

# Problemi sa održavanjem poželjnih naponskih prilika u distribucijskim mrežama sa priključenim fotonaponskim elektranama

---

Arlović, Dina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:251355>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**PROBLEMI S ODRŽAVANJEM POŽELJNIH  
NAPONSKIH PRILIKA U DISTRIBUCIJSKIM  
MREŽAMA S PRIKLJUČENIM FOTONAPONSKIM  
ELEKTRANAMA**

**Završni rad**

**Dina Arlović**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 12.09.2023.

Odboru za završne i diplomске ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Dina Arlović
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4782, 28.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	33580368009
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Sumentor:</b>	Marina Dubravac, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Problemi sa održavanjem poželjnih naponskih prilika u distribucijskim mrežama sa priključenim fotonaponskim elektranama
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Objasniti koji problemi sa naponom se mogu očekivati u distribucijskim mrežama sa povećanom penetracijom fotonaponskih elektrana. Navesti i moguće načine rješavanja problema. Na primjeru distribucijske mreže sa fotonaponskim elektranama, istražiti utjecaj fotonaponskih elektrana na napon i ispitati različite načine regulacije napona. Sumentorica sa FERIT-a: Marina Dubravac Tema rezervirana za: Dina Arlović
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	12.09.2023.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	24.09.2023.
<b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 25.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Dina Arlović

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4782, 28.07.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Problemi sa održavanjem poželjnih naponskih prilika u distribucijskim mrežama sa priključenim fotonaponskim elektranama**

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

i sumentora Marina Dubravac, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

**Potpis studenta:**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. PREGLED PODRUČJA RADA .....</b>	<b>2</b>
<b>3. PREGLED METODA ZA ODRŽAVANJE POŽELJNIH NAPONSKIH PRILIKA U DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA S PRIKLJUČENIM FOTONAPONSKIM ELEKTRANAMA .....</b>	<b>4</b>
3.1. Promjena parametara vodova .....	5
3.2. Promjena položaja preklopke transformatora.....	6
3.3. Upravljanje potrošnjom .....	7
3.4. Smanjenje proizvodnje fotonapona.....	8
3.5. Upravljanje jalovom snagom .....	10
3.5.1. Upravljanje pomoću fotonaponskog pretvarača .....	10
3.5.2. Upravljanje pomoću uređaja prilagođene snage .....	13
3.6. Spremnici energije (baterije) .....	14
3.7. Statička preklopka .....	14
3.8. Hibridne metode.....	15
3.8.1. Volt-var-watt metoda.....	15
3.8.2. Promjena položaja preklopke transformatora i volt/var metoda .....	16
<b>4. PRIMJENA METODA ZA ODRŽAVANJE POŽELJNIH NAPONSKIH PRILIKA U DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA S PRIKLJUČENIM FOTONAPONSKIM ELEKTRANAMA .....</b>	<b>17</b>
4.1. Opis mreže korištene za simulacije .....	17
4.2. Provođenje simulacije.....	18
4.3. Rezultati simulacije.....	20
4.3.1. Bazni slučaj .....	20
4.3.2. Slučaj A .....	21
4.3.3. Slučaj B .....	27
4.4. Usporedba rezultata simulacije .....	33
4.4.1. Slučaj A, slučaj B i bazni slučaj .....	33
4.4.2. Slučaj A .....	35

4.4.3. Slučaj B .....	36
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>37</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>38</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>40</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>40</b>

# 1. UVOD

Sve veća popularnost fotonaponskih elektrana u vidu solarnih panela, u posljednje vrijeme, sa sobom je donijela određene probleme koji se javljaju u distribucijskim mrežama s obzirom da se pojavljuju reverzni tokovi snage koji kao takvi uzrokuju porast naponske razine iznad gornje granice dozvoljene vrijednosti. Stoga su razvijene različite metode regulacije naponskih prilika u distribucijskim mrežama s velikim udjelom fotonaponskih elektrana. Ovaj rad bavi se upravo sistematizacijom i opisom tih metoda te za cilj ima ispitivanje djelotvornosti svake od njih.

U drugom poglavlju opisani su neki od znanstvenih radova koji se bave istom ili sličnom tematikom te je tako napravljen uvod u teze kojima se ovaj rad bavi. Također opisan je rad u kojem je predstavljeno osam metoda regulacije naponskih prilika. Treće poglavlje ukratko opisuje svaku od osam navedenih metoda u vidu njihovog djelovanja na sprječavanje reverznih tokova snage i/ili održavanja naponskih prilika unutar propisanih granica. U posljednjem, četvrtom, poglavlju napravljena je simulacija na već postojećoj mreži u kojoj su se dodavanjem fotonaponskih panela i promjenom nazivne snage istih, pojavili problemi u vidu povećanja napona te su neke od opisanih metoda testirane ne mijenjajući parametre mreže kako bi se, u konačnici, učinkovitost metoda mogla usporediti i kako bi se mogao izvesti zaključak o onoj koja se pokazala najuspješnija.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Objasniti koji problemi sa naponom se mogu očekivati u distribucijskim mrežama sa povećanom penetracijom fotonaponskih elektrana. Navesti i moguće načine rješavanja problema. Na primjeru distribucijske mreže sa fotonaponskim elektranama, istražiti utjecaj fotonaponskih elektrana na napon i ispitati različite načine regulacije napona.

## 2. PREGLED PODRUČJA RADA

Problemi s održavanjem naponskih prilika u distribucijskim mrežama (DM) s fotonaponom (FN) postali su aktualna tema današnjice s obzirom na sve veću popularnost obnovljivih izvora energije pa tako i fotonaponskih elektrana. Sve veća integracija FN može imati negativne učinke na DM, kao što su:

- reverzni tokovi snage
- preopterećenje komponenata mreže
- povećani gubitci
- problemi s frekvencijom i koordinacijom
- problemi sa zaštitnim uređajima
- naponska nesimetrija i prenaponi. [1]

Kao najčešći problemi u literaturi spominju se problemi s naponskim prilikama te su oni kao i njihova rješenja, postali su tema mnogih znanstvenih radova, a neki od njih ukratko su prikazani i sažeto objašnjeni u ovom poglavlju koje za cilj ima pregled teme ovog rada.

U literaturi [1] autori se bave procjenom učinkovitosti električnih vozila kao skladišta energije u distribucijskim mrežama. Rad opisuje algoritam inteligentnog upravljanja viškom energije punjenjem baterije električnog vozila u svrhu smanjenja problema koje FN stvara u distribucijskoj mreži. Električni automobil u ovom slučaju služi kao spremnik energije u kojeg se skladišti višak koji stvara odstupanje napona od dozvoljene razine. Zaključno, prema dobivenim rezultatima te provedbom detaljne analize rada utvrđeno je da predstavljeni algoritam pospješuje uvođenje solarnih sustava u distribucijsku mrežu do čak 50%, ovisno o karakteristikama mreže i vozila.

U radovima [2] i [3] objašnjena je Volt/VAr metoda kontrole naponskih prilika. Radovi se bave uporabom kontrolne petlje čija je zadaća održati napon unutar zadanih granica na način da koristi jalovu snagu iz fotonaponskog pretvarača. Ovi radovi obrađuju nekonvencionalnu metodu kontrole naponskih prilika, za razliku od tradicionalne Volt/VAr metode koja regulira napon uz pomoć kondenzatorskih baterija i/ili promjenom preklopke transformatora.

Nadovezujući se na radove [2] i [3], rad [4] obrađuje Volt/VAr/Watt metodu. U radu je objašnjeno i raščlanjeno djelovanje ove metode koja regulira i djelatnu i jalovu snagu. Ova metoda regulira naponske prilike na način da upravlja jalovom snagom Volt/VAr metodom, kako je objašnjeno u radovima [2] i [3], a djelatnu snagu regulira smanjenjem proizvodnje fotonapona.



Autori literature [5] predlažu hibridnu metodu u kojoj se kombinira konvencionalna metoda poput promjene preklopke transformatora i nekonvencionalna volt/VAr metoda. Rad izvodi zaključak da je ova hibridna metoda učinkovita ukoliko se regulacija napona promjenom preklopke transformatora provodi kao primarna, a Volt/VAr služi kao sekundarna metoda.

Za razliku od radova [1], [3], [4] i [5] čiji je primarni cilj minimizirati naponska odstupanja od nazivnog napona, rad [6] obrađuje problem nesimetričnosti u niskonaponskoj trofaznoj DM uslijed integracije jednofaznih FN u kućanstvima. Autori predlažu četiri metode kao rješenja za navedeni problem:

- povećanje površine presjeka vodiča
- uvođenje kondenzacijskih baterija
- kombinacija povećanja površine presjeka i uvođenja baterija
- upravljanje pomoću fotonaponskog pretvarača.

U radu je posebno istaknuta četvrta metoda koja prikazuje da FN, iako donosi nesimetriju u mreže, također može poslužiti i kao rješenje problema ukoliko se napon regulira pravilnom kontrolom fotonaponskog pretvarača.

Zaključno, u literaturi [7] autori iznose probleme koje FN stvara u distribucijskoj mreži kao što su pojava nesimetričnosti i odstupanje napona od zadanih vrijednosti. Također u radu predlažu i temeljito opisuju rješenja za problem nesimetričnosti i različite metode regulacije neravnoteže napona.

### **3. PREGLED METODA ZA ODRŽAVANJE POŽELJNIH NAPONSKIH PRILIKA U DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA S PRIKLJUČENIM FOTONAPONSKIM ELEKTRANAMA**

Dva najčešća problema koja se javljaju u distribucijskim mrežama (DM) s priključenim fotonaponskim elektranama su nesimetrija i naponska odstupanja od propisane razine.

Nesimetrija u trofaznim mrežama predstavlja stanje u kojem se tri faze napona razlikuju u amplitudama i/ili nemaju među sobom fazni pomak od  $120^\circ$  [6], dok se odstupanje od propisane naponske razine očituje u skokovima napona.

Prema mrežnim pravilima Republike Hrvatske [8] dozvoljeno odstupanje iznosi  $\pm 10\%$  nazivnog napona za sva uklopna stanja u stanju normalnog pogona mreže kao i:

- $\pm 5\%$  nazivnog napona na vodovima SN od sabirnica SN u transformatorskim stanicama VN/SN do sabirnica 10(20) kV u svim transformatorskim stanicama 10(20)/0,4 kV ili rasklopištima 10(20) kV
- $\pm 8\%$  nazivnog napona na vodovima NN [8].

Mrežna pravila također navode da u normalnim pogonskim uvjetima, indikativna planirana razina nesimetričnosti napona u DM iznosi 1,8%, a ta vrijednost odnosi se na 95% 10-minutnih prosjeka efektivnih vrijednosti inverzne komponente napona za razdoblje od tjedan dana [8].

Kako bi se karakteristike mreže držale u ovim, propisanim okvirima, neizbježno je pribjeći metodama regulacije naponskih prilika.

Slika 1.1. prikazuje pregled najčešće korištenih metoda koje će detaljnije biti opisane u daljnjem tekstu.



**Slika 3.1.** Metode za održavanje poželjnih naponskih prilika u distribucijskim mrežama s priključenim fotonaponskim elektranama [7]

### 3.1. Promjena parametara vodova

Ova metoda direktno je povezana s fizičkim karakteristikama vodiča u DM s obzirom da su i naponska nesimetrija i naponsko odstupanje izravno proporcionalni duljini voda [6].

Naponska nesimetrija u vidu razlike u amplitudi napona posebno je izražena u razlici vrijednosti amplitude s početka i s kraja voda [6], kako bi se ovaj problem spriječio, pribjegava se uporabi ove metode na način da se poprečni presjek vodiča povećava [6]. Povećanjem površine poprečnog presjeka smanjuje se impedancija voda što direktno utječe na smanjenje posljedica oba navedena problema [6]. Također, materijal od kojeg je vod izgrađen od iznimne je važnosti za učinkovitost ove metode, iz provedenih pokusa vidljivo je da je naponska nesimetrija manje izražena u vodu koji je izveden kao snop, nego u vodovima čija je izvedba u obliku čeličnog, galvanski razdvojenog vodiča ili zračnog snopa kabela [6].

Međutim, iako je izvedba ove metode poprilično jednostavna, kao nedostatak joj se nameće visoka cijena provedbe u usporedbi s troškovima potrebnim za realizaciju drugih metoda.

### **3.2. Promjena položaja preklopke transformatora**

Metoda promjene položaja preklopke transformatora odnosi se na promjenu prijenosnog omjera između primara i sekundara pojedinog transformatora [7].

Ovaj način kontrole naponskih prilika ograničen je na isključivo povećanje ili smanjenje napona, ovisno o potrebama mreže u zadanom trenutku, npr. ukoliko napon prelazi okvire propisane razine više od -10%, potrebno je povećati napon. Ovakvo povećanje postiže se pomicanjem preklopke na način da se prijenosni omjer poveća, a samim time povećava se i izlazni (sekundarni) napon.

Uvođenje transformatora s mogućnošću promjene položaja preklopke, tradicionalna je i uobičajena praksa u sredjonaponskim mrežama, međutim, povećanjem popularnosti FN javila se potreba za integracijom transformatora s automatskom preklopkom u niskonaponske (distribucijske) mreže u svrhu kontrole inverznih tokova snage s obzirom da ručna preklopka nije dovoljno fleksibilna za kontrolu naponskih prilika u DM s povećanom koncentracijom FN. Uočeno je da uvođenje ove vrste transformatora u DM omogućuje povećanje koncentracije fotonaponskih elektrana bez narušavanja simetrije i propisanih naponskih prilika s obzirom da provođenje ove metode omogućava kontrolu napona koji dolazi do potrošača, ali i zahtjeva poznavanje parametara DM [7].

Preklopka može biti izvedena kao trofazna ili kao tri jednofazne preklopke, a istraživanje je pokazalo da je izvedba u obliku tri jednofazne preklopke učinkovitija u vidu smanjenja gubitaka duž vodova i naponskog odstupanja u DM s FN [7].

Druga kategorija u vidu izvedbe preklopke odnosi se na arhitekturu same preklopke. Prema ovom kriteriju ona može biti mehanička i automatska [7].

### 3.3. Upravljanje potrošnjom

Upravljanje potrošnjom način je kontrole naponskih prilika u DM koji se temelji na izravnom upravljanju opterećenjem u privatnim kućanstvima koje se vrši od strane operatora distribucijske mreže [7].

Ovakav način upravljanja uglavnom se primjenjuje na kućanstvima koja posjeduju fotonaponsku elektranu i vlastite spremnike energije [7].

Ova metoda glavninu svog djelovanja temelji na planiranju potrošnje električne energije na način da velike potrošače u kućanstvima, kao što su grijači vode, pumpe, rashladni sustavi pa i električna vozila, u mrežu uključuje u vrijeme manjeg opterećenja kako bi se uspostavila ravnoteža i ravnomjerna potrošnja tj. kako bi se mreža rasteretila u vrijeme najveće potrošnje.

Ovakav način rukovođenja ostvariv je s obzirom da je potrošnju moguće pretpostaviti kombinacijom prije zabilježenih podataka i izračuna. Slika 3.2. prikazuje graf usporedbe potrošnje i proizvodnje električne energije jednog kućanstva s fotonaponskom elektranom. Na grafu su prikazani podatci o proizvodnji skinuti sa stranica PVGIS-a [9], dok su podatci o potrošnji prikupljeni mjerenjem.

Dakle, ova metoda trebala bi se primjenjivati u slučajevima kada je razlika između proizvodnje i potrošnje električne energije u kućanstvu velika, npr. iz grafa sa slike 3.2. vidljivo je da je u razdoblju od 13 do 15 h proizvodnja električne energije puno veća od potrošnje, stoga bi se u tom periodu višak proizvedene energije mogao iskoristiti za punjenje električnog vozila, korištenje kućanskih aparata, itd.

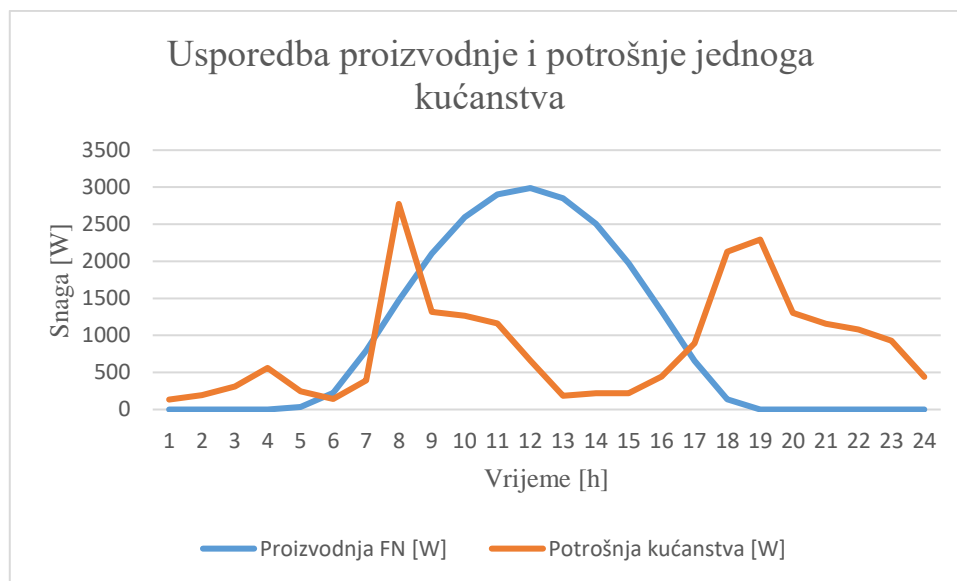
Operator distribucijskog sustava svakodnevno šalje podatke o potrošnji električne energije i opterećenosti mreže svakom pojedinom rukovoditelju konzumacije energije krajnjih korisnika koji upravlja uređajima s mogućnošću odgode rada (kao što su gore navedeni grijači vode, pumpe i klima uređaji) i spremnicima energije te na taj način stvara optimalan raspored rada i uključanja u mrežu te sprječava inverzne tokove snage što u konačnici rezultira poboljšanjem stabilizacije naponskih prilika u DM s povećanom koncentracijom FN [7].

S obzirom na prirodu ove metode, njeno djelovanje pokazalo se korisnim i u vidu uštede električne energije, smanjenja troškova i povećanja energetske učinkovitosti [7].

Inačica ove metode predstavljena je u [1] gdje autori predstavljaju algoritam koji predlaže punjenje baterija električnih vozila u vrijeme manjeg opterećenja mreže u svrhu pametnog skladištenja

viška proizvedene energije FN. Ova verzija metode upravljanja potrošnjom testirana je na dijelu danske niskonaponske mreže te se pokazalo da se njenom primjenom može postići 50% povećanja integracije FN u DM bez narušavanja željenih naponskih prilika ovisno o razini slobode koju operator posjeduje u upravljanju potrošnje krajnjih korisnika [1].

Za realizaciju ove metode ključno je posjedovanje pametnog brojila kao i suradnja krajnjih korisnika što dovodi u pitanje narušavanje privatnosti korisnika koje se nameće kao problem u izvedbi [7].



**Slika 3.2.** Graf potrošnje i proizvodnje jednog kućanstva

### 3.4. Smanjenje proizvodnje fotonapona

Metoda smanjenja proizvodnje (ili volt/watt metoda) odnosi se na smanjenje količine radne snage koju fotonaponske elektrane puštaju u mrežu u trenucima narušavanja ravnoteže DM [7].

Postoje tri stanja u kojima se distribucijska mreža može naći, ovisno o stvarnoj vrijednosti napona sabirnice ( $U$ ), kontrolira se količina proizvedene radne snage ( $P$ ):

1. Napon sabirnice ( $U$ ) premašuje maksimalni dozvoljeni napon ( $U_{max}$ )

$$P = 0 \quad (3-1)$$

2. Napon sabirnice ( $U$ ) poprima vrijednost u granicama između referentnog napona ( $U_{ref}$ ) i maksimalnog dozvoljenog napona

$$P = P_{max} \times \frac{U_{max} - U}{U_{max} - U_{ref}} \quad (3-2)$$

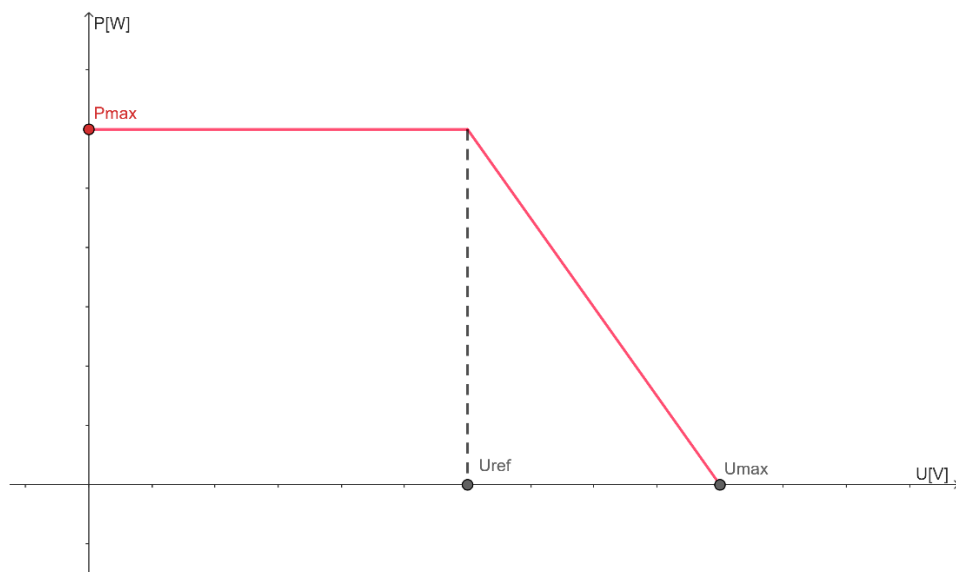
gdje je:  $P_{max}$  maksimalna snaga koju elektrana može proizvesti

3. Napon sabirnice ( $U$ ) poprima vrijednost manju od referentnog napona ( $U_{ref}$ )

$$P = P_{max} \quad (3-3)$$

Slika 3.3. prikazuje graf ovisnosti generiranog fotonapona o radnoj snazi (volt/watt krivulja) na kojem su vidljiva tri navedena intervala.

Na ovaj način, kontrolom proizvodnje reguliraju se uvjeti u mreži te se osigurava da napon ne prelazi zakonom propisane granice.



**Slika 3.3.** Volt/Watt krivulja [7]

### **3.5. Upravljanje jalovom snagom**

Ova metoda još se naziva i volt/var metoda te kao primarno sredstvo djelovanja koristi jalovu snagu. Svoje djelovanje temelji na emitiranju ili apsorpciji jalove snage (ovisno o prilikama u mreži) u svrhu održavanja napona u zadanim granicama na način da sprječava pojavu inverznih tokova snage [2].

Ova metoda uspješno kontrolira naponske prilike u DM, međutim nije pogodna za vodove s visokim R/X omjerom te također stvara dodatne troškove u vidu postavljanja većeg pretvarača i/ili D-STATCOM (Distributed Static Synchronous Compensator) i DVR (Dynamic Voltage Restorer) uređaja.

Postoje dva načina za kontrolu jalove snage u DM, a to su:

- Upravljanje pomoću fotonaponskog pretvarača
- FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) uređaji (D-STATCOM, DVR)

U ovom poglavlju će oba načina biti pobliže objašnjena.

#### **3.5.1. Upravljanje pomoću fotonaponskog pretvarača**

Ova metoda podrazumijeva aktivno sudjelovanje fotonaponskog pretvarača solarnih u kontroli naponskih prilika u mreži na način da injektiraju li apsorbiraju jalovu snagu te tako, iako stvaraju probleme u mreži, mogu ponuditi i rješenje za iste [2].

U radu [2] autori navode kako se jalova snaga pokazuje kao prikladno rješenje s obzirom da ju je lako generirati, ali također i zbog njenih općenitih karakteristika s obzirom da se induktivna jalova snaga može kompenzirati kapacitivnom i obrnuto.

Induktivna jalova snaga uglavnom se povezuje sa smanjenjem napona u mreži te je zato pogodna za kompenzaciju i stabilizaciju DM u slučajevima kada naponske prilike prelaze gornju propisanu granicu.

S druge strane, kapacitivna jalova snaga, povezuje se s porastom napona u mrežama s obzirom da kondenzator, kao element mreže, ima mogućnost injektiranja jalove snage te na taj način može osigurati povećanje napona u DM u slučajevima kada on pada ispod propisane razine.

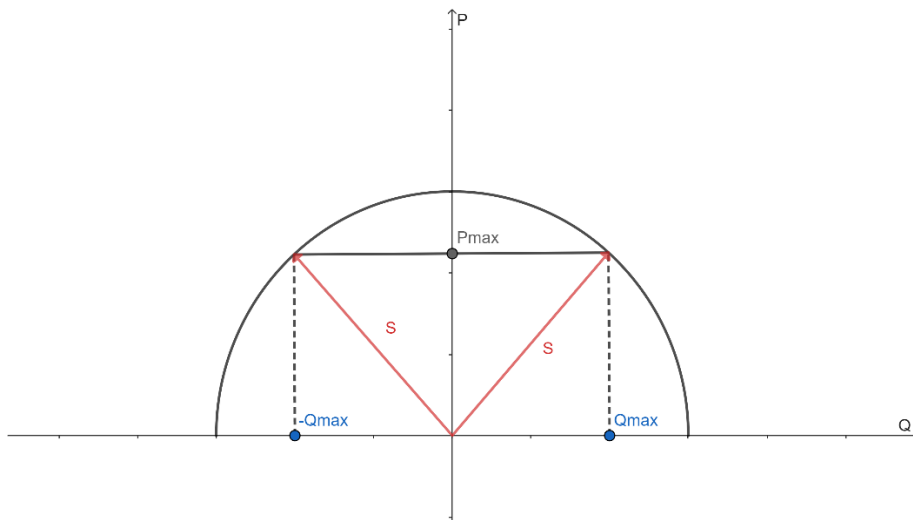


Fotonaponski pretvarač generira jalovu snagu ( $Q_{max}$ ) ovisno o maksimalnoj radnoj snazi koju fotonaponski panel može proizvesti ( $P_{max}$ ):

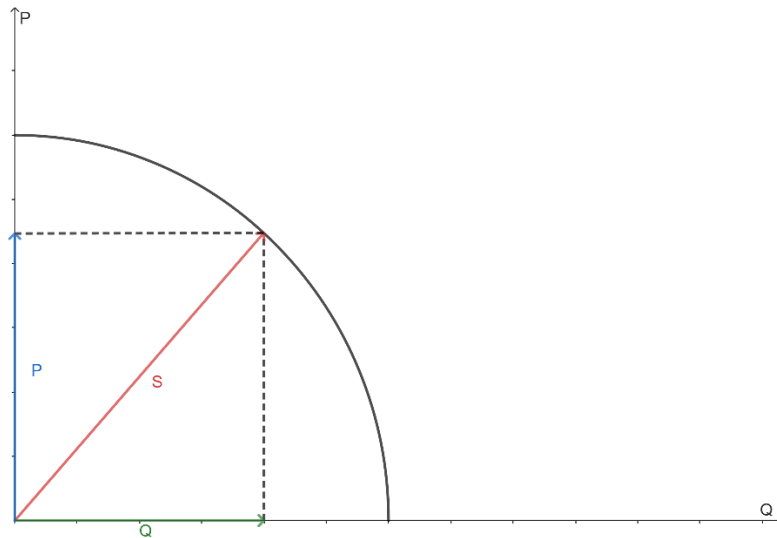
$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{max}^2} \quad (3-4)$$

Gdje je  $S_{max}^2$  nazivna kompleksna snaga fotonaponskog pretvarača [2].

Slika 3.4. prikazuje pogonsku kartu fotonaponskog pretvarača iz koje je vidljivo da polukružnica predstavlja vrijednosti koje kompleksna snaga može poprimiti ovisno o radnoj i jalovoj snazi, dok je na slici 3.5. поближе prikazan trokut snage iz kojeg, na temelju Pitagorinog poučka, proizlazi (3-4).



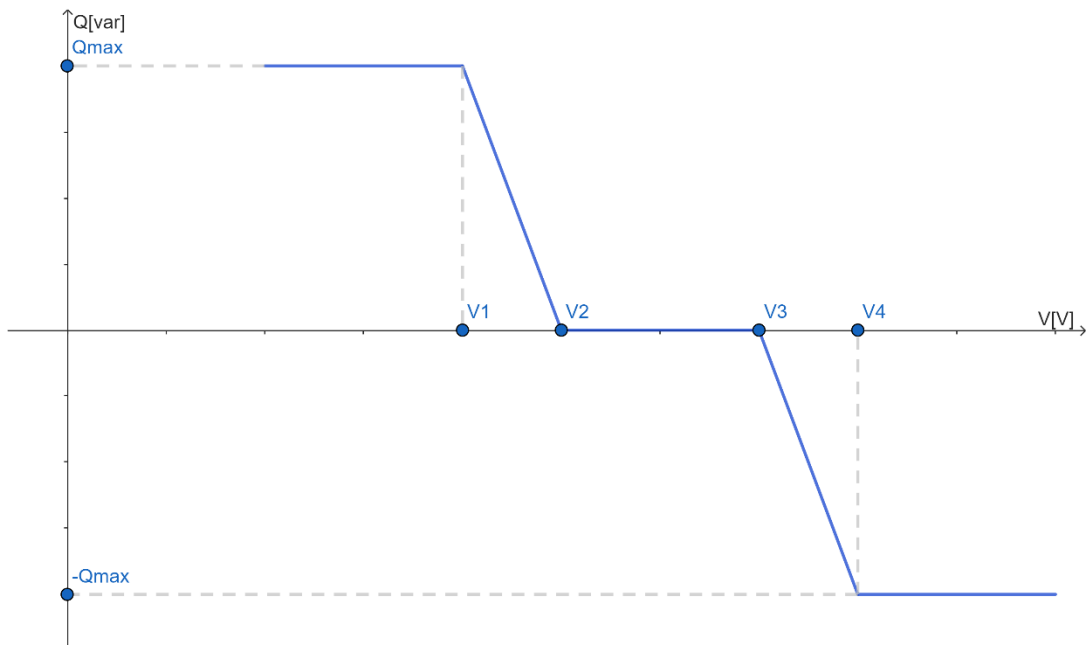
**Slika 3.4.** Pogonska karta fotonaponskog pretvarača [10]



**Slika 3.5.** Trokut snage [10]

Količina generirane reaktivne snage također je povezana s karakteristikama pretvarača, njegovom lokacijom i kutom pod kojim su FN paneli postavljeni [7].

Karakteristika jalove snage, linearna je funkcija generiranog fotonapona koja se dinamički mijenja ovisno o količini stvorene radne snage pretvarača što je i prikazano na Slici 3.6.



**Slika 3.6.** Graf ovisnosti emitirane/apsorbirane jalove snage pretvarača o generiranom fotonaponu [2]

Karakteristika (Slika 3.6.) se može opisati razdvajanjem na tri intervala:

- $\langle 0, V_1 \rangle$
- $\langle V_1, V_2 \rangle$
- $\langle V_3, +\infty \rangle$

Interval  $\langle V_1, V_2 \rangle$  predstavlja područje u kojem je napon unutar zadanih granica te je stoga vrijednost jalove snage pretvarača ravna nuli.

Do točke  $V_2$  pretvarač emitira (kapacitivnu) jalovu snagu s obzirom da je napon niži od minimalne propisane vrijednosti (točka  $V_2$ ).

Kada vrijednost napona premaši vrijednost određenu točkom  $V_3$ , pretvarač počinje apsorbirati (induktivnu) jalovu snagu do maksimalne vrijednosti kako bi se naponske prilike u DM snizile do propisanih okvira.

Ova metoda kontrole naponskih prilika u DM pokazala se učinkovitijom u vidu suzbijanja nesimetrije, nego konvencionalna metoda promjene položaja preklopke transformatora [7].

### **3.5.2. Upravljanje pomoću uređaja prilagodene snage**

Ovaj tip kontrole naponskih prilika neovisan je o proizvodnji radne snage, a regulacija se provodi uređajima prilagodljive snage i regulatorima napona gdje komunikacija među uređajima nije potrebna [7].

U radu [7] autori opisuju način kontrole naponskih prilika pomoću dva uređaja: D-STATCOM i DVR. D-STATCOM u mrežu se spaja paralelno s vodom, dok se DVR spaja u seriju.

D-STATCOM u mrežu može slati veće količine jalove snage nego fotonaponski pretvarač te je učinkovitiji u smanjenju nesimetrije i prilagodbi napona nego DVR, no DVR zahtjeva manju snagu stoga se DVR uglavnom postavlja u prvoj trećini voda, a D-STATCOM u druge dvije trećine [7].

### 3.6. Spremnici energije (baterije)

Učinkovitost ove metode ovisi o kapacitetu baterije kao i o brzini punjenja i pražnjenja. Dva su osnovna tipa instalacije spremnika energije u DM:

- Decentralizirane baterije
- Jedan centralizirani spremnik energije (baterija) [7]

Izvedba ove metode u obliku više razmještenih baterija učinkovita je za FN generirane u kućanstvima te djeluje na način da se spremnik energije počinje puniti kada proizvedena snaga iz FN postane veća od potrošene te na isti način sprječava pad količine napona ispod dozvoljene razine pražnjenjem u vrijeme manje proizvodnje [7].

Međutim, ovi spremnici ne mogu uvijek biti učinkoviti s obzirom da su ograničenog kapaciteta, npr. u podne, za vrijeme sunčanog dana, spremnik će biti potpuno napunjen te neće moći preuzeti razliku FN što onda može stvarati probleme u DM [7].

Drugi način izvedbe ove metode je jedan centralizirani spremnik energije. Kod ove metode važni su parametri baterije (kapacitet i vršno opterećenje) i smještaj u DM. Najbolja učinkovitost se postiže smještajem baterije na kraju voda, u najudaljenijoj točki od trafostanice [7].

Snaga potrebna za suzbijanje porasta napona na koju baterija treba proizvesti na kraju voda može se izračunati jednadžbom:

$$P = (U - U_{max}) \times \left\| \frac{dU}{dP} \right\| \quad (3-5)$$

Gdje je:

- $U$  – najveći izmjereni napon voda
- $U_{max}$  – gornja granica koju napon smije doseći u DM
- $\frac{dU}{dP}$  – faktor osjetljivosti napona

### 3.7. Statička preklopka

Statička preklopka je uređaj koji omogućuje prespajanje opterećenja s jednog izvora na drugi u slučaju kvara na vodu ili problema s isporukom energije od strane glavnog izvora bez prekida napajanja [7].

U kontekstu teme ovog rada, statička preklopka se koristi kako bi se opterećenje ravnomjerno raspodijelilo unutar tri faze u DM u svrhu sprječavanja skokova napona i nesimetrije [7].

Ovakav sustav zahtjeva senzore, centralnog upravitelja i komunikacijski kanal između faza kako bi uspješno mogao raspodijeliti potrošače te tako značajno smanjiti nesimetriju u DM [7].

### **3.8. Hibridne metode**

Hibridne metode omogućuju spajanje dviju ili više metoda kako bi se nedostaci svake pojedine metode sveli na minimum. Autori u literaturi [7] izdvajaju volt/var/watt metodu, kombinaciju volt/var metode sa spremnicima energije, metodu koja spaja promjenu položaja preklopke transformatora i volt/var te metodu koja također sjedinjuje promjenu položaja preklopke transformatora s baterijama.

U ovom dijelu rada, biti će opisani primjeri nekih hibridnih metoda koje se primjenjuju.

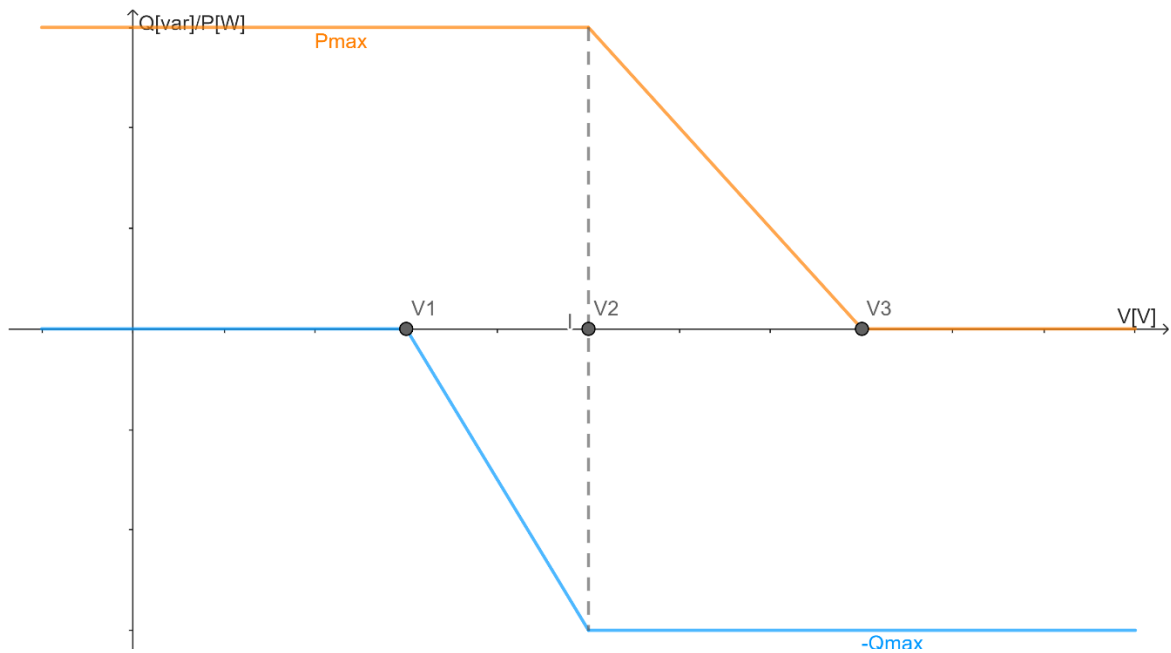
#### **3.8.1. Volt-var-watt metoda**

Ova metoda kombinira kontrolu i jalove i radne snage na način da fotonaponski pretvarač podešava vlastite parametre prilagođavajući se uvjetima svake od metoda [4].

Kako bi se izbjegli skokovi napona i nesimetrija u DM primjenjuju se tehnike izmjene jalove i radne snage u trenucima kada je to potrebno.

Na slici 3.7. prikazane su krivulje radne i jalove snage te je na grafu vidljivo da ukoliko napon premaši vrijednost  $V_1$ , pretvarač počinje koristiti jalovu snagu (volt/var metoda), no ukoliko je kapacitet jalove snage pretvarača iscrpljen, a napon dosegne vrijednost određenu točkom  $V_2$ , pretvarač smanjuje izlaznu radnu snagu (volt/watt metoda) te u krajnjem slučaju, ukoliko napon dosegne vrijednost  $V_3$ , radna snaga spušta se na nulu tj. obustavlja se proizvodnja FN.

Na taj se način naponske prilike u DM kontroliraju ovom hibridnom metodom.



**Slika 3.7.** Krivulje radne i jalove snage [4]

### 3.8.2. Promjena položaja preklopke transformatora i volt/var metoda

Prema [7] promjena položaja preklopke transformatora kao metoda za regulaciju naponskih prilika u DM pokazala se kao učinkovitija metoda nego volt/var, no s druge strane, autori navode da volt/var metoda ima manji utjecaj na opterećenje transformatora. Stoga, kombinacija ovih dviju metoda rezultira poboljšanom regulacijom naponskih prilika i manjem opterećenju transformatora.

Postoje dva načina kombinacije ovih metoda [5]:

1. Volt/var metoda primjenjuje se kao primarna, međutim, s obzirom na visok R/X omjer u DM, količina jalove snage s kojom se raspolaže može biti nedovoljna za kompenzaciju napona. U tom slučaju, aktivira se preklopka transformatora kako bi se naponske prilike u DM uskladile.
2. U slučaju kada se promjena položaja preklopke transformatora primjenjuje kao primarna, volt/var metoda može biti suvišna s obzirom na efikasnost primarne metode te se stoga ona koristi u svrhu uglađivanja naponskih prilika u mreži u vidu približavanja vrijednosti napona nazivnoj vrijednosti.

## 4. PRIMJENA METODA ZA ODRŽAVANJE POŽELJNIH NAPONSKIH PRILIKA U DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA S PRIKLJUČENIM FOTONAPONSKIM ELEKTRANAMA

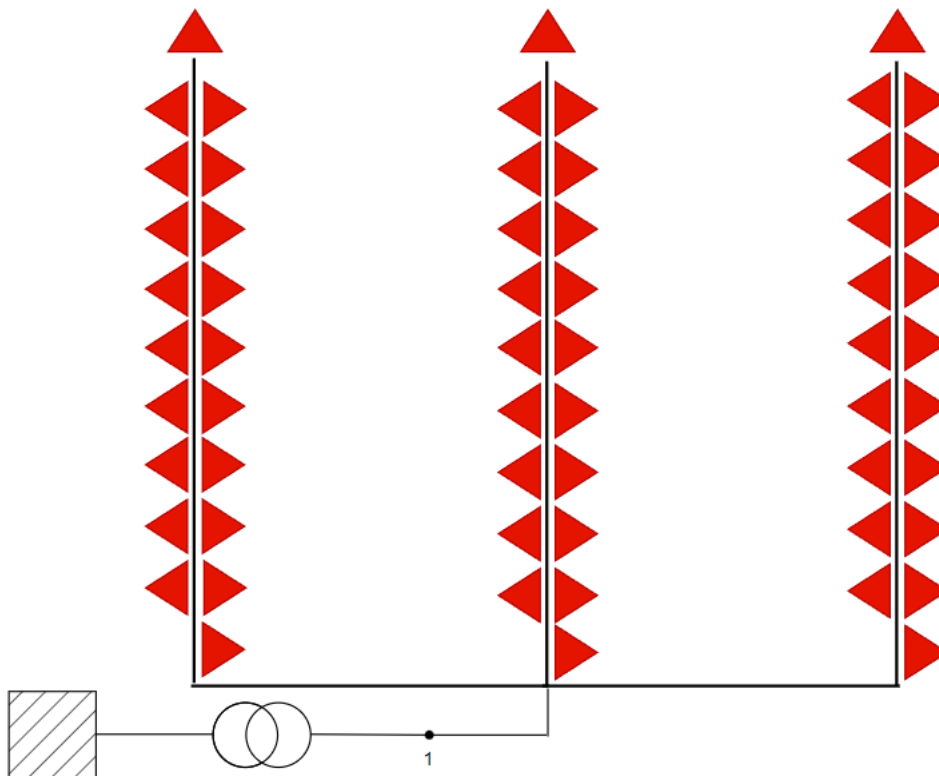
### 4.1. Opis mreže korištene za simulacije

Za svrhe provođenja simulacija u programu DIgSILENT [11] korištena je mreža iz literature [12].

Na slici 4.1. prikazana je shema mreže na kojoj su provođene simulacije. Mreža je simetrična i radijalna te je stoga za potrebe očitavanja rezultata korišten samo jedan od tri prikazana izvoda. Referentna sabirnica označena je brojem jedan, dok su ostale sabirnice prikazane crvenim trokutićima te svaka za sebe predstavljaju po jednog potrošača (kućanstvo).

Svaki od radijalnih izvoda kabelima je povezan s 10/0.4 kV transformatorskom stanicom i sastoji se od ukupno 20 sabirnica (kućanstava).

Svaka sabirnica (kućanstvo) ima instaliran FN maksimalne snage 7 kW.



Slika 4.1. Shema mreže korištene za simulacije

## 4.2. Provođenje simulacije

Postupak provođenja simulacije na prethodno opisanoj mreži podijeljen je na tri slučaja (slika 4.2.):

- Bazni slučaj – potrošnja svakog kućanstva u mreži podešena je na 1 kW, dok je proizvodnja FN svakog kućanstva jednaka nuli (svi FN u mreži su isključeni).
- Slučaj A – potrošnja svakog kućanstva u mreži je minimalna i iznosi 1 kW, dok je proizvodnja FN svakog kućanstva podešena na maksimalnu vrijednost u iznosu od 7 kW.
- Slučaj B – potrošnja električne energije svakog kućanstva jednaka je kao u slučaju A (1 kW), dok je proizvodnja podešena na upola manju vrijednost od maksimalne (3.5 kW).

Ovakav način sistematizacije odabran je kako bi se razlika u naponskim prilikama mreže najbolje uočila. Naime, izvedbom baznog slučaja očekuje se slikoviti prikaz pada napona u mreži s obzirom da niti jedno kućanstvo nema instaliran vlastiti FN, nego se ponaša isključivo kao potrošač.

Dodavanjem FN u mrežu (slučaj A), očekuje se porast napona, dakle, stvara se problem u DM kojeg je potrebno regulirati nekom od metoda opisanih u ovom radu.

U slučaju B očekuje se porast napona manji od onog u slučaju A s obzirom da je proizvodnja 50% manja od maksimalne.

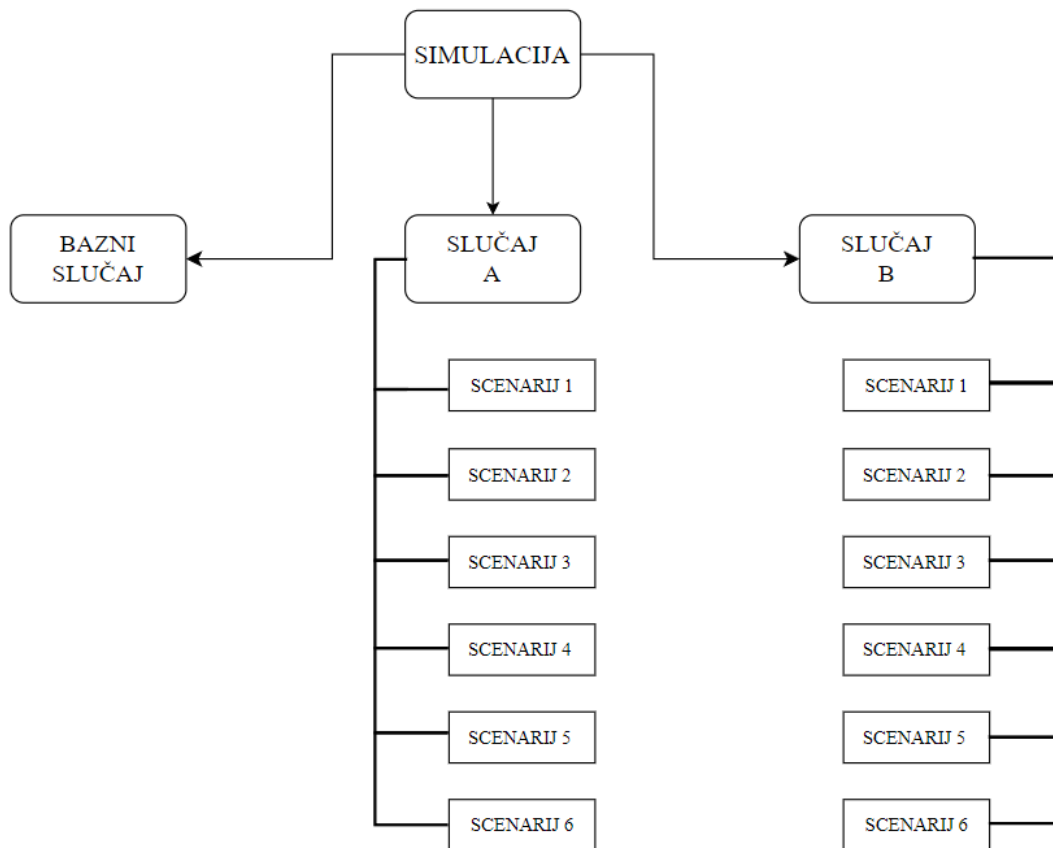
U sva tri slučaja potrošnja je podešena na istu vrijednost (1 kW) kako bi se prikazali problemi s naponskim prilikama vezani isključivo za uvođenje FN u DM.

Svrha dodavanja FN u DM je ispitivanje utjecaja FN na naponske prilike u DM kao i testiranje mogućih rješenja za nastale probleme.

Svaki od scenarija predstavlja po jednu metodu primijenjenu na spomenutu mrežu (slika 4.2.):

- Scenarij 1 – metoda upravljanja potrošnjom
- Scenarij 2 – metoda smanjenja proizvodnje (upravljanje jalovom snagom)
- Scenarij 3 – metoda upravljanja jalovom snagom
- Scenarij 4 – hibridna metoda koja uključuje metodu smanjenja proizvodnje i upravljanja jalovom snagom
- Scenarij 5 – metoda u kojoj se koriste spremnici energije (baterije)
- Scenarij 6 – metoda promjene položaja preklopke transformatora





**Slika 4.2.** *Postupak provođenja simulacije*

Rezultati dobiveni nakon provođenja simulacija u programu DIgSILENT grafički su prikazani i opisani u sljedećim podpoglavljima.

### 4.3. Rezultati simulacije

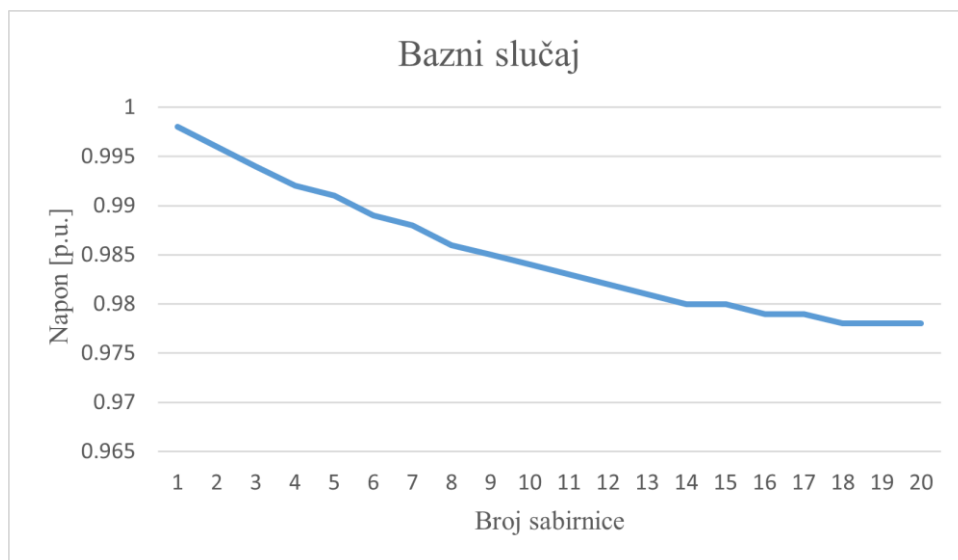
#### 4.3.1. Bazni slučaj

Potrošnja svakog kućanstva u mreži jednaka je 1 kW, dok je proizvodnja FN jednaka nuli.

Slika 4.3. prikazuje grafički prikaz naponskih prilika u mreži za navedeni slučaj. Napon na prvoj sabirnici iznosi 0.998 p.u., dok napon na posljednjoj sabirnici iznosi 0.978 p.u.

Iz grafa je vidljiv pad napona duž mreže koji daje razliku od 0.02 p.u. između napona na prvoj i dvadesetoj sabirnici.

Ovakav rezultat simulacije je očekivan s obzirom da se svako kućanstvo ponaša isključivo kao pasivni potrošač te koristi snagu iz mreže.



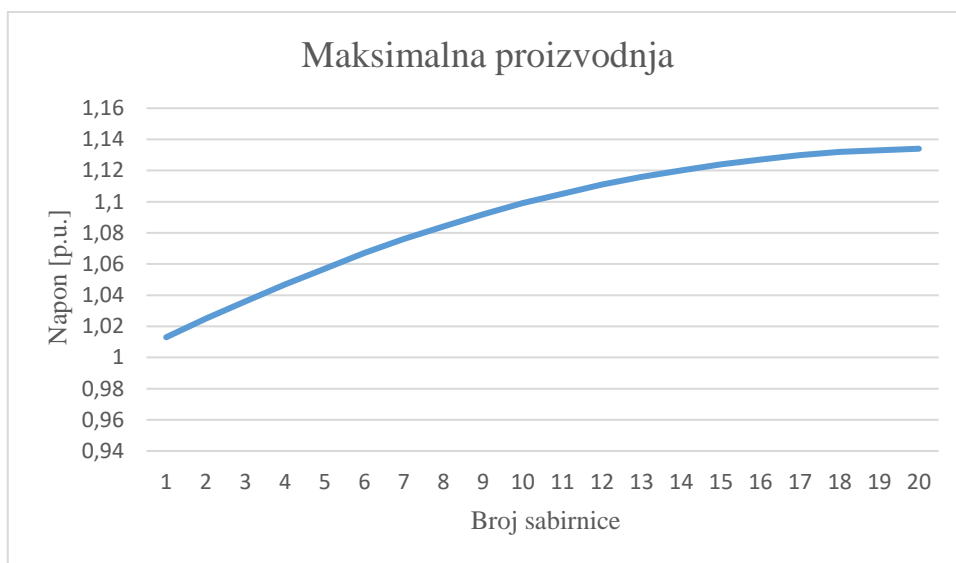
**Slika 4.3.** Izračunati napon sabirnica za bazni slučaj

### 4.3.2. Slučaj A

Potrošnja svakog kućanstva u mreži jednaka je 1 kW, dok je proizvodnja FN podešena na maksimalnu vrijednost (7 kW).

Krivulja na grafu (slika 4.4.) prikazuje porast napona iznad dozvoljene vrijednosti (1.1 p.u.). proizvodnja je u ovom slučaju puno veća od potrošnje što rezultira porastom napona.

Vidljivo je da iznos napona raste od prve do dvadesete sabirnice te u konačnici dostiže vrijednost koja nije u dozvoljenim granicama ( $\pm 10\%$ ), dakle potrebno je primijeniti neku od metoda regulacije naponskih prilika.

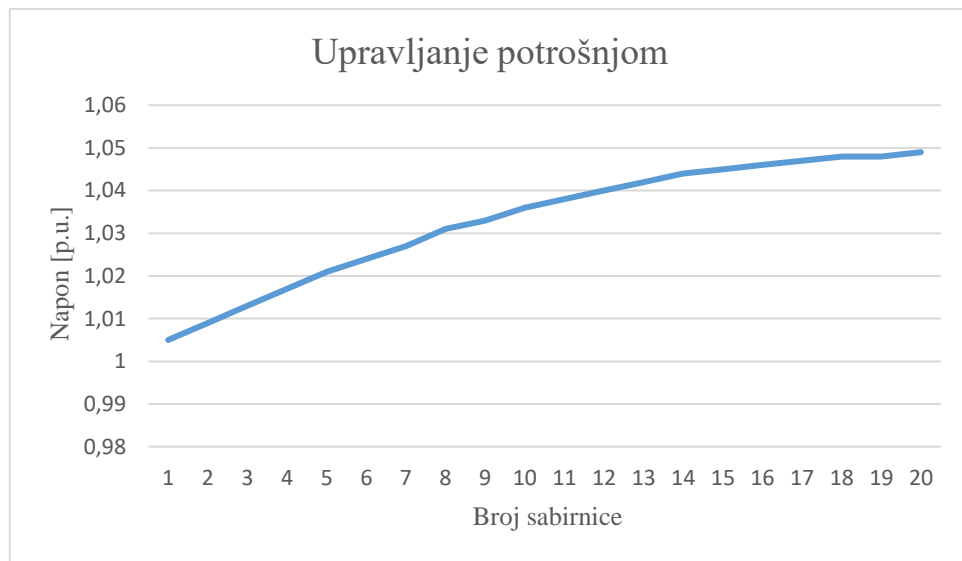


**Slika 4.4.** *Izračunati napon sabirnica za slučaj A*

### a) Scenarij 1

U scenariju 1 korištena je metoda upravljanja potrošnjom. Naime, ideja je vođena pretpostavkom da svako kućanstvo posjeduje punionicu električnog vozila snage 3.68 kW te ju puni viškom proizvedene električne energije.

Slika 4.5. prikazuje naponski profil nakon primjene ove metode na korištenu mrežu. U ovom slučaju potrošnja je puno manja od proizvodnje te je stoga vidljiv porast napona, ali u dozvoljenim granicama što pokazuje da je metoda učinkovita u funkciji regulacije naponskih prilika u DM s FN.



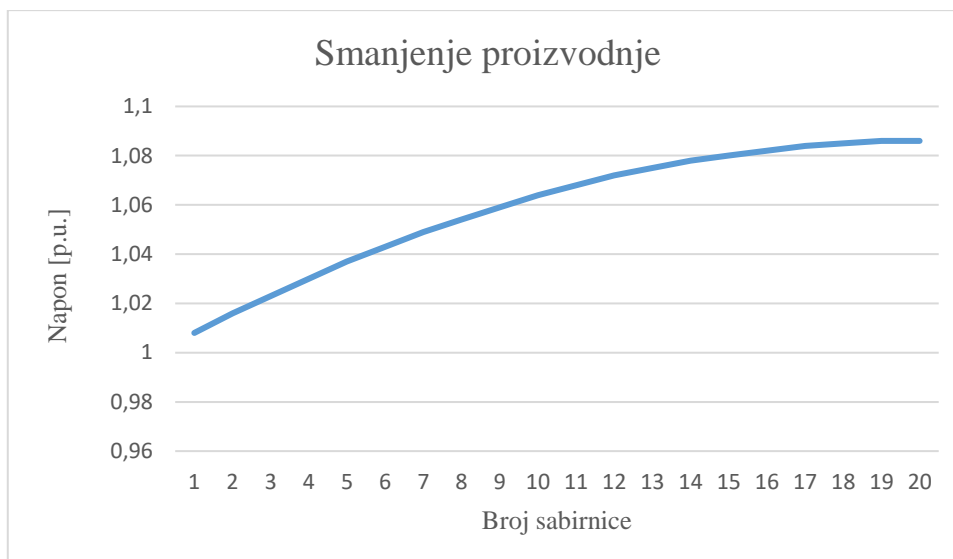
**Slika 4.5.** Napon sabirnica za slučaj A, scenarij 1

### b) Scenarij 2

U scenariju 2, na slučaj A primijenjena je metoda smanjenja proizvodnje (upravljanje radnom snagom).

U ovom scenariju proizvodnja FN svakog kućanstva smanjenja je za 30% te iznosi 4.9 kW.

Slika 4.6. prikazuje naponski profil za promatrani scenarij. Na grafu je vidljivo da iznos napona raste od prve sabirnice te najveću vrijednost doseže na dvadesetoj sabirnici, međutim, ne prelazi propisane okvire koji iznose  $\pm 10\%$ .



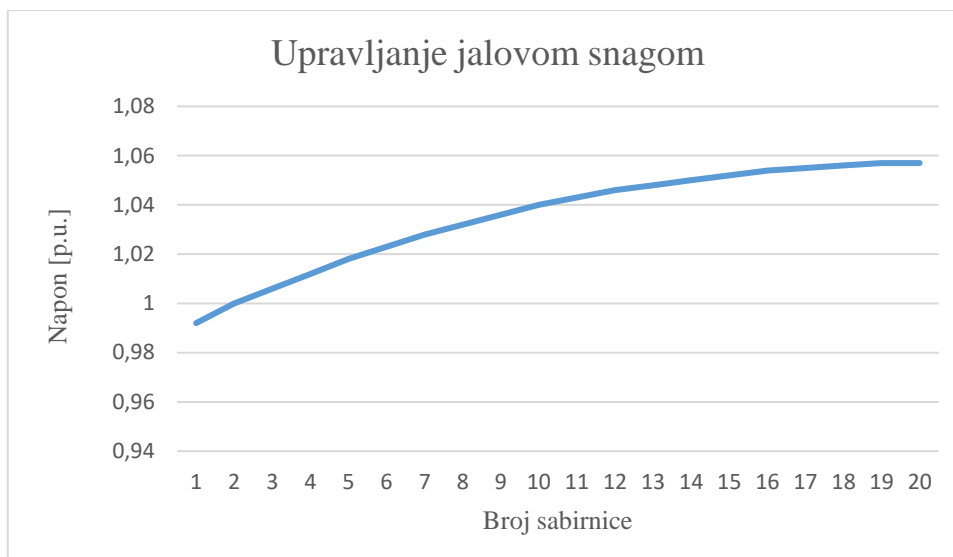
**Slika 4.6.** Napon sabirnice za slučaj A, scenarij 2

c) Scenarij 3

U scenariju 3, na slučaj A primijenjena je metoda upravljanja jalovom snagom na način da je faktor snage podešen na 0.9 ind.

Dakle, u ovom slučaju, induktivna jalova snaga koja je injektirana u mrežu od strane fotonaponskog pretvarača iznosi 3.395 kVAr.

Na slici 4.7. prikazan je graf naponskih prilika u mreži za promatrani scenarij, krivulja vidljivo pokazuje porast napona od prve do dvadesete sabirnice, no u dozvoljenim granicama s obzirom da napon na posljednjoj (dvadesetoj) sabirnici iznosi 1.057 p.u. što spada u propisane okvire ( $\pm 10\%$ ).



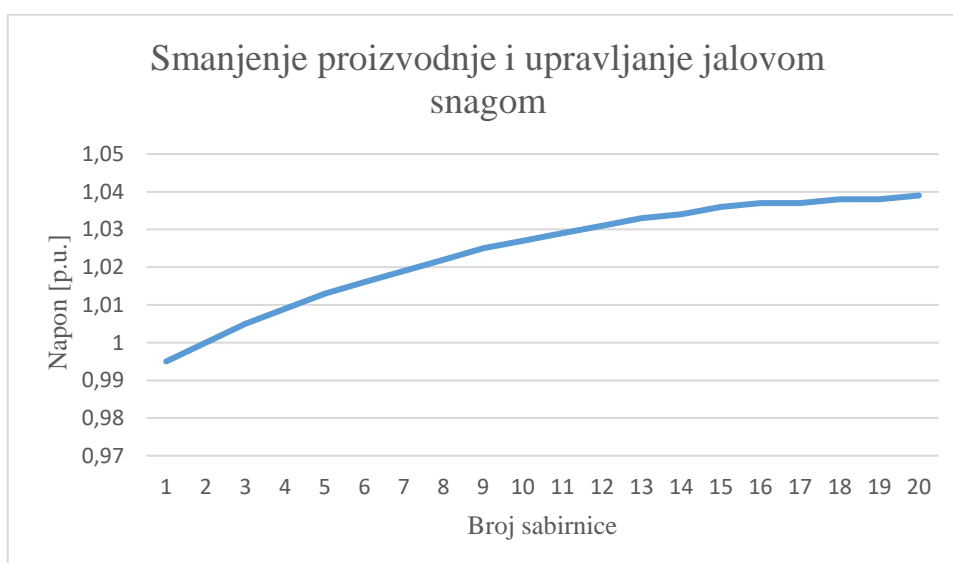
**Slika 4.7.** Napon sabirnice za slučaj A, scenarij 3

d) Scenarij 4

U scenariju 4 na slučaj A primijenjena je hibridna metoda koja uključuje metodu smanjenja proizvodnje FN i metodu upravljanja jalovom snagom.

Ovaj scenarij predstavlja kombinaciju scenarija 2 i 3 te su na slici 4.8. prikazani rezultati primjene kombinacije ovih metoda u obliku naponskog profila sabirnica.

Napon na sabirnicama također očekivano raste, no napon na dvadesetoj sabirnici iznosi 1.039 p.u. što spada u okvir dozvoljenih vrijednosti te tako dokazuje uspješnost kontrole naponskih prilika u DM s FN primjenom ove metode.



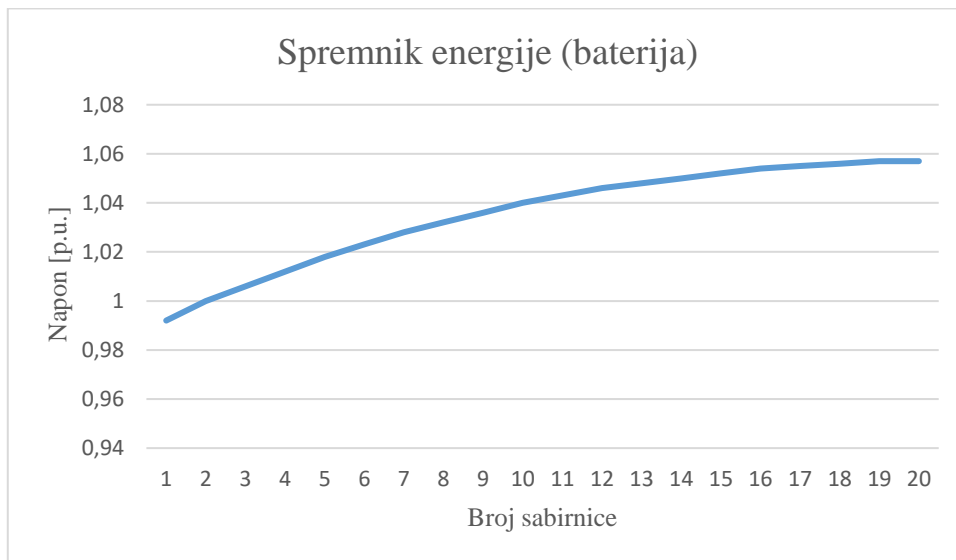
**Slika 4.8.** Napon sabirnica za slučaj A, scenarij 4

e) Scenarij 5

U scenariju 5 u mrežu je dodan jedan, centralizirani spremnik energije u kojeg je skladištena električna energija snagom od 80 kW.

Na taj je način ispitana učinkovitost baterije kao jedne od metoda regulacije naponskih prilika u DM s FN.

Slika 4.9. prikazuje rezultate simulacije nastale korištenjem ove metode. Kao i u prijašnjim slučajevima, vidljiv je porast napona, no očitavajući iznos napona na dvadesetoj sabirnici koji iznosi 1.057 p.u., da se zaključiti da se metoda pokazala uspješnom s obzirom da je iznos napona unutar zadanih granica.



**Slika 4.9.** Napon sabirnica za slučaj A, scenarij 5

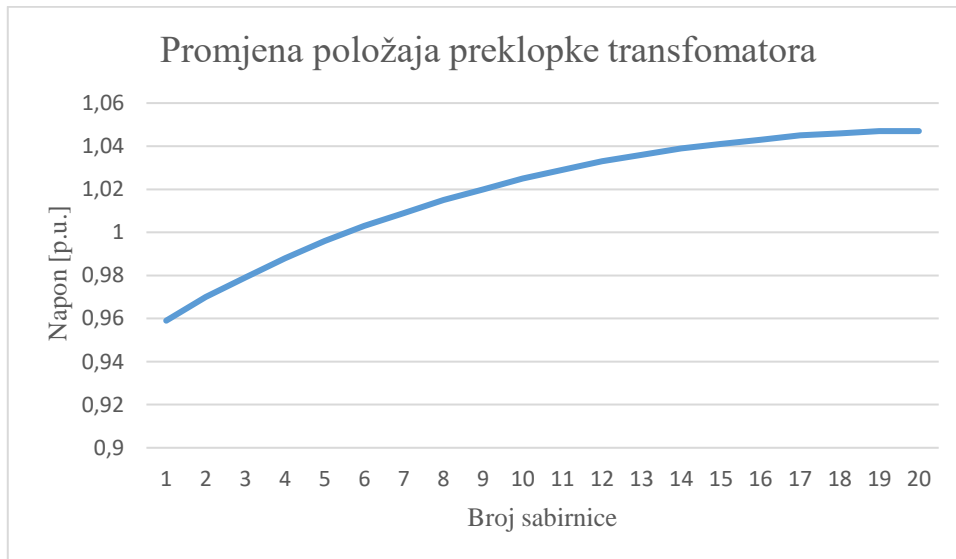
#### f) Scenarij 6

U ovom scenariju ispitana je metoda promjene položaja preklopke transformatora.

Položaj preklopke podijeljen je na pozicije u rasponu od -5 do +5 (s korakom vrijednosti 1) te je provođenjem simulacije utvrđeno da su najbolji rezultati ostvareni postavljanjem preklopke u položaj -5.

Na slici 4.10. grafički su prikazani dobiveni rezultati nakon provođenja simulacije u slučaju kada je preklopka postavljena u položaj -5.

Kao i u prijašnjim scenarijima, napon na dvadesetoj sabirnici dostiže najveću vrijednost u odnosu na napone ostalih sabirnica, ali ne prelazi okvire zadanih granica ( $\pm 10\%$ ).



**Slika 4.10.** Napon sabirnice za slučaj A, scenarij 6

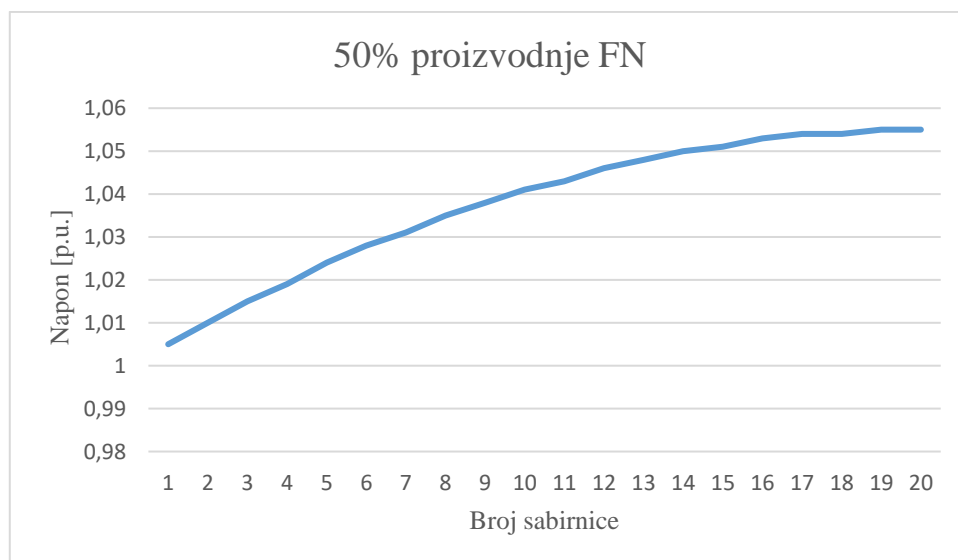


### 4.3.3. Slučaj B

Potrošnja svakog kućanstva u mreži jednaka je kao i u slučaju A i iznosi 1 kW., dok je proizvodnja FN smanjena za 50% i iznosi 3.5 kW, dakle potrošnja svakog kućanstva u mreži smanjena je za 50%.

Nakon provođenja simulacije rezultati pokazuju da napon na prvoj sabirnici iznosi 1.005 p.u., dok napon na dvadesetoj sabirnici doseže vrijednost od 1.055 p.u..

Na slici 4.11. grafički su prikazani dobiveni rezultati te je vidljivo da u ovom slučaju napon ne prelazi propisanu granicu od 1.1 p.u., međutim u scenarijima su ispitane iste metode kao u slučaju A kako bi se usporedila njihova učinkovitost u ovisnosti o proizvedenoj snazi i kako bi se naponske prilike u mreži dovele što bliže propisanoj vrijednosti.



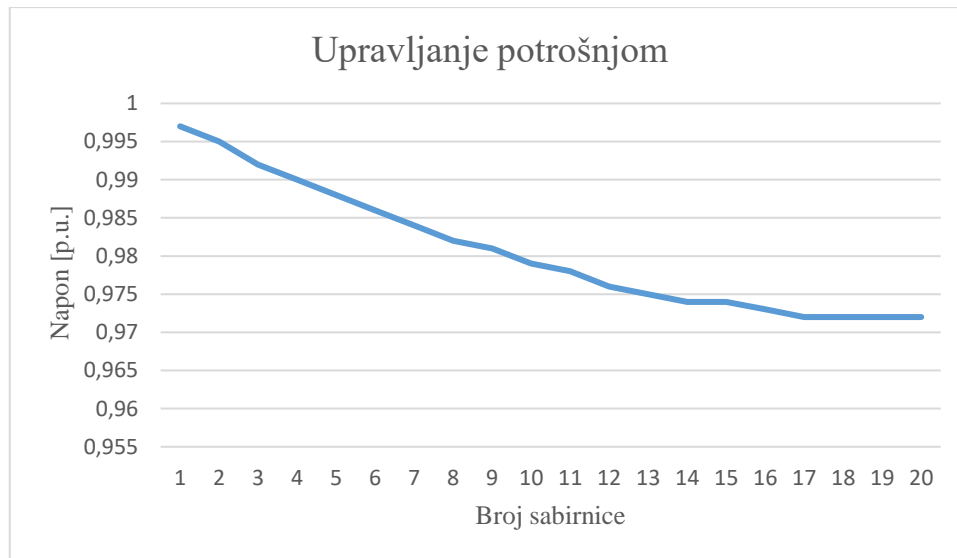
**Slika 4.11.** Izračunati napon sabirnica za slučaj B

#### a) Scenarij 1

U ovom scenariju ispitana je metoda upravljanja potrošnjom na isti način kao u scenariju 1 slučaja A. Dakle, korištena je pretpostavka da svako kućanstvo posjeduje punionicu u vidu električnog vozila snage 3.68 kW.

Slika 4.12. grafički prikazuje rezultate provedene simulacije. S obzirom da napon na sabirnici 1 iznosi 0.997 p.u., a napon na sabirnici 20 pada na vrijednost od 0.972 p.u. vidljiv je pad napona duž mreže s obzirom da se povećanjem potrošnje za 3.68 kW mreža dovela u stanje veće potrošnje u odnosu na proizvodnju.

Ovakav rezultat je očekivan s obzirom da kućanstva troše više električne energije nego što proizvode, međutim najniži iznos napona i dalje ne prelazi okvire propisnih granica.



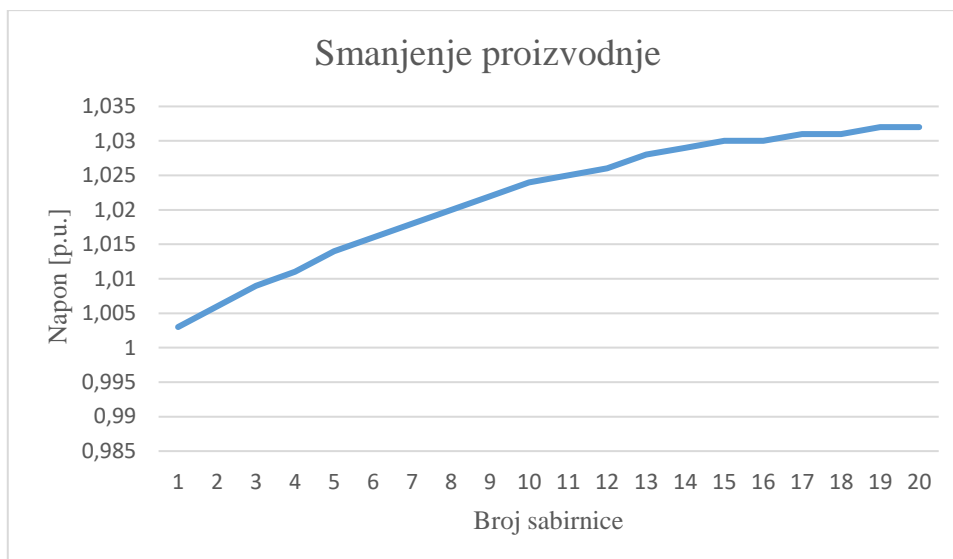
**Slika 4.12.** Napon sabirnica za slučaj B, scenarij 1

b) Scenarij 2

U ovom scenariju, provedena je metoda smanjenja proizvodnje na način da je proizvodnja FN smanjena za 30%.

Dakle, u ovom slučaju proizvodnja FN iznosi 2.45 kW dok je potrošnja nepromijenjena i iznosi 1 kW.

Na slici 4.13. grafički su prikazani rezultati nakon provođenja simulacije za ovaj slučaj. U ovom scenariju ne dolazi do pada napona duž mreže (za razliku od scenarija 1) s obzirom da je ukupna potrošnja manja od ukupne proizvodnje, no vidljiva je stabilizacija naponskih prilika u mreži s obzirom da napon na dvadesetoj sabirnici iznosi 1.032 p.u. što je za 0.023 p.u. manje od napona na toj istoj sabirnici u slučaju kada niti jedna metoda nije primijenjena na mrežu.



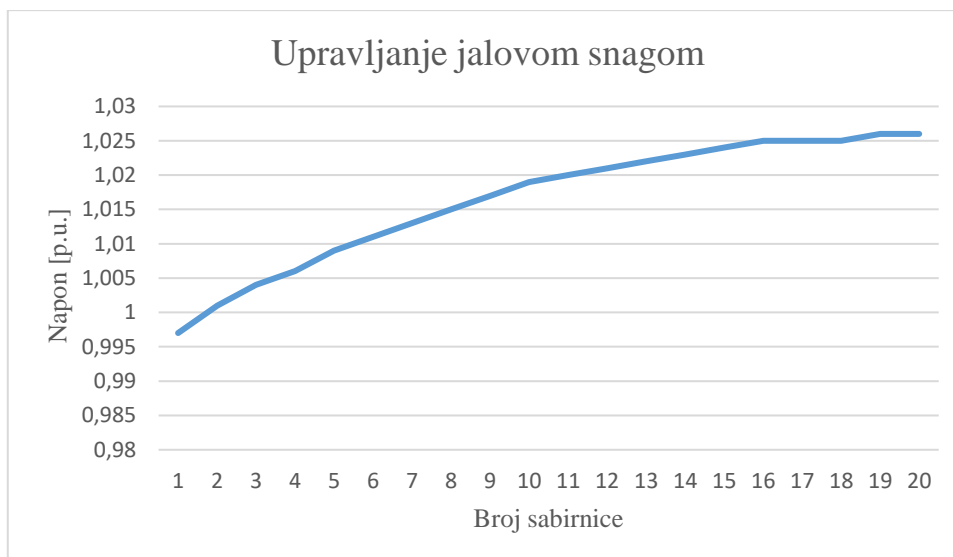
**Slika 4.13.** Napon sabirnice za slučaj B, scenarij 2

### c) Scenarij 3

Jednako kao i u scenariju 3 slučaja A, u ovom scenariju je ispitana metoda upravljanja jalovom snagom na način da je faktor snage podešen na 0.9 ind.

Dakle, jalova snaga koja je injektirana u mrežu od strane fotonaponskog pretvarača iznosi 1.698 kVAr.

Slika 4.14. grafički prikazuje rezultate simulacije za prikazan scenarij. Vidljivo je da se metoda pokazala uspješnom u kontroli naponskih prilika u DM s FN s obzirom da je napon na posljednjoj sabirnici unutar zadanih granica

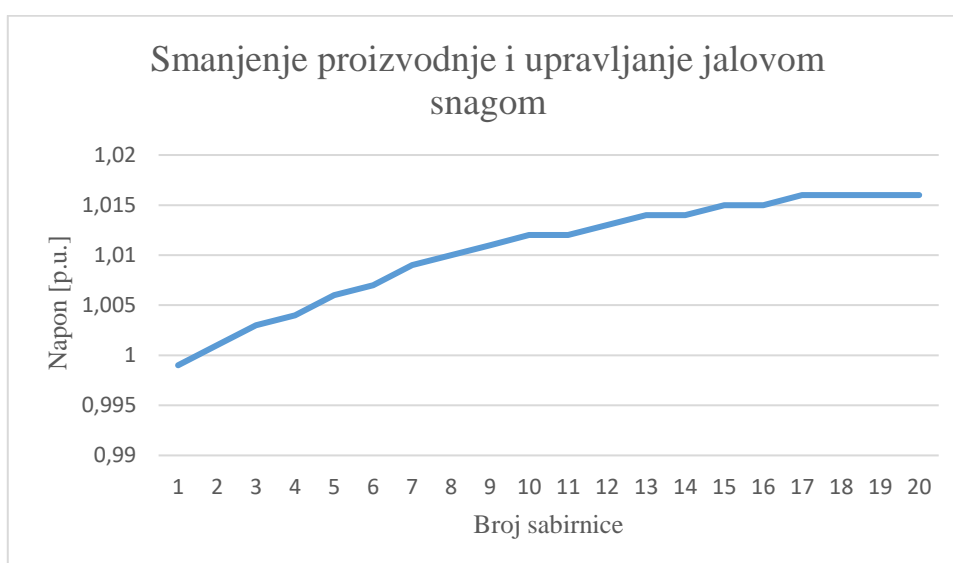


**Slika 4.14.** Napon sabirnice za slučaj B, scenarij 3

d) Scenarij 4

Hibridna metoda koja uključuje kombinaciju metode smanjenja proizvodnje i metode upravljanja jalovom snagom primijenjena je na korištenu mrežu u simulaciji za ovaj scenarij.

Slika 4.15. grafički prikazuje rezultate nakon provedene simulacije, iz grafa je vidljiva stabilizacija naponskih prilika s obzirom da napon na dvadesetoj (posljednjoj) sabirnici iznosi 1.016 p.u. što je za 0.039 p.u. manje od napona na toj istoj sabirnici u slučaju kada nije primijenjena niti jedna metoda.



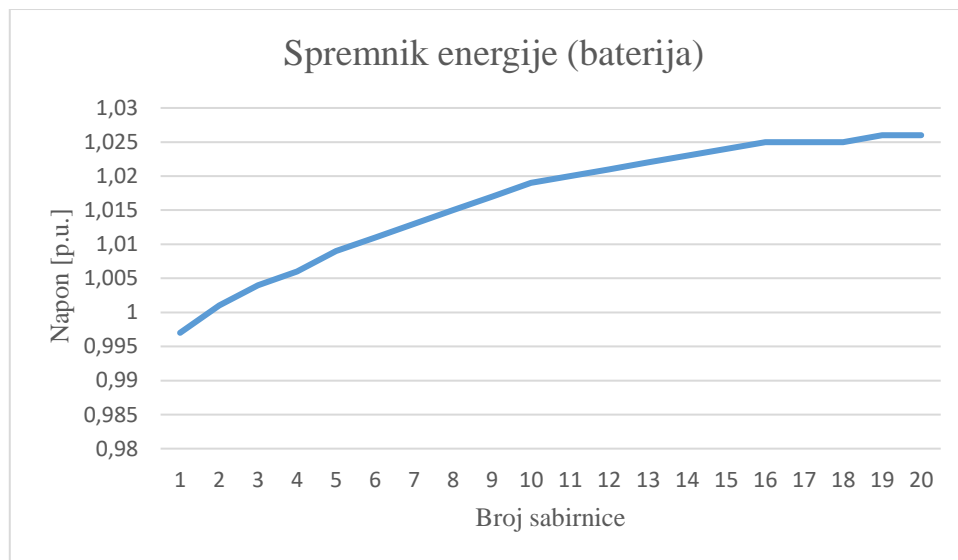
**Slika 4.15.** Napon sabirnice za slučaj B, scenarij 4

e) Scenarij 5

U scenariju 5 u mrežu je dodan jedan, centralizirani spremnik energije kapaciteta 80 kW koji se u ovom slučaju puni tj. skladišti višak proizvedene električne energije.

Na taj način ispitana je učinkovitost baterije kao jedne od metoda regulacije naponskih prilika u DM s FN.

Rezultati simulacije grafički su prikazani na slici 4.16. koja prikazuje naponski profil za svaku pojedinu sabirnicu nakon primjene ove metode. Iz grafa je vidljivo da je metoda učinkovita s obzirom da je iznos napona smanjen u odnosu na iznos napona u slučaju B kada na mrežu nije primijenjena niti jedna metoda.

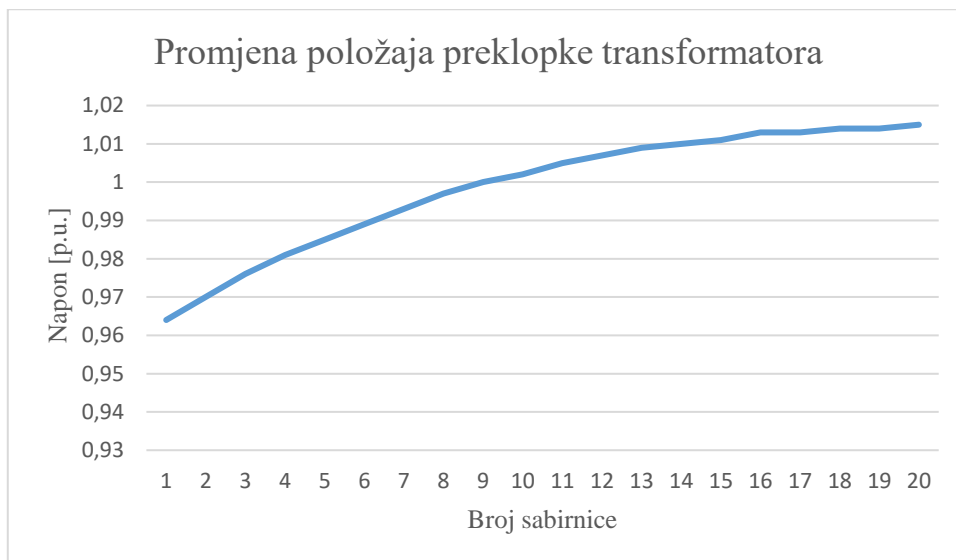


**Slika 4.16.** Napon sabirnica za slučaj B, scenarij 5

f) Scenarij 6

Preklopka transformatora postavljena je u položaj -5 kao i u scenariju 6 slučaja A.

Na slici 4.17. grafički su prikazani rezultati provedene simulacije te je iz grafa jasno vidljiv pad napona ispod 1.055 p.u. što pokazuje uspješnost ove metode u održavanju poželjnih naponskih prilika u DM s FN.



**Slika 4.17.** Napon sabirnice za slučaj B, scenarij 5

## 4.4. Usporedba rezultata simulacije

### 4.4.1. Slučaj A, slučaj B i bazni slučaj

Slika 4.18. prikazuje usporedbu slučaja A, slučaja B i baznog slučaja. Iz grafa je vidljivo da se vrijednost napona na sabirnicama prije integracije FN u mrežu kretao između 0.978 p.u. i 0.996 p.u. (bazni slučaj).

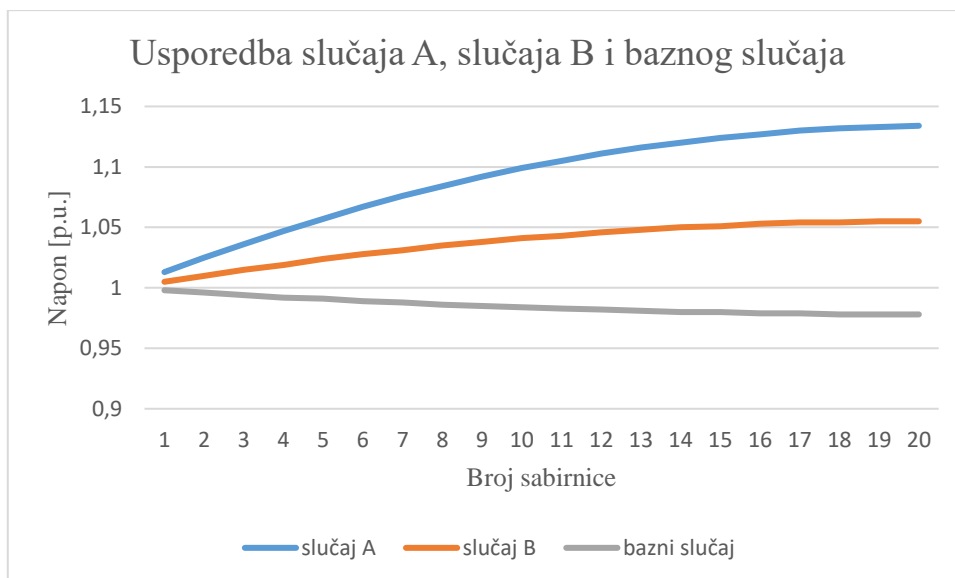
Nadalje, pedesetpostotnom integracijom FN u mrežu granice minimalne i maksimalne vrijednosti koje dosežu naponi sabirnica penju se i kreću u intervalu od 1.005 p.u. do 1.055 p.u. što je i očekivano, ali i dalje ne prelazi zakonski propisane okvire (slučaj B).

U konačnici, integracijom FN maksimalne snage u mrežu, iz grafa je vidljivo da funkcija napona sabirnica prelazi vrijednost od 1.1 p.u., odnosno poprima vrijednosti iz intervala od 1.013 p.u. do 1.134 p.u. (slučaj A).

Iz grafa je jasno vidljiv problem kojeg FN stvara u mreži te naponsko odstupanje slučajeva A i B, u kojima su FN uključeni i aktivni u mreži, u odnosu na bazni slučaj.

Konkretno, funkcija napona za slučaj A, u kojem je proizvodnja FN podešena na maksimalnu vrijednost, prelazi zakonski propisane granice ( $\pm 10\%$ ) te je zato potrebno primijeniti neku od metoda za regulaciju naponskih prilika.

Napon sabirnica za slučaj B ne prelazi zakonske granice, ali vidljivo je naponsko odstupanje od referentne vrijednosti za koje će se također primijeniti metode za regulaciju naponskih prilika.



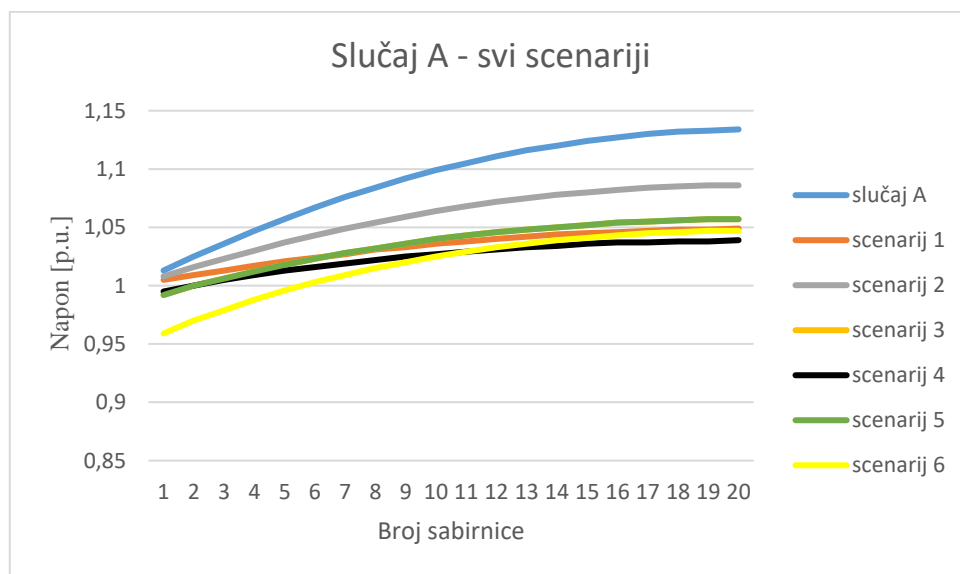
**Slika 4.18.** *Usporedba slučaja A, slučaja B i baznog slučaja*



#### 4.4.2. Slučaj A

Na slici 4.19. prikazan je slučaj A s pripadajućim scenarijima. Iz grafa je vidljivo da se scenarij 4 pokazao najučinkovitijim u spuštanju napona na propisanu vrijednost. Dakle, da se zaključiti da se hibridna metoda koja spaja smanjenje proizvodnje i upravljanje jalovom snagom pokazala najuspješnijom za održavanje poželjnih naponskih prilika u simuliranoj mreži za maksimalnu proizvodnju FN (7kW) s obzirom da se prema grafu (slika 4.19) može uočiti da je tada naponsko odstupanje najmanje.

S druge strane, scenarij 2 tj. isključivo smanjenje proizvodnje FN, pokazalo se kao najmanje uspješna metoda.

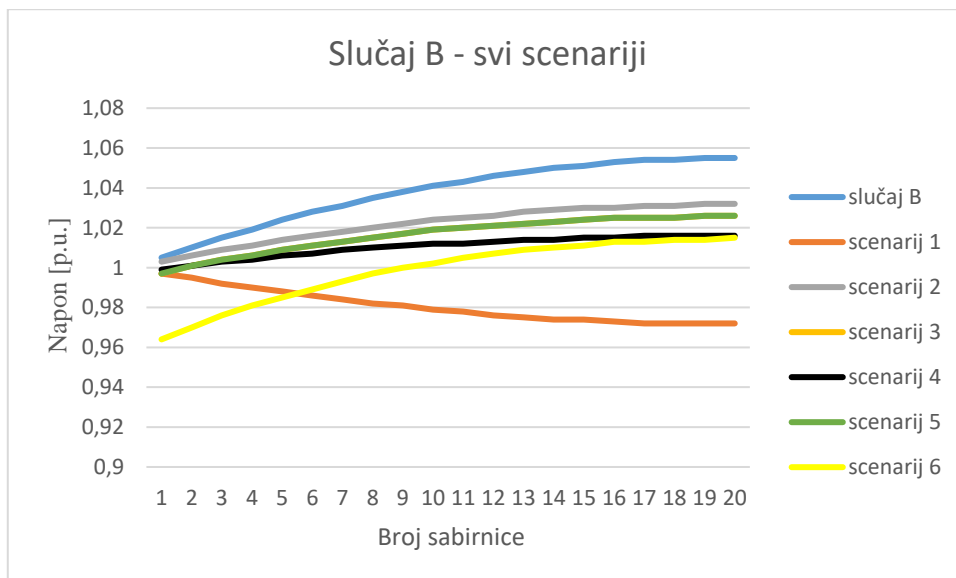


**Slika 4.19.** Usporedba svih scenarija za slučaj A

#### 4.4.3. Slučaj B

Slika 4.20. prikazuje slučaj B s pripadajućim scenarijima. Iz grafa je jasno vidljivo da se scenarij 4 pokazao najuspješnijim za održavanje poželjnih naponskih prilika u DM. Dakle, hibridna metoda koja sjedinjuje metodu upravljanja jalovom snagom i metodu upravljanja radnom snagom pokazala se najučinkovitijom s obzirom da je naponsko odstupanje za taj scenarij najmanje u odnosu na referentnu vrijednost (1 p.u.).

Metoda upravljanja potrošnjom, za ovaj slučaj, pokazala se najmanje djelotvornom što je i vidljivo iz grafa (slika 4.20) s obzirom da je naponsko odstupanje najveće, odnosno u ovom slučaju vrijednost napona opada. Takav rezultat je očekivan s obzirom da je potrošnja smanjena za 50%, a vrijednost punionice ostala je ista kao i u slučaju A pa ovakav scenarij stvara pad napona u mreži.



**Slika 4.20.** Usporedba svih scenarija za slučaj B

## 5. ZAKLJUČAK

Sve većom upotrebom fotonaponskih elektrana, pojavljuju se problemi u distribucijskoj mreži u vidu održavanja poželjnih naponskih prilika koje su zakonski propisane. Razvitkom tehnologije proizvodnje FN, razvile su se i određene metode za regulaciju problema koje FN stvara u DM. U ovom radu opisane su metode predstavljene u [7] te je njihova učinkovitost ispitana izvođenjem simulacija nad postojećom mrežom. Svaka od metoda pokazala se uspješnom u održavanju naponskih prilika u okvirima zadanih granica, međutim usporedbom rezultata izveden je zaključak o metodama koje su se pokazale više uspješnim od ostalih, odnosno koje su smanjile porast napona uzrokovan FN za najveću razliku te tako naponske prilike dovele najbliže propisanoj vrijednosti. Analizom svake od metoda da se zaključiti da niti jedna od njih ne otklanja u potpunosti probleme koje FN stvara u DM što u konačnici i nije moguće jer se u mreži nalaze opterećenja, kabeli i druga oprema. Neke od metoda financijski su neisplative za vlasnika elektrane poput smanjenja proizvodnje, dok su druge problematične jer zadiru u privatnost krajnjeg korisnika (upravljanje potrošnjom). Svakako je važno napomenuti da primjena ovih metoda otvara mogućnost šireg korištenja FN što u konačnici dovodi do efikasnijeg prijelaza na korištenje električne energije iz obnovljivih izvora.

## LITERATURA

[1] R. Ahmadi Kordkheili, S. Ali Pourmousavi, M. Savaghebi, J. M. Guerrero i M. Hashem Nehrir, „Assessing the Potential of Plug-in Electric Vehicles in Active Distribution Networks“, *Energies*, br.9, vol.34, siječanj 2016.

[2] P. Jahangiri, D. C. Aliprantis, „Distributed Volt/VAr Control by PV Inverters“, *IEEE*, br.3, vol.28, str. 3429-3439, kolovoz 2013.

[3] F.Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, T. Van Cutsem, „Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages Due to Photovoltaic Units“, *IEEE*, br.2, vol.7, str. 926-936, ožujak 2016.

[4] Y. Z. Gerdroodbari, R. Razzaghi, F. Shahnian, „Decentralized Control Strategy to Improve Fairness in Active Power Curtailment of PV Inverters in Low-Voltage Distribution Networks“, *IEEE*, br.4, vol.12, str. 2282-2292, listopad 2021.

[5] N. Efkarpidis, T. De Rybel, J. Driesen, „Technical assessment of centralized and localized voltage control strategies in low voltage networks“, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, br.8, vol.8, str. 85-97, prosinac 2016.

[6] F. Shahnian, R. Majumder, A. Ghosha, G. Ledwicha, F. Zare, „Voltage imbalance analysis in residential low voltage distribution networks with rooftop PVs“, *Electric Power Systems Research*, br. 9, vol.81, str.1805-1814, 2011.

[7] A. M. M. Nour, A.Y. Hatata, A. A. Helal, M. M. El-Saadawi, „Review on voltage-violation mitigation techniques of distribution networks with distributed rooftop PV systems“, *IET*, br.3, vol. 14, str. 349-361, 2020.

[8] Mrežna pravila distribucijskog sustava

[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_08\\_74\\_1539.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html)

(30.5.2023.)

[9] EU Science Hub: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

[https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en)

(2.6.2023.)

[10] L. Changfu, V.R.Disfani, H.V.Haghi, J.Kleissl, „Coordination of OLTC and smart inverters for optimal voltage regulation of unbalanced distribution networks“, *Electric Power Systems Research*, vol.187, listopad 2020.

[11] DIGSILENT POWER SYSTEM SOLUTIONS

<https://www.digsilent.de/en/>

(1.7.2023.)

[12] K. Fekete, Z. Klaić, Lj. Majdandžić, „Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid“, *Renewable Energy*, br. 43, str. 140 – 148, studeni 2011.

## **SADRŽAJ**

U ovome radu bilo je potrebno proučiti, opisati i u konačnici testirati metode za održavanje poželjnih naponskih prilika u DM s povećanom koncentracijom FN. Naglasak je stavljen na proučavanje optimalnog rješenja za probleme koje u DM stvaraju inverzni tokovi snaga u vidu porasta napona iznad zakonski propisane vrijednosti. Najprije su teorijski obrađene navedene metode, a zatim su neke od njih testirane na već postojećoj mreži u programu DIgSILENT. Nakon provođenja simulacije i obrade rezultata izveden je zaključak o učinkovitosti navedenih metoda.

Ključne riječi: distribucijska mreža, fotonapon, metode regulacije napona, naponske prilike

## **ABSTRACT**

In this paper, it was necessary to study, describe, and ultimately test the methods for maintaining desirable voltage conditions in the distribution network with increased photovoltaic (PV) integration. The emphasis was placed on exploring an optimal solution for issues arising in the distribution network due to reverse power flows, resulting in voltage exceeding the legally prescribed value. Firstly, these methods were theoretically addressed, and then some were tested on an existing network using the DIgSILENT software. After conducting simulations and analyzing the results, a conclusion was drawn regarding the effectiveness of the mentioned methods.

Keywords: distribution network, photovoltaic, voltage regulation methods, voltage conditions