je kako su gubici u radijalnoj mreži (R) u svakom scenariju veći od onih u zamkastoju mreži (Z). To je samo još jedna potvrda kako je zamkasta mreža povoljnija i bolja za integraciju FN elektrana na kućanstva.

Gubitke prikazujemo kilovatima [kW] jer u tokovima snage simuliramo samo jedan određeni trenutak u mreži, odnosno ne možemo govoriti o energiji izraženoj u kilovatsatima [kWh] jer za to je potrebno vrijeme, a u tokovima snage se uglavnom gleda samo jedan "zamrznuti" trenutak sustava te iz tog razloga su gubici izraženi u kilovatima.

Nakon provedenih simulacija za obje mreže i uspoređivanja svih rezultata jasno je da je zamkasta mreža bolja i kvalitetnija za svaki scenarij zbog stabilnijih napona na sabirnicama koje niti u jednom trenutku ne prelaze dozvoljene vrijednosti napona te su gubici duplo pa čak i više od duplo manji nego u radijalnoj mreži.

6. ZAKLJUČAK

Zbog negativnih utjecaja FN elektrana na mrežu provedena su testiranja i simulacije 5 različitih scenarija za dvije različite strukture mreže. Analizom rezultata i dobivenih podataka možemo zaključiti kako se stanja u mreži mijenjaju ovisno o strukturi mreže, potrošnji i proizvodnji u mreži. Iz dobivenih grafova i rezultata vidljivo je kako na obje strukture integracija fotonapona najbolje utječe na mrežu kada su proizvodnja i potrošnja približne. Kada nam je proizvodnja prevelika, a potrošnja premala, dolazi do problema u kojemu se stvaraju obrnuti tokovi snaga što utječe loše na mrežu. Obrnuti tokovi snaga utječu na napone na sabirnicama tako što svojom pojavom vrijednosti napona na sabirnicama prelaze dozvoljeno ograničenje od $\pm 10\%$ što se događa u radikalnoj mreži ili budu malo od granice što također nije dobro za mrežu. Osim problema s naponom na sabirnicama, kada je potrošnja prevelika stvara se i problem većih gubitaka zbog energije koja se vraća nazad u mrežu. Najbitnija stvar koja se može zaključiti iz simulacija pored izjednačavanja proizvodnje i potrošnje je ta da je zamkasta mreža znatno bolja za integraciju FN elektrana. Vod koji približava transformatorsku stanicu najudaljenijim potrošačima čini veliku razliku tako što smanjuje gubitke u mreži i što smanjuje promjenu napona na sabirnicama. U zamkastoj mreži nije dolazilo do prelazaka graničnih vrijednosti i gubitci su bili više od duplo manji. Glavno rješenje za popravljavanje naponskih prilika u svim mrežnim strukturama neovisno o količini integriranih FN elektrana je transformator kojim se može regulirati napon u mreži.

LITERATURA

- [1] N. Zovko, "Utjecaj velikog udjela fotonaponskih elektrana na distributivnu mrežu", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2018.
- [2] D. Habash, A. Azzam, R. Issa, E. Abdelsalam, H. Qandil, "Impact of Grid-Connected Photovoltaic Systems on Low Voltage Distribution Network," IEE, srpanj 2023.
- [3] A.S. Saidi, "Impact of grid-tied photovoltaic systems on voltage stability of tunisian distribution networks using dynamic reactive power control", Science Direct, br.2, vol.13, ožujak 2022.
- [4] D. Pajan, "Utjecaj solarne elektrane na mrežu u točki priključenja", Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
- [5] A. K. Rahmawan, M. Facta, S. Handoko, " The Effect of Solar Power Generating in Low Voltage Network on the Quality of Electricity to Costumers Side, A Case Study 4 kWp Photovoltaic at Salt Storage", Atlantis Press, vol.7, str.122-129, kolovoz 2023.
- [6] R. Goić, J. Krstulović Opara, I. Penović, D. Jakus, I. Zlatunić, Priključak velikih fotonaponskih elektrana na distribucijsku mrežu, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO-CIRED, S04-08
- [7] Lj. Majdandžić, "Fotonaponski sustavi", Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 2010.
- [8] ABB, Technical Application Papers No.10: Photovoltaic plants, 2013.
- [9] R. Goić, D. Jakus, I. Penović, "Distribucija električne energije", Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2008.
- [10] V. Radošević "Utjecaj solarnih elektrana na tokove snage u nesimetričnoj distribucijskoj mreži", HEP, Elektra Zagreb
- [11] G. Knežević, K. Fekete, S. Nikolovski, Simulation of the Residential Photovoltaic System Expansion Impact on the Voltage Profile, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity" / Katalinić, Branko (ur.). Beč: DAAAM International Vienna, 2011. str. 1615-1616

SAŽETAK

U ovome radu teorijski je opisan zatim simuliran utjecaj integracije fotonaponske elektrane na različite strukture niskonaponske mreže. Glavni fokus je bio prikazati što se događa s naponom na sabirnicama, gubitcima i tokovima snaga u različitim scenarijima. Prvo su odrađene simulacije u programu EasyPower, a potom se analiziraju i uspoređuju dobiveni rezultati. Na kraju je izveden zaključak o utjecaju integracije fotonapona na obje strukture mreže i njihova pogonska ograničenja.

Ključne riječi: fotonapon, pogonska ograničenja, struktura niskonaponske distribucijske mreže, tokovi snaga, utjecaj fotonapona na mrežu

ABSTRACT

In this paper, the impact of integrating a photovoltaic power plant on various low-voltage network structures is theoretically described and then simulated. The main focus was to demonstrate what happens to the voltage at busbars, losses, and power flows in different scenarios. Simulations were first conducted using the EasyPower software, followed by the analysis and comparison of the obtained results. Finally, a conclusion was drawn about the impact of photovoltaic integration on both network structures and their operational limitations.

Keywords: photovoltaic, operational limitations, low-voltage distribution network, power flows, impact of photovoltaic on the network