

Utjecaj promjene izlazne djelatne/jalove snage fotonaponskog sustava na napon niskonaponske mreže

Sabljić, Dino

Master's thesis / Diplomski 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:200:335157>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-22**

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

**UTJECAJ PROMJENE IZLAZNE DJELATNE/JALOVE
SNAGE FOTONAPONSKOG SUSTAVA NA NAPON
NISKONAPONSKE MREŽE**

Diplomski rad

Dino Sabljic

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 19.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

| | |
|---|---|
| Ime i prezime Pristupnika: | Dino Sabljčić |
| Studij, smjer: | Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika |
| Mat. br. Pristupnika, godina upisa: | D-1423, 07.10.2021. |
| OIB studenta: | 36805379227 |
| Mentor: | izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete |
| Sumentor: | Marina Dubravac, mag. ing. el. |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | prof. dr. sc. Zvonimir Klaić |
| Član Povjerenstva 1: | izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete |
| Član Povjerenstva 2: | Ružica Kljajić, mag. ing. el. |
| Naslov diplomskog rada: | Utjecaj promjene izlazne djelatne/jalove snage fotonaponskog sustava na napon niskonaponske mreže |
| Znanstvena grana diplomskog rada: | Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | Objasiti načine regulacije napona u niskonaponskoj mreži sa posebnim osvrtom na utjecaj fotonaponskih elektranama. Na primjeru niskonaponske mreže sa priključenim fotonaponskim elektranama ispitati utjecaj promjene izlazne jalove i djelatne snage na naponski profil niskonaponske mreže. Koristiti proračun tokova snaga. Sumentorica sa FERIT-a: Marina Dubravac |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada): | Izvrstan (5) |
| Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina |
| Datum prijedloga ocjene od strane mentora: | 19.09.2023. |
| Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada: | <i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i> |
| | Datum: |

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

Osijek, 11.10.2023.

Ime i prezime studenta:

Dino Sabljic

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1423, 07.10.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj promjene izlazne djelatne/jalove snage fotonaponskog sustava na napon niskonaponske mreže**

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

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PREGLED PODRUČJA TEME | 2 |
| 3. MOGUĆNOST UPRAVLJANJA NAPONSKIM PRILIKAMA POMOĆU AKTIVNIH KUPACA..... | 5 |
| 3.1. Mogućnosti upravljanja naponskim prilikama pomoću FN..... | 6 |
| 3.2. Volt-Var način rada | 7 |
| 3.3. Volt-Watt način rada..... | 9 |
| 3.4. Mogućnosti upravljanja naponskim prilikama upravljanjem potrošnjom..... | 11 |
| 3.5. Mogućnost upravljanja naponskim prilikama pomoću sustava za pohranu EE | 12 |
| 3.6. Mogućnost upravljanja naponskim prilikama pomoću hibridnih sustava..... | 13 |
| 4. SIMULACIJA UTJECAJA PROMJENE IZLAZNE DJELATNE/JALOVE SNAGE FOTONAPONSKOG SUSTAVA NA NAPON NISKONAPONSKE MREŽE | 15 |
| 4.1. Opis zadatka i mreže..... | 15 |
| 4.2. Rezultati osnovnih slučajeva | 18 |
| 4.3. Upravljanja djelatnom snagom | 21 |
| 4.3.1. Scenarij 1 slučaj 1..... | 21 |
| 4.3.2. Scenarij 2 slučaj 1..... | 25 |
| 4.3.3. Scenarij 3 slučaj 1..... | 29 |
| 4.3.4. Scenarij 4 slučaj 1..... | 32 |
| 4.3.5. Scenarij 5 slučaj 1..... | 36 |
| 4.3.6. Scenarij 1 slučaj 2..... | 40 |
| 4.3.7. Scenarij 2 slučaj 2..... | 44 |
| 4.3.8. Scenarij 3 slučaj 2..... | 48 |
| 4.3.9. Scenarij 4 slučaj 2..... | 51 |
| 4.3.10. Scenarij 5 slučaj 2..... | 55 |
| 4.4. Upravljanje jalovom snagom | 59 |
| 4.4.1. Scenarij 6 slučaj 1..... | 59 |
| 4.4.2. Scenarij 7 slučaj 1..... | 62 |
| Naponi na sabirnicama | 63 |
| Opterećenje vodova | 65 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Gubici | 67 |
| 4.4.3. Scenarij 6 slučaj 2..... | 68 |
| 4.4.4. Scenarij 7 slučaj 2..... | 72 |
| Naponi na sabirnicama | 72 |
| Opterećenje vodova | 74 |
| Gubici | 77 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 78 |
| LITERATURA | 79 |
| SAŽETAK..... | 82 |
| ABSTRACT | 82 |
| ŽIVOTOPIS..... | 83 |

1. UVOD

S obzirom na to da rastu potrebe za električnom energijom i smanjuje se udio tradicionalnih izvora u proizvodnji električne energije, javlja se sve više postrojenja u elektroenergetskom sustavu (EES) koja proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora. Fotonaponske elektrane (FN) postale su jedan od najbržih izvora električne energije. Zbog problema troškova i gubitaka prilikom prijenosa električne energije, proizvodne jedinice smještaju se na mjestu ili u blizini potrošača električne energije. Takav način zove se distribuirana proizvodnja električne energije. Povećanom integracijom FN elektrana distribucijska mreža suočava se s problemima među kojima se posebno ističu učestala naponska odstupanja. Budući da FN sustav u svojoj konfiguraciji sadrži pretvarač, ima mogućnost sudjelovanja u regulaciji naponskih prilika u mreži, na primjer upravljanjem djelatnom i jalovom snagom. Te dvije metode često se u literaturi nazivaju Volt-Watt i Volt-Var metoda. [1], [2]. U literaturi [1] prikazan je utjecaj priključenja fotonaponskog sustava na nesimetričnu distribucijsku mrežu. U literaturi [2] autori su prikazali strategiju kontrole naponskih prilika pomoću djelatne i jalove snage. Autori u literaturi [3] istražili su utjecaj paralelnog rada fotonaponskog sustava i niskonaponske distribucijske mreže. U literaturi [4] predložen je algoritam koordinacije FN-a koji imaju mogućnost Volt-Var kontrole i smanjenje proizvodnje FN. Autori u literaturi [5] predložili su centraliziranu metodu određivanja lokalnih strategija upravljanja naponskim prilikama u distribucijskoj mreži (DM). U literaturi [6] prikazane su odgovarajuće strategije za Volt-Var kontrolu energetskim mrežama s integriranim obnovljivim izvorima energije. Autori u literaturi [7] prikazali su pravilnu raspodjelu smanjivanja djelatne snage među vlasnicima FN-a. U literaturi [8] prikazane su mogućnosti upravljanja FN pretvaračem. Autori u literaturi [9] prikazali su algoritam optimalnog postavljanja Volt-Var krivulje FN pretvarača za odgovarajuću kontrolu izlazne snage. U literaturi [10] razrađen je problem ograničenja djelatne snage

Diplomski rad sastoji se od pet poglavlja. U prvom poglavlju nalazi se uvod u temu rada. U drugom poglavlju opisani su radovi u kojima se obrađuje slična tematika. U trećem su poglavlju opisane mogućnosti upravljanja naponskim prilikama pomoću aktivnih kupaca. U četvrtom poglavlju opisana je testna mreža i postupak provedbe simulacije. Zatim su dobiveni rezultati prikazani, uspoređeni i objašnjeni. U petom je poglavlju donesen zaključak u odnosu na opisanu teoriju i dobivene rezultate.

Ovaj diplomski rad izrađen je u okviru aktivnosti na HRZZ projektu Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca (UIP-2020-02-5796).

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Promjena izlazne djelatne i jalove snage fotonaponskog sustava postaje sve važnija i aktualnija metoda kontrole napona. Sve je više FN-a povezano u distribucijskim mrežama. FN se karakteriziraju kao obnovljivi izvori energije s izuzetno varijabilnom i nepredvidivom proizvodnjom te mogu uzrokovati probleme s naponom u distribucijskoj mreži. Klasične metode pokazale su smanjenu učinkovitost u regulaciji naponskih prilika u distribucijskoj mreži prvenstveno zbog sporog odaziva na brze naponske promjene. Za razliku od klasičnih metoda, FN imaju pretvarač koji se nameće kao obećavajuće rješenje. FN proizvodnja karakterizira se kao varijabilna i nepredvidiva zbog brzih promjena sunčevog zračenja. Zbog toga napon može značajno oscilirati tokom dana te kontrola naponskih prilika dobiva na značaju. Za razliku od klasičnih metoda za regulaciju koje sporije reagiraju na promjene, FN pretvarači mogu odgovoriti na navedene izazove i sve se više koriste za kontrolu napona.

Autor u literaturi [1] prikazuje problematiku utjecaja priključenja fotonaponskog sustava na nesimetričnu distribucijsku mrežu te prilikom proračuna uzima u obzir nesimetrični tokove snage priključenjem elektrane. Nesimetričnost kao posljedica ima nepoželjne pojave kao što su povećanje gubitaka snage i energije, grijanje namota transformatora te preopterećenje pojedinih faza. Autor je uzeo izvod niskonaponske distribucijske mreže te uz priključenje fotonaponskog sustava izvršio proračun. Prema dobivenim rezultatima inverzni tokovi snage uzrokovani FN doveli su do smanjivanja gubitaka u distribucijskoj mreži i manjeg opterećenja transformatora.

U literaturi [2] autori su prikazali strategiju kontrole naponskih prilika pomoću djelatne i jalove snage. Priključivanjem FN elektrane javlja se porast napona u DM-u. Strategija koju su autori koristili temelji se na amplitudi napona i impedanciji voda. Autori donose zaključak da fotonaponski pretvarač uz injektiranje djelatne i jalove snage može osim same kontrole naponskih prilika smanjiti i gubitke.

U literaturi [3] autori su proveli istraživanje o utjecaju paralelnog rada fotonaponskog sustava i niskonaponske distribucijske mreže. Autori su analizirali utjecaj FN elektrane na naponske profile niskonaponske mreže (0.4 kV). Proračunom tokova snaga za oba scenarija dobivene su vrijednosti napona svih mrežnih čvorova te su vrijednosti uspoređene sa scenarijem bez priključene fotonaponske elektrane na niskonaponsku mrežu. Analiziranjem podataka autori su došli do

zaključka da je priključivanjem fotonaponskog sustava došlo do povećanja vrijednosti napona na svim čvorovima u oba scenarija, najviše na čvoru gdje je priključena fotonaponska elektrana.

U literaturi [4] autori su predložili algoritam za koordinaciju FN-a koji imaju mogućnost Volt-Var kontrole i smanjenje proizvodnje FN-a. Korišteni su optimalni tokovi snaga za pravilnu koordinaciju distributivnih izvora energije koja se temelji na podešavanju djelatne i jalove snage FN pretvarača. Ponuđenom metodom predloženo je rješenje Volt-Var kontrole funkcije pretvarača za upravljanje jalovom snagom te pravedno smanjivanje djelatne snage fotonaponskih pretvarača među korisnicima. Kao pravedno smanjivanje izlazne snage fotonaponskog sustava korisnika predloženi su različiti pristupi, uključujući korištenje podataka o osjetljivosti napona izračunatih centralizirano i na decentraliziran način. Autori zaključuju da korištenje metode Volt-Var kontrole te smanjivanje proizvodnje fotonaponskog sustava među korisnicima učinkovito smanjuju uzrokovane naponske probleme bez nepravednog ograničavanja vlasnika FN elektrane.

Autori u literaturi [5] predlažu centraliziranu metodu za određivanje lokalnih strategija upravljanja naponskim prilikama u distribucijskoj mreži. Pretvarači fotonaponskih sustava prilagođavaju jalovu i smanjuju djelatnu snagu na temelju lokalno izmjerenih napona, održavajući napone sustava na željenoj razini i smanjujući gubitke u mreži. Kao zaključak autori navode da su gubici aktivne distribucijske mreže smanjeni te su naponski profili poboljšani. Autori napominju da izvedba lokalnih strategija upravljanja naponom ovisi o podešavanju parametara upravljanja koji ovisi o mreži i vremenu te da će strategija biti poboljšana ukoliko se poboljša komunikacijski sustav. Također, iskorištavanje preostalog kapaciteta pretvarača može poboljšati naponske profile uz smanjenje gubitaka u mreži.

U literaturi [6] autori su pružili pregled trenutnih tehnologija koje omogućuju operatorima distribucijskog sustava da odaberu odgovarajuće strategije za Volt-Var kontrolu u energetskim mrežama s integriranim obnovljivim izvorima energije. Također, u radu se istražuju nove tehnologije Volt-Var kontrole. Autori donose sljedeće zaključke: kondenzatorske baterije predstavljaju učinkovit način za kontrolu napona u distribucijskim sustavima, ali u odnosu na fotonaponske pretvarače mogu dovesti do problema s kvalitetom električne energije zbog djelovanja preklopke te, za razliku od pretvarača, ne mogu davati u mrežu jalovu snagu već ju samo apsorbirati. Također FN pretvarači mogu pružiti brzu Volt-Var kontrolu u distribucijskim mrežama. Zbog toga autori preporučuju korištenje fotonaponskih pretvarača kao pomoćne usluge za kontrolu jalove snage sustava umjesto kondenzatorskih baterija.

U literaturi [7] autori su pokazali da se centralnom koordinacijom rada fotonaponskih pretvarača može smanjiti djelatna snaga fotonaponskih pretvarača i to smanjenje se može pravilno raspodijeliti među vlasnicima fotonaponske elektrane. Autori zaključuju da se ovakvim optimizacijskim modelom osigurava ravnomjerno smanjenje izlazne snage u svim kućanstvima te daje bolje rezultate u smislu minimiziranja gubitaka u usporedbi s Volt-Var kontrolom. Autori napominju da bi optimalno rješenje za pogon distribucijske mreže predstavljala optimalna raspodjela snage FN pretvarača.

Autori su u literaturi [8] proučavali mogućnosti upravljanja fotonaponskim pretvaračem kako bi se poboljšala fleksibilnost distribucijske mreže s velikim brojem priključenih fotonaponskih sustava. Autori za problem predlažu rješenje pomoću modela temeljenog na optimalnim tokovima snage u kojem se upravlja djelatnom i jalovom snagom FN pretvarača. Prema dobivenim rezultatima autori utvrđuju da su predložene strategije učinkovite te pokazuju poboljšane rezultate u regulaciji naponskih prilika u NN DM, a samim time se povećava i fleksibilnost same mreže.

U literaturi [9] autori predlažu algoritam za optimalno postavljanje Volt-Var krivulje fotonaponskog pretvarača za odgovarajuću kontrolu izlazne snage. Autori su uzeli u obzir minimalna naponska odstupanja, gubitke u sustavu te vršnu vrijednost jalove snage čime se osiguravaju optimalni parametri Volt-Var krivulje. Autori donose zaključak da se poboljšala cjelokupna izvedba distribucijskog sustava kada se koriste optimalne postavke Volt-Var krivulje dobivene iz predloženog algoritma.

Autori u literaturi [10] razradili su problem ograničenja djelatne snage u svrhu rješavanja tehničkih pitanja u distribucijskim mrežama s fotonaponskim sustavima na pravedan način. Autori navode da postojeće metode smanjenja proizvodnje mogu biti ekonomski nepravedne za pojedine proizvođače. Volt-Var kontrolom nepravednost je vidljiva u udaljenim lokacijama radijalnih izvoda. Autori kao rješenje predlažu četiri linearizirane trofazne sheme temeljene na optimalnim tokovima snage. Rezultati istraživanja pokazali su da su sustavi koji uzimaju u obzir pravedno smanjenje snaga učinkoviti kada su FN elektrane neravnomjerno raspoređene u distribucijskoj mreži.

3. MOGUĆNOST UPRAVLJANJA NAPONSKIM PRILIKAMA POMOĆU AKTIVNIH KUPACA

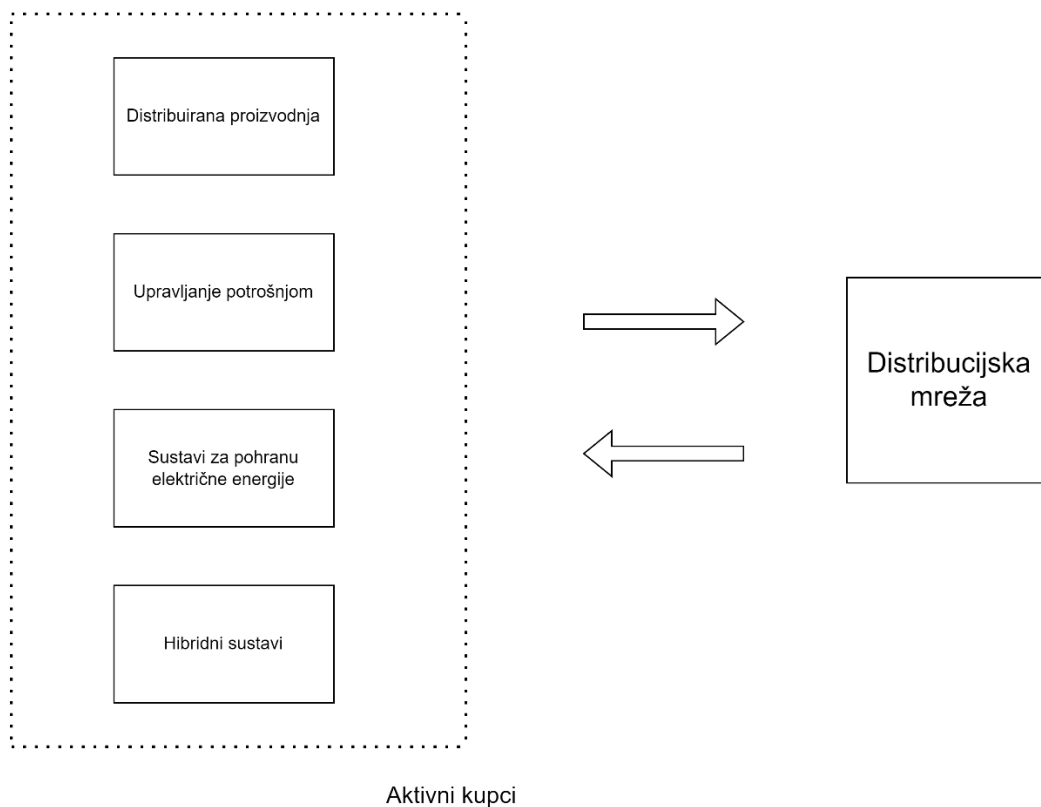
FN su dio konfiguracije aktivnih kupaca pa će ovo poglavlje dati definiciju aktivnog kupca, njegovu konfiguraciju te ukratko opisati mogućnosti aktivnih kupaca u regulaciji naponskih prilika s naglaskom na djelatnu i jalovu snagu FN pretvarača.

Prema literaturi [1] zbog povećanja potražnje za električnom energijom javlja se sve veći broj priključenih distribuiranih izvora kao što su FN na DM. Priključivanje FN na distribucijsku mrežu uzrokuje promjenu smjera tokova snaga te vodovi postaju dvostrano napajani. Time mreža prelazi iz pasivne u aktivnu mrežu. Stoga i kućanstva koja imaju instaliranu FN elektranu mogu sudjelovati u pogonu takve distribucijske mreže. Upotreba električne energije u kućanstvu ima sve veći utjecaj na cjelokupni elektroenergetski sustav. Kućanstva imaju potencijal prilagoditi se i odgovoriti na dostupnost obnovljive energije i mrežnog kapaciteta. Aktivni potrošači mogu prilagoditi korištenje energetske sredstava te samim time smanjiti neusklađenost između opskrbe energije sunca i potražnje za električnom energijom [11].

Prema literaturi [12] aktivni su kupci „skupina krajnjih kupaca koji djeluju zajedno, koji troši ili skladišti električnu energiju proizvedenu u vlastitom prostoru smještenom unutar definiranih granica ili koji prodaje električnu energiju koju sam proizvodi ili sudjeluje u pružanju fleksibilnosti ili u programima energetske učinkovitosti, uz uvjet da te djelatnosti nisu njegova primarna trgovačka ili profesionalna djelatnost“.

Aktivni kupci imaju mogućnost sudjelovanja na tržištu električne energije. Električnu energiju predaju u mrežu na istom obračunskom mjernom mjestu gdje preuzimaju električnu energiju iz mreže. Priključivanje na mrežu mora biti u skladu s pravilima za priključivanje na prijenosnu ili distribucijsku mrežu, mrežnim pravilima prijenosnog ili distribucijskog sustava. Mogu djelovati izravno ili putem agregatora te sudjelovati u pružanju usluge uravnoteženja i fleksibilnosti.[12]

Glavni predstavnik distribuirane proizvodnje je FN sustav koji često sadrži sustav za pohranu električne energije poput baterije te tako čine hibridni sustav. Kao glavni predstavnici upravljanja potrošnjom nameću se električna vozila, sustavi za upravljanje potrošnjom i druga fleksibilna opterećenja u kućanstvu. Slika 3.1. prikazuje navedenu konfiguraciju aktivnih kupaca te mogućnosti povezivanja s distribucijskom mrežom [13].



Slika 3.1. Konfiguracija aktivnih kupaca [13]

Budući da se u ovom diplomskom radu obrađuje upravljanje djelatnom i jalovom snagom FN-a, odnosno Volt-Var i Volt-Watt načinom rada ta dva načina bit će detaljnije objašnjena u nastavku. Nakon toga ukratko će biti objašnjene mogućnosti drugih aktivnih kupaca za upravljanje naponskim prilikama u DM-u.

3.1. Mogućnosti upravljanja naponskim prilikama pomoću FN

Tradicionalno, dostupne varijable su ograničene na smještaj kondenzatorske baterije, transformator s promjenom položaja regulacijske preklopke, rekonfiguraciju mreže i poboljšanje poprečnog presjeka. Međutim, navedene strategije nisu dovoljno učinkovite u mrežama s aktivnim kupcima. Primjena FN pretvarača predstavlja obećavajuće rješenje i u kombinaciji s već prisutnim mehanizmima upravljanja naponom može dati rezultate dobre za optimizaciju napona.

Prema literaturi [14], FN inverteri koriste se i u samostalnim i u mrežnim sustavima. Samostalni sustavi korisni su u udaljenim područjima koja su izolirana od distribucijske mreže. Za udaljena područja gdje mrežno napajanje izmjeničnom strujom nije dostupno, samostalni FN sustav osigurava napajanje lokalnim korisnicima ponašajući se kao izvor izmjeničnog napona. Zbog nepredvidljive prirode fotonaponskog izvora, potrebna je baterija ili rezervno napajanje za

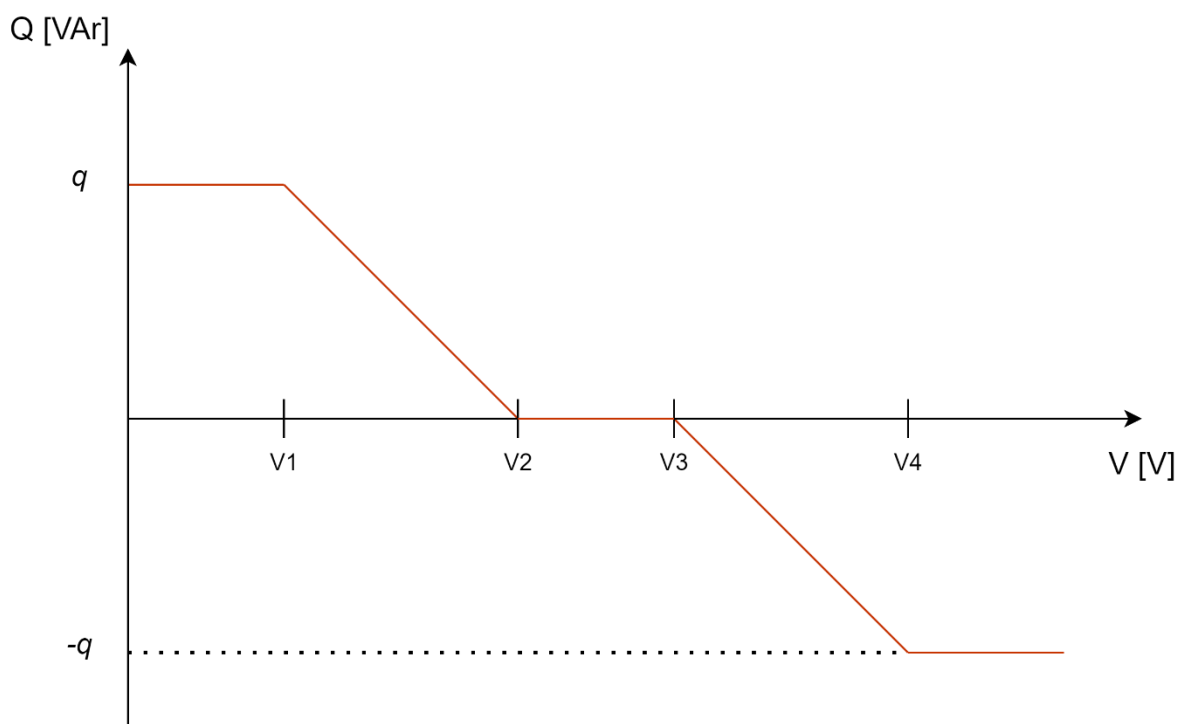
pohranjivanje viška energije tijekom razdoblja visokog sunčevog zračenja i opskrbu potrošača kada FN energija nije dostupna.

Autori u literaturi [4] predlažu različite načine rada FN pretvarača:

- Način rada s istim faktorom snage (rad bez regulacije napona). U načinu rada s istim faktorom snage, faktor snage se održava na konstantnoj vrijednosti i time izravno utječe na napone [14]. Faktor snage najčešće je jedan. Proizvođači pretvarača specificiraju faktor snage do 0,8 ind i 0,8 kap, dok po mrežnim pravilima postrojenja i instalacija proizvođača koji se priključuju na mrežu moraju imati mogućnost pogona s faktorom snage 0,9 [15]
- Način rada s Volt-Var kontrolom kojom se regulira jalova snaga pretvarača ovisno o naponu točke spajanja na mreži
- Način rada s Volt-Watt kontrolom kojom se regulira djelatna snaga koristeći kontrolu pada iznad određenog napona fotonaponskog pretvarača.
- Način rada s ograničavanjem snage kojim se ograničava brzina promjene izlazne djelatne snage pretvarača
- Način rada za simetriranje napona kojim se smanjuje naponska nesimetrija između faza injektiranjem nesimetrične trofazne struje [4]

3.2. Volt-Var način rada

Slika 3.3. napravljena po uzoru na literaturu [5] prikazuje primjer Q–V krivulje s kontrolom pada napona fotonaponskog pretvarača. Pozitivna vrijednost Q–V krivulje označava kapacitivnu jalovu snagu dok negativna vrijednost označava induktivnu jalovu snagu [5].



Slika 3.2. Primjer Q – V krivulje [5]

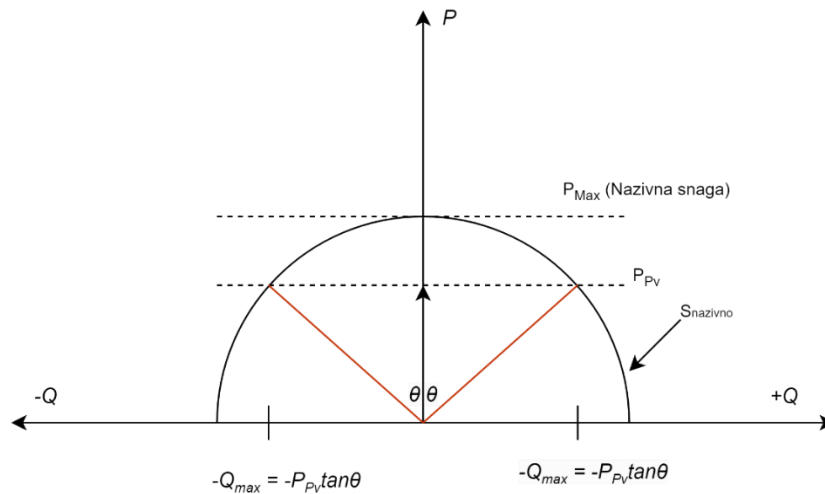
FN mogu injektirati ili apsorbirati jalovu snagu te samo injektirati u mrežu djelatnu snagu. Prema Volt-Var krivulji, ovisno o amplitudi napona u točki zajedničkog priključka, u slučaju da je napon veći od zadane vrijednosti, FN se može usporediti s ulogom zavojnice u mreži. Zavojnica apsorbira kapacitivnu jalovu snagu, a daje u mrežu induktivnu jalovu snagu. U slučaju da je napon manji od zadane vrijednosti, FN se može usporediti s ulogom kondenzatora u mreži. Kondenzator apsorbira induktivnu jalovu snagu, a daje u mrežu kapacitivnu jalovu snagu.

Količina injektiranja ili apsorbirane jalove energije na temelju napona i maksimalne dostupne jalove snage na svakom priključku dana je izrazom (4):

$$q_t = \phi(v_t) = \left\{ \begin{array}{ll} \bar{q}, & \text{ako je } vt \leq V_1 \\ \bar{q} * \frac{V_2 - vt}{V_2 - V_1}, & \text{ako je } V_1 < vt < V_2 \\ 0, & \text{ako je } V_2 \leq vt \leq V_3 \\ -\bar{q} * \frac{vt - V_3}{V_4 - V_3}, & \text{ako je } V_3 < vt < V_4 \\ -\bar{q}, & \text{ako je } vt \geq V_4, \end{array} \right\} \quad (3.1.)$$

U izrazu q predstavlja najveću izlaznu jalovu snagu, v_t je amplituda napona u točki zajedničkog spajanja, a q_t je izlazna jalova snaga, u bilo kojem trenutku t . [4]

Na slici 3.3. koja predstavlja pogonsku kartu FN pretvarača, vidljiva je ovisnost jalove snage FN pretvarača o djelatnoj i prividnoj snazi.



Slika 3.3. Pogonska karta FN pretvarača [16]

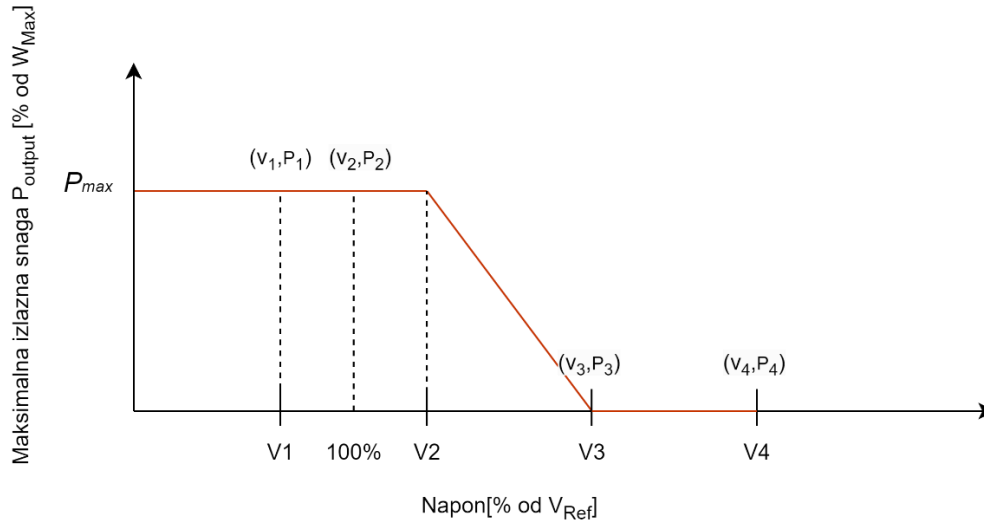
Polukrug predstavlja granicu radnog područja pretvarača, polumjer polukruga označava prividnu snagu pretvarača u MVA, P_{PV} predstavlja izlaznu djelatnu snagu pretvarača, dok Q_{max} predstavlja maksimalnu jalovu snagu pretvarača [17].

Prema trokutu snage prikazanom na slici 3.3., mogu se odrediti izrazi za pojedinu snagu [18]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.2.) \quad \text{iz čega slijedi da je:} \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.3.)$$

3.3. Volt-Watt način rada

Također, osim jalove snage, FN pretvarači mogu upravljati izlaznom djelatnom snagom ovisno o promjeni napona. Slika 3.5. napravljena po uzoru na literaturu [17] prikazuje primjer Volt-Watt krivulje, odnosno metode smanjenja djelatne snage FN-a.



Slika 3.5. *Primjer Volt-Watt krivulje [17]*

Na slici V_{ref} predstavlja referentni napon. V_1 , V_2 , V_3 i V_4 naponi su za određivanje aktivnih snaga: P_1 , P_2 , P_3 i P_4 koje bi fotonaponski sustav trebao emitirati. V_{ref} , V_2 i V_3 bitni su elementi za kontrolu aktivne snage dok su (V_1, P_1) u (V_4, P_4) izborne. V_2 i V_3 određuju nagib izlazne snage, stoga kriteriji za njihovo postavljanje moraju biti jasni [17].

FN određene snage P_{max} , nakon prelaska zadane granice napona V_2 , linearno smanjuje svoju proizvodnju dok ne dođe do graničnih vrijednosti napona određenih mrežnim pravilima (najčešće 1.1 p.u.), tada prestaje proizvodnja FN-a.

Nakon postavljanja V_{ref} , V_2 i V_3 može se nacrtati Volt-Watt krivulja. Vrijednost djelatne snage koja odgovara svakom naponu određena je izrazom [17]:

$$P_{PV_ref} = \begin{cases} P_{max} & (V_{PCC}(t) < V_2) \\ \frac{P_{min} - P_{max}}{V_3 - V_2} \times (V_{PCC}(t) - V_3) & V_2 < V_{PCC}(t) < V_3 \\ 0 & V_3 < V_{PCC}(t) \end{cases} \quad (3.4.)$$

U navedenom izrazu, V_{PCC} predstavlja napon u točki zajedničkog spajanja. Kad je proizvodnja FN-a jednaka nuli, V_{PCC} je određen opterećenjem. Kada je opterećenje najveće, V_{PCC} ima minimalnu vrijednost, a kada je opterećenje najniže, V_{PCC} poprima maksimalnu vrijednost.

P_{max} i P_{min} u izrazu predstavljaju maksimalnu i minimalnu izlaznu snagu FN-a.

3.4. Mogućnosti upravljanja naponskim prilikama upravljanjem potrošnjom

Proizvodnja i potrošnja električne energije moraju biti u ravnoteži u svakom trenutku u mreži. Nestabilnost mreže ili ozbiljne oscilacije napona mogu biti posljedica značajne nesimetričnosti i uzrokovati kvarove unutar mreže. Upravljanje potrošnjom suradnjom između operatora distribucijske mreže i krajnjih korisnika kroz dvosmjernu komunikaciju preko komunikacijskog sustava uključuje sve mjere, programe, opremu i aktivnosti koje se provode za poboljšanje energetske učinkovitosti i isplativosti korištenja energije korisnika. Upravljanje potrošnjom daljinska je izravna kontrola kućanstva od strane operatora distribucijske mreže za upravljanje protokom energije u distribucijskoj mreži. Metoda je osmišljena kako bi se smanjilo povećanje ukupne potrošnje energije, čime se održava sigurnost i stabilnost mreže i povećava energetska učinkovitost. Pridonosi kontroli napona i frekvencije i omogućuje veću integraciju FN-a u distribucijsku mrežu. Zahtjev za iskorištavanje metode je taj da opterećenja budu u mogućnosti kontrolirati operatori distribucijske mreže. To omogućuje pomicanje potrošnje odgodivih opterećenja kućanstva iz razdoblja vršnog opterećenja na potrošnju izvan vršnog opterećenja, kao što su na primjer električno grijanje vode i pumpe. Razdoblje vršne proizvodnje FN-a i vršnog opterećenja nije usklađeno. Dok se vršna proizvodnja FN-a odvija u popodnevним satima kada je sunce na najvišoj točki, vršno opterećenje odvija se u poslijepodnevним ili večernjim satima kada je i potrošnja energije najveća. Metodom pomicanja potrošnje odgodivih opterećenja u razdoblje vršne proizvodnje FN-a, dolazi do smanjenja potrošnje energije tijekom vršnih razdoblja opterećenja i veće potrošnje tijekom razdoblja izvan vršnih opterećenja[19], [20].

Glavni je problem kršenje privatnosti korisnika. Metoda se može koristiti za ublažavanje problema porasta napona u NN distribucijskoj mreži, ali suradnja je krajnjeg korisnika ključna. Stoga se primjenjuje politika poticaja kako bi se olakšala takva tehnika. Operator distribucijske mreže šalje podatke o optimalnom protoku energije tijekom dana svakom sudioniku na temelju povijesti podataka o potrošnji i proizvodnji svakoga. Rezultati istraživanja pokazali su da upravljanje potrošnjom električne energije učinkovito kontrolira porast napona za NN mreže s integriranim FN-om. Korištenje metode ne samo da smanjuje račun za struju, već i sprječava porast napona [20].

3.5. Mogućnost upravljanja naponskim prilikama pomoću sustava za pohranu EE

U mreži pojedina kućanstva mogu biti povezana sa sustavom pohrane energije. Položaj sustava za pohranu energije u cijeloj mreži omogućuje lokalno pohranjivanje viška energije s manjim linijskim gubicima i zatim ponovno slanje energije istom korisniku kada je to potrebno. U praksi, sustavi za pohranu EE apsorbiraju višak energije tijekom popodnevni sati kako bi ublažio obrnuti tok snage kao rezultat visokog izlaza FN-a. Pohranjena energija se zatim prazni kako bi se održao željeni napon u večernjem vršnom razdoblju. Rješavanje problema porasta/pada napona ovisi o kapacitetu baterije i njevoj brzini punjenja/praznjenja tijekom razdoblja. Postoje dvije glavne strategije za ugradnju ESS-a: distribuirane baterije i centralizirane baterije. Prva strategija podrazumijeva da svaki FN ima instaliranu bateriju. Tradicionalna DEES kontrola se aktivira kada je generirana FN snaga veća od snage opterećenja. Tijekom popodnevni sati, DESS potpuno je napunjen i ne utječe na napon. Umjesto konvencionalne strategije punjenja/praznjenja, postoje različite vrste strategija punjenja/praznjenja po danu kao što su trapezoidna, pravokutna i trokutna. Slično, navečer se DESS prazni s istom strategijom kako bi se izbjegao preveliki pad. Time se rješava problem porasta i pada napona u mreži. Druga je strategija centralizirani ESS (CESS), koji zahtijeva identificiranje optimalne lokacije, optimalna alokacija i veličina baterije u distribucijskoj mreži. Najbolja pozicija za ugradnju baterije na kraju je dovoda na najudaljenijem položaju od trafostanice. Snaga potrebna od CESS, P_{ESS} , na kraju dovoda za suzbijanje porasta napona može se odrediti prema [21]:

$$P_{ESS} = U_{max} - U_H \times \|dU/dP\| \quad (3.5.)$$

gdje je $\|dU/dP\|$ faktor osjetljivosti na napon. Kada se baterija nalazi na istoj lokaciji kao i FN, bolji je učinak kontrole smanjenja porasta napona od ostalih lokacija [19], [21].

Također, pretvarači baterija mogu proizvesti djelatnu i jalovu snagu. Energetska elektronika koja se koristi u sustavima za pohranu energije ima sposobnost djelovanja kao VAR kompenzatori za održavanje odgovarajućeg napona i faktora snage u lokalnom području. Baterije na kraju izvoda učinkovitije su za poboljšanje profila napona nego kada se nalaze na početku izvoda [19], [21].

3.6. Mogućnost upravljanja naponskim prilikama pomoću hibridnih sustava

Kako bi se povećala upotreba električnih vozila na udaljenim lokacijama i smanjilo opterećenje mreže u urbanim područjima, stanica za punjenje izvan mreže igra značajnu ulogu. Za takav sustav potrebna je energija iz obnovljivih izvora energije. Među svim, fotonaponski sustav najprikladniji je izvor. Međutim, energija FN sustava varira zbog promjene u zračenju i ne može generirati stalnu energiju te je potreban uređaj za pohranu energije kako bi se zadovoljila potražnja za energijom i poboljšala održivost punionice. Stoga sustav čini fotonaponski izvor, sustav za pohranu energije te punjač za električna vozila. Takav sustav čini hibridni sustav. Energija proizvedena iz FN sustava ne može zadovoljiti potražnju tijekom odsutnosti ili smanjenja sunčeve svjetlosti, stoga sustav za pohranu energije napaja mrežu za to vrijeme. S druge strane, dok je proizvodnja veća od potražnje, višak energije pohranjuje se u spremnik/bateriju [22].

Električna vozila (EV) također mogu raditi kao uređaj za pohranu kada su spojena na mrežu. Tijekom vršne proizvodnje EV djeluje kao dodatno opterećenje mreže. Punionica EV-a kao hibridni sustav može puniti EV pri pojavi viška proizvodnje u mreži [20].

Strategije za regulaciju naponskih prilika mogu se povezivati kako bi bile učinkovitije i riješile nedostatke svake strategije. Kao na primjer:

- Smanjivanje djelatne snage i regulacija jalove snage. Nedostatak obje strategije spajanjem dovodi do bolje izvedbe regulacije napona.
- Regulacija jalove snage sustavom za pohranu energije. Sustavi za pohranu energije mogu se kombinirati s FN pretvaračem koji regulira jalovu snagu kako bi se povećani napon ublažio
- OLTC transformator s regulacijom jalove snage. Općenito, sam OLTC učinkovitiji je za sprječavanje porasta napona u usporedbi s metodom upravljanja jalovom snagom. Kombinacija obje metode uzrokuje robusniju kontrolu napona i opterećenja transformatora. Stoga se najbolji rezultat može postići kada je OLTC aktiviran kao primarna kontrola, a upravljanje jalovom snagom kao pomoćna kontrola
- OLTC transformator sa sustavom za pohranu energije. Ta kombinacija metoda smanjuje opterećenje na regulacijskoj preklopci. Vremenom bez vršnog opterećenja, OLTC radi za smanjenje porasta napona, a sustavi za pohranu energije koriste se za punjenje viška

generirane snage FN-a duž dovoda. Tijekom vremena vršnog opterećenja, DESS se pri svakom pražnjenju opterećenja smanjuje za smanjenje vršnog opterećenja mreže, a zatim radi OLTC. Cilj je ublažavanje prenapona [21].

4. SIMULACIJA UTJECAJA PROMJENE IZLAZNE DJELATNE/JALOVE SNAGE FOTONAPONSKOG SUSTAVA NA NAPON NISKONAPONSKE MREŽE

4.1. Opis zadatka i mreže

Slika 4.1. prikazuje shematski prikaz simulacija provedenih u ovom diplomskom radu. Provedene su tri glavne simulacije:

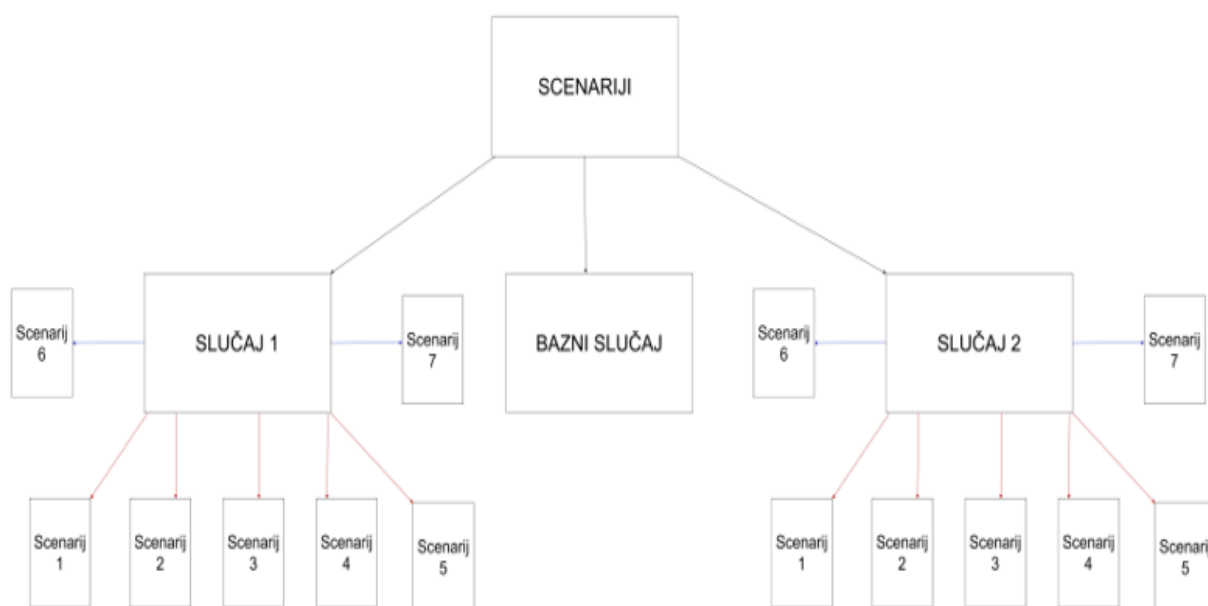
- Bazni slučaj – mreža bez priključenog FN-a
- Slučaj 1 – proizvodnja FN-a na 100%
- Slučaj 2 – proizvodnja FN-a na 50%

Za oba slučaja s priključenim FN-om provodili su se scenariji upravljanja djelatnom i jalovom snagom. Upravljanje djelatnom snagom na slici prikazano je crvenim strelicama te su provedena četiri različita scenarija:

- Scenarij 1 – Smanjivanje proizvodnje FN-a na zadnjih 10 sabirnica
- Scenarij 2 – Smanjivanje proizvodnje FN-a na prvih 10 sabirnica
- Scenarij 3 – Smanjivanje proizvodnje FN-a na prvih 5 i zadnjih 5 sabirnica
- Scenarij 4 – Smanjivanje proizvodnje FN-a svakom drugom FN-u
- Scenarij 5 – Smanjivanje proizvodnje FN-a svakom FN-u

Upravljanje jalovom snagom na slici prikazano je plavim strelicama te su provedena dva različita scenarija:

- Scenarij 6 – Smanjivanje faktora snage ($\cos \varphi$)
- Scenarij 7 – Volt-Var metoda

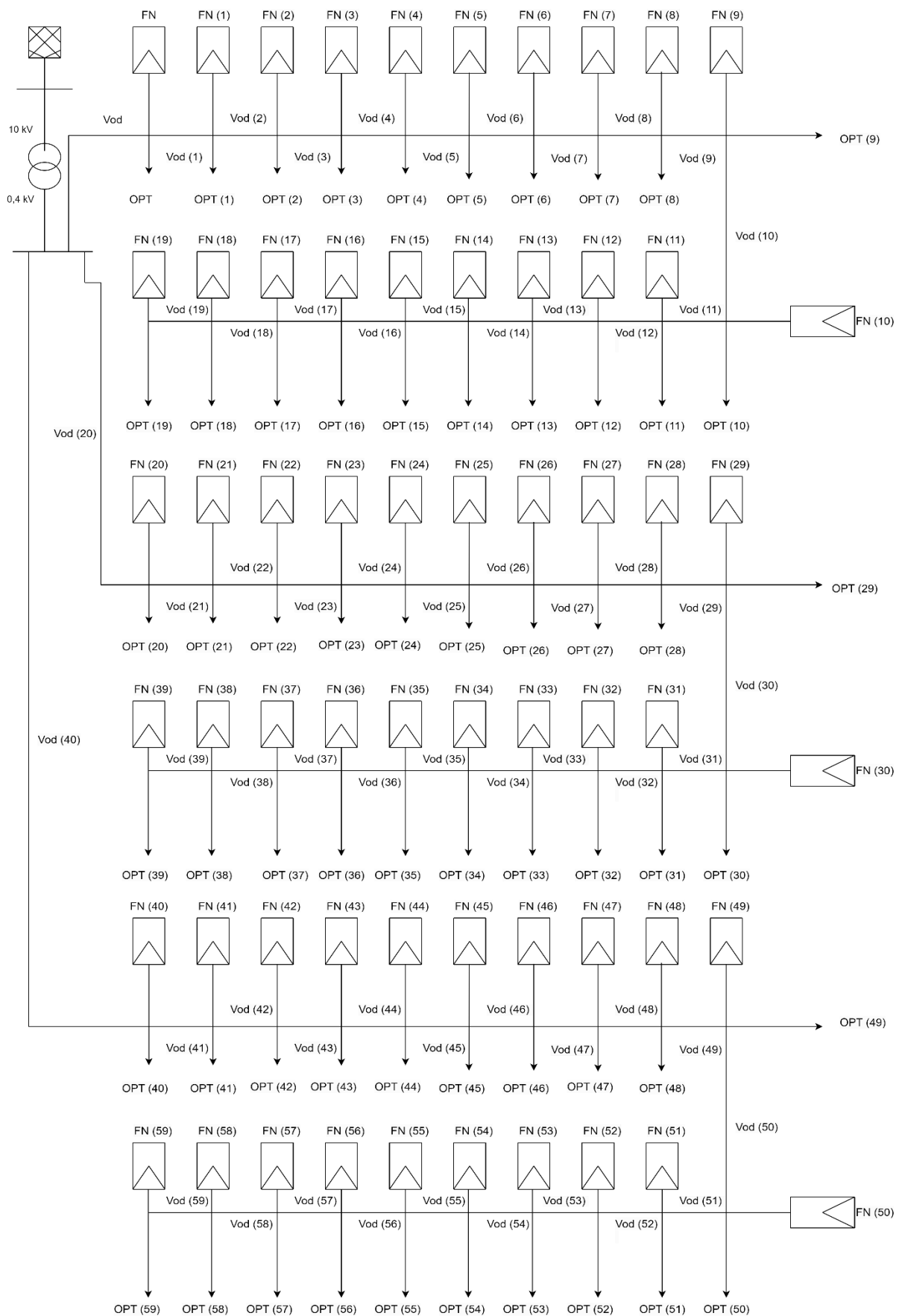


Slika 4.1. – *Postupak provedbe simulacije*

U svrhu objašnjavanja regulacije napona u niskonaponskoj mreži, s posebnim osvrtom na utjecaj fotonaponskih elektrana, korištena je niskonaponska mreža Špansko (slika 4.1.) u programu DIgSILENT PowerFactory [23]. Cilj je proračuna na primjeru niskonaponske mreže s priključenim fotonaponskim elektranama ispitati utjecaj promjene izlazne jalove i djelatne snage na naponski profil niskonaponske mreže koristeći proračun tokova snaga.

Navedena niskonaponska mreža sastoji se od transformatora (10/0,4 kV) preko kojega su tri simetrična izvoda spojena na mrežu. Svaki izvod sastoji se od dvadeset opterećenja. U proračunima je korišten idealan slučaj kada je na svakom potrošaču priključen FN.

Opterećenja mreže postavljena se na minimalnu potrošnju od 0,9 kW uz $\cos \varphi = 0,95$ induktivno. FN-i su pri maksimalnoj proizvodnji podešeni na 7,5 kW uz $\cos \varphi = 1$.



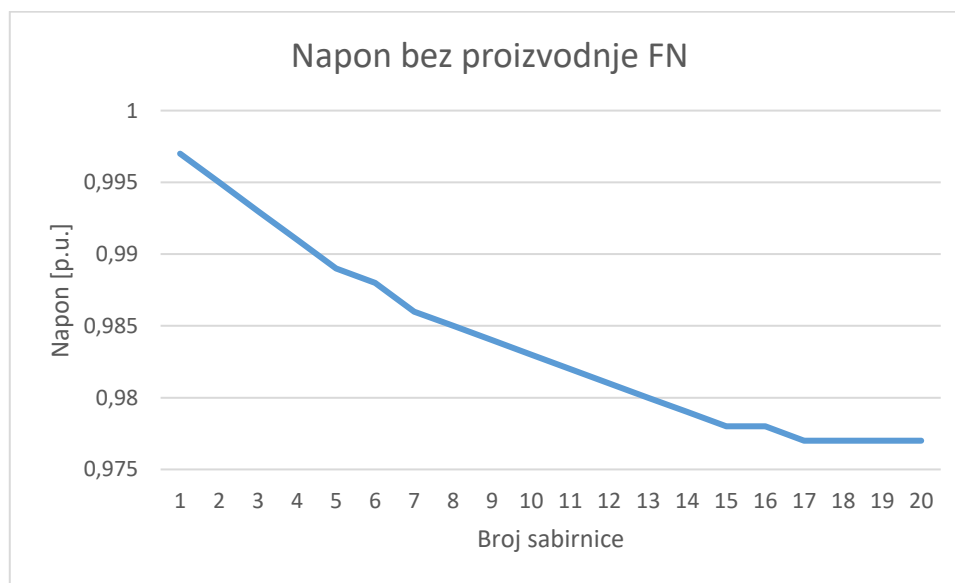
Slika 4.2. – Testna niskonaponska mreža Španjolsko

4.2. Rezultati osnovnih slučajeva

U ovom su radu, na početku izvođenja tokova snaga, provedena tri glavna scenarija. Prvi je scenarij bazni slučaj te predstavlja osnovni slučaj kada FN nije priključen na niskonaponsku mrežu. Drugi scenarij predstavlja slučaj 1, kada je FN pri 50 % proizvodnje priključen na mrežu te treći scenarij, slučaj 2, kada je FN pri maksimalnoj proizvodnji priključeni na mrežu.

Zbog simetričnosti mreže, rezultati su prikazani na sabirnicama jednoga izvoda.

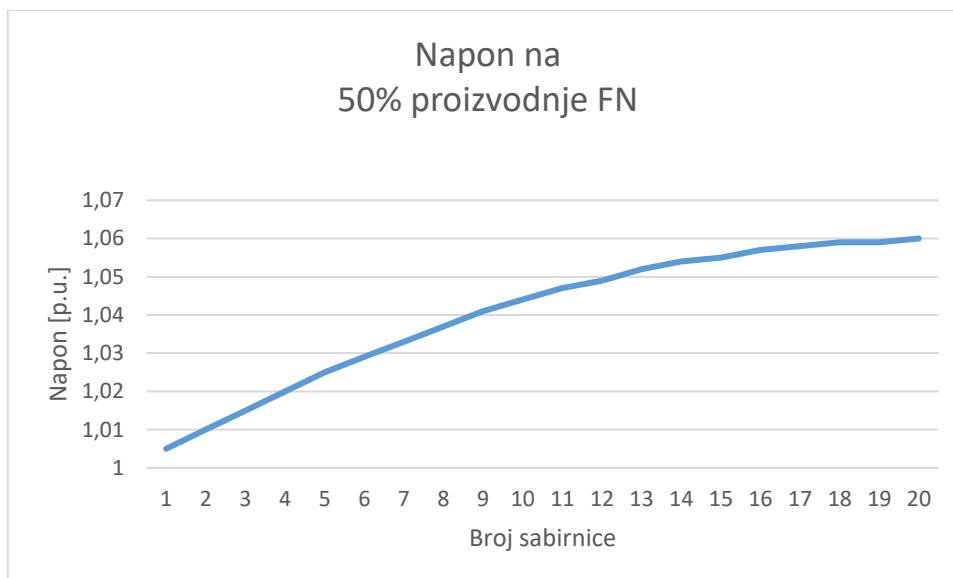
Slika 4.3. prikazuje napone bez proizvodnje FN-a. Na slici je vidljiv pad napona na udaljenijim sabirnicama mreže, a naponi su unutar granica mrežnih pravila ($\pm 10\%$ od nominalne vrijednosti napona 1 p.u.) u rasponu od 0,999 p.u. do 0,977 p.u. Do pada napona duž izvoda dolazi zbog toga što se u mreži nalaze samo potrošači. Potrošači uzimaju snagu iz vanjske mreže, a što je veća udaljenost potrošača od vanjske mreže to su gubici veći, što rezultira smanjenju napona.



Slika 4.3. Napon na sabirnicama bez proizvodnje FN-a

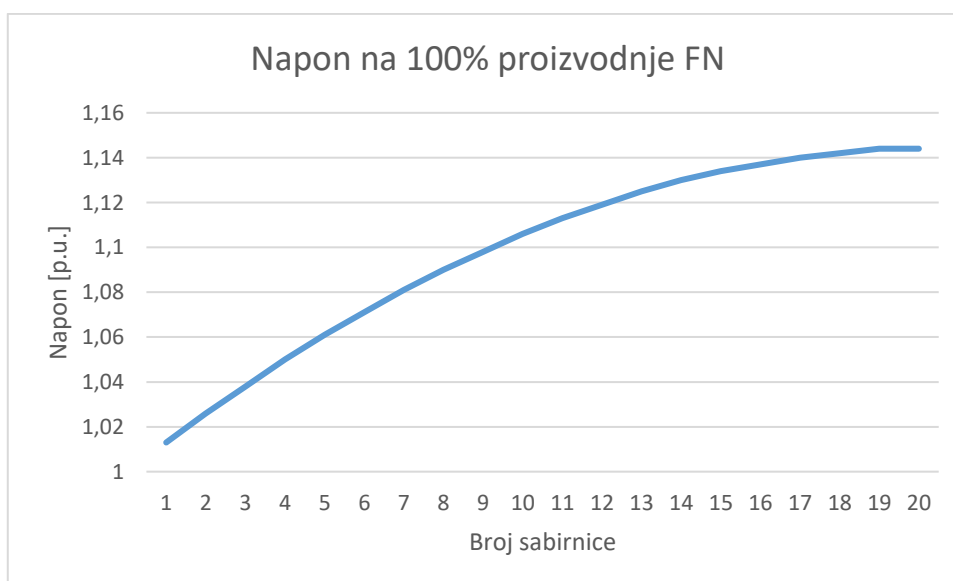
Slika 4.4. prikazuje napone na sabirnicama pri 50 % proizvodnje FN-a. Dvostrani tokovi snage posljedica su integracija FN sustava i zato je došlo do povećanja napona.

Dobiveni naponi u dozvoljenim su granicama u rasponu od 0,999 p.u. do 1,06 p.u.



Slika 4.4. Napon na sabirnicama pri 50 % proizvodnje FN-a

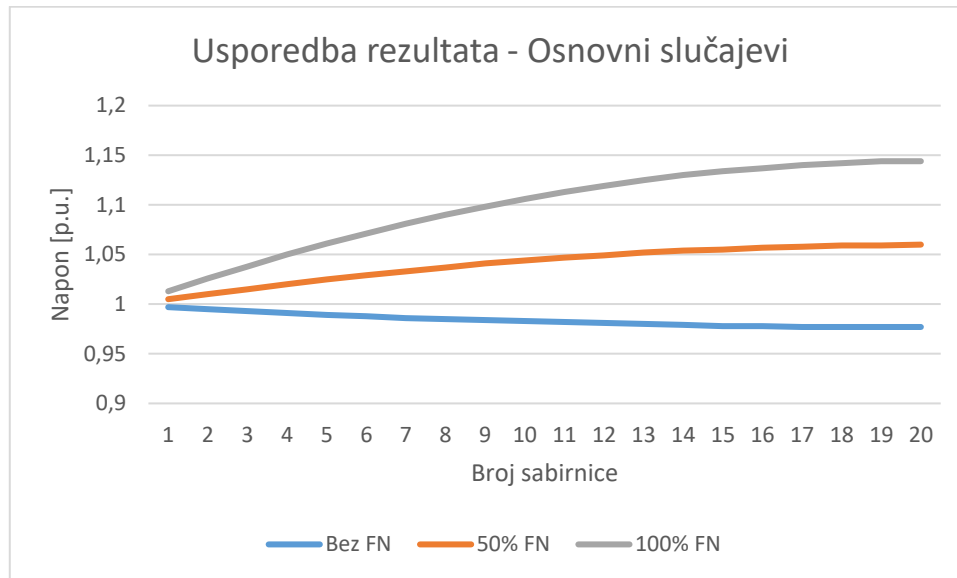
Slika 4.5. prikazuje napone na sabirnicama pri maksimalnoj proizvodnji FN-a. Dvostrani tokovi snage posljedica su integracija FN sustava i zato je došlo do povećanja napona. Dobiveni su naponi do osme sabirnice u dozvoljenim granicama u rasponu od 0,999 p.u. do 1,098 p.u., ali od osme sabirnice naponi prelaze granične vrijednost te dolaze do vrijednosti napona od 1,144 p.u.



Slika 4.5. Napon na sabirnicama pri maksimalnoj proizvodnji FN-a

Slika 4.6. prikazuje dobivene vrijednosti napona za: Bazni slučaj, Slučaj 1 i Slučaj 2. Iz dobivenih rezultata baznog slučaja vidljiv je pad napona od prvih prema zadnjim sabirnicama zbog nedostatka proizvodnje FN-a. U druga dva slučaja priključivanjem FN-a na mrežu te pojavom dvostranog toka snage vidljiv je porast napona od prvih prema zadnjim sabirnicama

Usporedbom dobivenih rezultata vidljiv je porast napona na sabirnicama priključivanjem FN-a. Veći porast napona ostvaren je prilikom maksimalne proizvodnje FN-a. Svi dobiveni rezultati dodavanjem FN-a unutar su granica mrežnih pravila $\pm 10\%$ od nominalnog napona od 1.1 p.u.

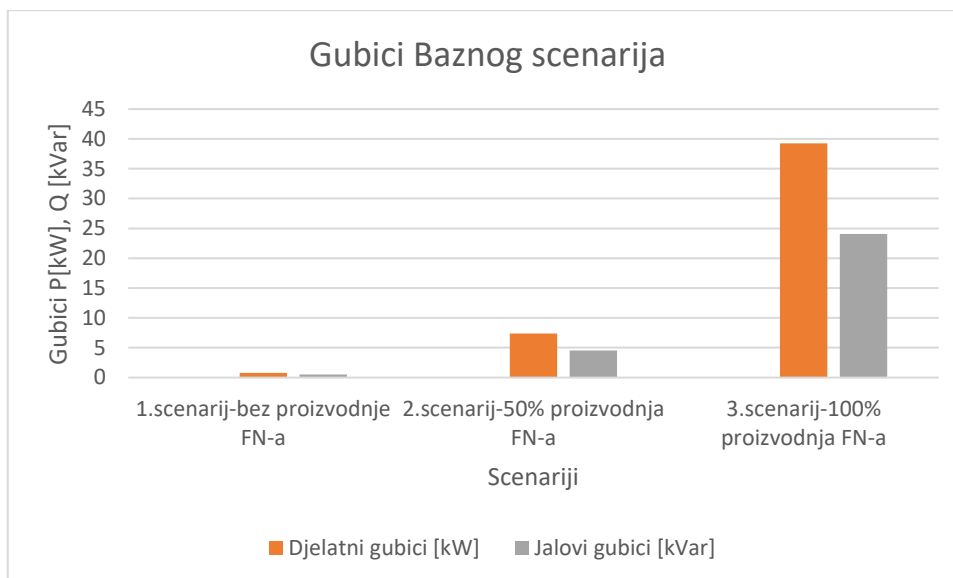


Slika 4.6. Usporedba rezultata osnovnih slučajeva

Tablica 4.1. i slika 4.7. prikazuju djelatne i jalove gubitke osnovnih scenarija. Iz tablice je vidljivo da su najmanji gubici u baznom slučaju bez FN-a. U scenarijima s dodanim FN-ovima, poraslo je i ukupno opterećenje mreže te su uz porast napona porasli su i gubici u mreži, najviše prilikom maksimalne proizvodnje FN-a.

Tablica 4.1. Gubici osnovnih slučajeva

| Scenarij | Napon bez proizvodnje FN | Napon na 50 % proizvodnje FN | Napon na 100 % proizvodnje FN |
|----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 0,80687 | 7,38067 | 39,23858 |
| Jalovi gubici [kVar] | 0,49494 | 4,52734 | 24,06916 |



Slika 4.7. Gubici osnovnih slučajeva

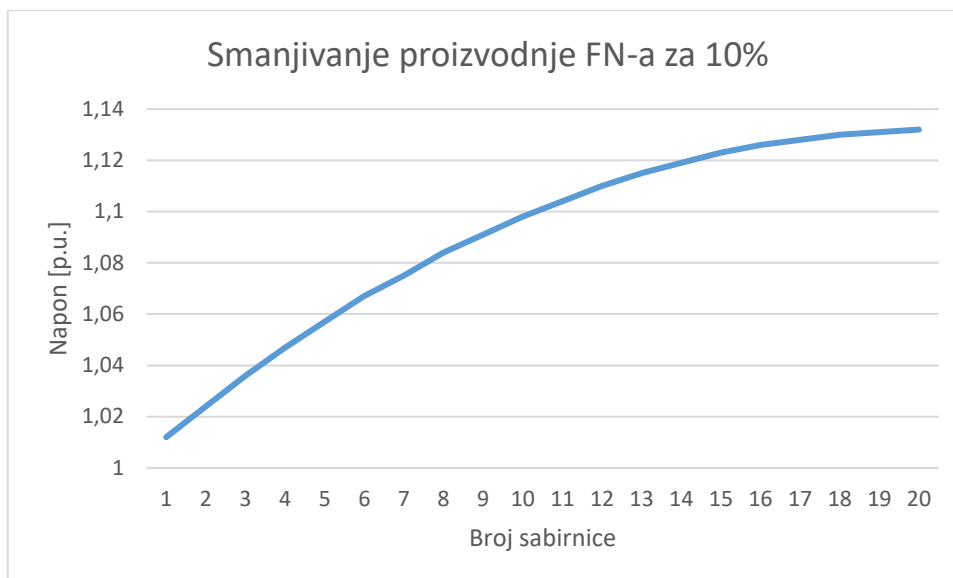
4.3. Upravljanja djelatnom snagom

U sljedećim scenarijama, u svrhu provođenja upravljanja djelatnom snagom FN-a, smanjivala se proizvodnja FN-a na pojedinim sabirnicama svakog izvoda, dok je na ostalim sabirnicama ostala konstantna.

4.3.1. Scenarij 1 slučaj 1

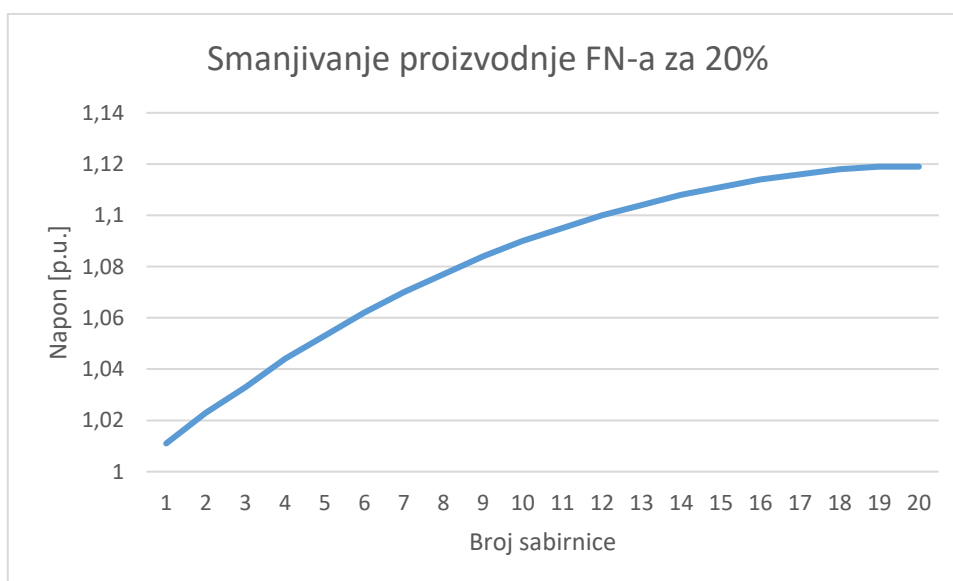
U prvom scenariju odabrano je zadnjih deset sabirnica zbog dobivenih vrijednosti napona u osnovnim slučajevima iznad graničnih vrijednosti te su rezultati prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže. Proizvodnja na ostalim sabirnicama ostala je maksimalna.

Slika 4.8. prikazuje napone na sabirnicama pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Naponi su do desete sabirnice u dozvoljenim granicama vrijednosti u rasponu od 1,024 p.u. do 1,098 p.u. dok je na ostalim sabirnicama napon i dalje rastao izvan graničnih vrijednosti, do vrijednosti od 1.132 p.u.



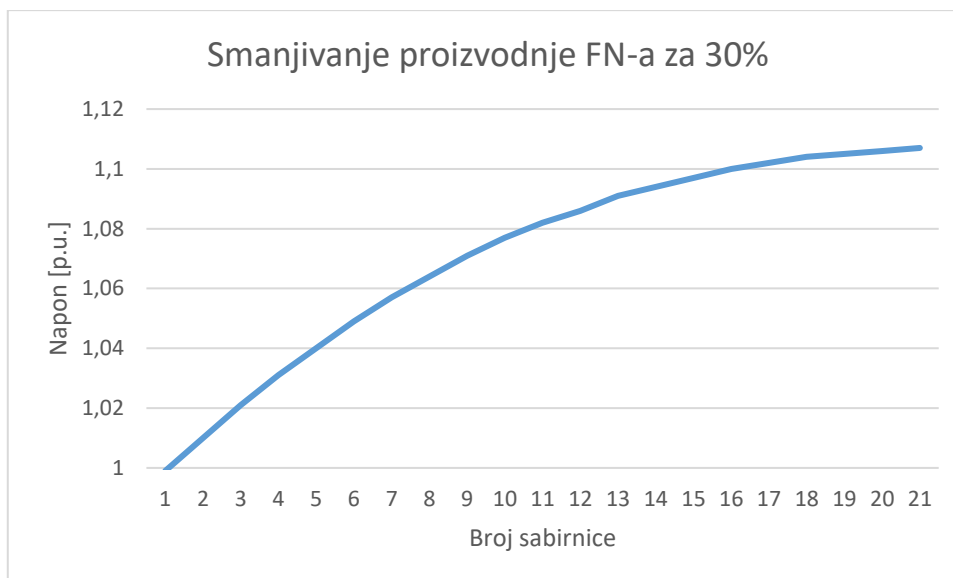
Slika 4.8. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.9. prikazani su naponi pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Do dvanaeste sabirnice naponi su u dozvoljenim granicama (1,011 p.u. – 1,1 p.u.) dok je na ostalim sabirnicama napona i dalje napon rastao do vrijednosti 1,119 p.u.



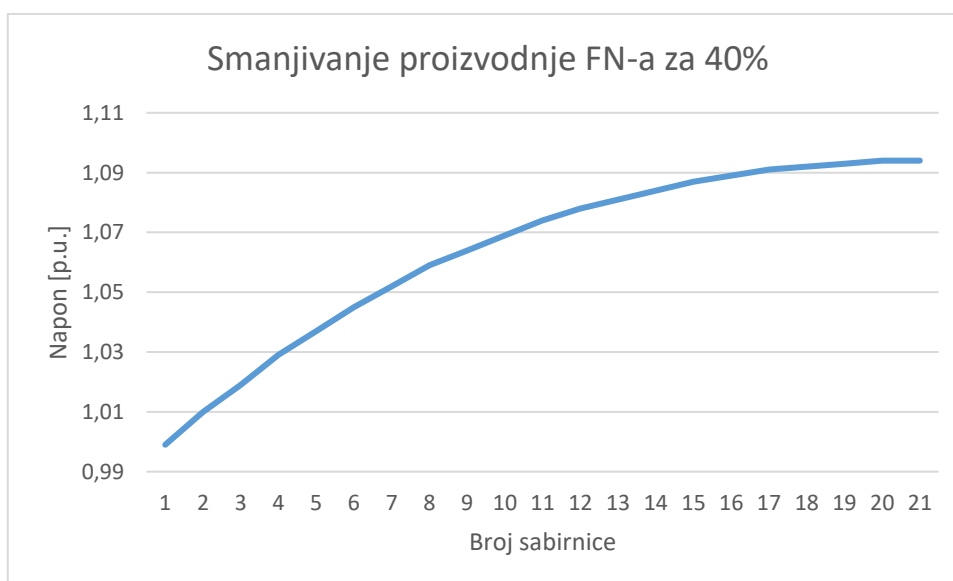
Slika 4.9. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.10. prikazuje napone na sabirnicama pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Do šestnaeste sabirnice naponi su rasli unutar dozvoljenih granica (0,999 p.u. – 1,1 p.u.) dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do vrijednosti od 1,107 p.u.



Slika 4.10. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

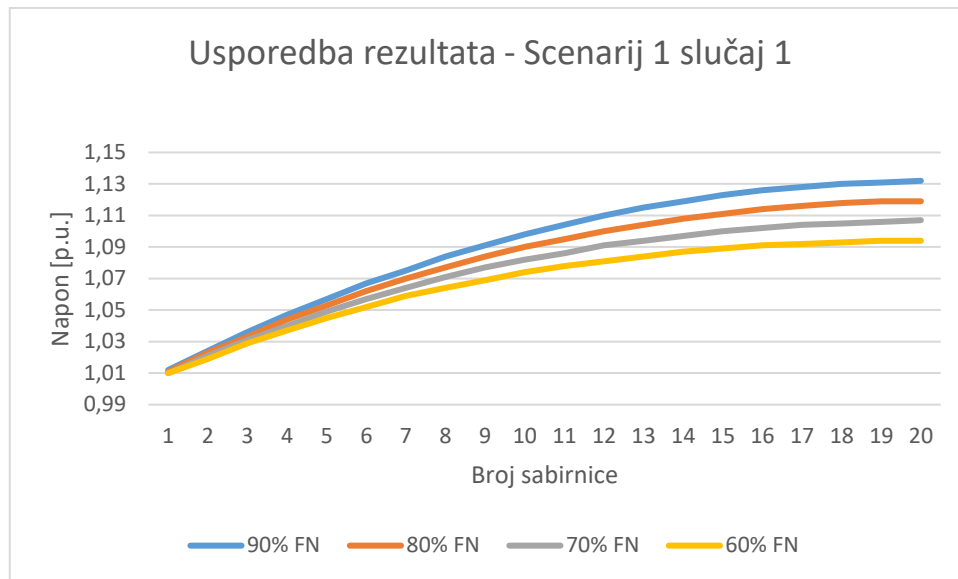
Na slici 4.11. su prikazani naponi na sabirnicama pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Naponi su na svim sabirnicama rasli unutar dopuštenih granica napona u rasponu od 0,999 do 1,094 p.u.



Slika 4.11. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.12. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 1 slučaja 1. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na zadnjih deset sabirnica. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. U četvrtom koraku naponi su na svim sabirnicama svakog izvoda rasli

unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,99 p.u. do 1,094 p.u te je regulacija napona uspješno provedena.

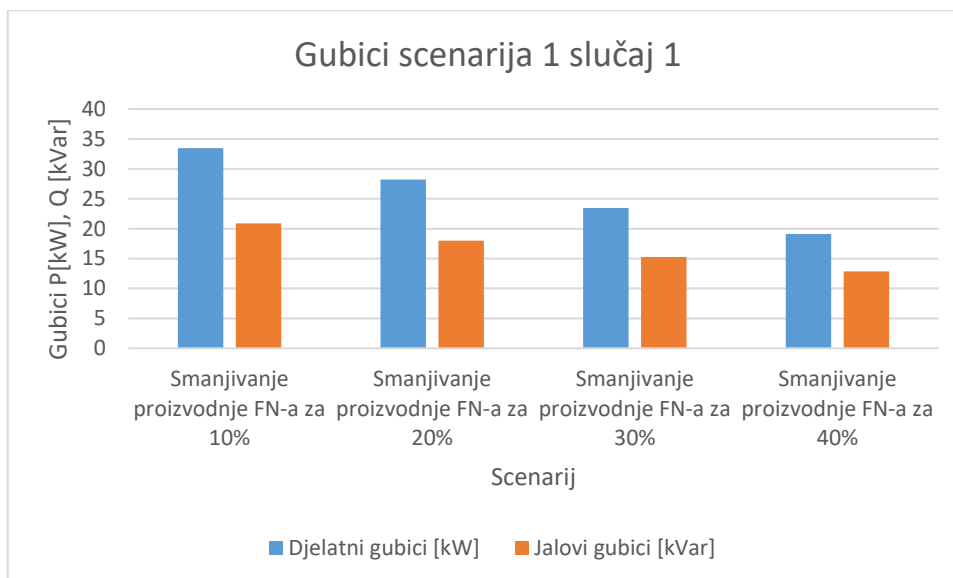


Slika 4.12. Usporedba rezultata – Scenarij 1 slučaj 1

Tablica 4.2. i slika 4.13. prikazuje djelatne i jalove gubitke scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na zadnjih 10 sabirnica izvoda pri maksimalnoj proizvodnji na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 1, gubici su se smanjili za 20,098 kW i 11,229 kVar.

Tablica 4.2. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na zadnjih 10 sabirnica svakog izvoda (maksimalan proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 33,4821 | 28,21367 | 23,43331 | 19,14101 |
| Jalovi gubici [kVar] | 20,90242 | 17,97526 | 15,28767 | 12,83965 |

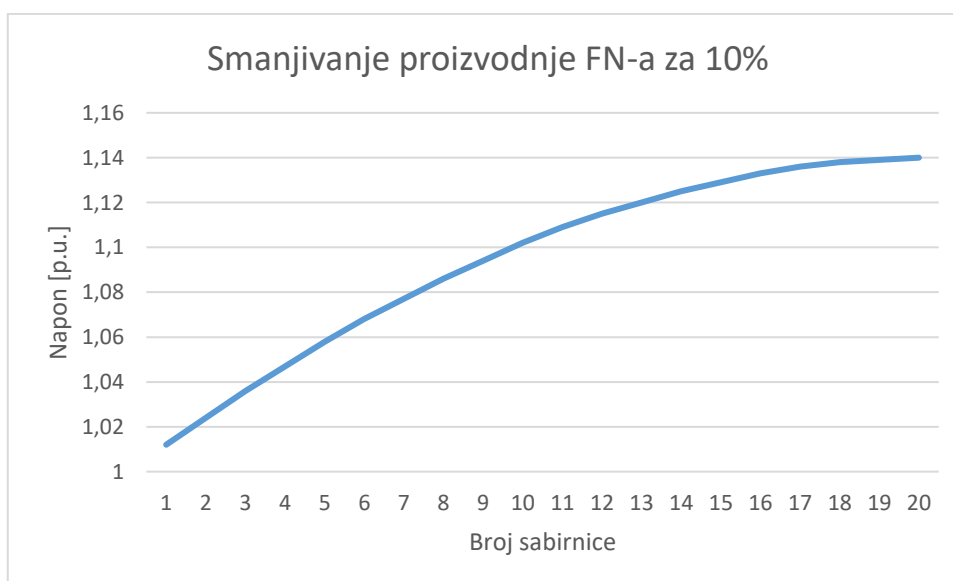


Slika 4.13. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.3.2. Scenarij 2 slučaj 1

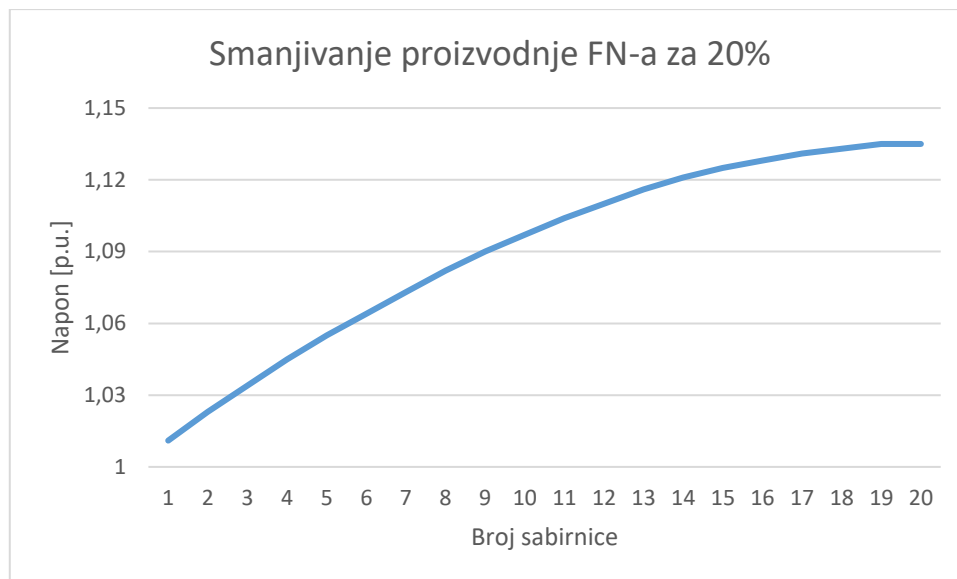
U scenariju se smanjivala proizvodnja FN-a na prvih deset sabirnica dok je na ostalim sabirnicama proizvodnja FN-a ostala maksimalna. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.14. prikazuje dobivene vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Napon je do devete sabirnice rastao unutar dozvoljenih granica, dok je na sljedećim sabirnicama rastao izvan granica sve do vrijednosti 1,14 p.u.



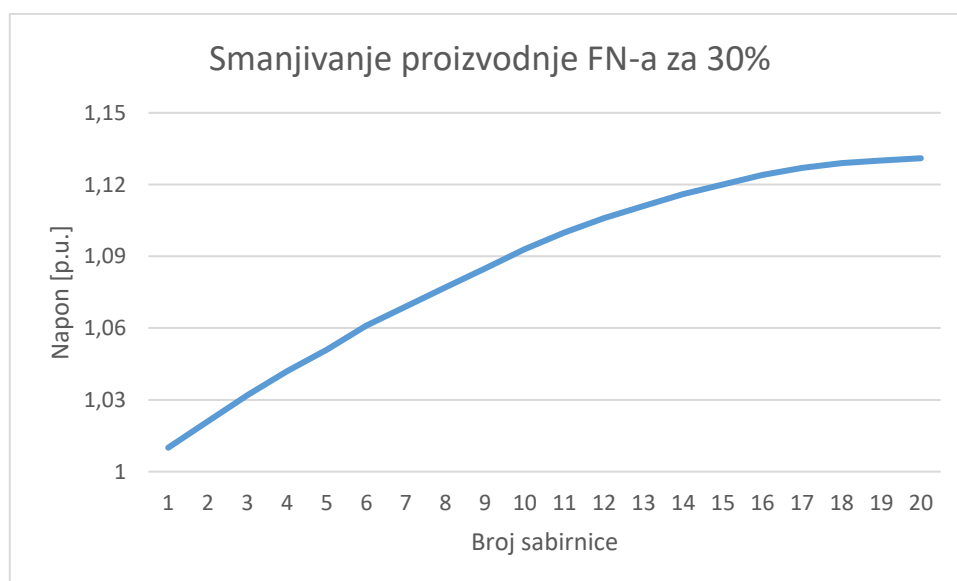
Slika 4.14. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.15. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Naponi su do desete sabirnice rasli u dozvoljenim granicama dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do vrijednosti 1,135 p.u.



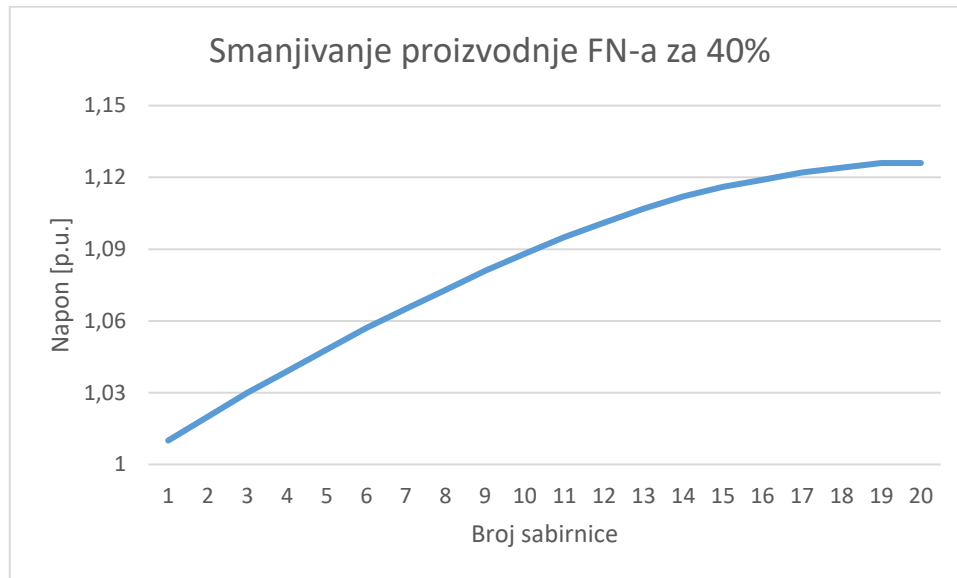
Slika 4.15. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.16. prikazuje dobivene vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Naponi su do jedanaeste sabirnice rasli do granične vrijednosti napona 1.1. p.u. dok je na sljedećim sabirnicama napon rastao sve do 1,131 p.u.



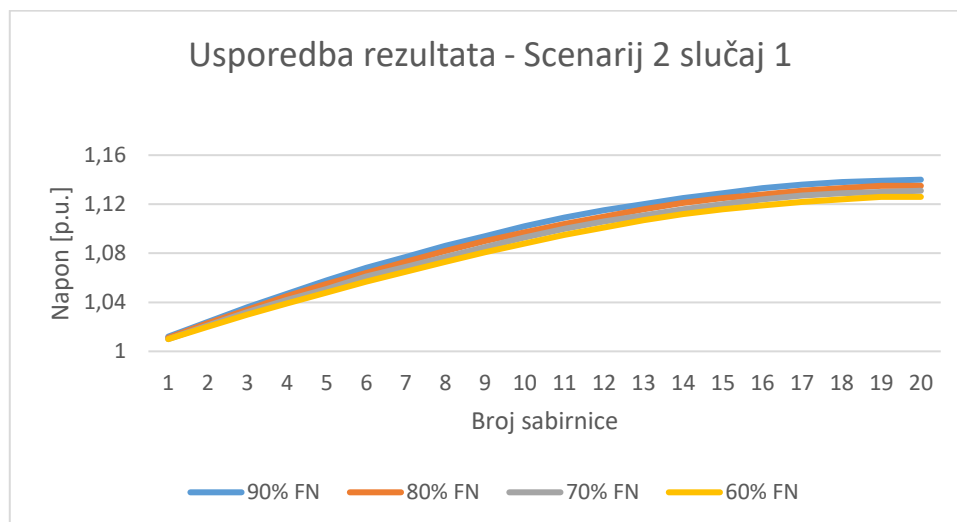
Slika 4.16. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.17. prikazani su dobivene vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Naponi su do jedanaeste sabirnice unutar granične vrijednosti napona dok su sabirnice udaljenije od mreže ostale u rasponu napona izvan dozvoljene granice (1,01 p.u. – 1,126 p.u)



Slika 4.17. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.18. prikazana je usporedba rezultata scenarija 2 slučaja 1. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na prvih deset sabirnica. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, u četvrtom koraku vrijednosti su najniže, ali napon je rastao izvan dopuštenih granica do vrijednosti 1,126 p.u.

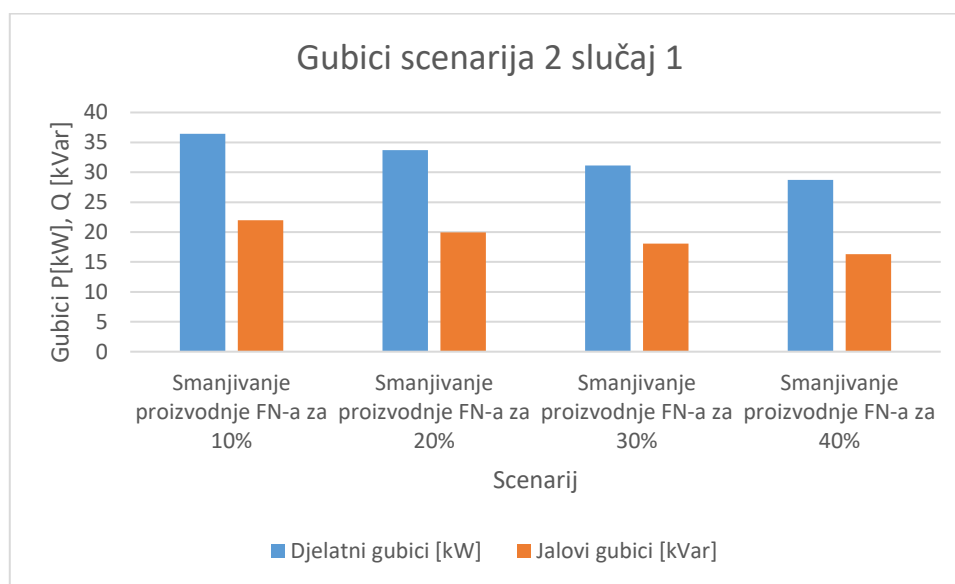


Slika 4.18. Usporedba rezultata - Scenarij 2 slučaj 1.

Tablica 4.3. i slika 4.19. prikazuju djelatne i jalove gubitke dobivene smanjivanjem proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica uz maksimalnu proizvodnju na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 2, gubici su se smanjili za 10,513 kW i 7,787 kVar.

Tablica 4.3. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 36,40694 | 33,71097 | 31,15067 | 28,72604 |
| Jalovi gubici [kVar] | 21,95289 | 19,94963 | 18,05938 | 16,28214 |

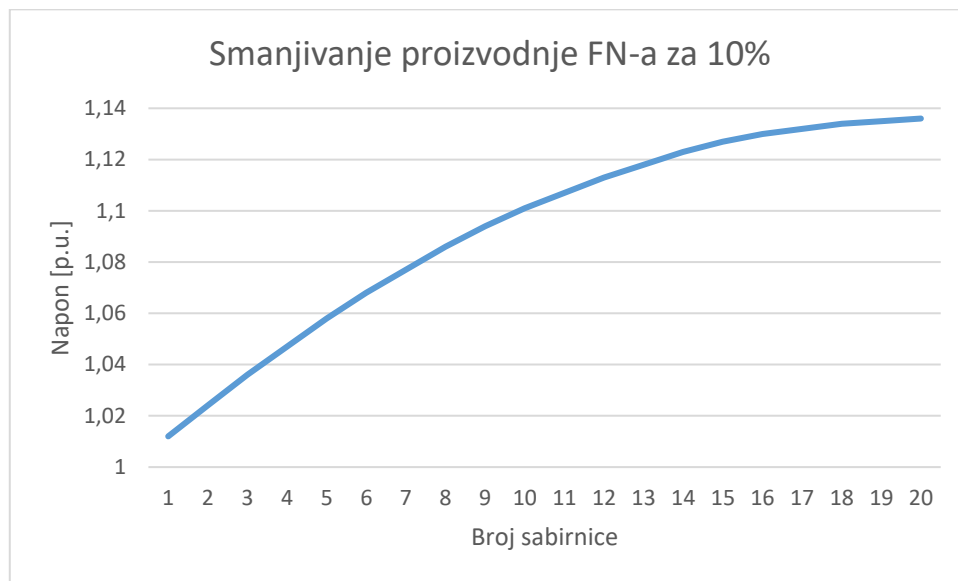


Slika 4.19. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.3.3. Scenarij 3 slučaj 1

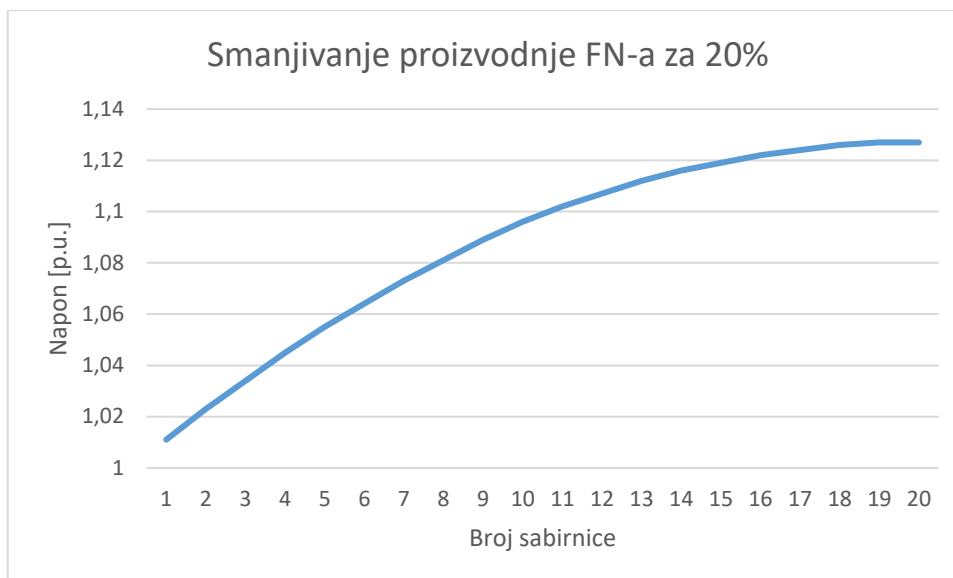
U scenariju smanjivala se proizvodnja FN-a na prvih pet sabirnica i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda dok je proizvodnja FN-a na ostalim sabirnicama ostala maksimalna. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.20. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Naponi su do devete sabirnice unutar dozvoljenih granica vrijednosti dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do vrijednosti 1,136 p.u.



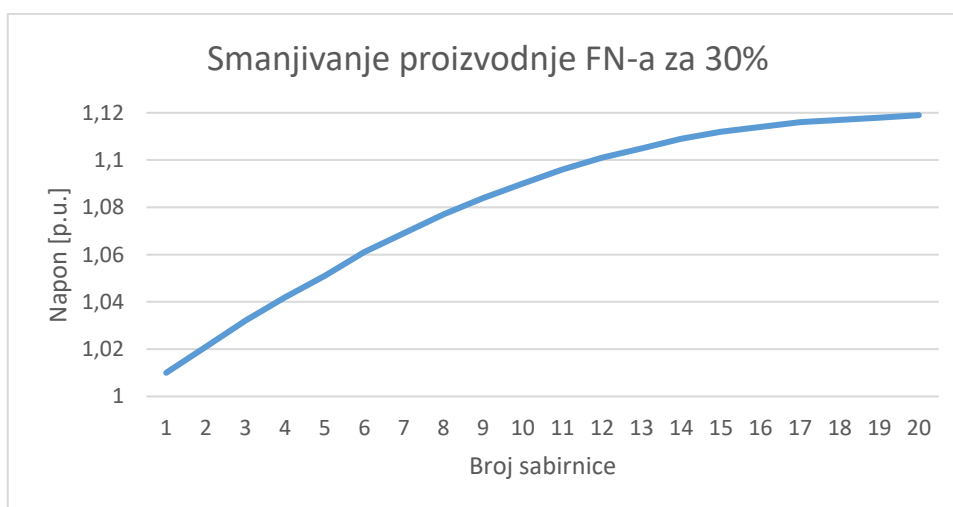
Slika 4.20. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.21. prikazane se vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Do desete sabirnice naponi su rasli unutar dozvoljenih granica dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do 1,127 p.u.



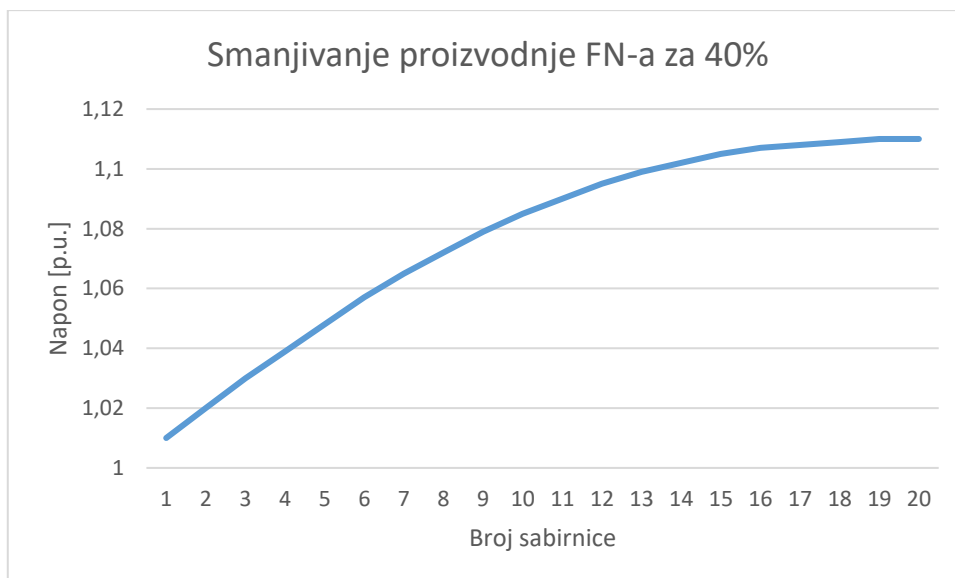
Slika 4.21. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.22. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Naponi su do jedanaeste sabirnice ostali unutar dozvoljenih granica dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do 1,119 p.u.



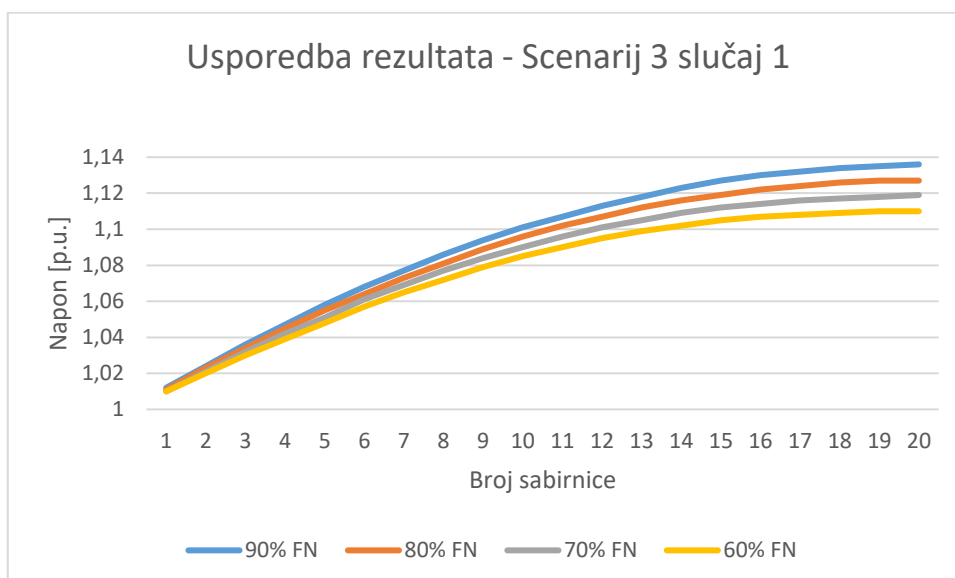
Slika 4.22. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.23. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Naponi su do trinaeste sabirnice rasli unutar dozvoljenih granica dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do 1,11 p.u. Iz dobivenih rezultata vidljivo je na zadnjim sabirnicama svakog izvoda kontinuirano odstupanje napona od graničnih vrijednosti



Slika 4.23. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.24. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 3 slučaja 1. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na prvih pet i zadnjih pet sabirnica. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona su se smanjivale. Prema dobivenim rezultatima, u četvrtom koraku vrijednosti su najniže, ali je napon rastao izvan dopuštenih granica do vrijednosti 1,11 p.u.

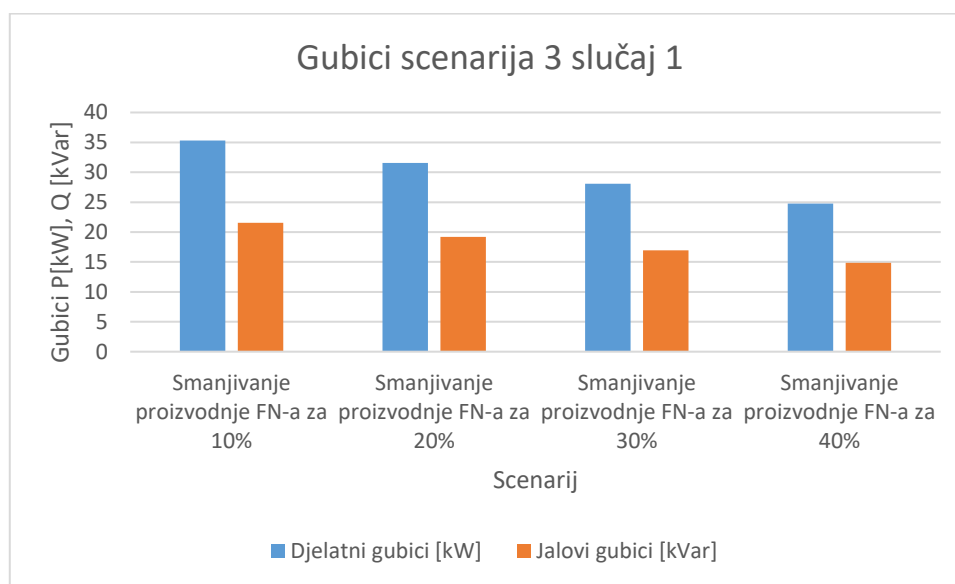


Slika 4.24. Usporedba rezultata – Scenarij 3 slučaj 1.

Tablica 4.4. i slika 4.25. prikazuju gubitke pri smanjivanju proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda uz maksimalnu proizvodnju FN-a na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 2, gubici su se smanjili za 14,459 kW i 9,205 kVar

Tablica 4.4. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 35,2881 | 31,56139 | 28,05844 | 24,77926 |
| Jalovi gubici [kVar] | 21,55106 | 19,1776 | 16,9488 | 14,86465 |

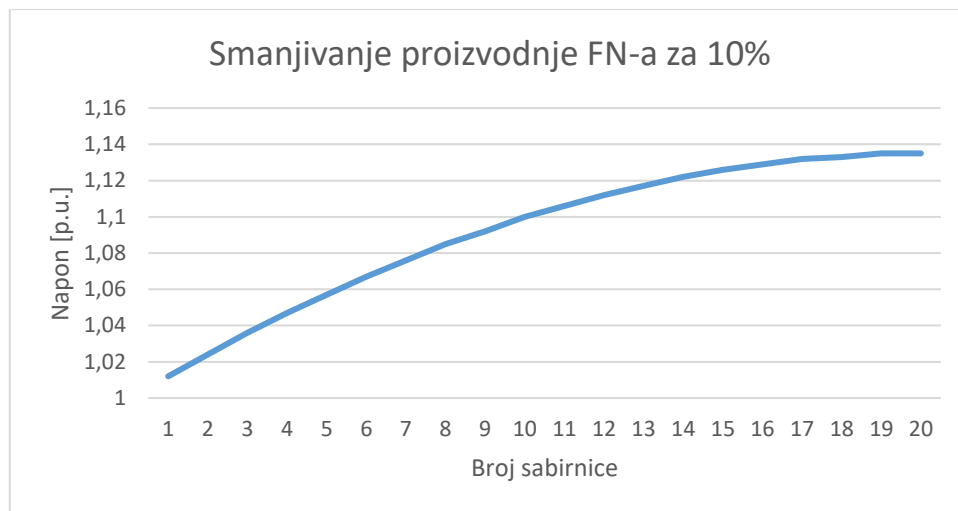


Slika 4.25. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.3.4. Scenarij 4 slučaj 1

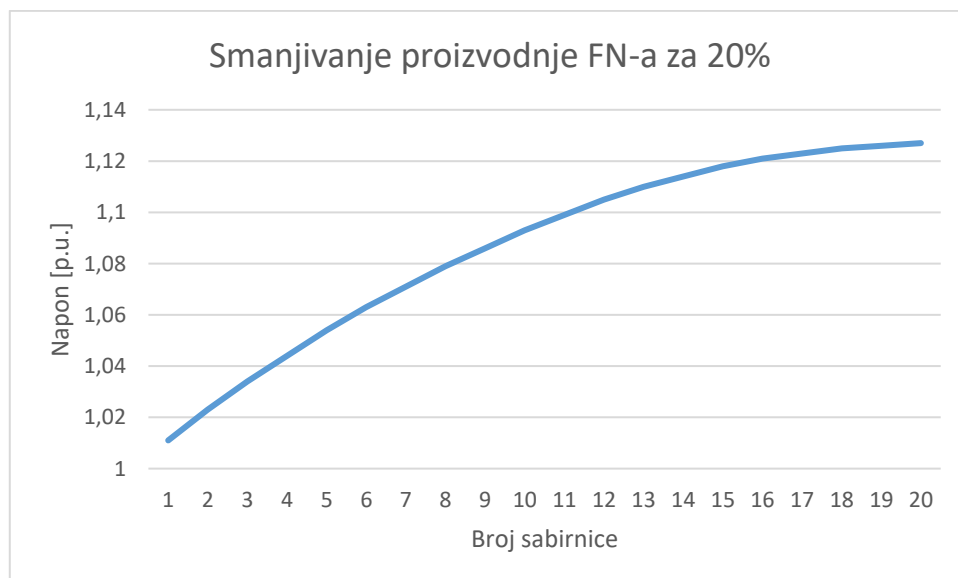
U scenariju se smanjivala proizvodnja FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda dok je proizvodnja na ostalim FN-ima ostala maksimalna. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.26. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Do devete sabirnice naponi su rasli unutar dopuštenih granica, dok je na daljnjim sabirnicama napon rastao sve do vrijednosti 1,135 p.u.



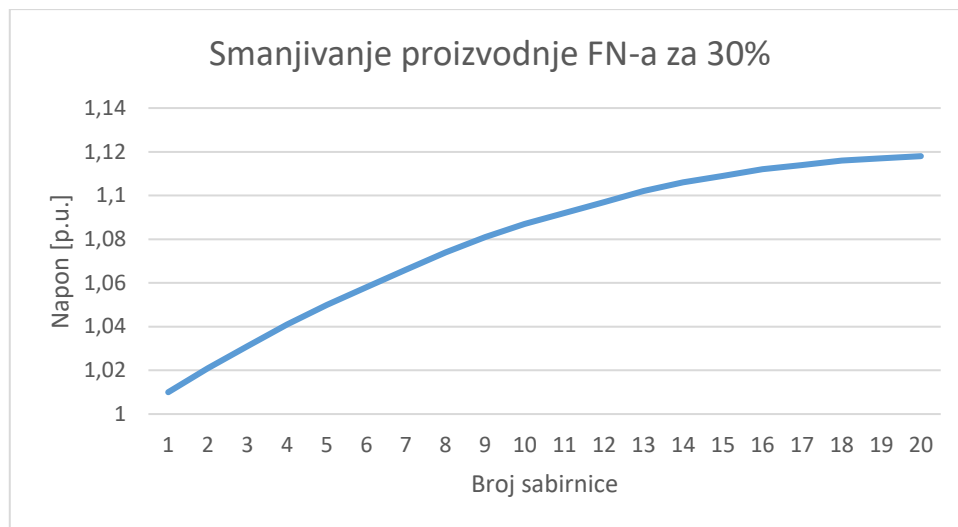
Slika 4.26. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.27. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Naponi su do jedanaeste sabirnice ostali unutar dozvoljenih granica. Na ostalim sabirnicama napon je rastao do vrijednosti 1,127 p.u.



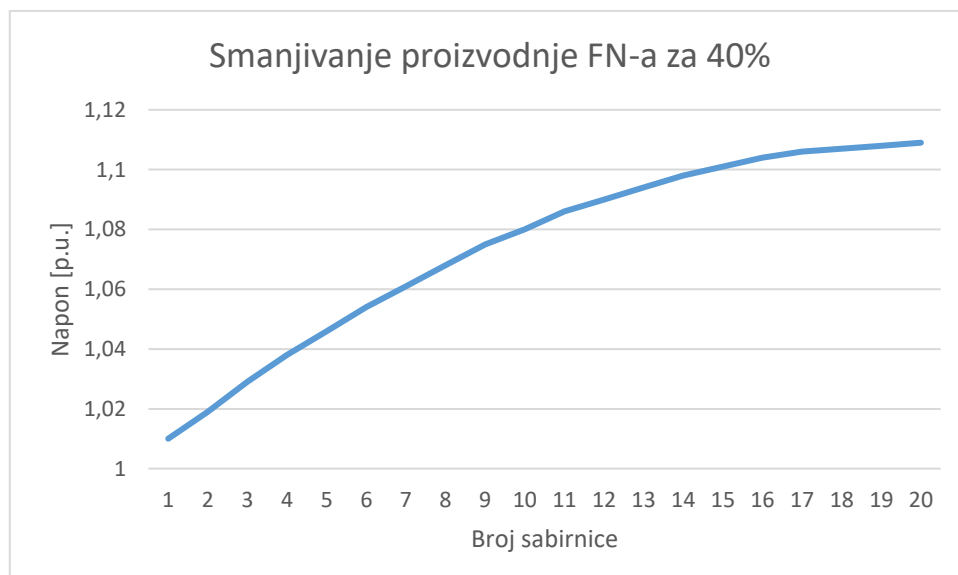
Slika 4.27. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.28. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Do dvanaeste sabirnice naponi su rasli unutar dozvoljenih granica dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do vrijednosti 1,118 p.u.



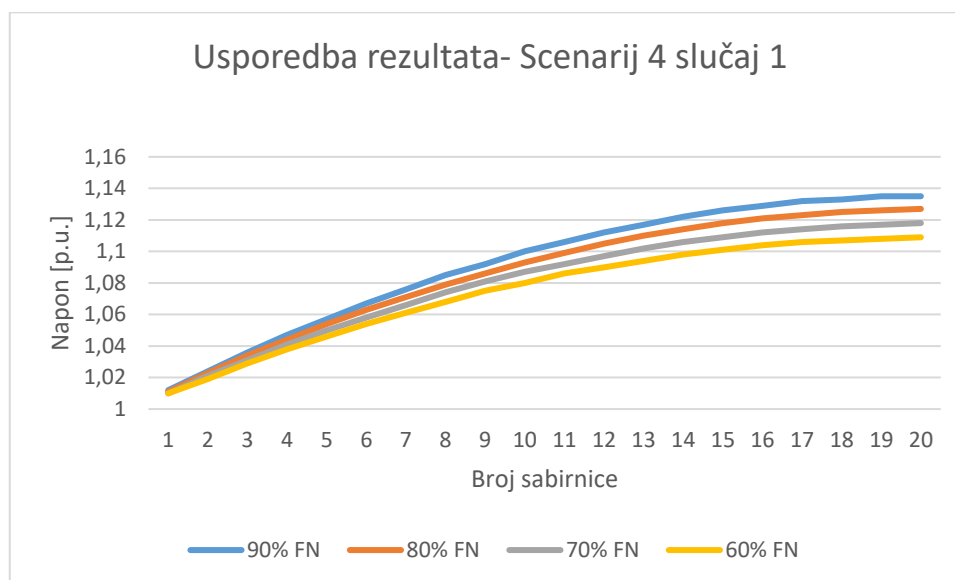
Slika 4.28. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.29. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Do četrnaeste sabirnice naponi su ostali unutar dozvoljenih granica. Na ostalim sabirnicama napon je rastao do vrijednosti 1,109 p.u.



Slika 4.29. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.30. prikazana je usporedba rezultata scenarija 4 slučaja 1. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na svakoj drugoj sabirnici. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, u četvrtom koraku vrijednosti su najniže, ali je napon rastao izvan dopuštenih granica do vrijednosti 1,109 p.u.

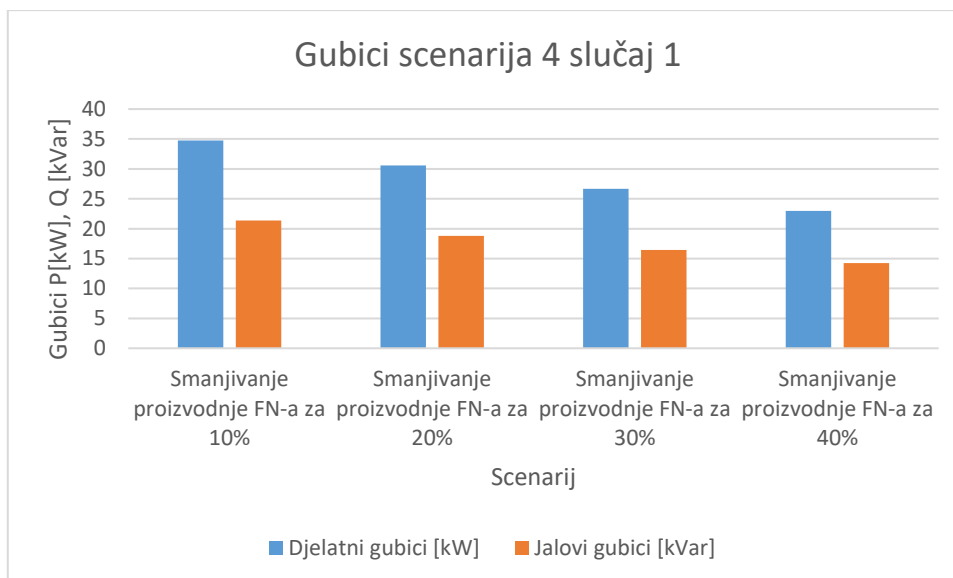


Slika 4.30. Usporedba rezultata scenarija 4 slučaja 1.

Tablica 4.5. i slika 4.31. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda uz maksimalnu proizvodnju FN-a na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 2, gubici su se smanjili za 16,249 kW i 9,847 kVar.

Tablica 4.5. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 34,7692 | 30,57117 | 26,64447 | 22,98912 |
| Jalovi gubici [kVar] | 21,36469 | 18,82196 | 16,44097 | 14,22171 |

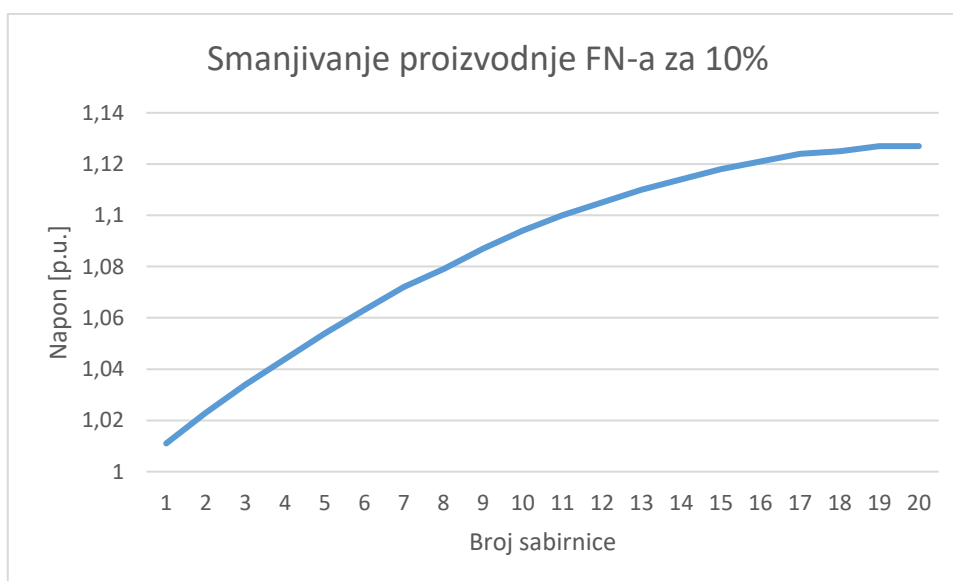


Slika 4.31. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.3.5. Scenarij 5 slučaj 1

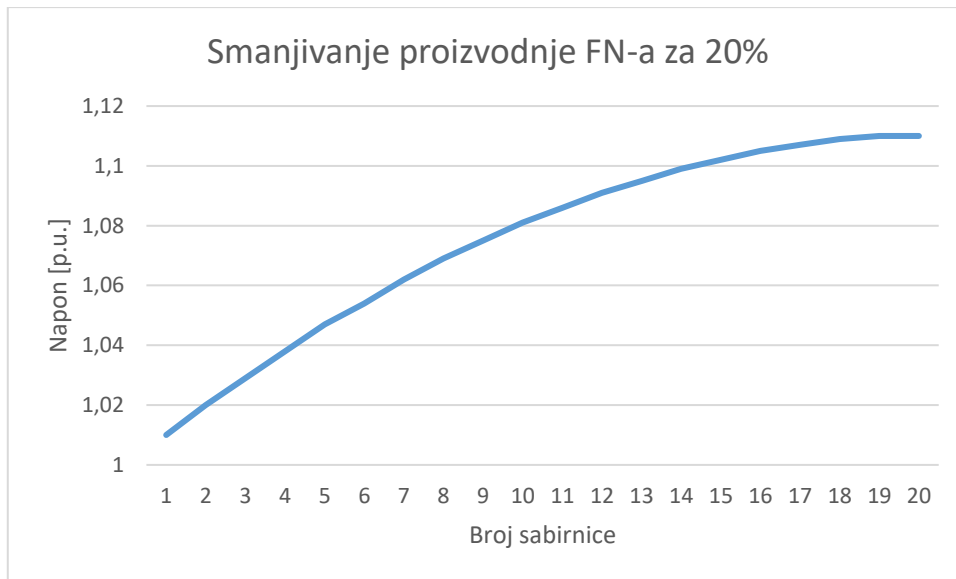
U scenariju se smanjivala maksimalna proizvodnja FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.32. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Do jedanaeste sabirnice naponi su rasli unutar dozvoljenih granica, dok je na ostalim sabirnicama napon rastao do vrijednosti 1,127 p.u.



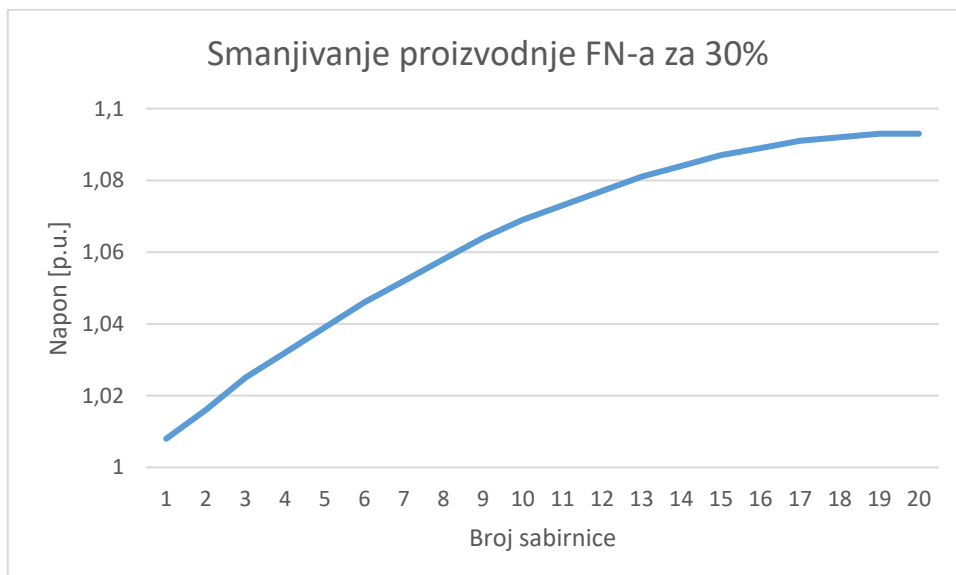
Slika 4.32. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.33. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Do četrnaeste sabirnice naponi su rasli unutar dozvoljenih granica dok je na ostalim sabirnicama napon rastao sve do vrijednosti 1,11 p.u.



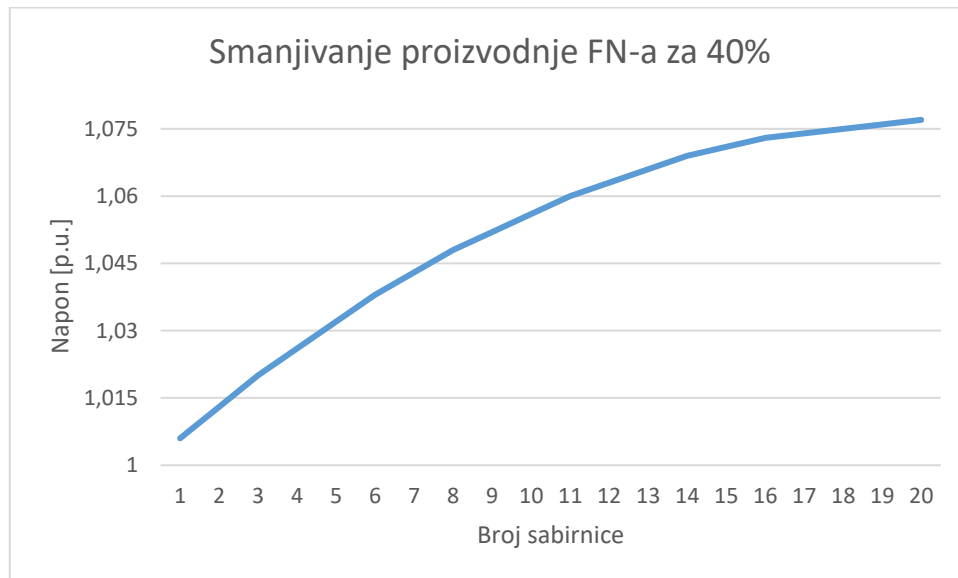
Slika 4.33. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.34. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Naponi su na svim sabirnicama rasli unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,008 p.u. do 1,093 p.u.



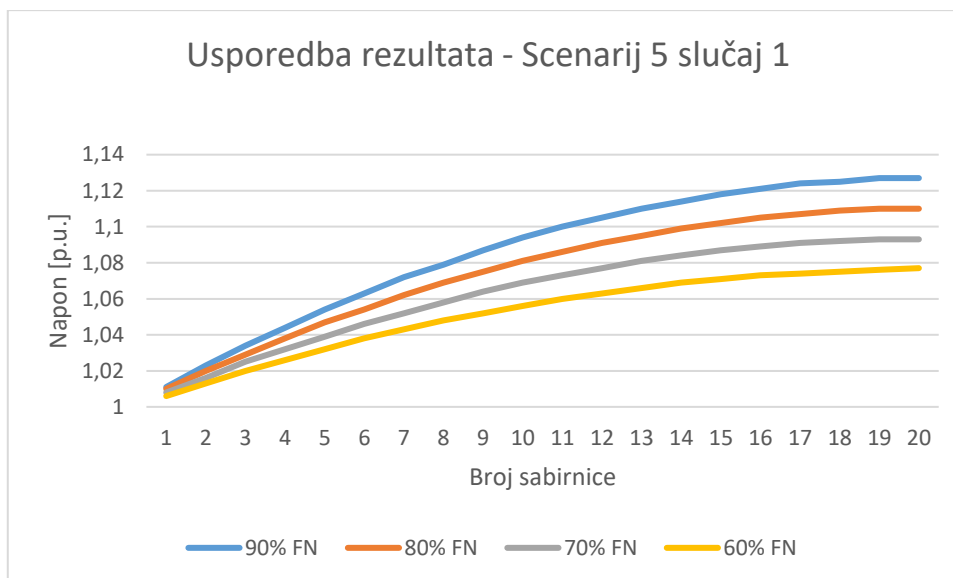
Slika 4.34. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.35. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Na svim sabirnicama naponi su ostali unutar dozvoljeni granica u rasponu od 1,006 p.u. do 1,077 p.u.



Slika 4.35. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.36. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 5 slučaja 1. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na svim sabirnicama. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona su se smanjivale. Prema dobivenim rezultatima, u trećem i četvrtom koraku vrijednosti napona rastle su unutar dozvoljenih granica te je regulacija već pri 30 % smanjivanja proizvodnje FN-a uspješno provedena.

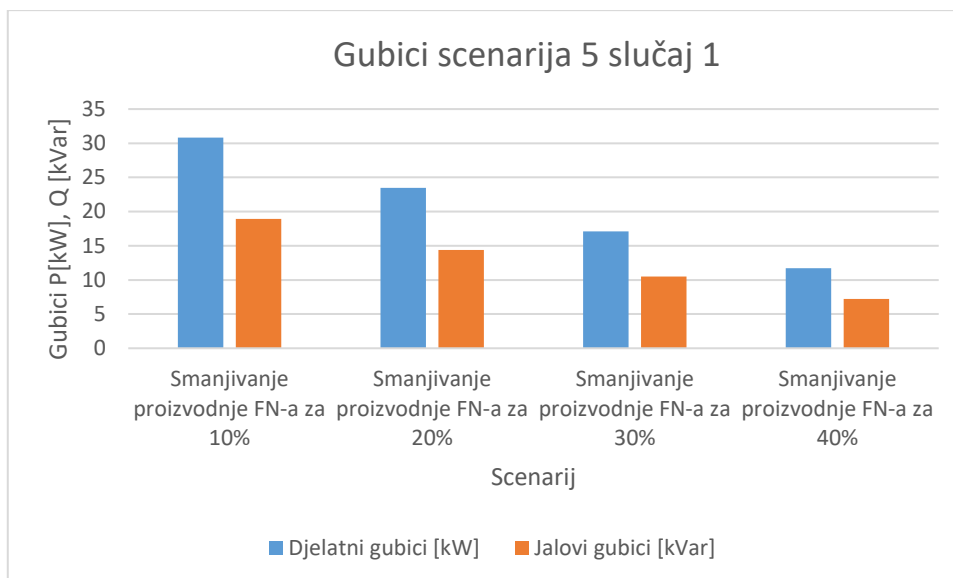


Slika 4.36. Usporedba rezultata scenarija 5 slučaj 1.

Tablica 4.6. i slika 4.37. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda uz maksimalnu proizvodnju na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 2, gubici su se smanjili za 27,509 kW i 16,874 kVar.

Tablica 4.6. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 30,84427 | 23,46132 | 17,08974 | 11,72952 |
| Jalovi gubici [kVar] | 18,92005 | 14,3913 | 10,48294 | 7,19495 |

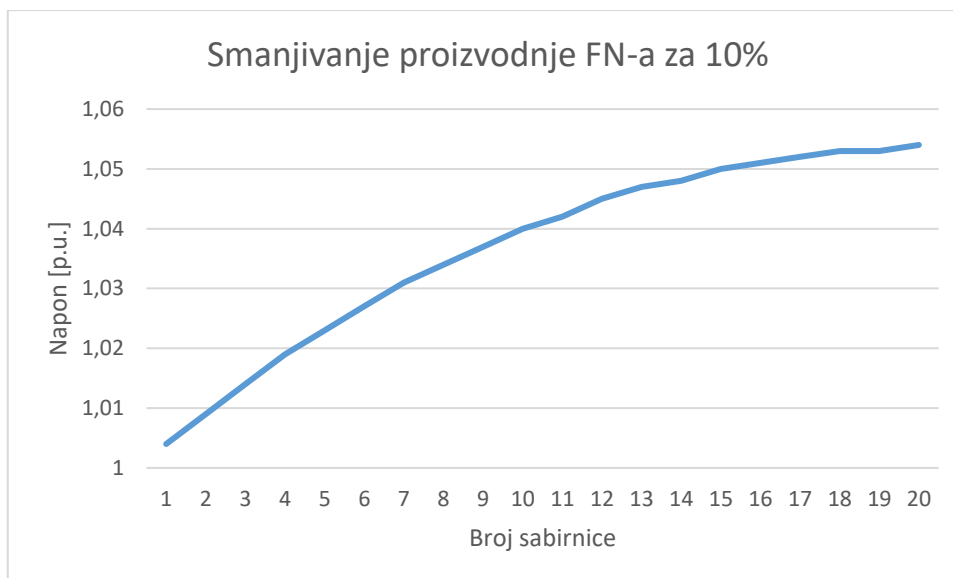


Slika 4.37. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.3.6. Scenarij 1 slučaj 2

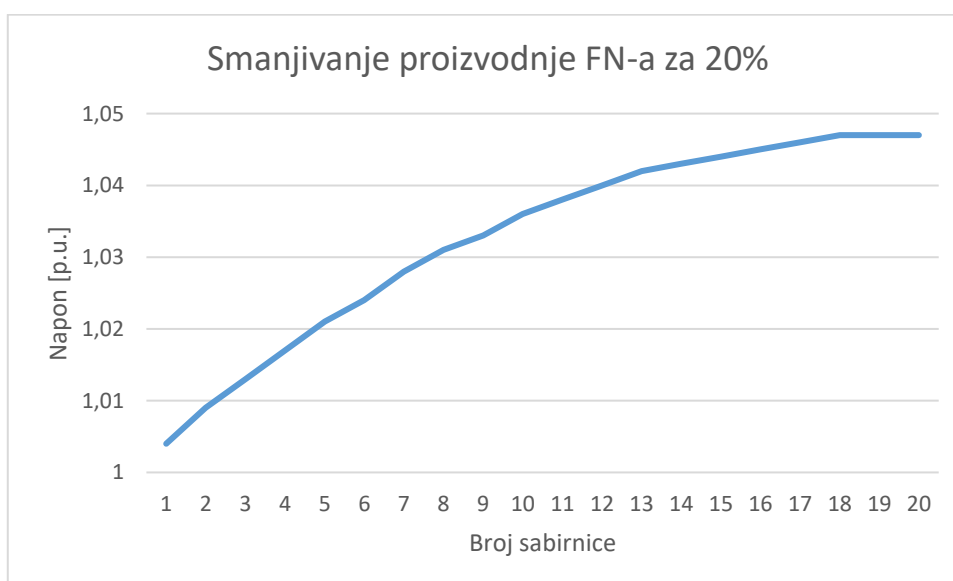
U scenariju smanjivala se proizvodnja FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda dok je proizvodnja FN-a na ostalim sabirnicama ostala na 50 %. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.38. prikazuje dobivene vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Zbog smanjivanja proizvodnje FN-a na 50 % te dodatnim smanjivanja proizvodnje na zadnjim sabirnicama, vrijednosti napona na svim sabirnicama su unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,004 p.u. do 1,054 p.u.



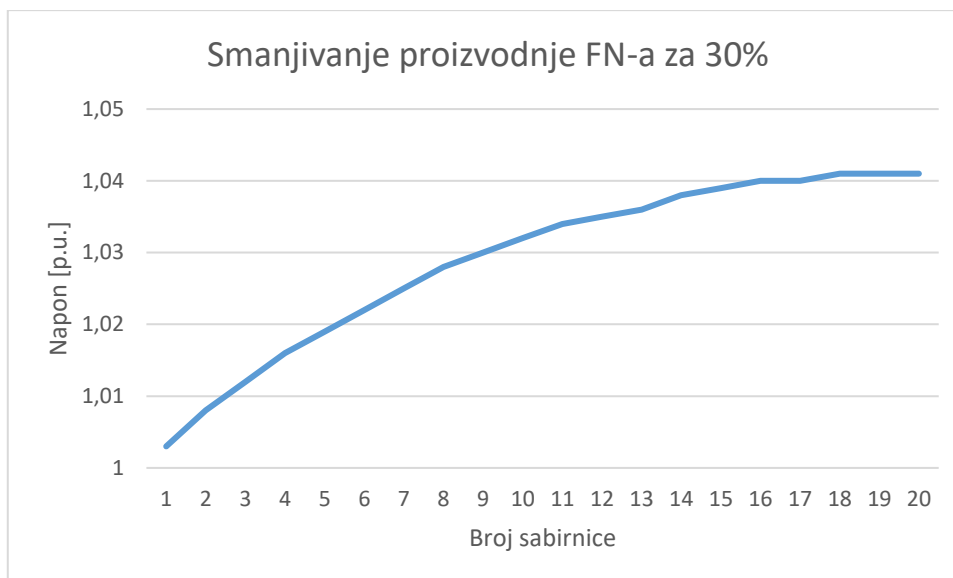
Slika 4.38. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.39. su prikazani naponi pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Naponi su u dozvoljenim granicama u rasponu od 1,004 p.u. do 1,047 p.u.



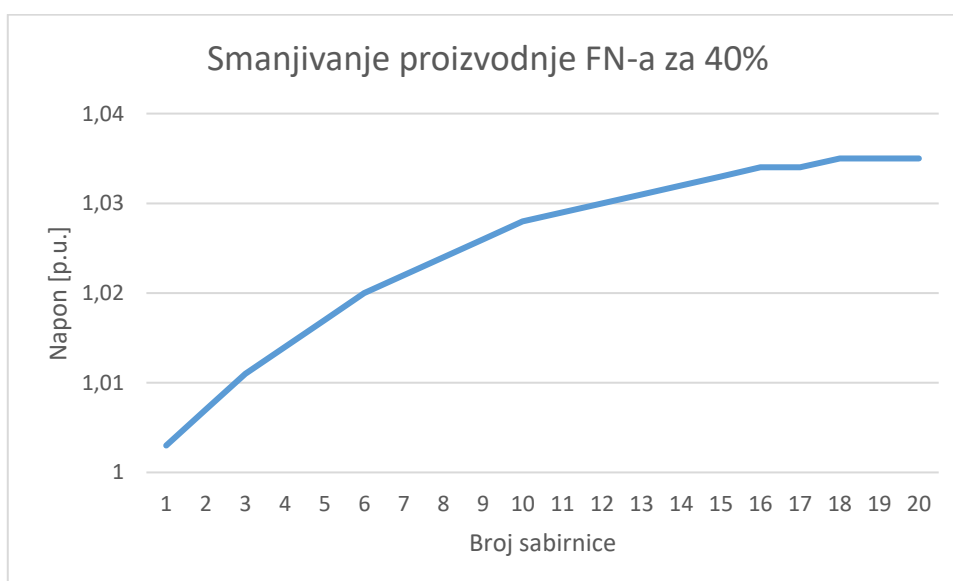
Slika 4.39. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.40. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Dobiveni naponi unutar su dozvoljenih granica u rasponu od 1,003 p.u. do 1,041 p.u.



Slika 4.40. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

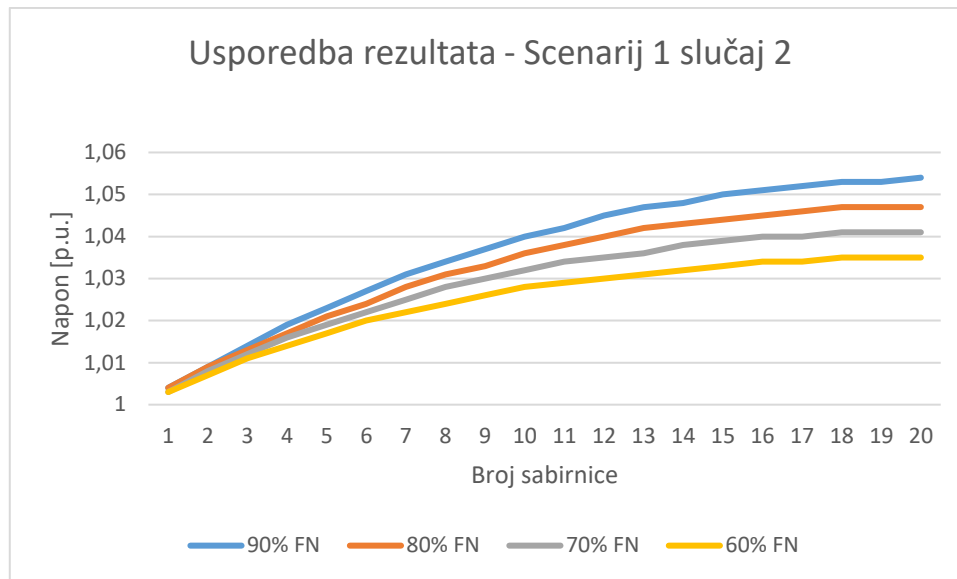
Na slici 4.41. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Svi dobiveni naponi u dozvoljenim su granicama u rasponu od 1,003 do 1,035 p.u.



Slika 4.41. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.42. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 1 slučaja 2. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na zadnjih sabirnica. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, zbog smanjivanja proizvodnje FN-a na 50 % te

zatim dodatnim smanjivanjem na pojedinim sabirnicama, naponi su u svim koracima rasli unutar dozvoljenih granica.

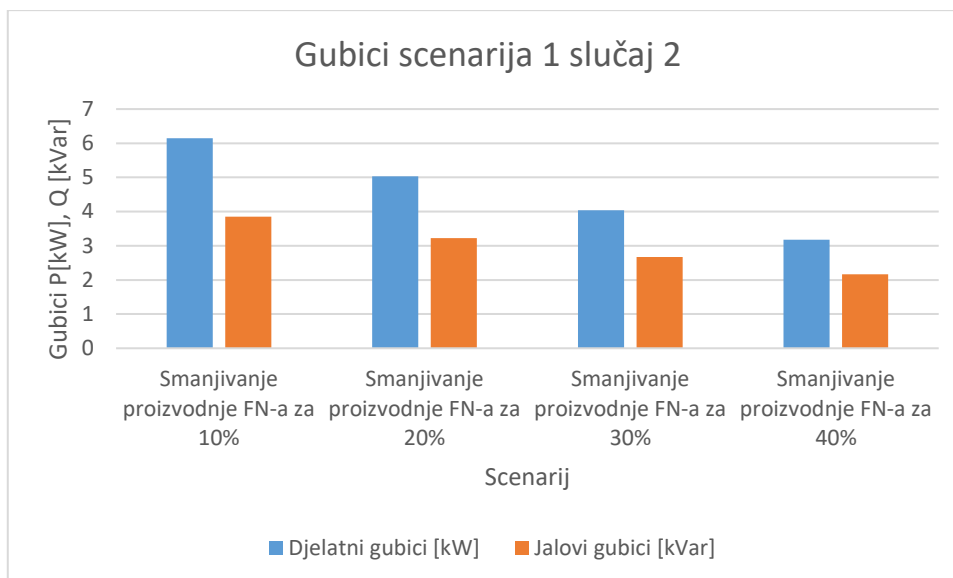


Slika 4.42. Usporedba rezultata scenarija 1 slučaj 2.

Tablica 4.7. i slika 4.43 predstavljaju djelatne i jalove gubitke scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica izvoda pri 50 % proizvodnje FN-a na ostalim sabirnicama svakog izvoda. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 1, gubici su se smanjili za 4,206 kW i 2,359 kVar.

Tablica 4.7. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 6,14611 | 5,03357 | 4,04304 | 3,17454 |
| Jalovi gubici [kVar] | 3,8477 | 3,22795 | 2,66809 | 2,16813 |

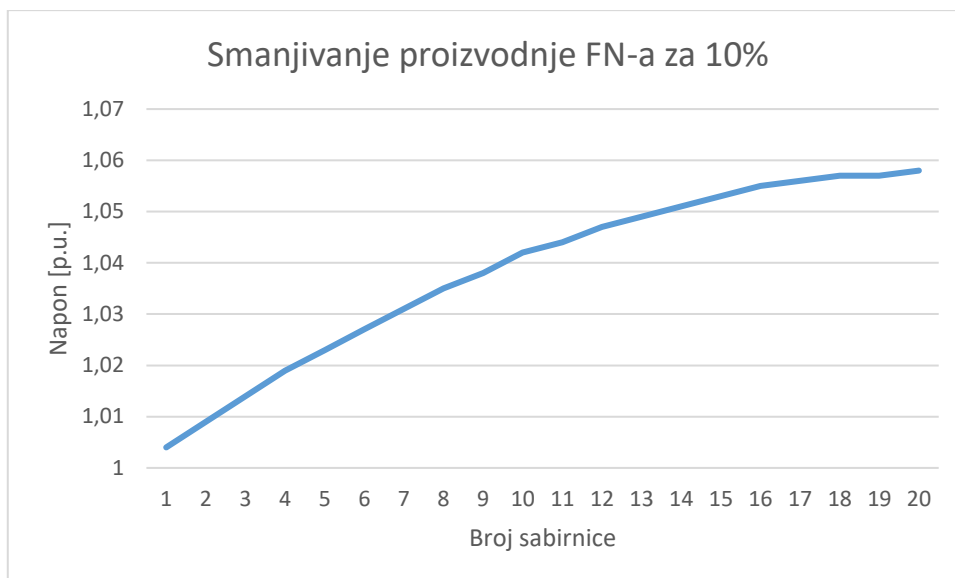


Slika 4.43. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na zadnjih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

4.3.7. Scenarij 2 slučaj 2

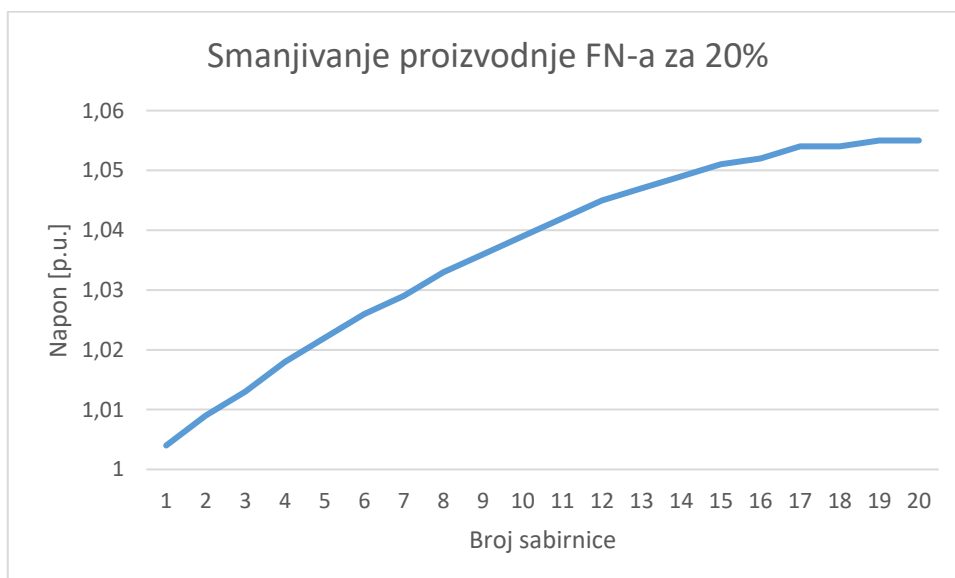
U scenariju se smanjivala proizvodnja FN-a na prvih deset sabirnica dok je na ostalim sabirnicama proizvodnja FN-a ostala smanjena na 50 %. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.44. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Zbog smanjenje proizvodnje FN-a na ostalim sabirnicama i dodatnim smanjivanjem na prvih deset dobiveni rezultati napona unutar su dozvoljenih vrijednosti napona u rasponu od 1,004 p.u. do 1,058 p.u.



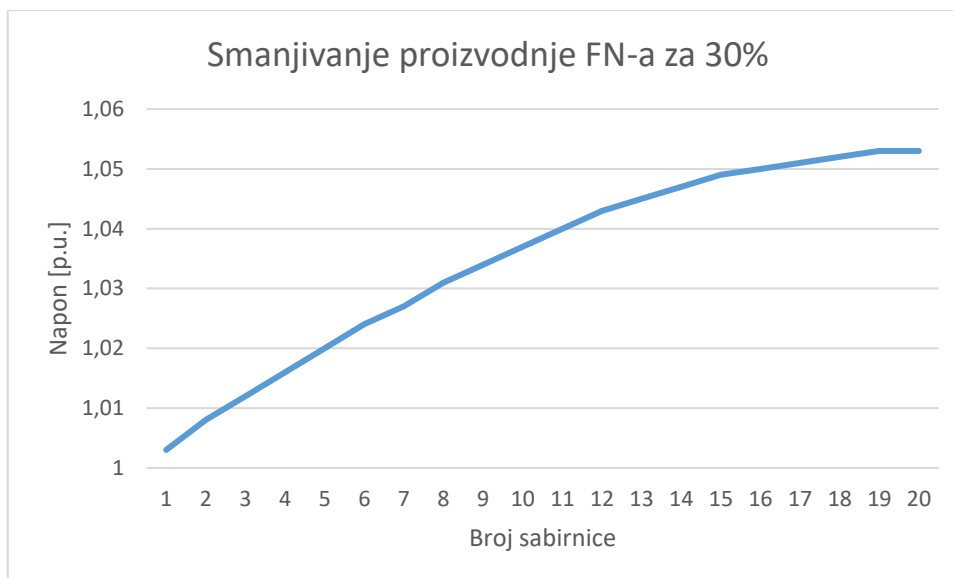
Slika 4.44. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.45. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Dobiveni naponi unutar su dozvoljenih granica u rasponu od 1,004 p.u. do 1,051 p.u.



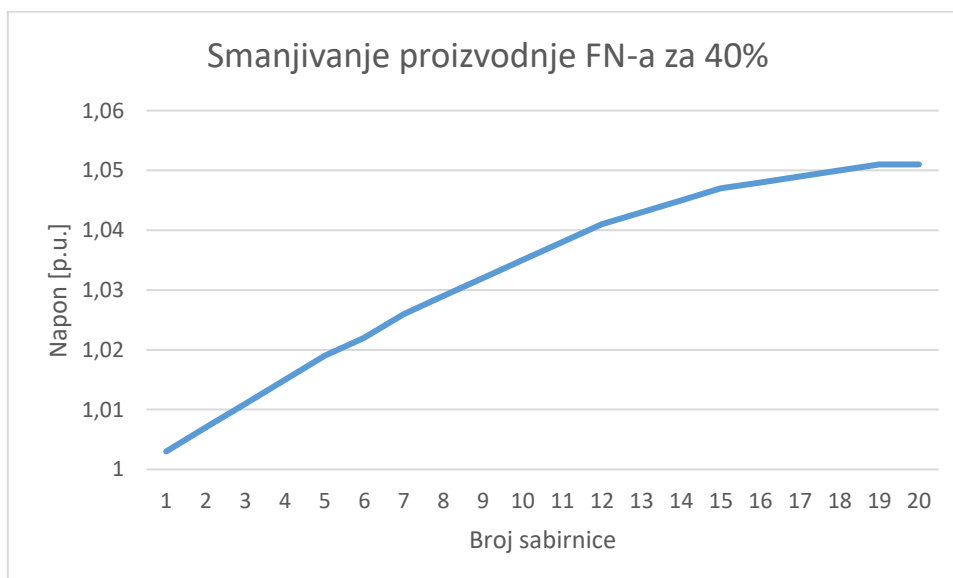
Slika 4.45. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.46. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Dobivene vrijednosti napona unutar su dozvoljenih granica u rasponu od 1,003 p.u. do 1,053 p.u.



Slika 4.46. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

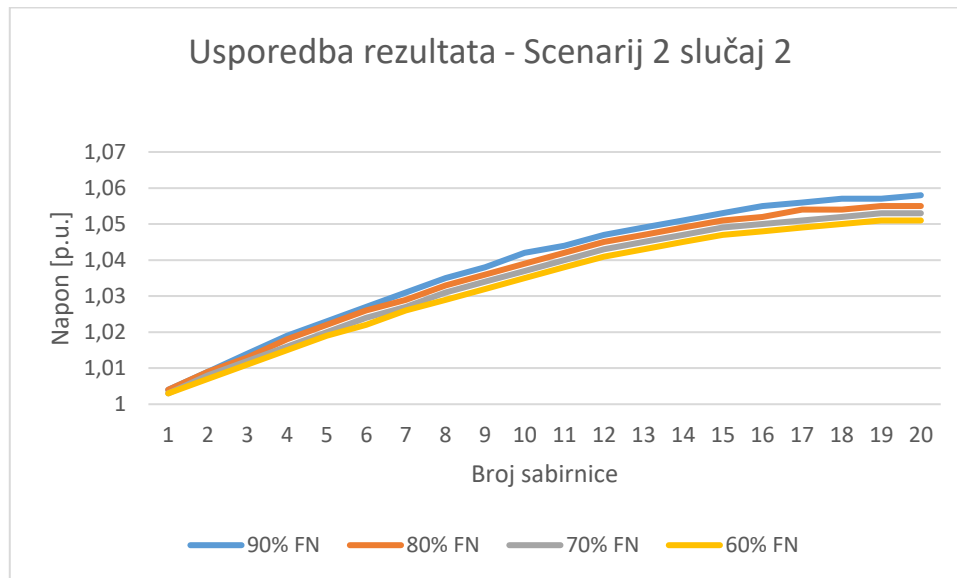
Na slici 4.47. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Dobivene vrijednosti napona unutar su dozvoljenih granica u rasponu od 1,003 p.u. do 1,051 p.u.



Slika 4.47. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.48. prikazana je usporedba rezultata scenarija 2 slučaja 2. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na prvih deset sabirnica. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, zbog smanjivanja proizvodnje FN-a na 50

% te zatim dodatnim smanjivanjem na pojedinim sabirnicama, naponi su u svim koracima rasli unutar dozvoljenih granica.

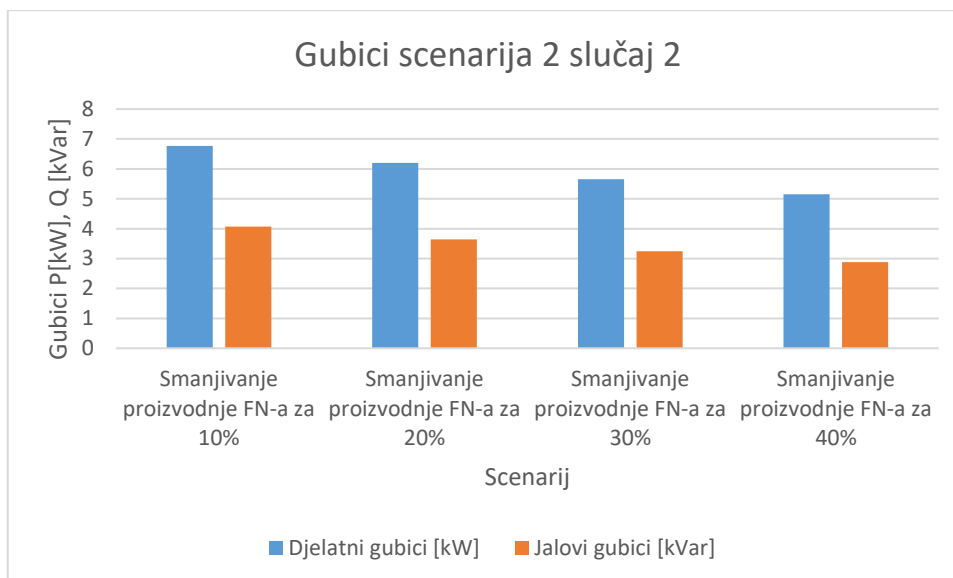


Slika 4.48. Usporedba rezultata – Scenarij 2 slučaj 2

Tablica 4.8. i slika 4.49. prikazuju djelatne i jalove gubitke dobivene smanjivanjem proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica te 50 % proizvodnje FN-a na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 1, gubici su se smanjili za 2,233 kW i 1,650 kVar.

Tablica 4.8. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 6,7716 | 6,19646 | 5,65523 | 5,14792 |
| Jalovi gubici [kVar] | 4,07235 | 3,6456 | 3,24711 | 2,87688 |

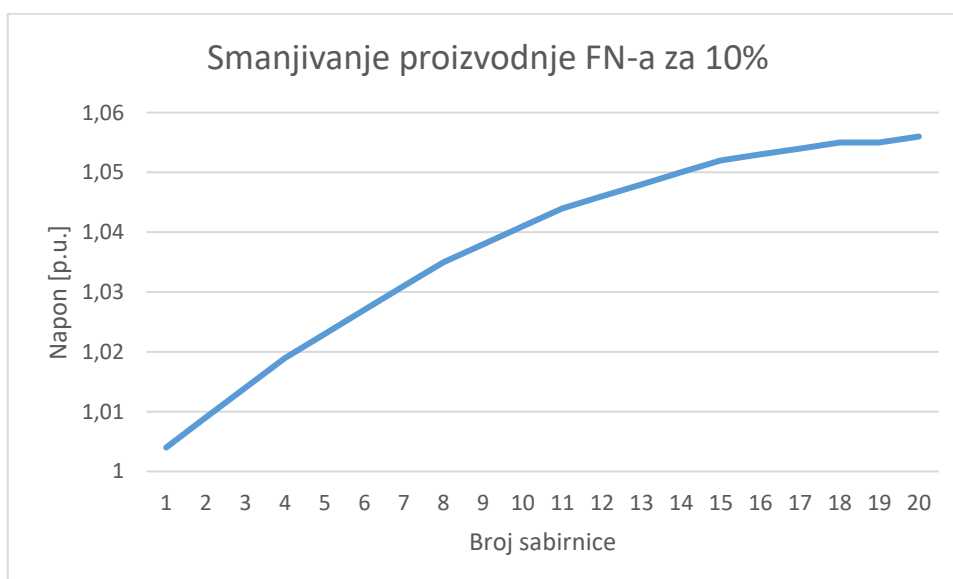


Slika 4.49. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih deset sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

4.3.8. Scenarij 3 slučaj 2

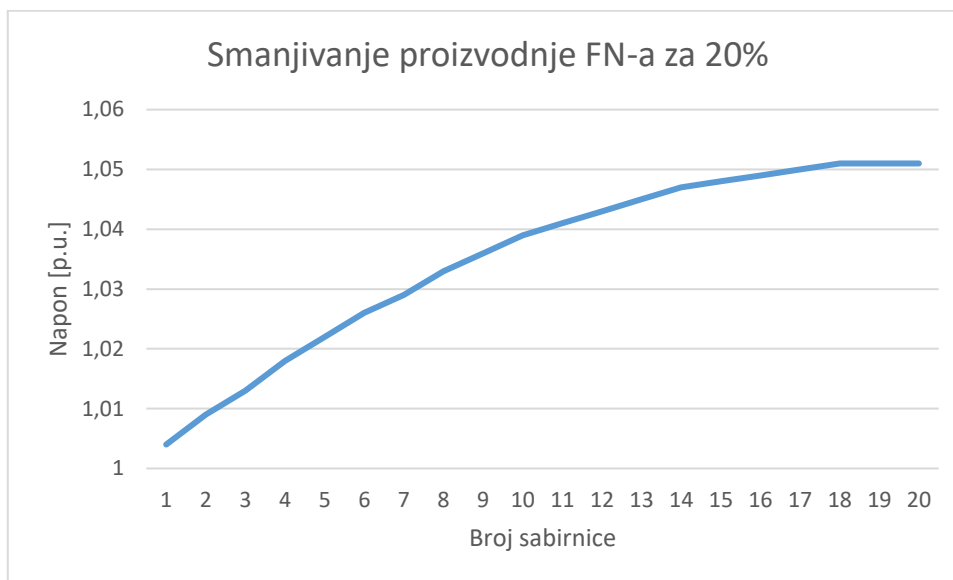
U scenariju smanjivala se proizvodnja FN-a na prvih pet sabirnica i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda, dok je proizvodnja FN-a na ostalim sabirnicama 50 %. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.50. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Zbog smanjene proizvodnje FN-a na svim sabirnicama te dodatnim smanjivanjem na prvim i zadnjim sabirnicama naponi su rasli unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,004 p.u. do 1,056 p.u.



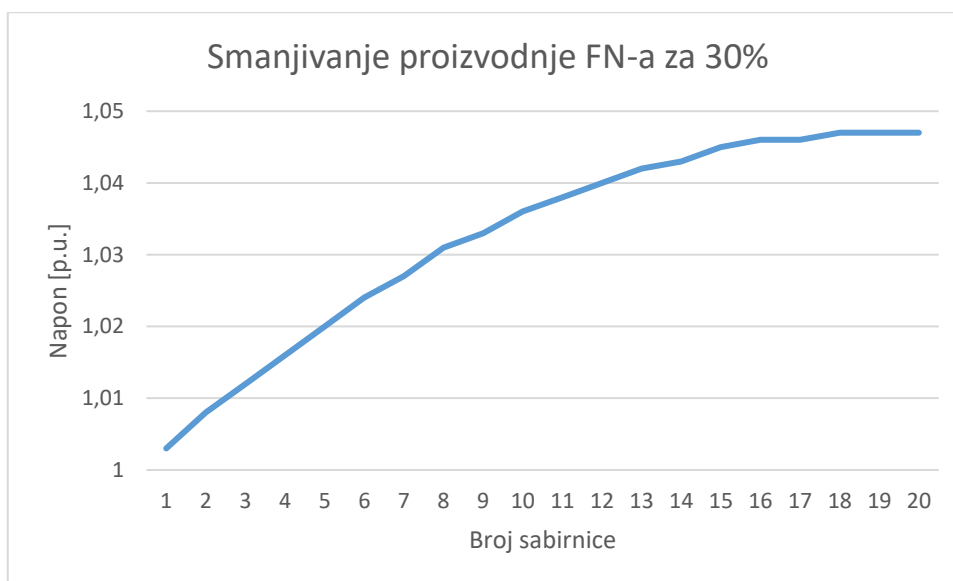
Slika 4.50. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.51. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Naponi su na svim sabirnicama unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,004 do 1,051 p.u.



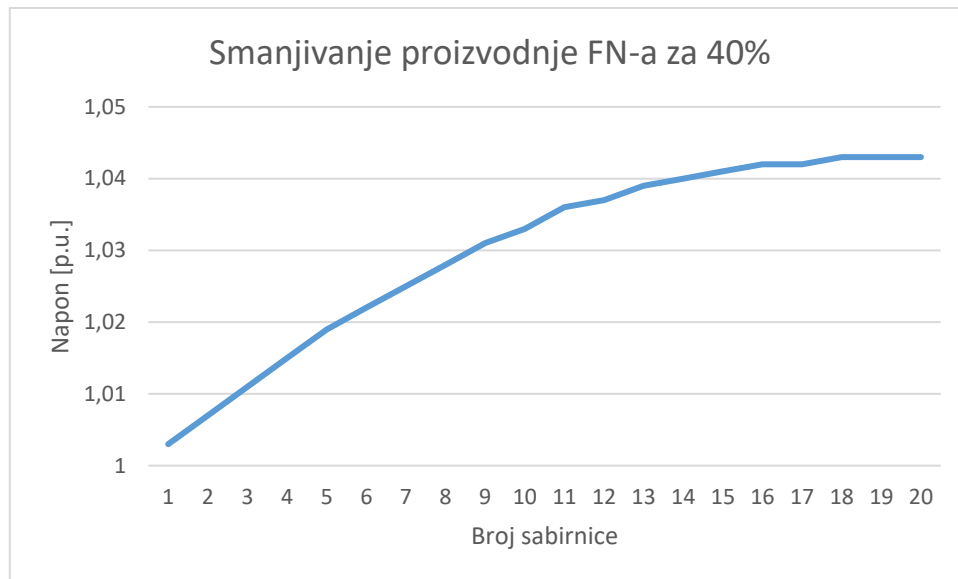
Slika 4.51. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.52. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Maksimalna vrijednost napona na najudaljeniji sabirnici izvoda 1,047 p.u.



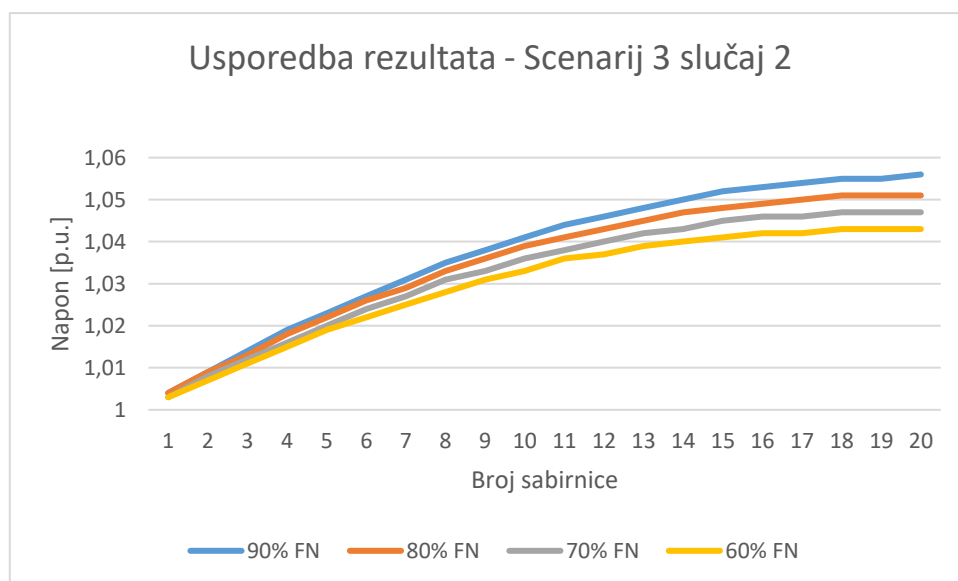
Slika 4.52. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.53. prikazuje vrijednosti napona pri 60 % proizvodnje FN-a. Maksimalna dobivena vrijednost napona je 1,043 p.u.



Slika 4.53. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.54. prikazana je usporedba rezultata scenarija 3 slučaja 2. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na prvih pet i zadnjih pet sabirnica. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, zbog smanjivanja proizvodnje FN-a na 50 % te zatim dodatnim smanjivanjem na pojedinim sabirnicama, naponi su u svim koracima rasli unutar dozvoljenih granica.

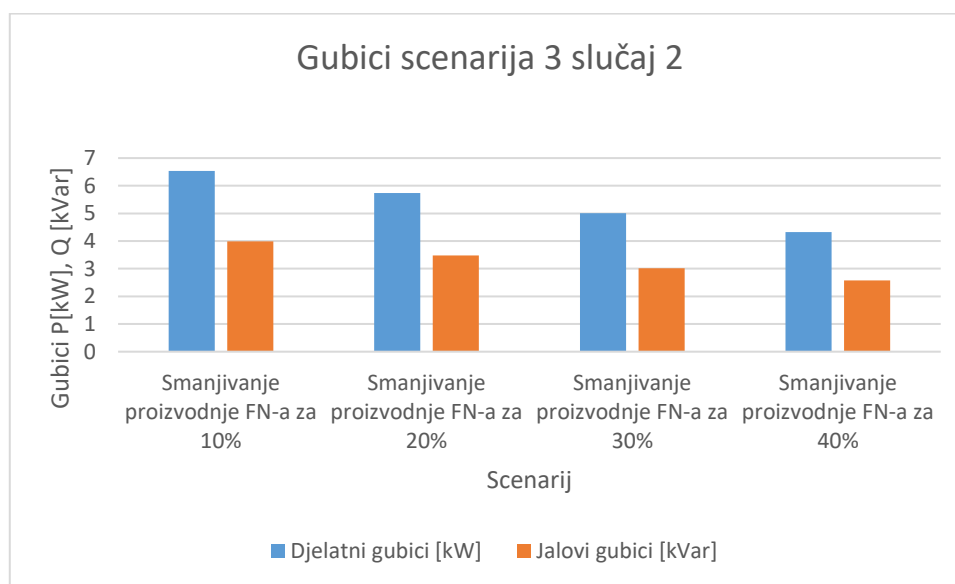


Slika 4.54. Usporedba rezultata – Scenarij 3 slučaj 2

Tablica 4.9. i slika 4.55. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda uz 50 % proizvodnju FN-a na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 1, gubici su se smanjili za 3,061 kW i 1,948 kVar.

Tablica 4.9. *Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)*

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 6,53154 | 5,73835 | 5,00111 | 4,31981 |
| Jalovi gubici [kVar] | 3,98613 | 3,48107 | 3,01218 | 2,57946 |

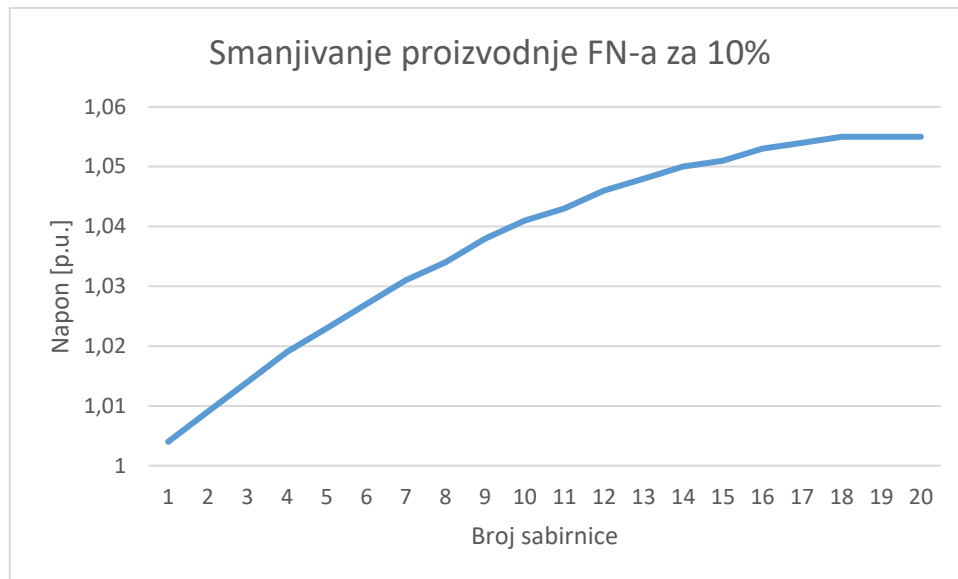


Slika 4.55. *Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na prvih pet i zadnjih pet sabirnica svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)*

4.3.9. Scenarij 4 slučaj 2

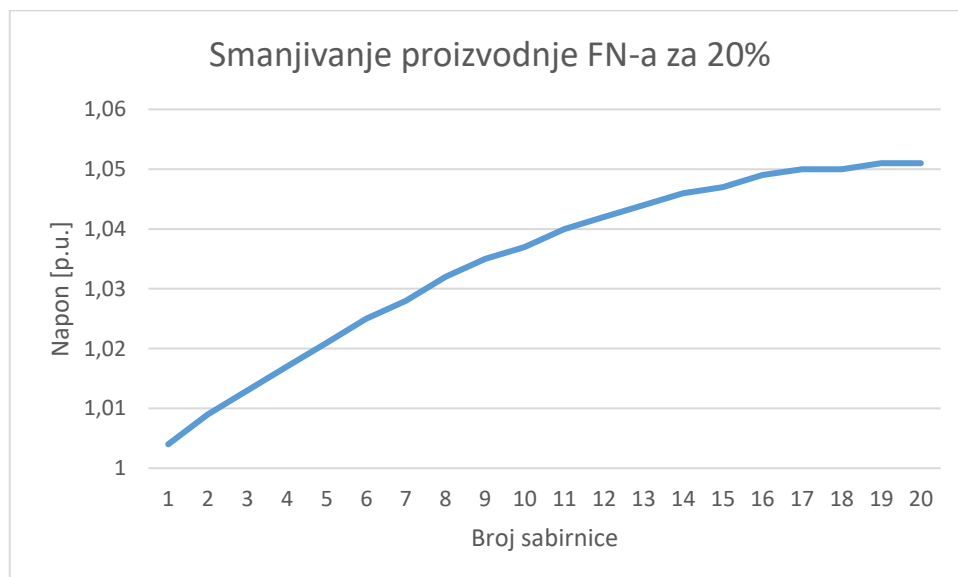
U scenariju smanjivala se proizvodnja FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda. Na ostalim FN-ima, proizvodnja je smanjena na 50 %. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.56. prikazuje vrijednosti napona pri 90 % proizvodnje FN-a. Naponi su ostali unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,004 p.u. do 1,055 p.u.



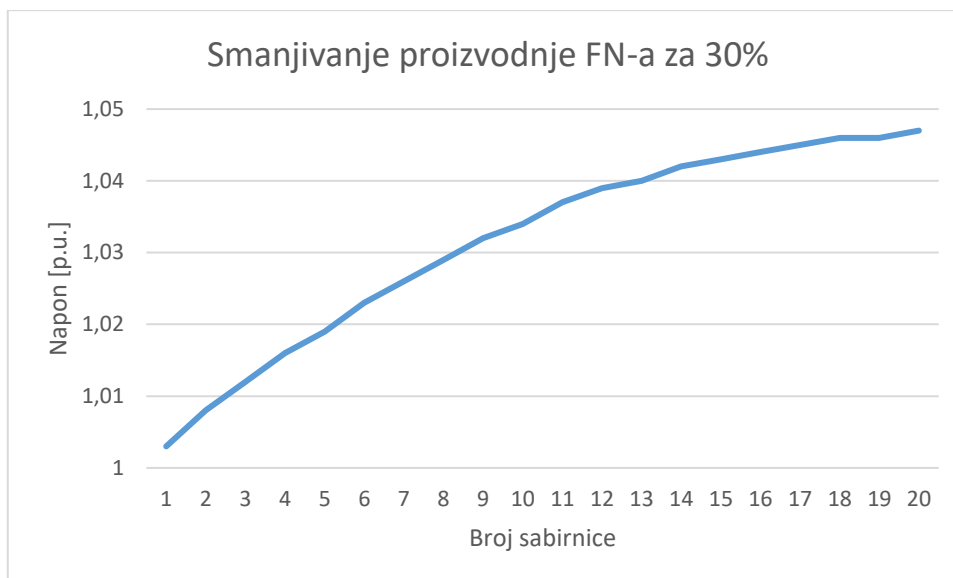
Slika 4.56. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.57. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 % Naponi su na svim sabirnicama ostali unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,004 p.u. do 1,051 p.u.



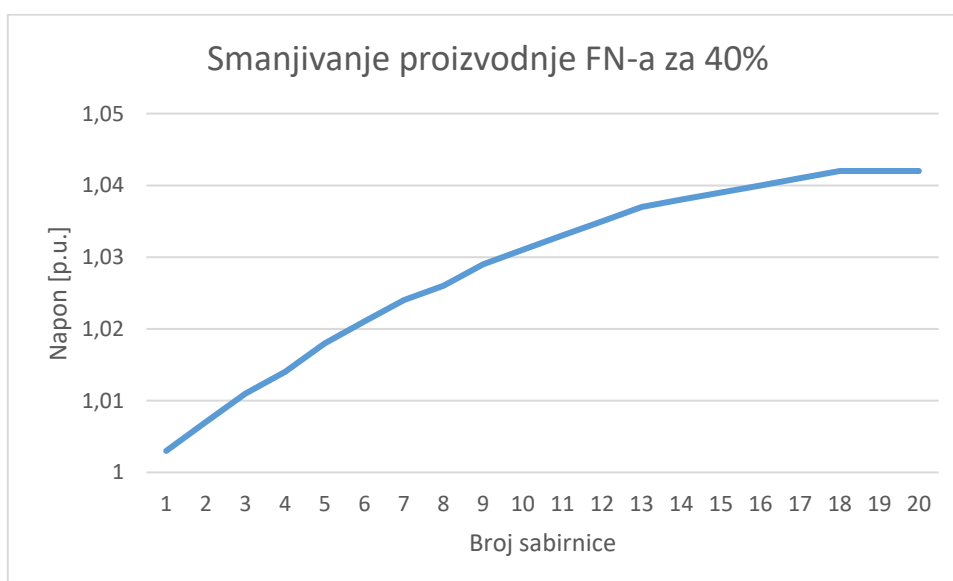
Slika 4.57. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.58. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Naponi su na svim sabirnicama unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,999 p.u. do 1,043 p.u.



Slika 4.58. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

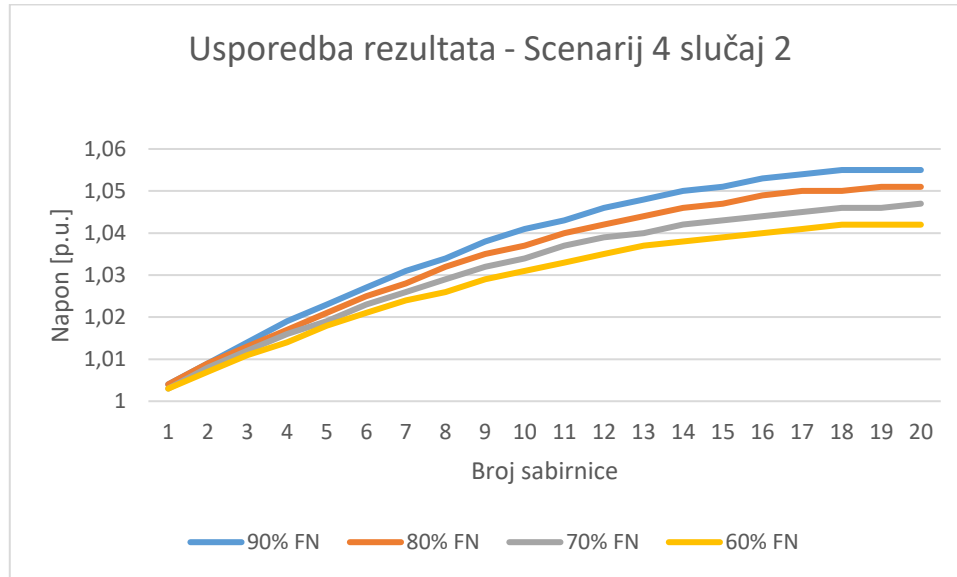
Slika 4.59. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Naponi su rasli unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,003 p.u. do 1,042 p.u.



Slika 4.59. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.60. prikazana je usporedba rezultata scenarija 4 slučaja 2. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na svakoj drugoj sabirnici. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, zbog smanjivanja proizvodnje

FN-a na 50 % te zatim dodatnim smanjivanjem na pojedinim sabirnicama, naponi su u svim koracima rasli unutar dozvoljenih granica.

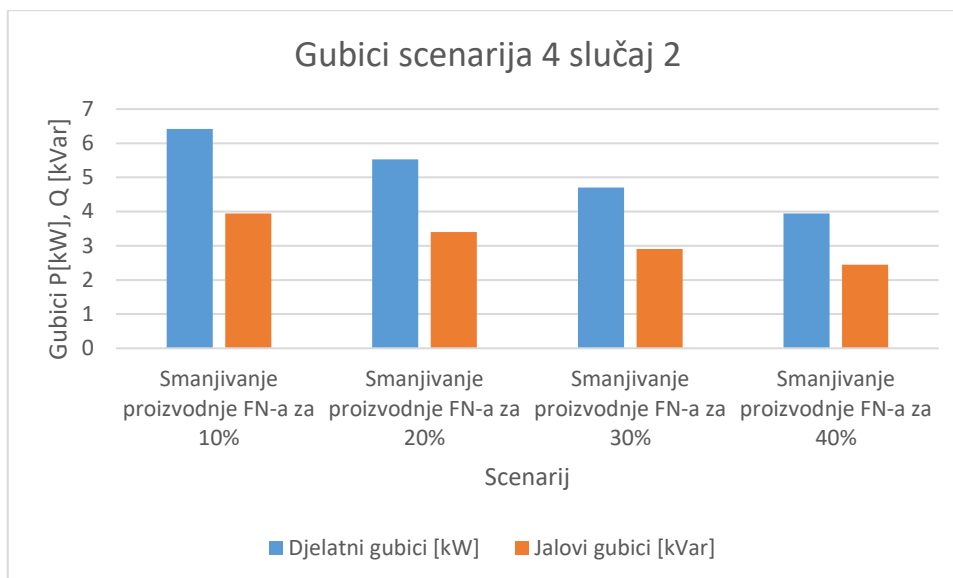


Slika 4.60. Usporedba rezultata- Scenarij 4 slučaj 2

Tablica 4.10. i slika 4.61. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog drugog izvoda pri 50 % proizvodnje FN-a na ostalim sabirnicama. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 1, gubici su se smanjili za 3,434 kW i 2,082 kVar.

Tablica 4.10. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 6,42031 | 5,5278 | 4,70312 | 3,94627 |
| Jalovi gubici [kVar] | 3,94618 | 3,40545 | 2,90516 | 2,4453 |

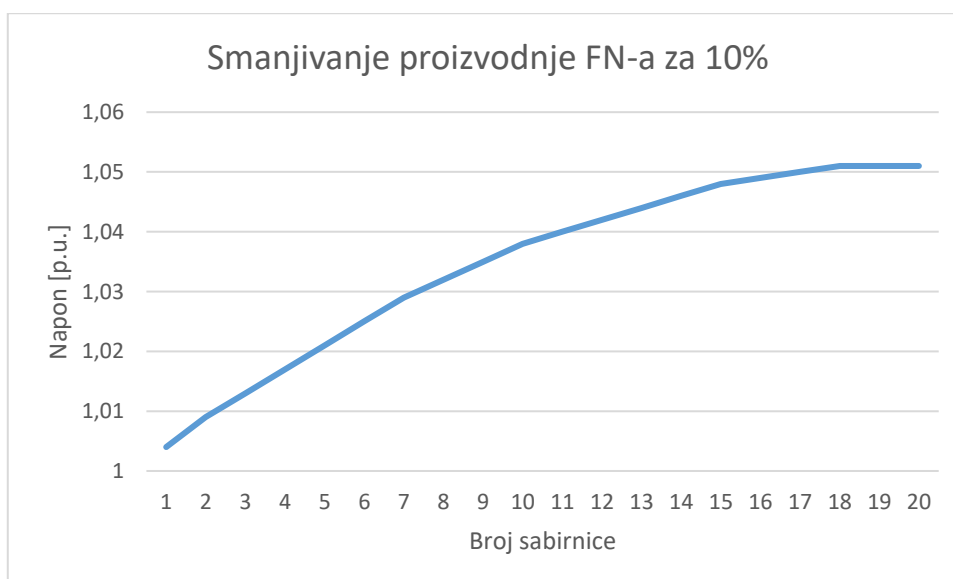


Slika 4.61. Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj drugoj sabirnici svakog izvoda (50% proizvodnja FN-a)

4.3.10. Scenarij 5 slučaj 2

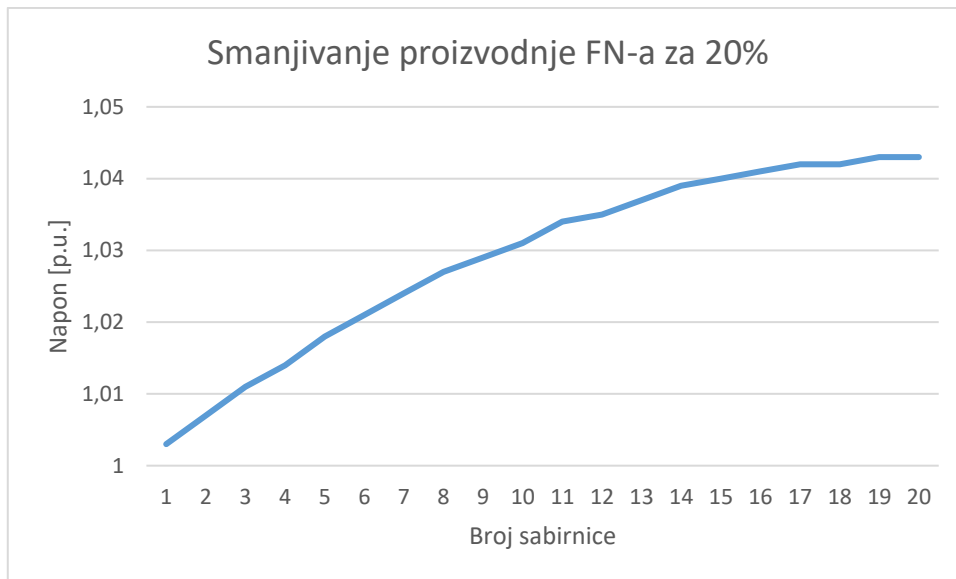
U scenariju smanjivala se proizvodnja FN-a postavljena na 50 % na svakoj sabirnici svakog izvoda. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda mreže.

Slika 4.62. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 90 %. Naponi su ostali u dozvoljenim granicama u rasponu od 1,009 p.u. do 1,051 p.u.



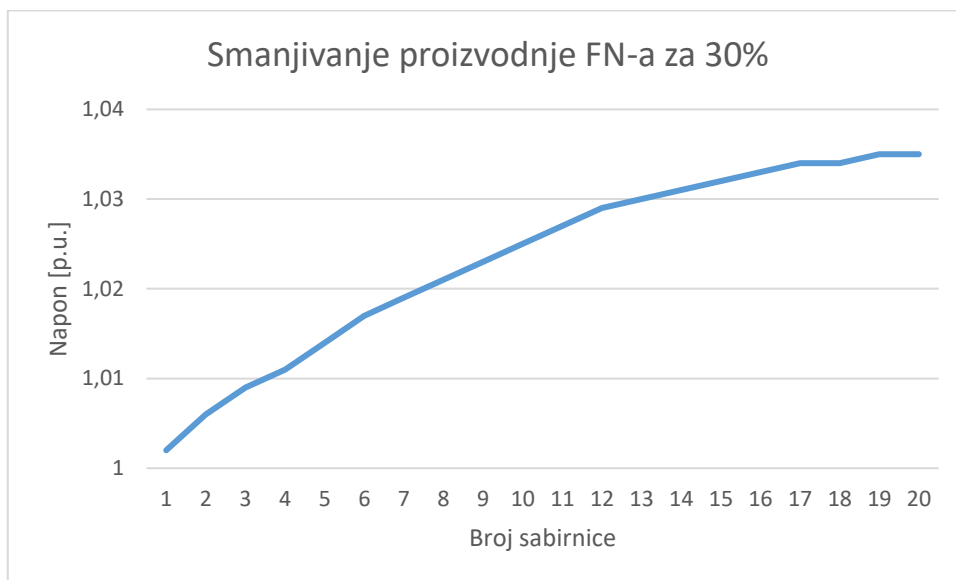
Slika 4.62. Napon na sabirnicama pri 90 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.63 prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 80 %. Naponi su ostali unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,003 p.u. do 1,043 p.u.



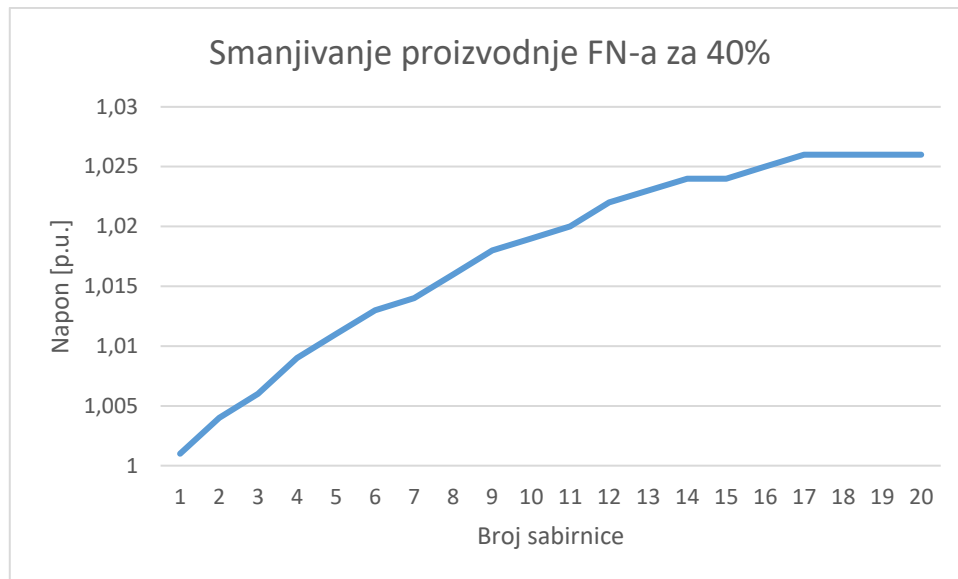
Slika 4.63. Napon na sabirnicama pri 80 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.64. prikazuje vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 70 %. Naponi su na svima sabirnicama unutar dozvoljenih granica u rasponu od 1,002 p.u. do 1,035 p.u.



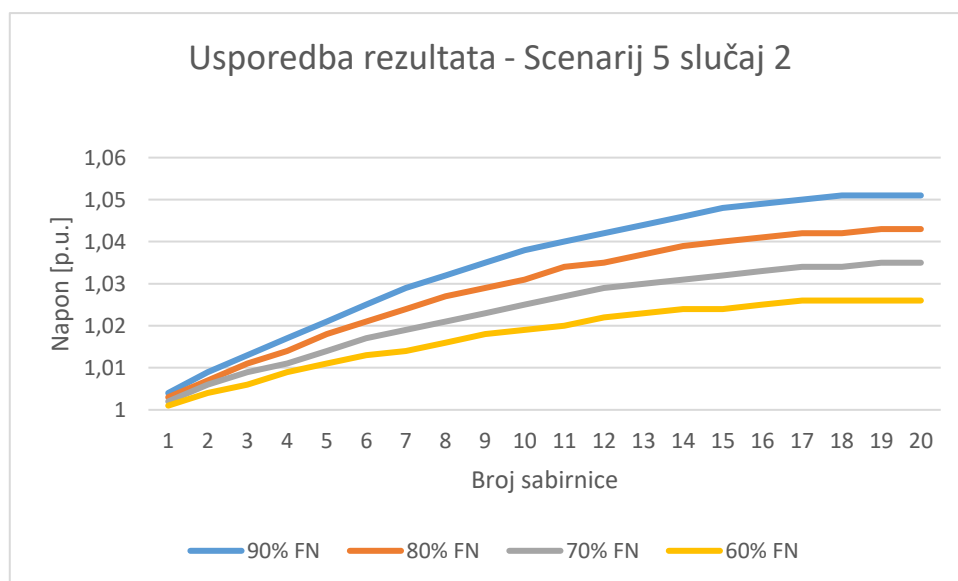
Slika 4.64. Napon na sabirnicama pri 70 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.65. prikazane su vrijednosti napona pri smanjivanju proizvodnje FN-a na 60 %. Naponi su rasli u dozvoljenim granicama u rasponu od 1,001 p.u. do 1,026 p.u.



Slika 4.65. Napon na sabirnicama pri 60 % proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.66. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 5 slučaja 2. Proizvodnja FN-a smanjivala se u četiri koraka za 10 % na svakoj sabirnici. Pri svakom smanjivanju proizvodnje vrijednosti napona smanjivale su se. Prema dobivenim rezultatima, zbog smanjivanja proizvodnje FN-a na 50 % te zatim dodatnim smanjivanjem na pojedinim sabirnicama, naponi su u svim koracima rasli unutar dozvoljenih granica.

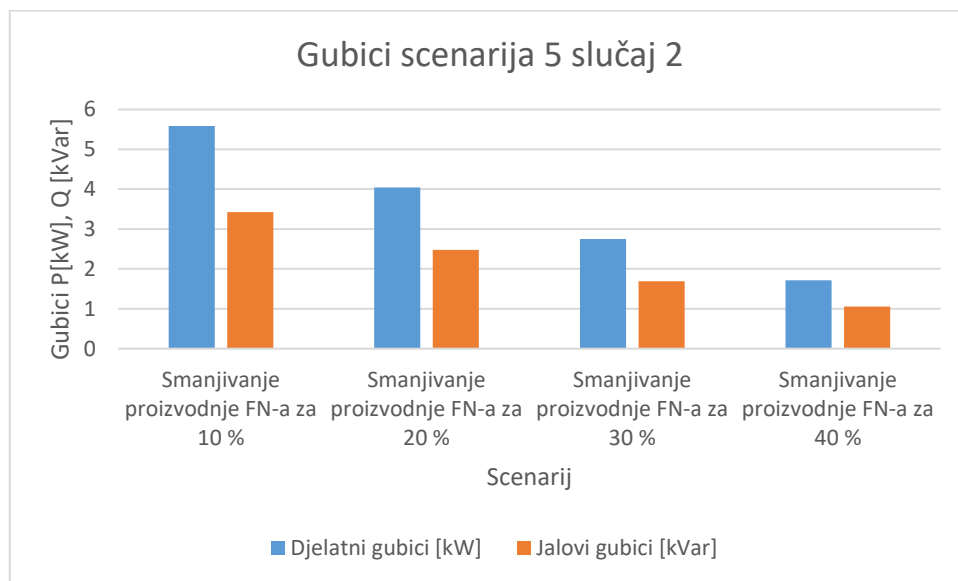


Slika 4.66. Usporedba rezultata – Scenarij 5 slučaj 2

Tablica 4.11. i slika 4.67. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda. Smanjivanjem proizvodnje FN-a smanjuje se i ukupno opterećenje mreže, a samim time smanjuju se i gubici u mreži. U odnosu na osnovni slučaj 1, gubici su se smanjili za 5,664 kW i 3,474 kVar.

Tablica 4.11. *Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (50 % proizvodnja FN-a)*

| Scenarij | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 10 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 20 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 30 % | Smanjivanje proizvodnje FN-a za 40 % |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 5,5855 | 4,04318 | 2,75369 | 1,71705 |
| Jalovi gubici [kVar] | 3,42618 | 2,48011 | 1,68913 | 1,05325 |



Slika 4.67. *Gubici scenarija smanjivanja proizvodnje FN-a na svakoj sabirnici svakog izvoda (100 % proizvodnja FN-a)*

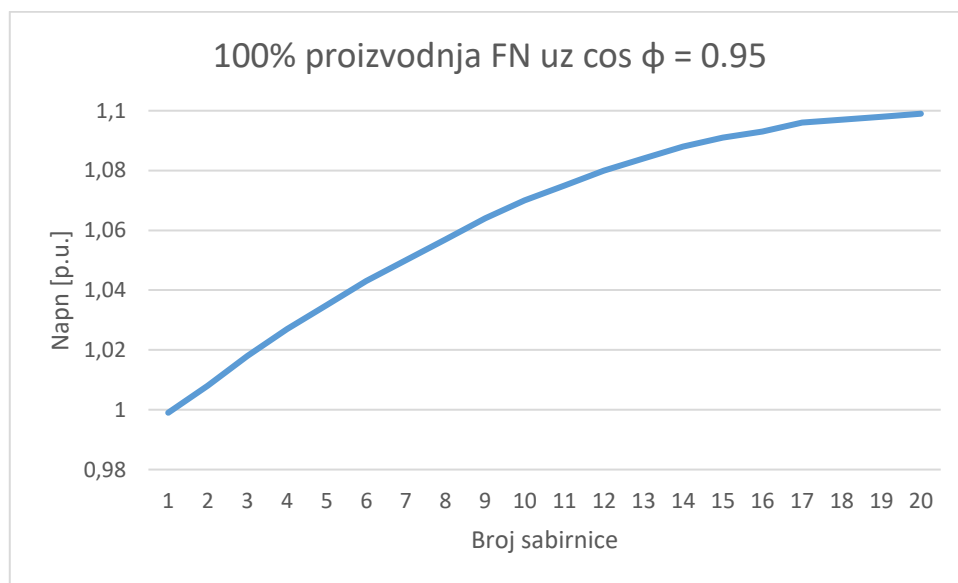
4.4. Upravljanje jalovom snagom

U sljedećim scenarijama, u svrhu provođenja upravljanja jalovom snagom FN-a, provodila su se dva slučaja. U prvom slučaju smanjivao se faktor snage ($\cos \varphi$) uz maksimalnu i 50 % proizvodnje FN-a. U drugom slučaju koristila se Volt-Var metoda.

4.4.1. Scenarij 6 slučaj 1

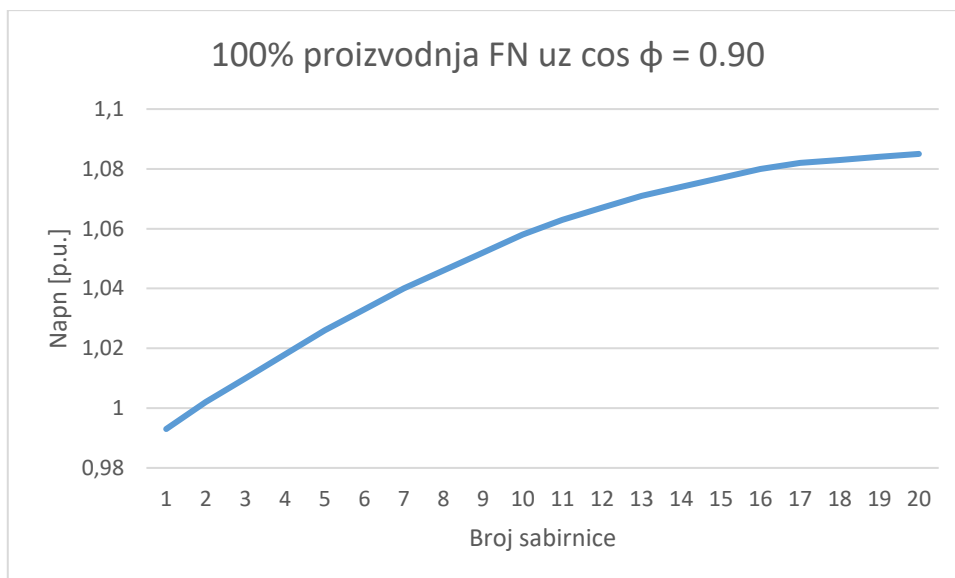
U scenariju smanjivao se faktor snage ($\cos \varphi$) svakom FN-u uz maksimalnu proizvodnju. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda.

Slika 4.68. prikazuje vrijednosti napona na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0,95$. Naponi su rasli unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,999 p.u. do 1,099 p.u.



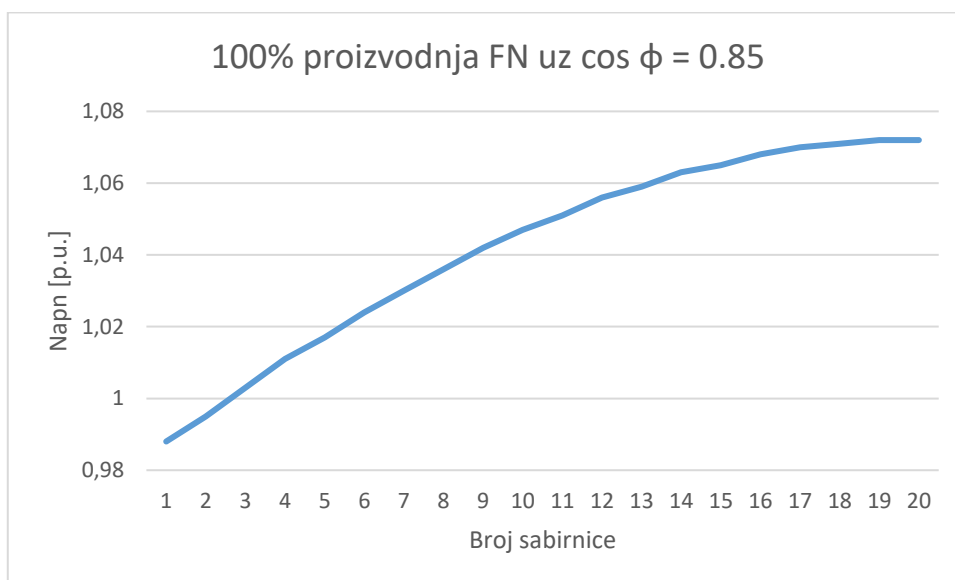
Slika 4.68. Napon na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0,95$ (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.69. prikazane su vrijednosti napona pri $\cos \varphi = 0,90$. Naponi su na svim sabirnicama unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,99 p.u. do 1,085 p.u.



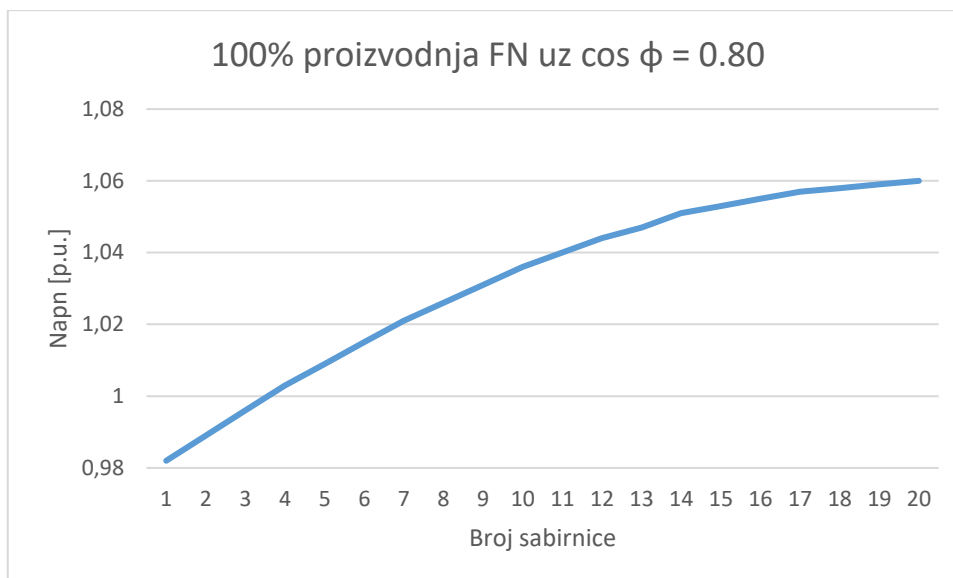
Slika 4.69. Napon na sabirnicama pri $\cos \phi = 0,90$ (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.70. prikazuje vrijednosti napona pri $\cos \phi = 0,85$. Najveća vrijednost napona na najudaljenijoj sabirnici mreže je 1,072 p.u.



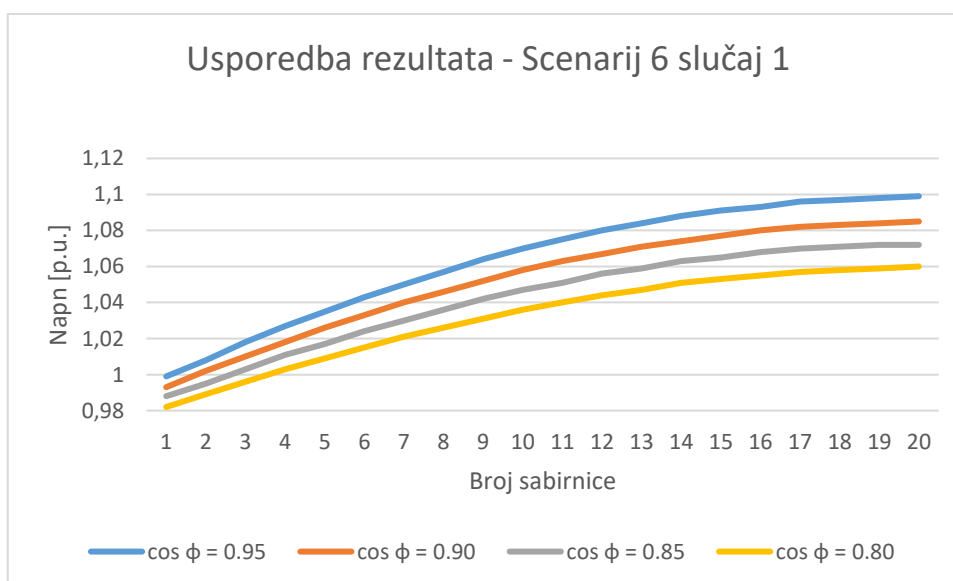
Slika 4.70. Napon na sabirnicama pri $\cos \phi = 0,85$ (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.71. prikazane su vrijednosti napona pri $\cos \phi = 0,80$. Naponi su na svim sabirnicama unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,982 p.u. do 1,06 p.u.



Slika 4.71. Napon na sabirnicama pri $\cos \phi = 0,80$ (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.72. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 6 slučaja 1. Faktor snage smanjivao se u četiri koraka za 0,05. Iz dobivenih rezultata vidljivo je smanjivanje vrijednosti napona na sabirnicama pri svakom smanjivanju faktora snage. Dobiveni naponi u svakom koraku ostali su unutar dopuštenih granica odstupanja te je samim time regulacija uspješno ostvarena.

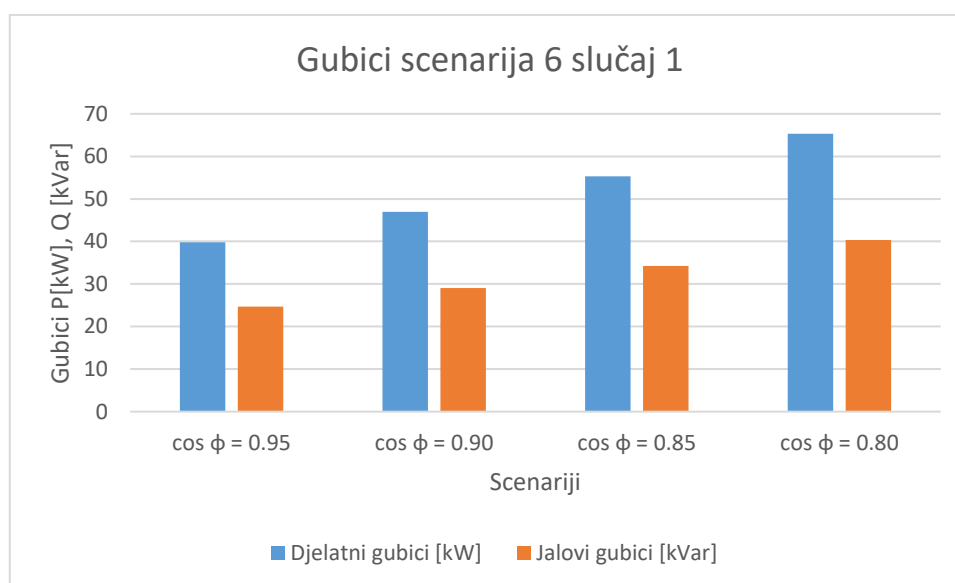


Slika 4.72. Usporedba rezultata – Scenarij 6 slučaj 1

Tablica 4.12. i slika 4.73. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju faktora snage svakog FN-a svakog izvoda. Smanjivanjem faktora snage povećava se udio jalove snage u mreži. Zbog povećanja jalove snage i dodatne jalove struje gubici su u mreži porasli. U odnosu na osnovni slučaj 2, gubici su porasli za 26,07578 kW i 16,29549 kVar

Tablica 4.12. Gubici scenarija smanjivanja faktor snage ($\cos \varphi$) FN-ova (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | $\cos \varphi = 0.95$ | $\cos \varphi = 0.90$ | $\cos \varphi = 0.85$ | $\cos \varphi = 0.80$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 39,84352 | 46,98251 | 55,30887 | 65,31436 |
| Jalovi gubici [kVar] | 24,68637 | 29,08432 | 34,21049 | 40,36465 |



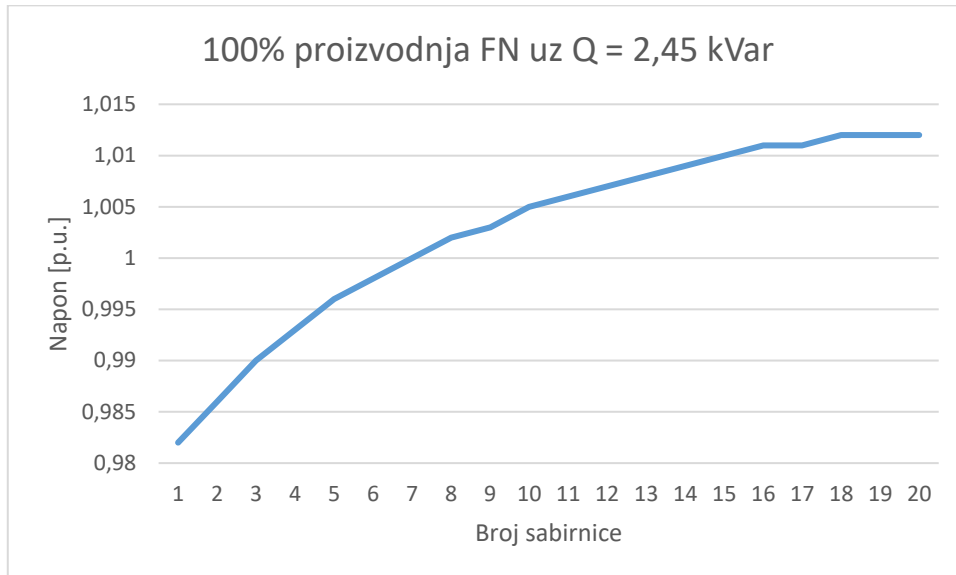
Slika 4.73. Gubici scenarija smanjivanja faktor snage ($\cos \varphi$) FN-ova (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.4.2. Scenarij 7 slučaj 1

U scenariju se upravljanja jalovom snagom postavila željena granica održavanja napona u rasponu od 0,95 p.u. do 1,05 p.u. Scenarij se provodio za različitu vrijednost kapacitivne jalove snage. Zbog preopterećivanja pojedinih vodova prikazane su i postotne vrijednosti opterećenja voda za jedan izvod.

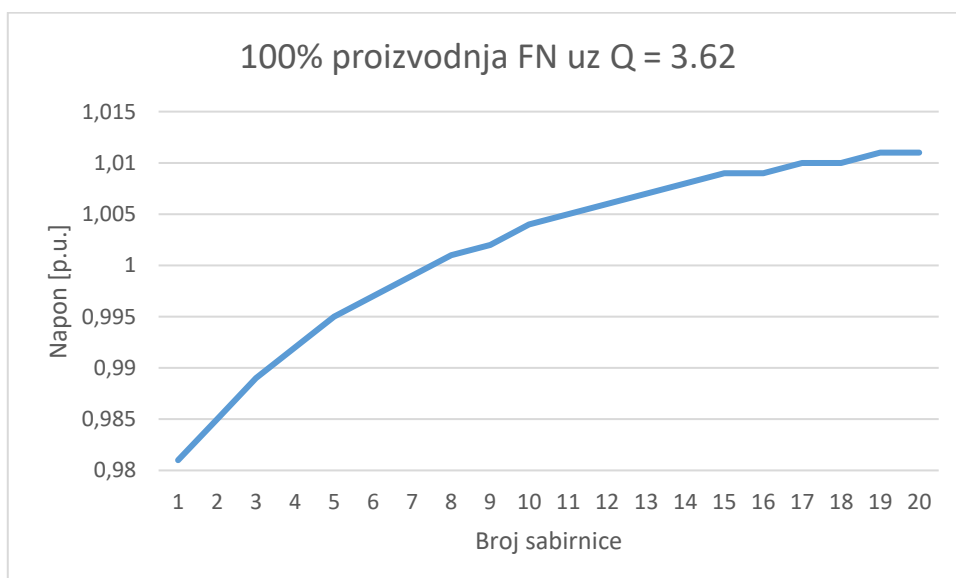
Naponi na sabirnicama

Na slici 4.74. prikazane su vrijednosti napona pri maksimalnoj proizvodnji FN-a uz vrijednost kapacitivne jalove snage $Q = 2,45 \text{ kVar}$. Napon je na svim sabirnicama ostao unutar postavljenih granica u rasponu od 0,982 p.u. do 1,012 p.u.



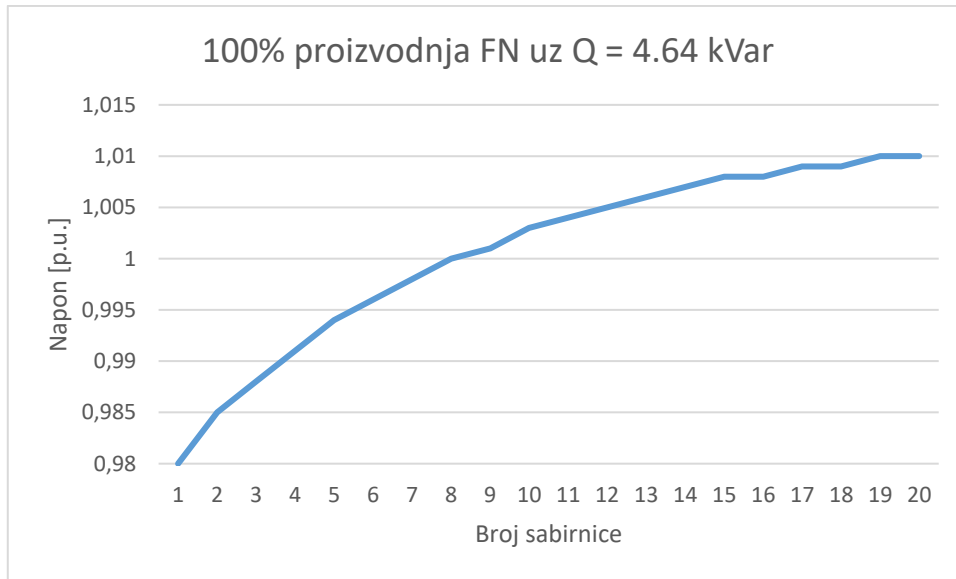
Slika 4.74. Napon na sabirnicama pri $Q = 2,45 \text{ kVar}$ (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.75. prikazuje vrijednosti napona pri $Q = 3,62 \text{ kVar}$. Napon je na svim sabirnicama rastao unutar podešenih granica u rasponu od 0,981 p.u. do 1,011 p.u.



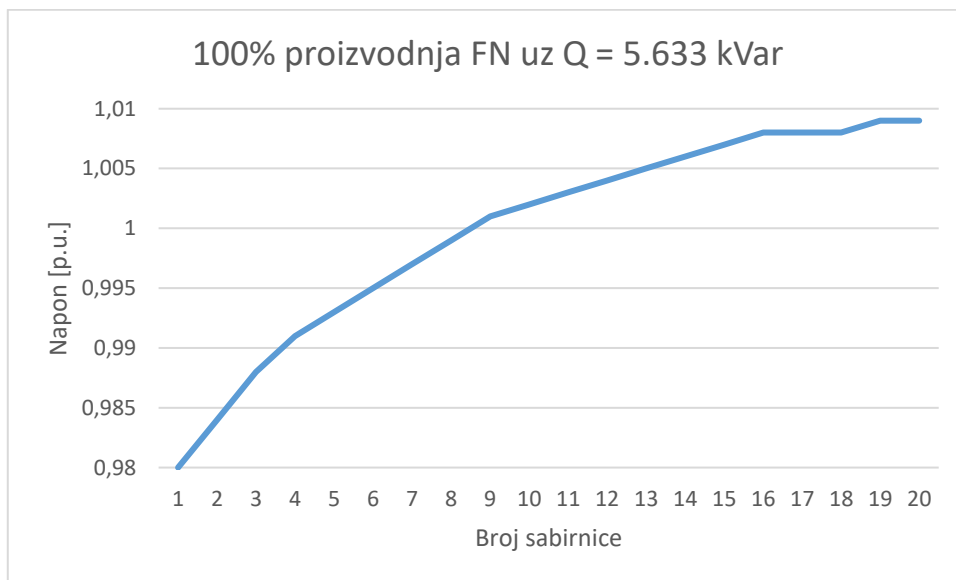
Slika 4.75. Napon na sabirnicama pri $Q = 3,62$ (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.76. su prikazane vrijednosti napona pri $Q = 4.64$ kVar. Napon je na svim sabirnicama rastao unutar dozvoljenih granica u rasponu 0,98 p.u. – 1,01 p.u.



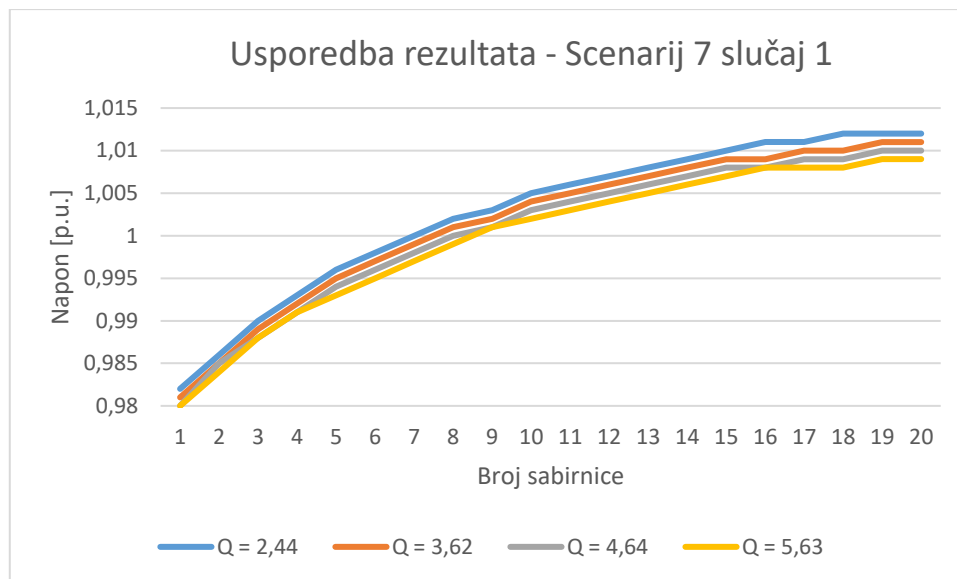
Slika 4.76. Napon na sabirnicama pri $Q = 4.64$ kVar (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.77. prikazuje vrijednosti napona na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0.80$. Napon je na svim sabirnicama ostao unutar podešenih granica u rasponu od 0,98 p.u. do 1,009 p.u.



Slika 4.77. Napon na sabirnicama pri $Q = 5.633$ kVar (maksimalna proizvodnja FN-a)

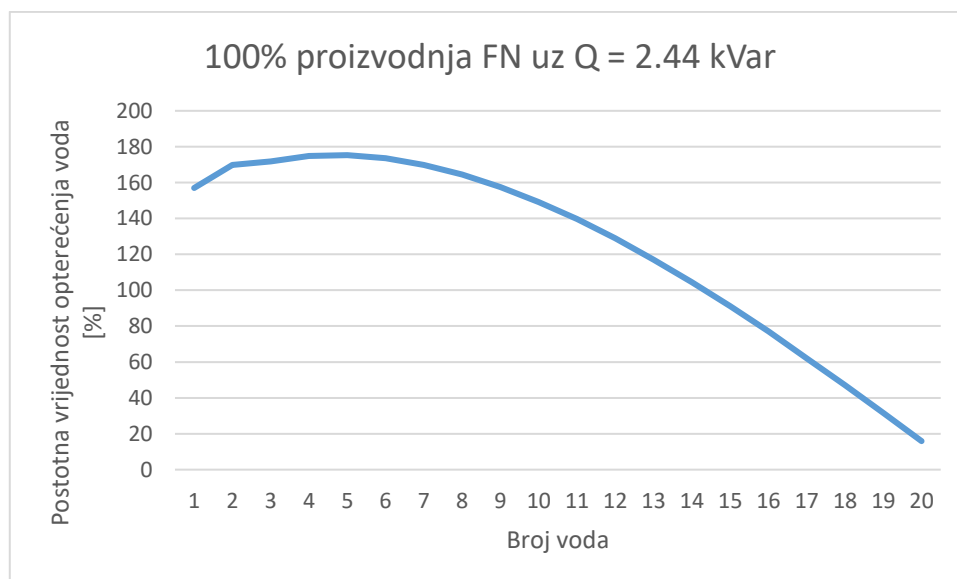
Slika 4.78. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 7 slučaja 1. Iz dobivenih rezultata vidljiv je porast vrijednosti napona u svakom scenariju unutar postavljenog raspona napona. Metodom je ostvarena uspješna regulacija.



Slika 4.78. Usporedba rezultata – Scenarij 7 slučaj 1

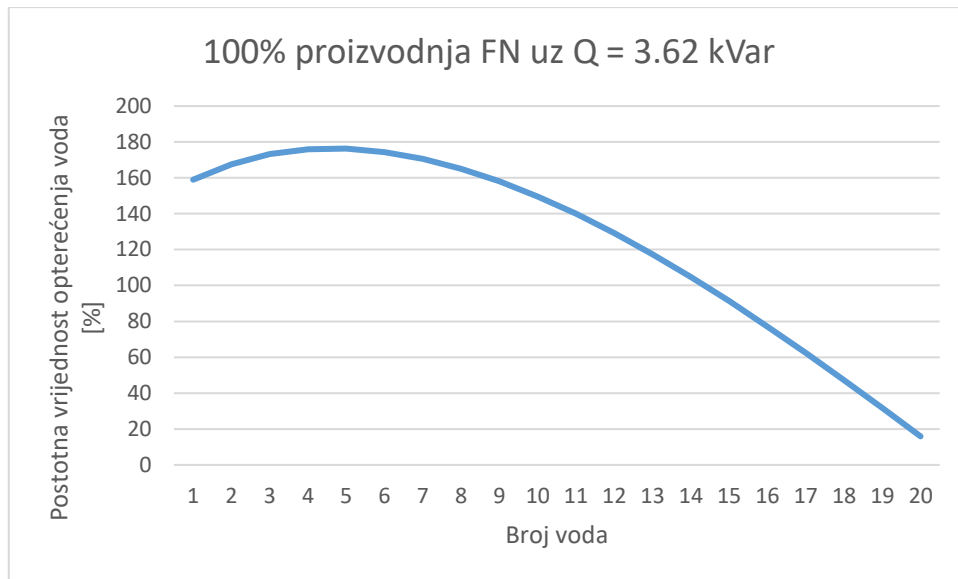
Opterećenje vodova

Na slici 4.79. prikazane su vrijednosti napona na vodovima $Q = 2.44$ kVar. Naponi su rasli u rasponu od 0,976 p.u. do 1,012 p.u. Javlja se preopterećenje od prvog do četrnaestog voda u rasponu od 104,5 % do 157 %.



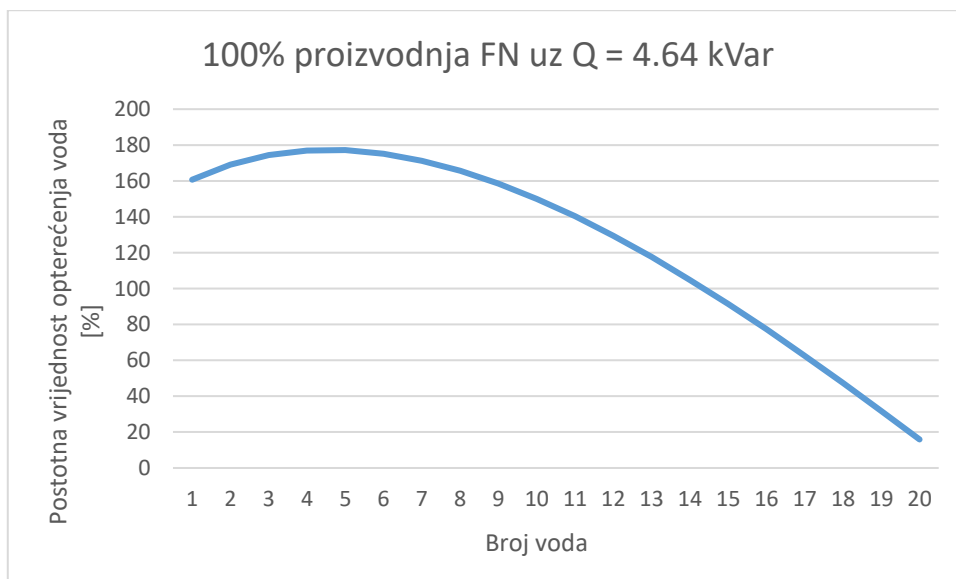
Slika 4.79. Opterećenje vodova pri $Q = 2,44$ kVar (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.80. prikazuje vrijednosti napona na vodovima pri maksimalnoj proizvodnji FN-a i $Q = 3,62$ kVar. Dobiveni naponi su u rasponu od 0,976 p.u. do 1,011 p.u. Javlja se preopterećenje od prvog do četrnaestog voda u rasponu od 104,7 % do 159 %.



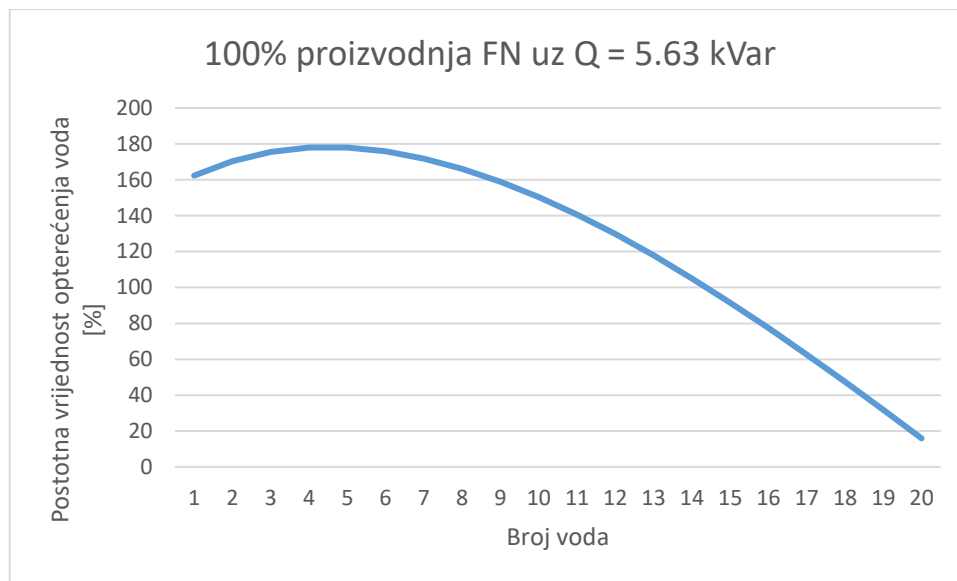
Slika 4.80. Opterećenje vodova pri $\cos \varphi = Q = 3,62$ kVar (maksimalna proizvodnja FN-a)

Na slici 4.81. prikazane su vrijednosti napona na vodovima pri $Q = 4.64$ kVar. Naponi su rasli u rasponu od 0,975 p.u. do 1,01 p.u. Javlja se preopterećenje od prvog do četrnaestog voda u rasponu od 104,9 % do 160,7 %.



Slika 4.81. Opterećenje vodova pri $Q = 4,64$ kVar (maksimalna proizvodnja FN-a)

Slika 4.82. prikazuje vrijednosti napona na vodovima pri $Q = 5.63$ kVar. Dobiveni naponi su u rasponu od 0,975 p.u. do 1,009 p.u. Javlja se preopterećenje od prvog do četrnaestog voda u rasponu od 105,1 % do 162,3 %.



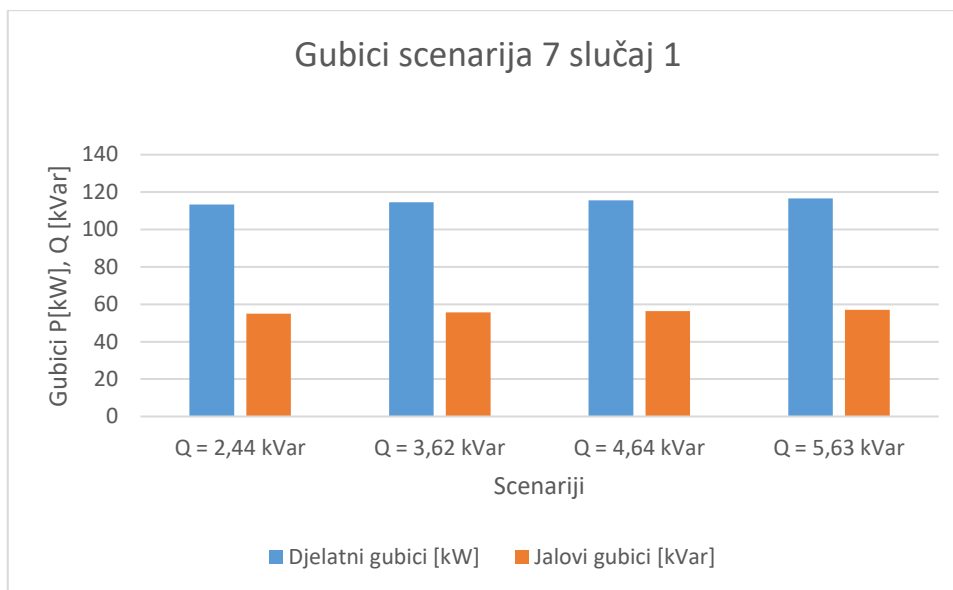
Slika 4.82. Opterećenje vodova pri $Q = 5,63$ kVar (maksimalna proizvodnja FN-a)

Gubici

Tablica 4.13. i slika 4.83. prikazuju djelatne i jalove gubitke Volt-Var metoda pri različitoj vrijednosti kapacitivne jalove snage i maksimalnoj proizvodnji FN-a. Iz rezultata vidljiv je porast gubitaka pri svakom smanjivanju faktora snage zbog jalove snage koja daje i jalovu struju u mrežu i doprinosi ukupnoj struji mreže, a gubici ovise o kvadratu struje. U odnosu na osnovni slučaj 2, gubici su porasli za: 77,39802 kW i 33,01932 kVar

Tablica 4.13. Gubici Volt-Var metoda pri različitoj vrijednosti kapacitivne jalove snage (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Q = 2,44 kVar | Q = 3,62 kVar | Q = 4,64 kVar | Q = 5,63 kVar |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 113,3205 | 114,5354 | 115,6021 | 116,6366 |
| Jalovi gubici [kVar] | 54,92285 | 55,71241 | 56,4098 | 57,08848 |

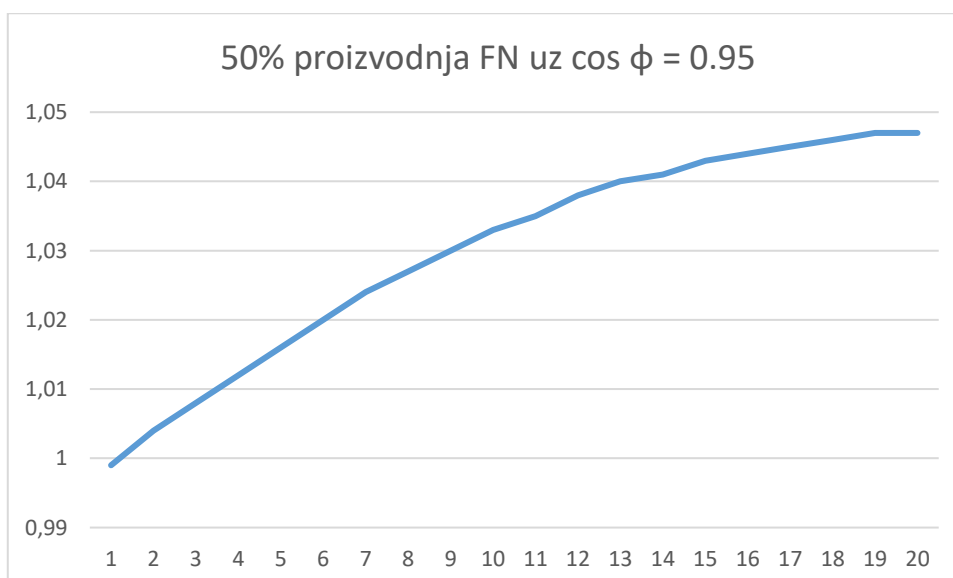


Slika 4.83. Gubici Volt-Var metoda pri različitoj vrijednosti kapacitivne jalove snage (maksimalna proizvodnja FN-a)

4.4.3. Scenarij 6 slučaj 2

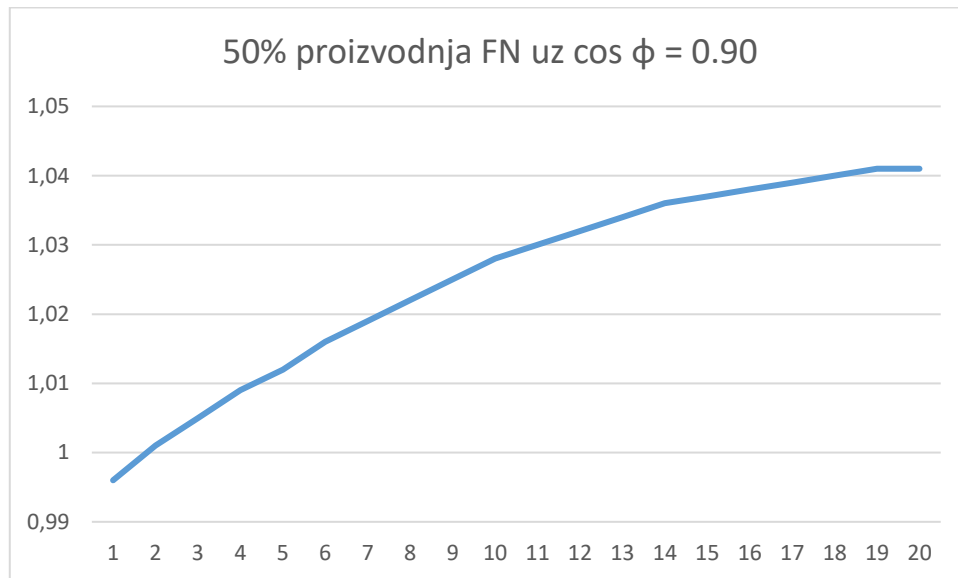
U scenariju se smanjivao faktor snage ($\cos \varphi$) svakom FN-u uz 50 % proizvodnje FN-a. Rezultati su prikazani na sabirnicama jednog izvoda

Slika 4.84. prikazuje vrijednosti napona na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0,95$. Naponi su na svim sabirnicama ostali unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,999 p.u. do 1,047 p.u.



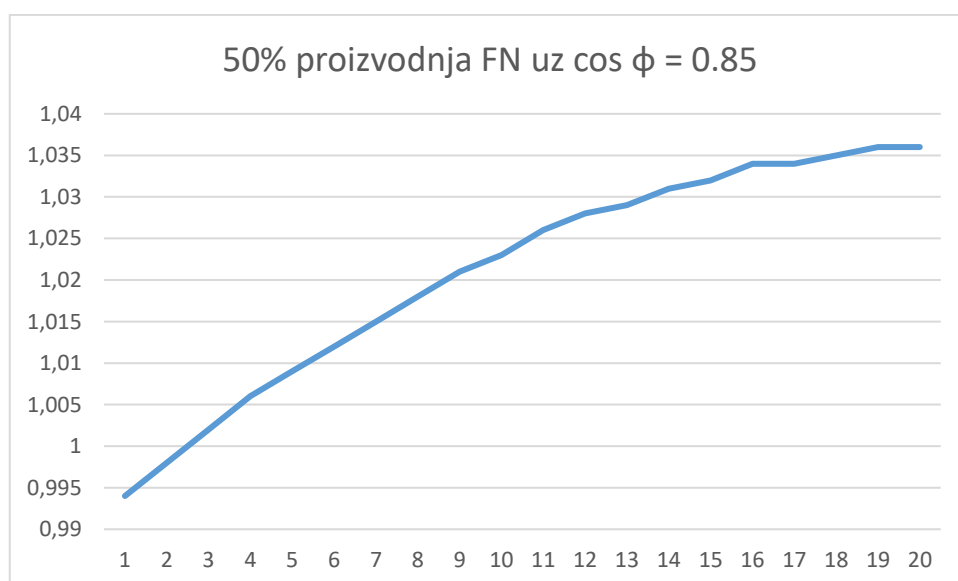
Slika 4.84. Napon na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0,95$ (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.85. prikazane su vrijednosti napona pri $\cos \varphi = 0,90$. Naponi su rasli unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,996 p.u. do 1,041 p.u.



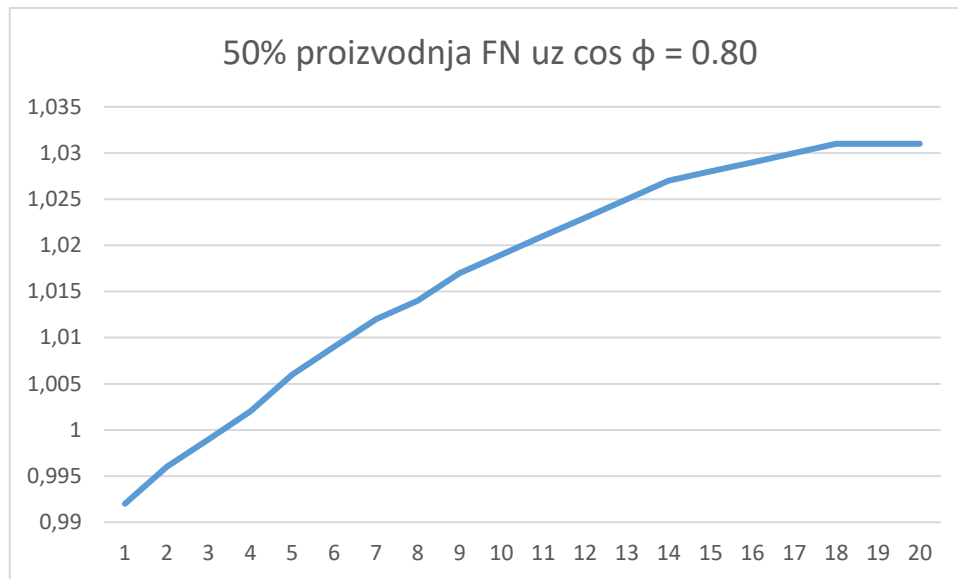
Slika 4.85. Napon na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0,90$ (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.86. prikazuje vrijednosti napona pri $\cos \varphi = 0,85$. Najveća vrijednost napona na najudaljenijoj sabirnici mreže je 1,036 p.u.



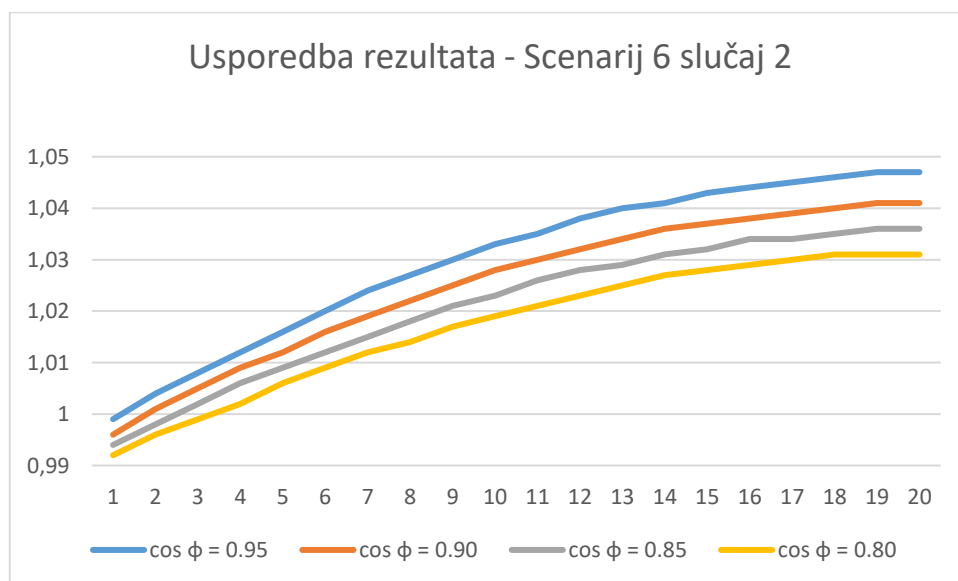
Slika 4.86. Napon na sabirnicama pri $\cos \varphi = 0,85$ (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.87. prikazane su vrijednosti napona pri $\cos \phi = 0,80$. Naponi su na svim sabirnicama ostali unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,992 p.u. do 1,031 p.u.



Slika 4.87. Napon na sabirnicama pri $\cos \phi = 0,80$ (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.88. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 6 slučaja 2. Faktor snage smanjivao se u četiri koraka za 0,05. Iz dobivenih rezultata vidljivo je smanjivanje vrijednosti napona na sabirnicama pri svakom smanjivanju faktora snage. Dobiveni naponi u svakom koraku ostali su unutar dopuštenih granica odstupanja te je samim time regulacija uspješno ostvarena.

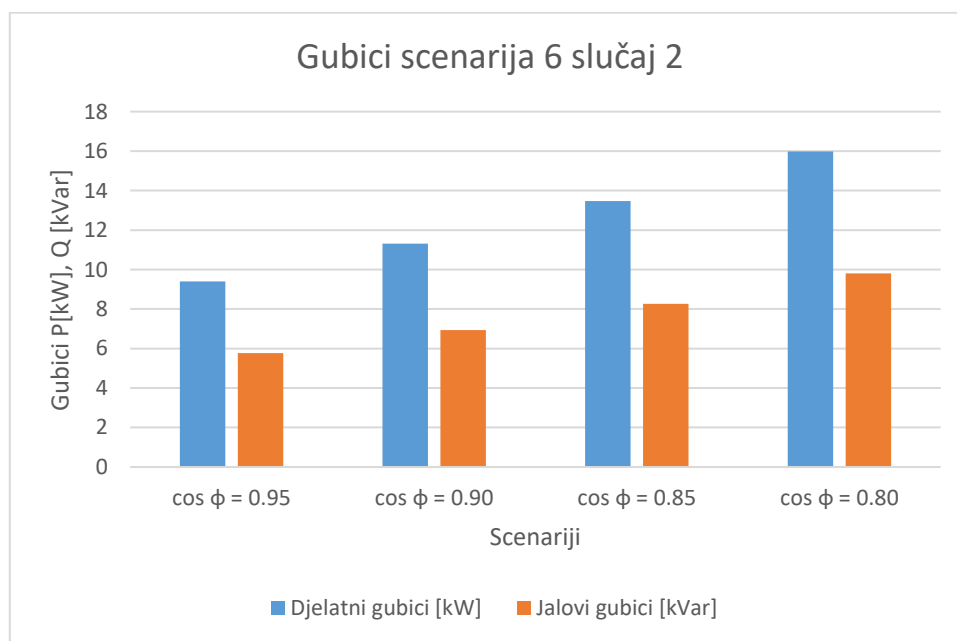


Slika 4.88. Usporedba rezultata – Scenarij 6 slučaj 2

Tablica 4.14. i slika 4.89. prikazuju djelatne i jalove gubitke pri smanjivanju faktora snage svakog FN-a svakog izvoda. Smanjivanjem faktora snage povećava se udio jalove snage u mreži. Zbog povećanja jalove snage i dodatne jalove struje gubici su u mreži porasli. U odnosu na osnovni slučaj gubici su porasli za: 8,60705 kW i 5,27962 kVar

Tablica 4.14. Gubici scenarija smanjivanja faktor snage ($\cos \varphi$) FN-ova (maksimalna proizvodnja FN-a)

| Scenarij | $\cos \varphi = 0.95$ | $\cos \varphi = 0.90$ | $\cos \varphi = 0.85$ | $\cos \varphi = 0.80$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 9,402 | 11,31208 | 13,47236 | 15,98772 |
| Jalovi gubici[kVar] | 5,76724 | 6,93889 | 8,26402 | 9,80696 |

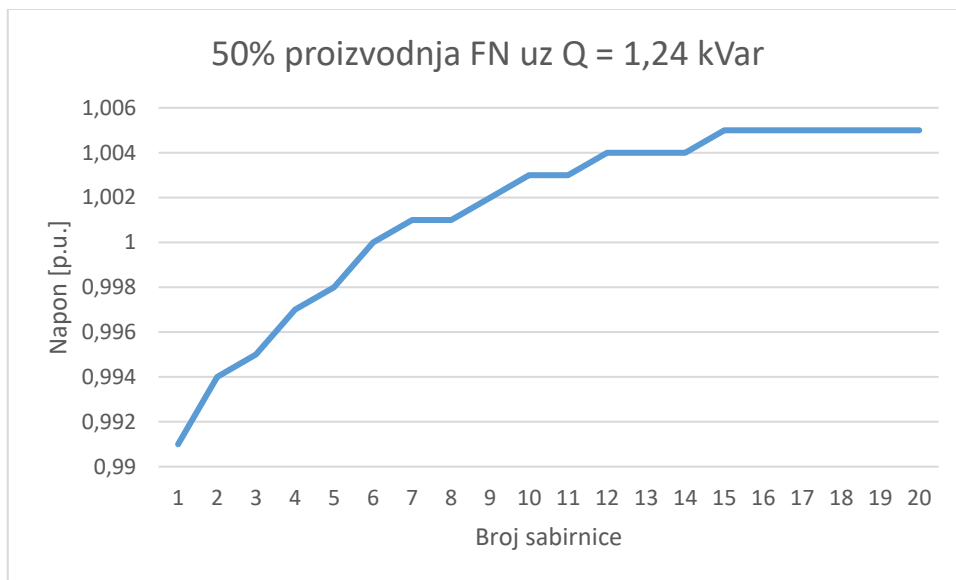


Slika 4.89. Gubici scenarija smanjivanja faktor snage ($\cos \varphi$) FN-ova (50 % proizvodnja FN-a)

4.4.4. Scenarij 7 slučaj 2

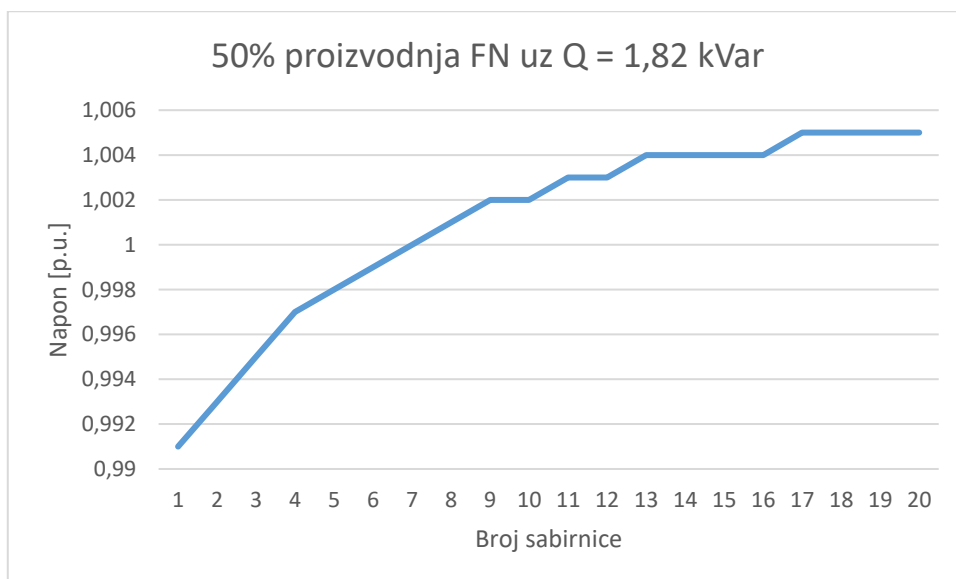
Naponi na sabirnicama

Slika 4.90. prikazuje vrijednosti napona na sabirnicama pri $Q = 1,24$ kVar. Napon je na svim sabirnicama ostao unutar podešenih granica u rasponu od 0,991 p.u. do 1,005 p.u.



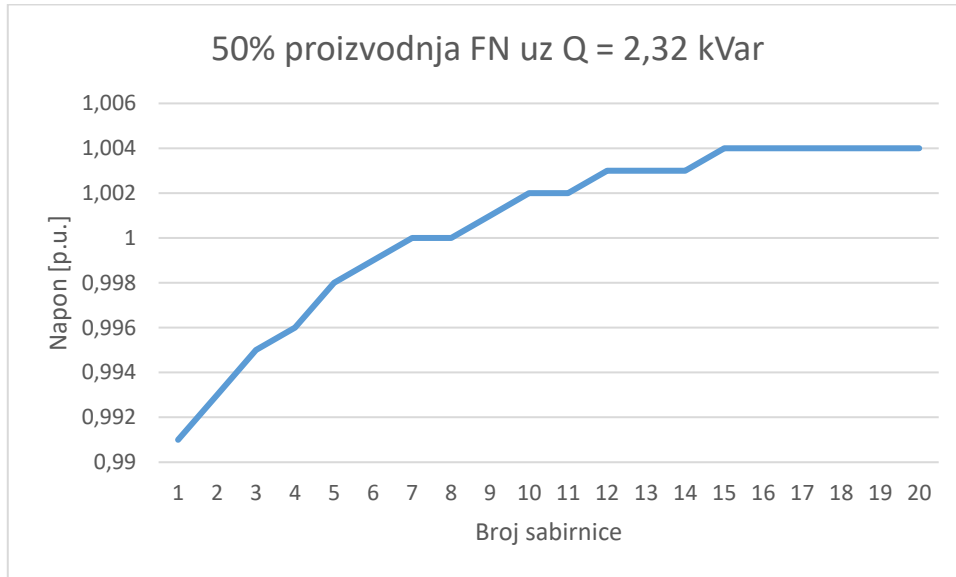
Slika 4.90. Napon na sabirnicama pri $Q = 1,24$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.91. prikazuje vrijednosti napona na sabirnicama pri $Q = 1,82$ kVar. Napon je na svim sabirnicama ostao unutar podešenih granica u rasponu od 0,991 p.u. do 1,005 p.u.



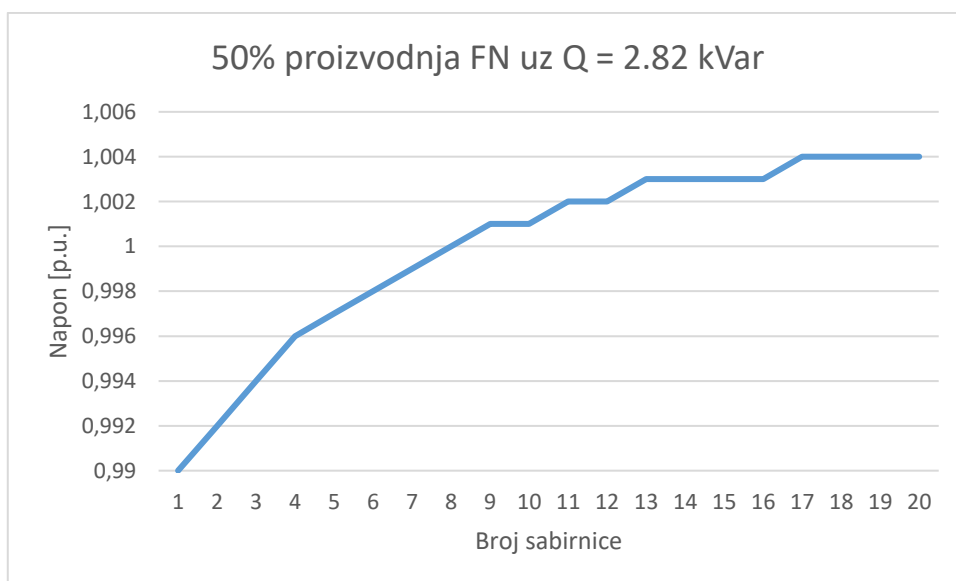
Slika 4.91. Napon na sabirnicama pri $\cos \varphi = Q = 1,82$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.92. prikazane su vrijednosti napona pri $Q = 2,32$ kVar. Napon je na svim sabirnicama rastao unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,991 p.u. do 1,004 p.u.



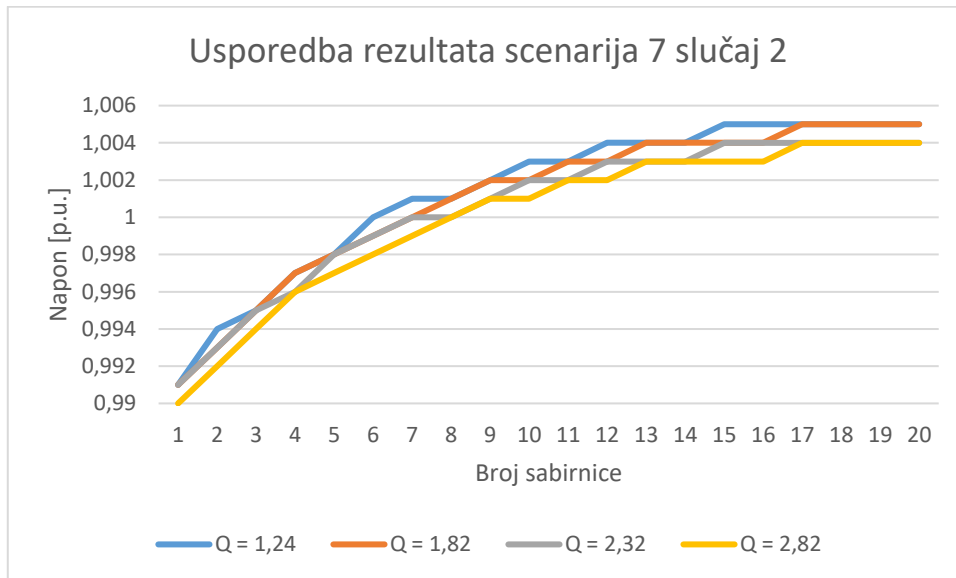
Slika 4.92. Napon na sabirnicama pri $Q = 2,32$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.93. prikazane su vrijednosti napona pri $Q = 2.82$ kVar. Napon je na svim sabirnicama rastao unutar dozvoljenih granica u rasponu od 0,99 p.u. do 1,004 p.u.



Slika 4.93. Napon na sabirnicama $Q = 2.82$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

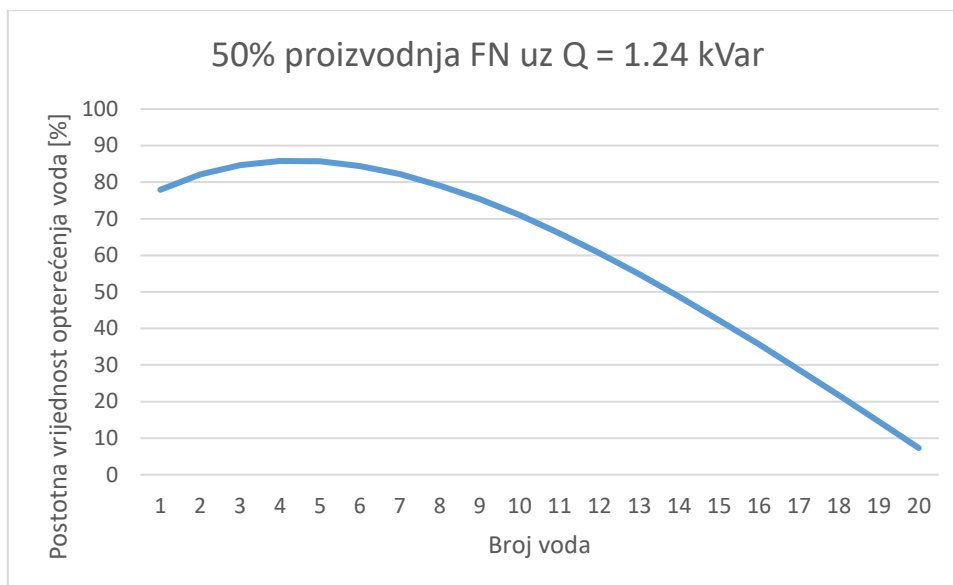
Slika 4.94. prikazuje usporedbu rezultata scenarija 7 slučaja 2. Iz dobivenih rezultata vidljiv je porast vrijednosti napona u svakom scenariju unutar postavljenog raspona napona. Metodom je ostvarena uspješna regulacija.



Slika 4.94. Usporedba rezultata – Scenarij 7 slučaj 2

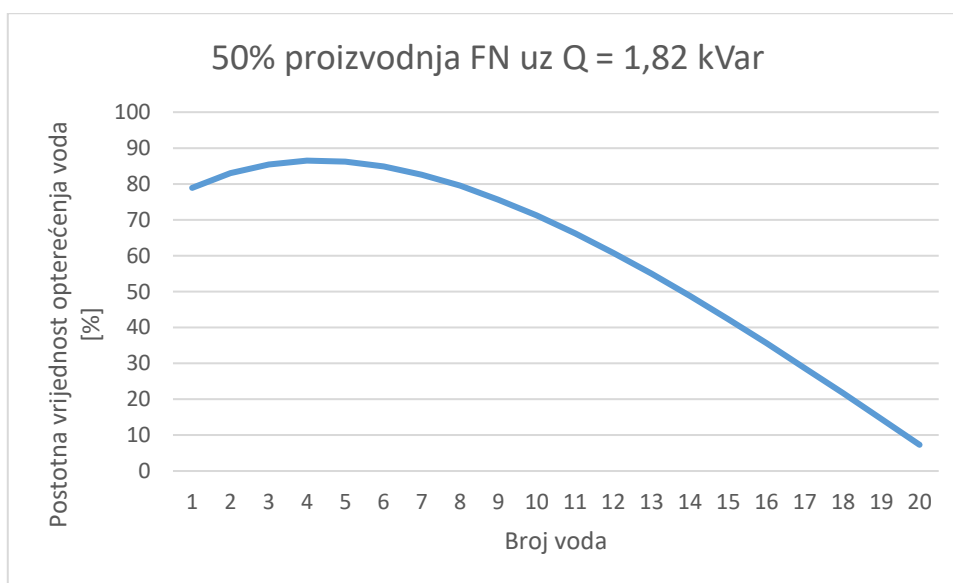
Opterećenje vodova

Na slici 4.95. prikazane su vrijednosti napona na vodovima pri $Q = 1.24$ kVar. Naponi su rasli u rasponu od 0,988 p.u. do 1,005 p.u. Nije došlo do preopterećivanja vodova te su opterećenja u rasponu od 7,3 % do 77,9%.



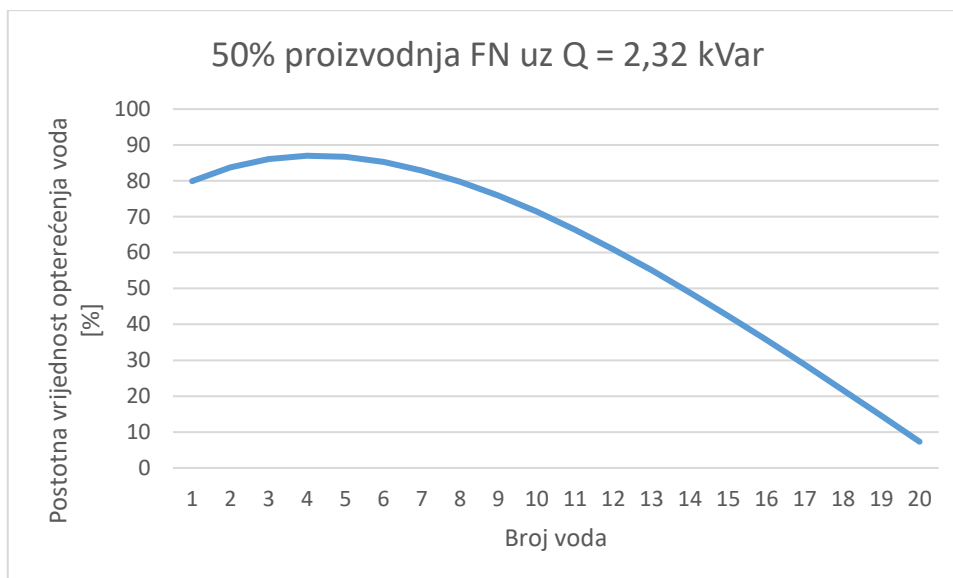
Slika 4.95. Opterećenje vodova pri $Q = 1.24$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.96. prikazuje vrijednosti napona na vodovima pri $Q = 1,82$ kVar. Dobiveni naponi u rasponu su od 0,988 p.u. do 1,005 p.u. Nije došlo do preopterećivanja vodova te su opterećenja u rasponu od 7,3 % do 78,9 %.



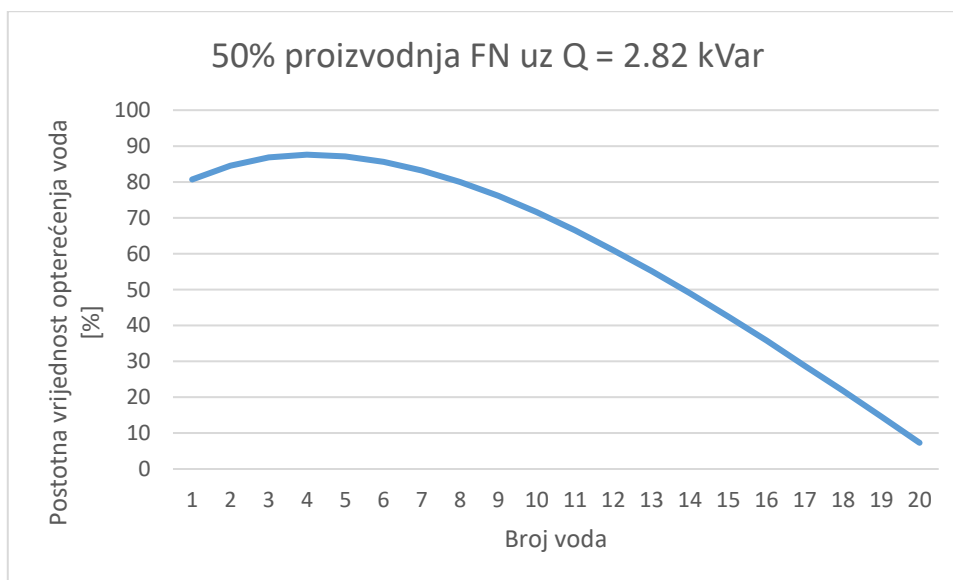
Slika 4.96. Opterećenje vodova pri $Q = 1,82$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Na slici 4.97. prikazane su vrijednosti napona na vodovima pri $Q = 2,32$ kVar. Naponi su rasli u raspon od 0,988 p.u. do 1,004 p.u. Nije došlo do preopterećivanja vodova te su opterećenja u rasponu od 7,3 % do 83,8 %.



Slika 4.97. Opterećenje vodova pri $Q = 2,32$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Slika 4.98. prikazuje vrijednosti napona na vodovima pri $Q = 2.82$ kVar. Dobiveni naponi su u rasponu od 0,988 p.u. do 1,005 p.u. Nije došlo do preopterećivanja vodova te su opterećenja u rasponu od 7,3 % do 80,7%



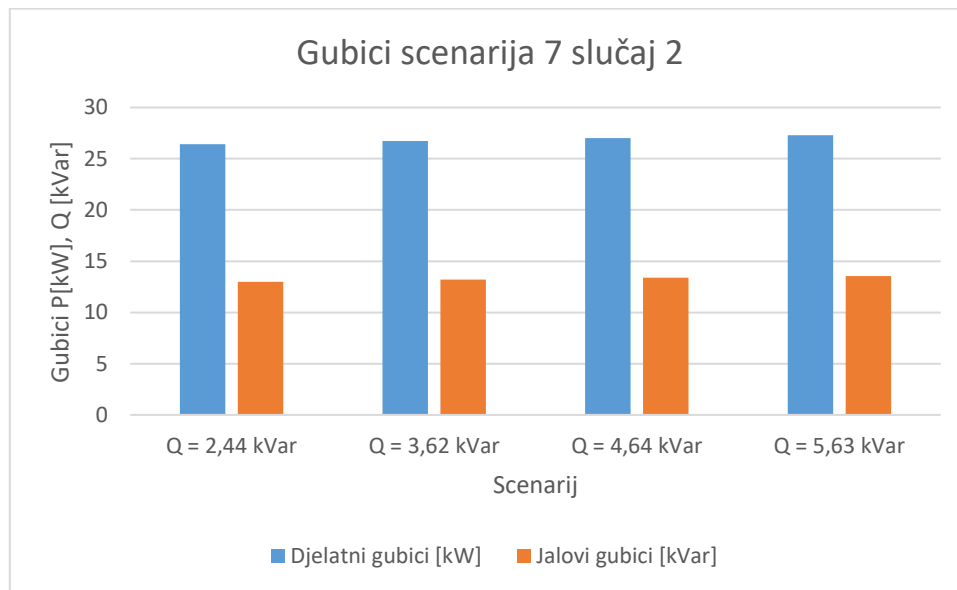
Slika 4.98. Opterećenje vodova pri $Q = 2.82$ kVar (50 % proizvodnja FN-a)

Gubici

Tablica 4.15. i slika 4.99. prikazuju djelatne i jalove gubitke Volt-Var metoda pri različitim vrijednostima kapacitivne jalove snage i 50 % proizvodnje FN-a. Zbog pojave jalove snage i dodatne jalove struje gubici su u mreži porasli. U odnosu na osnovni slučaj 1 gubici su porasli za: 19,89891 kW i 9,03195 kVar

Tablica 4.15. Gubici Volt-Var metoda pri različitoj vrijednosti kapacitivne jalove snage FN-ova (50 % proizvodnja FN-a)

| Scenarij | Q = 1,24 kVar | Q = 1,82 kVar | Q = 2,32 kVar | Q = 2,82 kVar |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Djelatni gubici [kW] | 26,41956 | 26,73431 | 27,01099 | 27,27958 |
| Jalovi gubici [kVar] | 12,99031 | 13,19758 | 13,380711 | 13,55929 |



Slika 4.99. Gubici Volt-Var metoda pri različitom faktoru snage ($\cos \varphi$) FN-ova (50 % proizvodnja FN-a)

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih simulacija utjecaja promjene izlazne djelatne i jalove snage fotonaponskog sustava na napon niskonaponske mreže, FN pretvarači pokazali su se kao učinkovit alat regulacije napona. Upravljanje FN pretvaračima, kako djelatnom tako i jalovom snagom, ima svoje prednosti i nedostatke.

Upravljanje jalovom snagom pokazalo se kao učinkovita metoda za kontrolu napona. Smanjivanjem faktora snage FN pretvarača naponi su rasli unutar dozvoljenih granica. Međutim, svakim daljnjim smanjivanjem faktora snage povećavao se i udio jalove snage u mreži, generirajući dodatnu jalovu struju koja dodatno opterećuje mrežu. Kao rezultat toga, porasli su gubici u mreži. Također Volt-Var metodom uspjela se ostvariti kontrola napona u željenom rasponu. Pretvarač je pri maksimalnoj proizvodnji u scenarijima davao najviše 2,45 kVar kapacitivne jalove snage. Naponi su ostali u dozvoljenim granicama, ali su se pojavila i preopterećenja vodova te su gubici u pojedinim scenarijima porasli i za 100 % u odnosu na osnovni slučaj. Preopterećenjem vodova i povećanjem gubitaka stvaraju se optimizacijski problemi. Najuspješniji rezultati postignuti su pri 50% proizvodnji FN-a kada su naponi i dalje ostajali unutar dozvoljenih granica, ali gubici su i dalje rasli.

Upravljanje djelatnom snagom također se pokazalo kao učinkovita metoda za kontrolu naponskih prilika. Prema dobivenim rezultatima, u scenariju kada se smanjivala djelatna snaga FN-a na zadnjih deset sabirnica, koje su se po osnovnim slučajevima prikazale kritičnima zbog prelaska graničnih vrijednosti napona, regulacija je uspješno provedena u četvrtom koraku kada je napon na svim sabirnicama rastao unutar dozvoljenih granica. Gubici su se pri tome smanjili. Pri smanjivanju proizvodnje FN-a na svim sabirnicama, naponi su već u trećem koraku rasli unutar dozvoljenih granica. Najuspješniji scenariji bili su oni kada se proizvodnja FN-a smanjila prvo na 50 % te zatim dodatno na različitim scenarijima. U tim slučajevima naponi su uvijek bili unutar dozvoljenih granica, a gubici u mreži smanjivali su se. Glavni nedostatak te metode uzrokovanje je nepravедnosti i nezadovoljstva vlasnika FN-a zbog zadiranja u njihovu privatnost.

LITERATURA

- [1] V.Radošević, Utjecaj solarnih elektrana na tokove snage u nesimetričnoj distribucijskoj mreži, HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o., Elektra Zagreb
- [2] Y.Liu, W.Qin, X.Han, P.Wang, Y.Wang, L.Wang, F.Li, Distribution Network Voltage Control by Active Power/Reactive Power Injection from PV Inverters, 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)
- [3] D.Franković, M.Živić Đurović, S.Sladić, Some aspects of implementing grid-connected PV systems, Engineering Review Vol. 31, Issue 2, 71-79, 2011
- [4] D.Gebbran, S.Mhanna, Y.Ma, A.C.Chapman, G.Verbič, Fair coordination of distributed energy resources with Volt-Var control and PV curtailment, Applied Energy 286 (2021) 116546
- [5] H.Ji, C.Wang, P.Li, J.Zhao, G.Song, F.Ding, J.Wu, A centralized-based method to determine the local voltage control strategies of distributed generator operation in active distribution networks, Applied Energy 228 (2018) 2024-2036.
- [6] K.Gholam, Md.R.Islam, Md.M.Rahman, A.Azizivahed, A.Fekih, State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids, Energy Reports 8 (2022) 8630–8651
- [7] P.Luis, L.L.H. Andrew, A.Liebmanm, G.Tack, S.Chakraborty, Reducing the Unfairness of Coordinated Inverter Dispatch in PV-Rich Distribution Networks, Shantanu Chakraborty Faculty of Technology, Policy and Management Delft University of Technology Delft, the Netherlands, 2019 IEEE Milan PowerTech
- [8] X.Su, M.A.S.Masoum, P.J.Wolfs, Optimal PV Inverter Reactive Power Control and Real Power Curtailment to Improve Performance of Unbalanced Four-Wire LV Distribution Networks, IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 5, NO. 3, JULY 2014
- [9] H.Lee, J.C. Kim, S.M.Cho, Optimal Volt–Var Curve Setting of a Smart Inverter for Improving Its Performance in a Distribution System, Received August 10, 2020, accepted August 23, 2020, date of publication August 27, 2020, date of current version September 10, 2020.
- [10] M.Z.Liu, A.T.Procopiou, K.Petrou, L.F.Ochoa, T.Langstaff, J.Harding, J.Theunissen, On the Fairness of PV Curtailment Schemes in Residential Distribution Networks, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 11, NO. 5, SEPTEMBER 2020

- [11] S.Pelka, E.J.L. Chappin, M.Klobasa, L.J, de Vries, Participation of active consumers in the electricity system: Design choices for consumer governance, *Energy Strategy Reviews* 44 (2022) 100992
- [12] Narodne novine – Zakon o tržištu električne energije dostupno na:
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_10_111_1940.html (13.09.2023.)
- [13] M.Dubravac, K.Fekete, D.Topić, M.Barukčić, Voltage Optimization in PV-Rich Distribution Networks – A Review, *Appl. Sci.* 2022, 12, 12426.
- [14] V.Karthikeyan, V.Das, S.Rajasekar, K.Pi, Grid-Connected and Off-Grid Solar Photovoltaic System, Chapter in *Green Energy and Technology* · April 2017
- [15] Mrežna pravila distribucijskog sustava, dostupna na:
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html (15.09.2023.)
- [16] A.Ali, D.Raisz, Sensitivity-based and optimization-based methods for mitigating voltage fluctuation and rise in the presence of PV and PHEVs, Article in *International Transactions on Electrical Energy Systems* · November 2017
- [17] J.Noh, S.Kang, J.Kim, J.W.Park, A Study on Volt-Watt Mode of Smart Inverter to Prevent Voltage Rise with High Penetration of PV System
- [18] I.A.Ibrahim, M.J.Hossain, Low Voltage Distribution Networks Modeling and Unbalanced (Optimal) Power Flow: A Comprehensive Review, Received October 5, 2021, accepted October 13, 2021, date of publication October 15, 2021, date of current version October 26, 2021. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3120803
- [19] J.O. Petinrin, M. Shaaban, Impact of renewable generation on voltage control in distribution systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65 (2016) 770–783
- [20] P.Chaudhary, M. Rizwan, Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: A review, partment of Electrical Engineering, Delhi Technological University, Delhi 110042, India
- [21] Ahmed M.M. Nour , Ahmed Y. Hatata, Ahmed A. Helal , Magdi M. El-Saadawi, Review on voltage-violation mitigation techniques of distribution networks with distributed rooftop PV systems, Review Article, ISSN 1751-8687 Received on 3rd June 2019 Revised 25th September 2019 Accepted on 26th November 2019

[22] V.Kumar, V.R.Teja, M.Singh, S.Mishra, PV Based Off-Grid Charging Station for Electric Vehicle, IFAC PapersOnLine 52-4 (2019) 276–281

[23] DIgSILENT PowerFactory. dostupno na: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (20.06.2023.)

SAŽETAK

Zadatak je ovog diplomskog rada prikazati utjecaj promjene izlazne djelatne/jalove snage fotonaponskog sustava na napon niskonaponske mreže. U radu su prikazane različite literature koje se bave temom regulacije napona niskonaponske mreže. Nakon toga, opisani su aktivni kupci te njihova mogućnost upravljanja naponskim prilikama. Opisane su mogućnosti upravljanja naponskim prilikama pomoću: fotonaponskih pretvarača, upravljanjem potrošnjom, sustavom za pohranu električne energije i pomoću hibridnih sustava. U sljedećem poglavlju, opisana je niskonaponska mreža u kojoj su se provodile simulaciju u DIgSILENT PowerFactory programu. Nakon toga, provedeni su osnovni slučajevi: niskonaponska mreža bez proizvodnje fotonapona, niskonaponska mreža pri 50 % proizvodnje fotonapona i pri maksimalnoj proizvodnji fotonapona. Zatim su provedeni različiti scenariji pri navedenoj proizvodnji fotonapona te je na temelju opisane teorije i dobivenih rezultata izveden zaključak o utjecaju fotonaponskog sustava na napon niskonaponske mreže.

Ključne riječi: Fotonaponski sustav, regulacija napona, distribucijska mreža, FN djelatna snaga, FN jalova snaga

ABSTRACT

The task of this thesis is to demonstrate the impact of changing the output active/reactive power of a photovoltaic system on the voltage of the low-voltage network. The paper presents various sources dealing with the topic of low-voltage network voltage regulation. After that, active consumers and their ability to control voltage conditions are described. The possibilities of managing voltage conditions are: distributed generation, demand side management, energy storage systems and hybrid systems. In the next chapter, the low – voltage network in which simulations are carried out in the DIgSILENT PowerFactory is described. After that, basic cases are examined: a low voltage network without photovoltaic production, a low voltage network with 50% photovoltaic production, and with maximum photovoltaic production. Various scenarios at the specified photovoltaic production levels are analyzed, and based on the described theory and obtained results, a conclusion is made regarding the impact of the photovoltaic system on the low-voltage network voltage.

Keywords: Photovoltaic system, voltage regulation, distribution network, active power, reactive power

ŽIVOTOPIS

Dino Sabljčić rođen je 05. ožujka 2000. u Vukovaru. Završio je Osnovna školu Mitnica Vukovar te nakon osnovne škole upisuje Gimnaziju Vukovar. Gimnaziju završava 2018. godine te upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektrotehnika. Na drugoj godini studija opredjeljuje se za smjer elektroenergetika. Za diplomski studij 2021. godine odabire modul DEA – Elektroenergetski sustavi. Na drugoj godini diplomskog studija sudjelovao je Erasmus+ projektu, studijski boravak četvrtog semestra na fakultetu Polytechnic Institute of Braganca (IPB), Braganca/Portugal. Dobitnik je Dekanovog priznanja za uspješnost u studiranju na diplomskom studiju.