

# Analiza naponske regulacije pomoću vjetroparka metodom udaljene sabirnice

---

**Mašić, Amanda**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:612567>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA NAPONSKE REGULACIJE POMOĆU**  
**VJETROPARKA METODOM UDALJENE SABIRNICE**

**Diplomski rad**

**Amanda Mašić**

**Osijek, 2023.**

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| <b>1. UVOD</b> .....   | 1  |
| <b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....                            | 1  |
| <b>1. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....                                | 2  |
| <b>2. REGULACIJA NAPONA U MREŽI</b> .....                            | 3  |
| <b>3.1. Klasične metode regulacije napona</b> .....                  | 4  |
| <b>3.2. Novije metode regulacije napona prijenosne mreže</b> .....   | 6  |
| <b>4. ULOGA VJETROPARKA U REGULACIJI NAPONA</b> .....                | 8  |
| <b>4.1. Vjetroelektrana – obnovljivi izvor energije</b> .....        | 8  |
| <b>4.3. Načini izvedbe vjetroagregata</b> .....                      | 9  |
| <b>4.6. Primjer kopnenog vjetroparka: Vjetroпарк Ljubač</b> .....    | 13 |
| <b>4.7. Primjer pučinskog vjetroparka: Vjetroпарк Nysted</b> .....   | 14 |
| <b>5. MODEL MREŽE VJETROPARKA I OPIS ANALIZIRANIH PRIMJERA</b> ..... | 15 |
| <b>6. REZULTATI I ANALIZA PRIMJERA</b> .....                         | 18 |
| <b>6.1. Situacija 1</b> .....  | 18 |
| <b>6.1.1. Primjer 1</b> .....  | 18 |
| <b>6.1.2. Primjer 2</b> .....  | 19 |
| <b>6.1.3. Primjer 3</b> .....  | 19 |
| <b>6.1.4. Primjer 4</b> .....  | 20 |
| <b>6.1.5. Primjer 5</b> .....  | 21 |
| <b>6.1.6. Primjer 6</b> .....  | 23 |
| <b>6.2. Situacija 2</b> .....  | 25 |
| <b>6.2.1. Primjer 7</b> .....  | 25 |
| <b>6.2.2. Primjer 8</b> .....  | 25 |
| <b>6.2.3. Primjer 9</b> .....  | 26 |
| <b>6.2.4. Primjer 10</b> .....                                       | 27 |
| <b>6.2.5. Primjer 11</b> .....                                       | 27 |
| <b>6.2.6. Primjer 12</b> .....                                       | 30 |
| <b>6.3. Usporedba gubitaka</b> .....                                 | 32 |
| <b>6.3.1. Gubici pri maksimalnoj potrošnji</b> .....                 | 32 |
| <b>6.3.2. Gubici pri minimalnoj potrošnji</b> .....                  | 33 |
| <b>7. ZAKLJUČAK</b> .....  | 35 |
| <b>LITERATURA</b> .....  | 36 |
| <b>SAŽETAK</b> .....   | 39 |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 39 |
| <b>ŽIVOTOPIS</b> .....   | 41 |

# 1. UVOD

Potreba za električnom energijom u današnje vrijeme neprestano raste te se zbog toga elektroenergetski sustavi (EES) stalno razvijaju. Potrebno je pronaći optimalan način funkcioniranja sustava kako bi se ulaganje u razvoj EES-a isplatilo. Shodno tome, upotreba obnovljivih izvora energije sve je učestalija. Uz hidroelektrane i fotonaponske sustave, jedan od najbrže rastućih obnovljivih izvora energije jesu i vjetroelektrane. To su postrojenja koja koriste vjetar kao izvor energije, pri čemu kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehaničku, a potom u električnu. Vjetroelektrana (VE) ili vjetroпарк (VP) se sastoji od više vjetroagregata (VA), čiji broj može biti i više desetaka. Ovisno o vrsti generatora i pretvarača koji koriste, postoji nekoliko vrsta VA od kojih neke mogu regulirati napon, a neke ne. Sami postupak regulacije napona u VP-u odnosi se na prijenosnu mrežu te se u suvremenom dobu više koriste VE koje imaju mogućnost regulacije napona. Vjetroagregati se dijele prema jačini mehaničke snage te prema brzini vrtnje. Kada se promatra brzina vrtnje, postoje VA s fiksnom brzinom vrtnje, s ograničenom promjenjivom brzinom vrtnje te s promjenjivom brzinom vrtnje pri čemu mogu biti djelomično ili potpuno spojeni na mrežu. Posljednje dvije vrste imaju mogućnost regulacije napona te se oni zbog toga češće i koriste.

Dakle, u ovom radu ukratko je objašnjeno koja je uloga te koji doprinosi VP-a u regulaciji napona. Naglasak je stavljen na vrste regulacija napona, prvo klasične, a onda i modernije. Zatim su pobliže objašnjeni VP, njihova uloga u regulaciji napona, načini izvedbe VA te su dana dva primjera VP-a. Nakon toga, prikazan je model mreže VP-a [1] na kojemu se sam rad bazira i na kojemu su odrađeni različiti primjeri simulacija, koji su blokovski jednostavnije prikazani. Konkretno, na primjeru VP s ukupno 23 VA rađena je regulacija napona pomoću udaljene sabirnice, gdje je VP isprva bio namješten da regulira napone na sabirnicama VP, a zatim da regulira udaljenu sabirnicu Gračac. Cilj je bio pronaći optimalno rješenje za povećanje napona na sabirnici Gračac na način da ga regulira napon VP. Na samom kraju primjeri su opisani i objašnjeni pomoću različitih grafikona te su rezultati svih primjera uspoređeni, nakon čega je izveden zaključak.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Cilj ovog diplomskog rada je na primjeru testne mreže vjetroparka analizirati mogućnost regulacije napona pomoću samog vjetroparka metodom udaljene sabirnice. Za analizu različitih primjera korišten je računalni program PowerWorld Simulator 22 [2].

# 1. PREGLED PODRUČJA TEME

Ovaj diplomski rad zapravo se nastavlja na rad [1], u kojem je autorica opisala čemu služi vjetropark te detaljnije objasnila vjetroagregate. Nakon teorijskog dijela, modelirana je mreža vjetroparka na temelju stvarne mreže te je ispitan utjecaj vjetroparka na napone u točki zajedničkog spoja s mrežom. Ispitivanje je obavljeno bez regulacije napona te kada je regulacija uključena.

U literaturi [3] autori su usporedili detaljan model mreže vjetroparka i predloženi model vjetroparka prikazan jednim generatorom. Također, sve impedancije i susceptancije vodova u mreži vjetroparka nadomještene su ekvivalentnom impedancijom i susceptancijom. Nakon toga, modeli su testirani u svrhu ispitivanja naponske stabilnosti, posebice kada je u pitanju dugoročna stabilnost napona.

Autori u literaturi [4] predlažu metodu upravljanja jalovom snagom u svrhu regulacije naponskih prilika. Metoda se sastoji od koordiniranog upravljanja jalovom snagom iz vjetroagregata Tipa 3 (ili vjetroagregata s dvostruko napajanim asinkronim generatorom) i statičkog VAR kompenzatora. Simulacijski model izrađen je u programskom alatu MATLAB [5].

U literaturi [6] autori su ispitali upravljanje naponskim prilikama u normalnom pogonu i za vrijeme kvara u blizini vjetroelektrane. Uspoređivane su izvedbe dvije različite alternativne metode upravljanja naponskim prilikama korištenjem vjetroagregata Tipa 3 ili s dvostruko napajanim asinkronim generatorom (engl. *DFIG – Doubly-fed Induction Generator*).

Autori u literaturi [7] predlažu upravljanje naponskim prilikama pomoću vjetroagregata Tipa 4 (koji sadrži sinkroni generator s permanentnim magnetima). U ovom slučaju napon se upravlja i održava konstantnim tako da se varijacije u brzini vjetra simuliraju kroz promjenu brzine sinkronog generatora.

## 2. REGULACIJA NAPONA U MREŽI

Potrošnja električne energije u današnjem svijetu znatno je veća od očekivane i život bez nje je nezamisliv, stoga je potrebno neprestano nadograđivati elektroenergetske sustave, praviti nove elektrane te ulagati u njih. Obzirom na to da elektrane stalno nadograđuju u veće kako bi se proizvodilo više električne energije, uz nju se pojavljuje i neizbježna jalova energija. Jalova energija je nepoželjna, jer njezina pojava uzrokuje dodatne gubitke i nestabilnost napona. Međutim, značajno je njeno korištenje u svrhu regulacije naponskih prilika u mreži. Napon u mreži potrebno je održavati što bliže nazivnoj vrijednosti, odnosno najvažnije je održavati naponsku stabilnost i kvalitetu prijenosne mreže. Općenito, na napon u prijenosnoj mreži može se utjecati na više različitih načina. Primjerice, operator prijenosnog sustava (OPS) ima zadatak nadzirati i regulirati napon u prijenosnom sustavu djelovanjem kompenzacijskih uređaja, upotrebom zakretnih transformatora, promjenom prijenosnog omjera regulacijskim transformatorima, proizvodnjom jalove energije te isključivanjem vodova koji su slabo opterećeni. Da bi se EES održao uravnoteženim, OPS koristi sekundarnu regulaciju, tercijarnu regulaciju ili kupnju, odnosno prodaju električne energije. Kako bi se spriječile velike neprilike zbog promjene napona, OPS ugovara i primjenjuje određene mjere kako bi se on regulirao [8] od kojih su neke:

- smanjenje podešene vrijednosti regulatora napona i/ili blokiranje regulatora napona transformatora u prijenosnoj mreži te na sučelju prijenosne i distribucijske mreže,
- rasterećivanje EES-a ručno ili automatski (ovisno o naponu),
- nadziranje rezerve jalove snage,
- vođenje pogona pri ujednačenim najvišim dopuštenim iznosima napona u prijenosnoj mreži,
- vođenje pogona tako da se omogući aktiviranje brzo djelujuće rezerve jalove snage,
- razmatranje smanjenja proizvodnje ili isključenje električki udaljenijih generatora zbog smanjenja opterećenja vrlo opterećenih vodova prijenosne mreže,
- razmatranje smanjenja proizvodnje djelatne snage zbog veće proizvodnje jalove snage
- u najkraćem mogućem roku stavljanje u pogon raspoložive brzo djelujuće proizvodne jedinice,
- razmatranje smanjenja uvoza električne energije iz drugih regulacijskih područja,
- pripremanje za aktiviranje planova ponovne uspostave pogona nakon raspada elektroenergetskog sustava te
- isključivanje optimizacije napona/jalove snage.

### 3.1. Klasične metode regulacije napona

Autori u literaturi [9] objasnili su složenost elektroenergetskog sustava, koja se nalazi u činjenici da se u njemu događaju dinamičke promjene na svim naponskim razinama, pa se stoga razvila primarna, sekundarna i tercijarna regulacija napona. U kontroliranoj mreži napon se održava unutar propisanih granica, a u samom procesu sudjeluju i proizvođači i kupci te preuzimanje jalove snage u propisanim granicama koristi svim korisnicima mreže. Zahtjev za regulacijom jalove snage povezan je s karakteristikama mreže zbog činjenice da utjecaj ubrizgavanja jalove snage u različite razine napona ovisi o kapacitetu kratkog spoja mreže, otporu i vrsti vjetrogeneratora koji se koristi u vjetroelektrani. Klasične metode regulacije napona vrše se npr. pomoću sinkronih kompenzatora, sinkronih generatora, prigušnica, kondenzatorskih baterija te transformatorima, koji su objašnjeni u ovom potpoglavlju.

**Sinkroni kompenzatori** služe za proizvodnju i potrošnju jalove energije. Koriste se većinom za regulaciju napona u mreži prilikom njegovih promjena, a te promjene su većinom male i brze ili velike, pa samim time i sporije. U slučaju malih promjena, automatski regulatori održavaju napon statora što je više moguće konstantnim, odnosno na njegovim podešenim vrijednostima kako bi se spriječile nagle promjene napona. Ako dođe do većih promjena, referentne ulazne veličine se podešavaju.

Regulacija pomoću **sinkronih generatora** odvija se promjenom njihove uzbude, jer se time ograničava regulacija tokova jalove snage i napona u EES-u. Ograničenja tokova uzrokovana su duljinom visokonaponskih vodova ili udaljenošću velikih potrošača. Uzimajući u obzir navedena ograničenja, na generatoru se ne bi trebala povećavati proizvodnja jalove snage, nego bi se kompenzacijom ona trebala izvesti što bliže potrošačima [10].

**Prigušnice** se koriste kao regulatori pri pojavi vrlo visokih (nepoželjnih) napona na visokonaponskim vodovima, a taj napon se pojavljuje zbog niskog opterećenja mreže. One uklanjaju višak jalove snage u mreži, a s obzirom na snagu, mogu biti fiksne ili promjenjive. Promjena jalove snage na prigušnici vrši se pomoću regulacijskih preklopki. Navedena jalova snaga proporcionalna je kvadratu napona te obrnuto proporcionalna induktivitetu prigušnice [11].

Za kompenzaciju jalove energije često se koriste i **kondenzatorske baterije**. Navedena kompenzacija može se odraditi na više načina, tj. može se raditi o fiksnoj, varijabilnoj ili automatskoj regulaciji. U slučaju kada je tok energije u mreži dvosmjernan, nije poželjno koristiti fiksnu regulaciju, zato što bi ona mogla prouzrokovati nepravilnosti kad bi tok energije krenuo u suprotnom smjeru od onog koji je predviđen, a za to su predviđeni kompenzacijski uređaji

[12]. Kondenzatorske baterije funkcioniraju na način da apsorbiraju jalovu snagu iz mreže te tako smanjuju struju koja uzrokuje taj pad napona. Statičke kondenzatorske baterije spajaju paralelno s trošilima kako bi se na taj način smanjile induktivne komponente struje, a povećala vrijednost napona [13].

**Transformatori** su električni uređaji koji nemaju pokretne dijelove, nego međuinuktivno povezuju dva električna strujna kruga izmjenične struje. Služe za pretvorbu izmjenične električne struje zadanog električnog napona u izmjeničnu električnu struju višeg ili nižeg električnog napona [14].

Regulacijski transformatori koriste se kako bi se regulirale spore promjene unutar elektroenergetskog sustava. Izvode se kao jedinice koje imaju odvojene namote ili kao autotransformatori, a predstavljaju jedan od osnovnih dijelova sustava za reguliranje napona i jalove snage. Regulacija se pri tome izvodi kroz promjenu prijenosnog omjera transformatora, koji ima utjecaj na vrijednosti napona i tokove jalovih snaga u sustavu. Regulacijski se transformatori mogu podijeliti prema načinima izvedbe na [10]:

- potrošačke ili distributivne regulacijske transformatore – namijenjeni su smanjenju vrijednosti napona, upotrebljavaju se radi povezivanja razvodnih mreža srednjeg napona s distribucijskim mrežama srednjeg napona, kao i s prijenosnim mrežama vrlo visokog napona i visokog napona, regulator služi kako bi se održala vrijednost napona na sabirnicama nižeg napona
- interkonektivne transformatore – upotrebljavaju se kako bi povezali visokonaponske mreže različitih razina napona, regulator je namijenjen regulaciji jalove snage i njezinoj razmjeni između povezanih mreža,
- generatorske blok transformatore – namijenjene su povezivanju distribucijskih i prijenosnih mreža s proizvodnim jedinicama, regulator je namijenjen regulaciji omjera transformacije i regulaciji uzbudne struje generatora kako bi se podesila proizvodnja jalove snage generatora.

U autotransformatoru se dio snage prenosi uz pomoć induktiviteta, a ostatak energije se prenosi izravno, preko fizičke veze, s primara na sekundar. Ukoliko je srednji izvod transformatora pomičan, tada promjena prijenosnog omjera daje mogućnost regulacije, a s obzirom da se samo dio snage prenosi induktivnim putem, nužan je manji presjek jezgre, što će rezultirati manjim opsegom namota. Zbog manje jezgre je ujedno i količina gubitaka u željezu manja, kao što je i napon kratkog spoja manji jer su namotaji kraći [15].



Transformator s regulacijskom preklopkom koji vrši regulaciju pod opterećenjem, odnosno **OLTC** (engl. *On-Load Tap Changer*) ili "promjenjivač kruga pod opterećenjem", je električni uređaj koji se upotrebljava u transformatorima kako bi se promijenio omjer napona na primarnoj ili sekundarnoj strani transformatora. Ovakav uređaj omogućuje podešavanje omjera napona zbog održavanja stabilnog i željenog izlaznog napona.

OLTC za svoju funkciju ima prilagodbu broja zavoja na transformatorskom namotaju radi postizanja željenog izlaznog napona, što je pogotovo važno u elektroenergetskim sustavima koji zahtijevaju precizan izlazni napon kako bi se održavala kvaliteta napajanja. Ovaj uređaj upotrebljava mehanički sustav za promjenu zavoja transformatorskog namotaja te je moguća njegova aktivacija pod opterećenjem. Prema tome, promjene se mogu napraviti dok transformator radi, što je osobito korisno onda kada je nužno brzo prilagođavanje omjera napona bez isključivanja transformatora. Upravljanje OLTC uređajem je isto tako moguće automatiziranim sustavima radi prilagodbe omjera napona, ovisno o promjenama opterećenja ili o zahtjevima elektroenergetskog sustava, što omogućuje održavanje stabilnog izlaznog napona čak i kod promjenjivih uvjeta opterećenja [16].

Dakle, kod OLTC-a se radi o električnom uređaju koji se koristi u transformatorima za promjenu omjera napona pod opterećenjem radi održavanja stabilnog i željenog izlaznog napona.

### **3.2. Novije metode regulacije napona prijenosne mreže**

U literaturi [12] navedeno je da: „Napon prijenosne mreže od 110 kV ne smije prelaziti opseg od  $\pm 10\%$  od nazivnog napona. Čimbenici koji utječu na naponske prilike u mreži su:

- početni iznosi napona na 110 kV mreži
- regulacija napona na transformatorima 110/x, 35/x i 10(20)/0,4
- postrojenja za kompenzaciju jalove energije
- naponski regulatori u NN mreži
- vrsta vodova u mreži: zračni ili kabelski
- $\cos \varphi$ .

### **FACTS uređaji**

FACTS (engl. *Flexible Alternating Current Transmission System*) uređaji se nazivaju i fleksibilnim izmjeničnim prijenosnim sustavom temeljenom na energetskejoj elektronici.

Spomenuti su uređaji zamijenili sinkrone kompenzatore, a razlog tomu je skupo održavanje i neekonomičnost samih kompenzatora. FACTS uređaji imaju više prednosti, poput:

- regulacije napona,
- regulacije tokova jalove snage,
- kompenzacije nesimetrija,
- povećanja prijenosnog kapaciteta mreže,
- prigušenja njihanja,
- povećanja stabilnosti prijenosa električne energije na veće udaljenosti, te
- povećanja prijenosne moći DV-a [12].

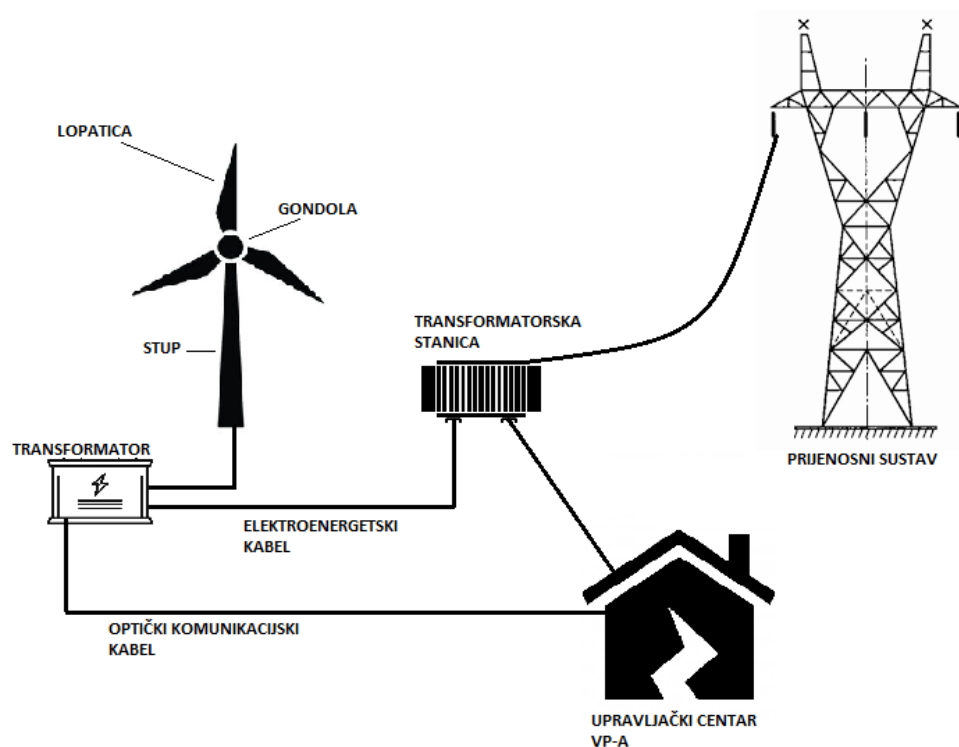
FACTS uređaji mogu imati različite izvedbe s obzirom na kompenzaciju, pa se tako razlikuju:

- uređaji sa serijskom kompenzacijom – obavljaju regulaciju serijskih tokova snaga kod njektiranog napona u serijskom spoju s vodom,
- uređaji s poprečnom ili paralelnom kompenzacijom – obavljaju regulaciju iznosa napona uz pomoć neprestanog injektiranja jalove snage,
- uređaji s kombiniranom kompenzacijom – ovakvi uređaji kombiniraju serijsko-serijsku kompenzaciju ili serijsko-paralelnu kompenzaciju [17].

## 4. ULOGA VJETROPARKA U REGULACIJI NAPONA

### 4.1. Vjetroelektrana – obnovljivi izvor energije

VE se sve više koristi kao izvor energije zbog trajne isplativosti ulaganja te očuvanja okoliša, upravo zbog toga što je vjetar zapravo dostupan svima, potrebno je samo odrediti dobru lokaciju gdje će se VE napraviti, nema otpada koji zagađuje okoliš te proizvođači ne ovise o nabavci različitih materijala (kao npr. u slučaju fosilnih goriva) [18]. U literaturi [19] vjetroelektrane su opisane na sljedeći način: „Vjetroelektrana, energetska postrojenja u kojem se kinetička energija vjetra, s pomoću jedne ili niza vjetrenih turbina s električnim generatorima, pretvara u električnu. U današnje je doba osnova uobičajene konstrukcije vjetroelektrane brzohodna vjetrena turbina s horizontalnom osovinom. Sastoji se od rotora s lopaticama (krilima) i gondole (kućišta) s generatorom i drugom opremom, pričvršćene na vrhu nosivoga stupa uz pomoć okretnoga ležaja.“ Na slici 4.1. prikazan je način spajanja VE na prijenosnu mrežu te njezini dijelovi.



Slika 4.1. Shematski prikaz spajanja VE na prijenosnu mrežu [20]

Dakle, glavni dijelovi vjetroagregata su lopatice, stup te gondola (kućište). Lopatice se mogu izvoditi i s jednim ili s dva krila, no najčešće se koriste one s tri, kako brzina vrtnje ne bi bila prevelika. Rađene su po principu krila zrakoplova te one pretvaraju kinetičku energiju vjetra u mehanički rad. U gondoli, odnosno kućištu se nalazi generator, uz motor za zakretanje same gondole, rashladni sustav, anemometar itd. Generator dobivenu mehaničku energiju vjetra pretvara u električnu. Stup se najčešće izrađuje kao cjevasti, iako može biti i rešetkasti. U njemu se nalazi kontrolna jedinica, stepenice (u nekim slučajevima i lift) te transformator. Taj transformator povezuje vjetroagregat s mrežom, putem elektroenergetskih kabela. Optički komunikacijski kabele služe kako bi povezali VA povežali s upravljačkim centrom. Kasnije se preko TS napon transformira te odlazi u mrežu, tj. prijenosni sustav [20].

#### **4.2. Način rada vjetroelektrana**

Vjetroturbine u vjetroparkovima generiraju električnu energiju, no navedena energija može sadržavati reaktivnu snagu, a zbog viška ili manjka te snage u mreži se javlja nestabilnost napona. Kako bi se mogao održati prihvatljiv raspon napona, nužno je upravljati jalovom snagom u sklopu regulacije napona vjetroparka. Uređaji za kompenzaciju napona mogu brzo i na precizan način apsorbirati ili isporučivati reaktivnu snagu i tako održavati stabilnost napona u VP-u i u električnoj mreži. Kontroliranje ovih uređaja je temeljeno na praćenju napona, kao i na praćenju brzine promjene napona, ali i na prilagođavanju jalove snage zbog održavanja željenog napona. U vjetroparkovima je regulacija napona vrlo važan aspekt održavanja stabilnosti mreže i kvalitete isporučene električne energije, a kao ključan izazov koji se javlja kod regulacije napona u vjetroparkovima je upravo upravljanje jalovom snagom, odnosno komponentom električne snage koja ne čini korisni rad.

U modernim se vjetroparkovima upotrebljavaju napredni algoritmi i sustavi upravljanja kojima se optimizira regulacija napona i jalove snage, a ovi sustavi u obzir mogu uzeti i druge parametre (brzinu vjetra, opterećenje mreže itd.) U vjetroparkovima je regulacija napona kompleksan proces koji traži integraciju različitih komponenti i sustava [21].

#### **4.3. Načini izvedbe vjetroagregata**

Autori u literaturi [22] definirali su vjetroagregate ovako: „Vjetroagregati su rotirajući strojevi koji kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju.“ Vjetroagregati se često kategoriziraju prema snazi koju mogu generirati. Oni koriste napredne tehnologije za povećanje učinkovitosti, kao što su promjenjiva brzina vrtnje lopatica i sustavi regulacije napona. Mogu imati napredne sustave upravljanja i kontrolu kako bi optimizirali performanse i prilagodili se promjenjivim uvjetima vjetra.

Važno je napomenuti da se tehnologija vjetroagregata stalno razvija, a snaga vjetroagregata može varirati ovisno o proizvođaču i modelu.

Postoji nekoliko različitih tipova vjetroagregata, a njihov dizajn i tehnologija se razlikuju ovisno o specifičnim karakteristikama i uvjetima. Najčešći tipovi vjetroagregata su:

- Horizontalna os: tip vjetroagregata s horizontalnom osi rotacije, imaju rotor koji se okreće oko horizontalne osi, usmjeravajući lopatice vjetra.
- Vertikalna os: rotor se okreće oko vertikalne osi, a mogu imati različite oblike, poput uspravnih ili helikopterskih lopatica, te se često koriste za manje razmjere i specifične primjene, često u urbanim okruženjima,
- Darrieusova turbina: tip vjetroagregata s vertikalnom osi rotacije, čije lopatice nalikuju na okomite krugove ili polukrugove koji se nalaze oko središnje osi, a ovaj tip vjetroagregata može biti osjetljiv na promjene smjera vjetra,
- Giromill: vjetroagregat savijajućeg tipa s horizontalnom osi rotacije i lopaticama montiranim okomito na rotor. Pružaju stabilnost, a lopatice se mogu prilagoditi različitim smjerovima vjetra,
- Plutajući vjetroagregati: poseban tip vjetroagregata koji se postavlja na plutajuće platforme, obično u dubokom moru, i omogućuju postavljanje vjetroagregata na područjima koja su udaljena od obale i gdje je voda preduboka za postavljanje klasičnih postolja.

Tehnologija vjetroagregata neprestano se razvija, a novi tipovi ovakvih agregata nastaju kako bi se povećala učinkovitost te smanjili troškovi proizvodnje energije vjetra. Različite vrste vjetroagregata odabiru se ovisno o specifičnim uvjetima lokacije, dostupnoj infrastrukturi i potrebama projekta, ali najčešća izvedba je ona s horizontalnom osi.

Skladištenje energije kod prijenosne mreže vjetroparka također ima važnu funkciju, kako bi se osigurala stabilnost i pouzdanost rada. U vjetroparkovima se energetska skladištenje najčešće vrši putem baterijskih stanica, no odabir i implementacija sustava energetske skladištenja može se razlikovati ovisno o specifičnim potrebama, resursima i uvjetima vjetroparka. Razvoj tehnologija energetske skladištenja i dalje napreduje, otvarajući nove mogućnosti za učinkovito upravljanje energijom u prijenosnoj mreži vjetroparka.

Jedna od najvažnijih odluka u vezi izvedbe vjetroelektrane jest njena lokacija. Da bi VE bile isplative, prosječna brzina vjetra na lokacijama na kojima se grade trebala bi biti minimalno 4,5 m/s, uz uvjet da strujanje vjetra bude stalno, bez turbulencija te da je vjerojatnost naglih olujnih

udara vjetra minimalna. No, u obzir se moraju uzeti i narušavanje ljepota krajolika, utjecaj buke koju stvara okretanje krila prema staništima različitih vrsta ptica te utjecaj štetnog utjecaja na okoliš, iako je on znatno manji od onoga kojega imaju konvencionalne elektrane. VE na kopnu najčešće se nalaze na vrhovima određenih brda ili padina, jer se tako prelaženjem vjetra preko uzvisine može iskoristiti njegovo ubrzanje. Nadalje, priobalne lokacije nalaze se na obali, najčešće na udaljenosti do 3 km od mora te na samom moru, na udaljenosti do 10 km od obale. Takve VE izuzetno su pogodne zbog vjetrova koji nastaju pri različitim zagrijavanjima kopna i mora. Lokacije na moru koje su od kopna udaljene više od 10 km su u prednosti zbog isplativijih vjetrova te zbog manjeg utjecaja na sami izgled krajolika, ali su rjeđe, jer su za njih izgradnja i održavanje znatno skuplji [23].

#### **4.4. Regulacija napona pomoću vjetroagregata**

Kod vjetroagregata je kontrola napona važan aspekt rada zbog osiguranja stabilnog i pouzdanog isporučivanja električne energije u elektroenergetsku mrežu. U vjetroagregatima se provođenje kontrole napona obično obavlja pomoću regulatora snage (koji prilagođava brzinu vrtnje vjetroagregata radi postizanja odgovarajuće izlazne snage) ili regulatora napona (održava konstantan izlazni napon vjetroagregata neovisno o varijacijama vjetra). Regulator napona vjetroagregata prati izlazni napon i uspoređuje isti s određenim referentnim naponom, a ukoliko izlazni napon pređe postavljenu granicu, tada će regulator prilagoditi rad vjetroagregata i na taj način smanjiti napon. U slučaju da je izlazni napon ispod granice, tada će regulator prilagoditi rad vjetroagregata s ciljem povećanja napona. S obzirom na složenost vjetroagregata, provođenje kontrole napona moguće je kroz različite algoritme i strategije, a napredniji vjetroagregati nerijetko upotrebljavaju više razina kontrole, poput primarne, sekundarne i tercijarne regulacije napona. Na taj se način osigurava optimalna kontrola i maksimizira se učinkovitost sustava. Kontroliranje napona predstavlja samo jedan od aspekata cjelokupnog upravljanja vjetroagregatom, a prisutni su i drugi parametri koji se prate i reguliraju, jer se na taj način može osigurati sigurno i optimalno djelovanje vjetroagregata, poput brzine vjetra, opterećenja vjetra, brzine vrtnje lopatica, temperature itd. [24]

Kontroliranje napona uz pomoć vjetroagregata se u pravilu ostvaruje kroz integrirane regulatorne sustave koji prate izlazni napon i koji prilagođavaju rad vjetroagregata, održavajući tako stabilnost napona. Napon se može kontrolirati uz pomoć vjetroagregata na više načina, a to su:

- regulacijom brzine vrtnje - vjetroagregati kontroliraju brzinu vrtnje lopatica radi održavanja stabilnog izlaznog napona, a ukoliko izlazni napon prelazi postavljenu

granicu, tada će regulator smanjiti brzinu vrtnje lopatica i na taj način smanjiti proizvodnju električne energije i smanjiti napon. No, ako je izlazni napon ispod granice, tada će regulator povećati brzinu vrtnje lopatica s ciljem povećanja napona,

- kontrolom trakcije generatora - vjetroagregati upotrebljavaju asinkroni generator ili sinkroni generator koji ima promjenjivu brzinu vrtnje, a kontrola trakcije generatora donosi mogućnost prilagođavanja generatora kako bi se održao stabilan napon, što se realizira mijenjanjem magnetskog polja generatora ili prilagođavanjem parametara generatora i, na taj način, prilagodbom izlaznog napona,
- kompenzacijom reaktivne snage – opremu vjetroagregata mogu činiti uređaji za kompenzaciju reaktivne snage, kao što su kondenzator ili STATCOM, a ovi uređaji upravljaju reaktivnom snagom radi održavanja stabilnog napona, apsorbiraju ili isporučuju reaktivnu snagu sukladno potrebama mreže i pomažu u održavanju željenih naponskih razina,
- naprednom regulacijom napona - moderne vjetroelektrane se koriste naprednim sustavima regulacije napona u kojima se kombinira više algoritama i strategija za optimalnu kontrolu napona, a u obzir se mogu uzeti i drugi parametri poput brzine vjetra, opterećenja mreže i drugih varijabli kako bi se postigla najbolja regulacija napona.

Kontrola napona predstavlja samo jedan od aspekata cjelokupnog upravljanja vjetroagregatima, jer oni također provode kontrolu drugih parametara poput brzine vjetra, opterećenja vjetra, temperature i ostalih faktora kako bi se osigurala sigurnost i optimalno djelovanje vjetroagregata i integracija s elektroenergetskom mrežom.

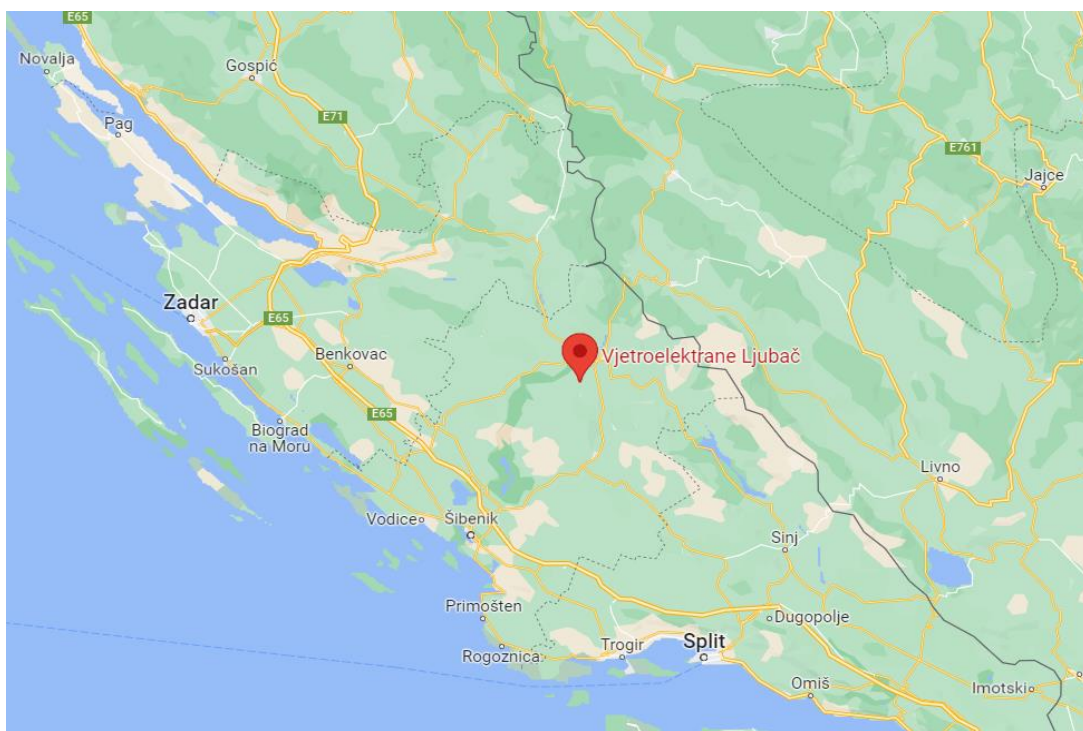
#### **4.5. Tipovi vjetroagregata**

Postoji više vrsta vjetroagregata, čija primjena ovisi o sposobnosti ispunjenja različitih zadataka povezanih s dizajnom i sposobnostima samih strojeva, kao što su upravljanje brzinom, naponom, kontrolom reaktivne snage, ponašanjem tijekom kratkih spojeva i sl. Konkretno, za ovaj rad važno je promotriti one tipove koji imaju mogućnost regulacije naponskih prilika. Prvi koji ima takvu ulogu je vjetroagregat s turbinom Tipa 3, koji je temeljen na DFIG-u, odnosno na indukcijskom generatoru s dvostrukim napajanjem, ali sa djelomičnom pretvorbom snage. Dobra stvar kod ovog tipa su četkice slip prstenova, jer pomoću njih rotor može gotovo trenutno prilagoditi amplitudu i fazu rotorskih struja. Rotor je povezan s mrežom putem „leđa uz leđa“ pretvarača, dok je stator izravno povezan s mrežom. Glavna prednost DFIG-a je što on nudi odvojene kontrole stvarne i reaktivne snage, slično kao u tradicionalnom sinkronom generatoru,

dok može raditi i asinkrono. Iako su dosta skuplji od vjetroturbina Tipa 1 ili 2, VT Tipa 3 koriste se puno češće zbog svojih prednosti. Važna prednost je i ta što reagiraju dovoljno brzo ostavljajući VA pod kontrolom, čak i tijekom značajnih poremećaja u mreži. Vjetroturbina Tipa 4 nudi veliku fleksibilnost u radu zbog pune veze putem pretvarača s mrežom. Obzirom na to da je generator izravno povezan putem pretvarača s mrežom, pretvarač se može podijeliti na dva dijela: pretvarač mrežne strane te pretvarač strojne strane. Temeljem sposobnosti pretvarača za kontrolu aktivne i reaktivne snage, nema ograničenja u izboru generatora. Stoga konfiguracija VT Tipa 4 može sadržavati sljedeće generatore: generator s četkicama slip prstena, kavezni indukcijski generator te sinkroni generator s permanentnim magnetom. Ovisno o generatoru, prijenosnik se može izostaviti iz konfiguracije. Kada bi se on izostavio, brzina vrtnje bi bila znatno niža, ali bi i frekvencija bila niža od frekvencije prijenosne mreže [25][26].

#### **4.6. Primjer kopnenog vjetroparka: Vjetroпарк Ljubač**

Jedan primjer vjetroparka na kopnu je vjetroпарк Ljubač, koji se nalazi u blizini Knina. Vjetroпарк Ljubač započeo je s probnim radom u kolovozu 2021. te je prošle godine, 2022., u travnju i službeno otvoren. Sastoji se od devet vjetroagregata, ukupnog kapaciteta 30 MW. Snage turbina u vjetroparku Ljubač iznose 3,6 MW, sa zajedničkom instaliranom snagom od 32,4 MW. Očekivana godišnja proizvodnja cijelog vjetroparka je 96 GWh električne energije, što je dovoljno za 30 tisuća prosječnih kućanstava, no plan je nadograditi VP da može proizvoditi 170 GWh, kako bi se moglo opskrbljivati i do 50 tisuća kućanstava [27].



*Slika 4.2. Lokacija vjetroelektrane Ljubač [28]*



#### 4.7. Primjer pučinskog vjetroparka: Vjetropark Nysted

Vjetropark Nysted u Danskoj nalazi se južno od otoka Lollanda na istočnom dijelu zemlje. Povezan je s kopnenim prijenosnim sustavom putem svojih visokonaponskih podmorskih i kopnenih kabela duljine otprilike 50 km. Sastoji se od 72 vjetroagregata ukupne snage 165 MW. Tijekom ozbiljnih kvarova mreže, njegovi vjetroagregati mogu smanjiti generiranu aktivnu snagu na 20% od nazivne snage u manje od 2 s. Kada se uspostavi napon, normalna proizvodnja električne energije mora se ponovno uspostaviti u roku od 30 s. VP Nysted pušten je u rad bez gromobranskih zaštitnih uređaja u visokonaponskim kabelskim sustavima, kako bi se izbjegla prisilna aktivacija takvih gromobranskih aparata, što bi priobalnim vjetroelektranama izazvalo kratkospojni kvar s rizikom od prekida. Upotreba gromobranskih aparata može uvesti dodatna ograničenja na raspon napona na priobalnoj platformi, što zahtijeva učinkovitiju kontrolu jalove snage i napona od velikih priobalnih vjetroelektrana prema kopnenim prijenosnim sustavima. U slučaju kvara, vjetroagregati nastavljaju s radom sa smanjenom mehaničkom snagom sve dok se napon mreže ne oporavi [29].



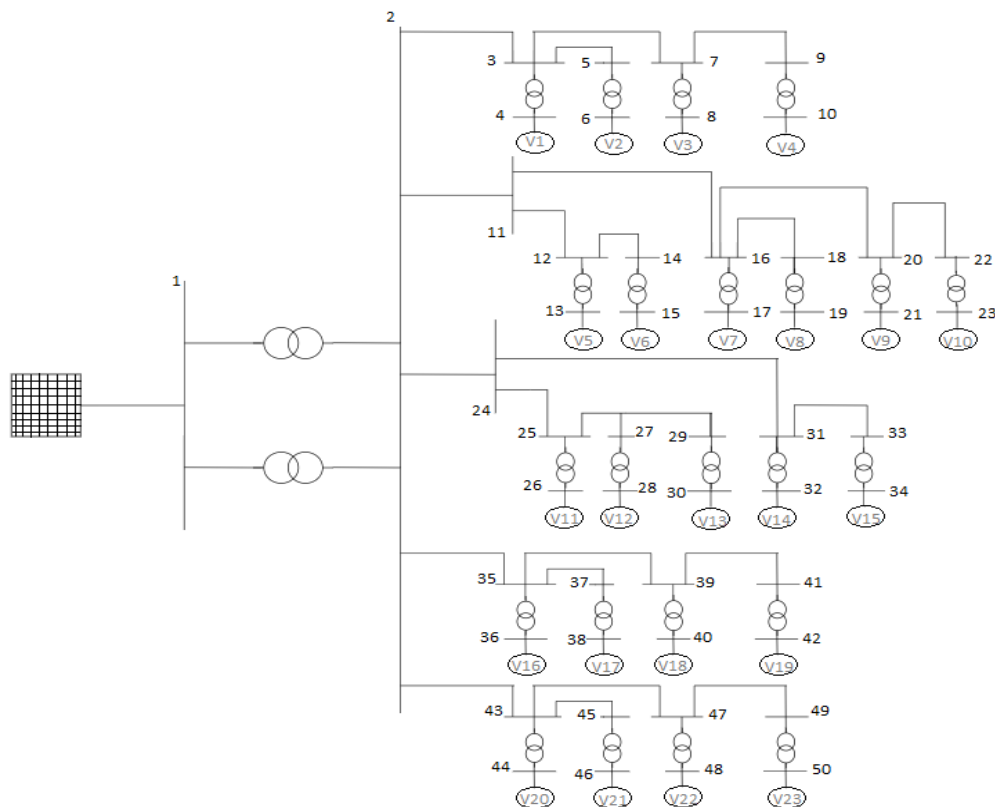
*Slika 4.3. Vjetropark Nysted [30]*

## 5. MODEL MREŽE VJETROPARKA I OPIS ANALIZIRANIH PRIMJERA

U idućem poglavlju pobliže je objašnjen i shematski prikazan model mreže VP. Nakon danog modela, svi odrađeni primjeri blokovski su prikazani, kako bi bili pregledniji te su ukratko opisani.

### 5.1. Model mreže vjetroparka

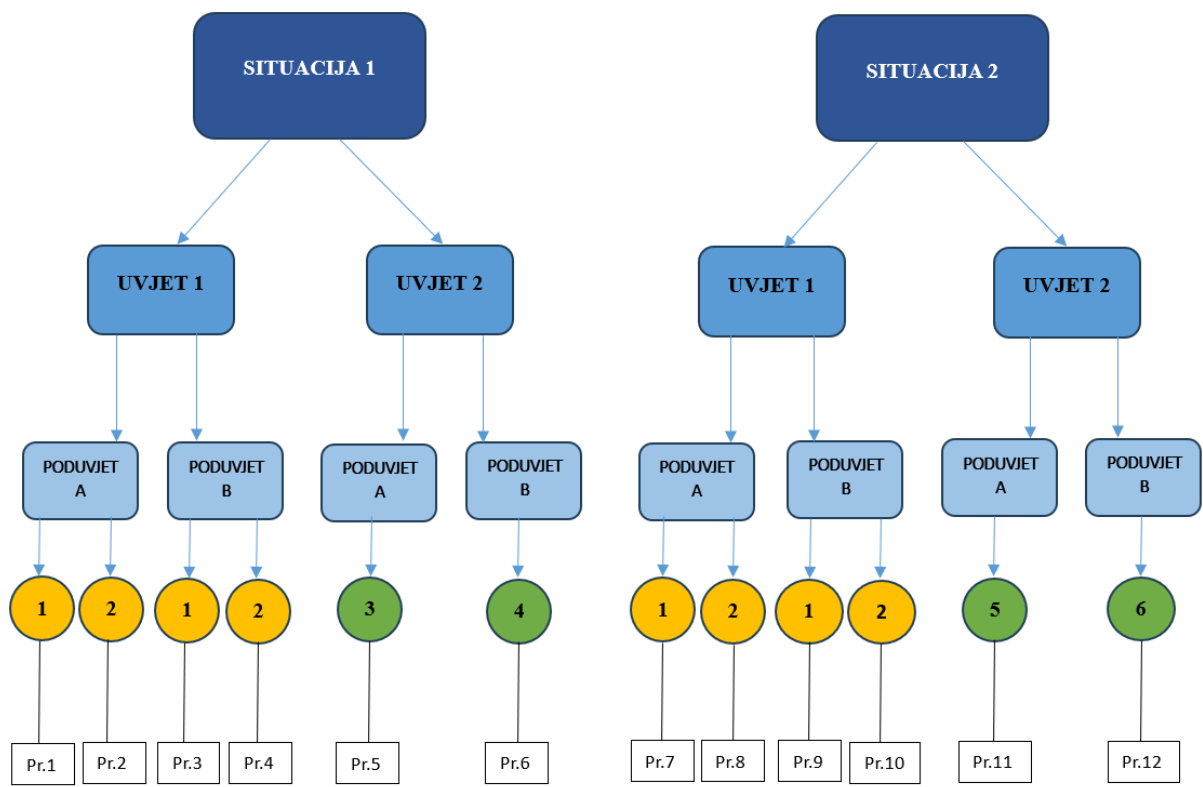
Mreža na kojoj se zasniva model koji je korišten u ovom radu je iz rada [1] u kojem je autorica dala pregled utjecaja VP-a na prijenosni sustav. Navedeni VP sastoji se od 23 vjetroagregata snage 4,2 MW, koji imaju promjer rotora 150 m. Nazivni napon iznosi 33 kV te je potpuni prijenos električne energije moguć. Vjetroagregati su kabelima spojeni preko dva paralelna transformatora čija je nazivna snaga 63 MVA. Utjecaj VP-a i njegova isplativost promatrani su uz pomoć detaljnog modela te uz pomoć generatora kojim je on modeliran. Za simulaciju je u oba rada korišten program PowerWorld Simulator 22 [2]. Obzirom na to da se regulacija u ovom radu proučava pomoću vjetroparka metodom udaljene sabirnice, detaljnije je proučavan samo dio mreže na kojemu se to konkretno nalazi. Model dijela mreže koji je ključan za simulaciju prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1. Shematski prikaz modela korištene mreže VP-a [1]

## 5.2. Opis analiziranih primjera

Prve kombinacije odnosile su se na reguliranje napona samog VP-a, a druge na to kada VP regulira napon sabirnice Gračac. Simulacije na modelu odrađene su u 12 primjera, jer je svaki primjer odrađen i pri maksimalnoj i pri minimalnoj potrošnji. Kako bi se primjeri lakše shvatili, shematski su prikazani na slici 6. **Situacija 1** označava sustav s maksimalnom potrošnjom, a **situacija 2** sustav s minimalnom potrošnjom. **Uvjet 1** predstavlja regulaciju samog vjetroparka, odnosno tada generatori ne reguliraju udaljenu sabirnicu Gračac, nego samo sebe. **Uvjet 2** predstavlja regulaciju udaljene sabirnice Gračac, tj. svi generatori iz VP-a reguliraju napon na spomenutoj sabirnici. **Poduvjet A** znači da su generatori postavljeni da rade uz 100% proizvodnje. **Poduvjet B** znači da je proizvodnja smanjena na 50%. Nadalje, **žuti kružić s brojem 1** označava da je napon generatora postavljen na 1,05 p.u., dok **žuti kružić s brojem 2** predstavlja napon postavljen na 1,1 p.u. **Zeleni kružići s brojevima 3, 4, 5 i 6** predstavljaju zasebne slučajeve u kojima se promjenom napona na generatorima VP-a pokušalo regulirati napon na Gračacu do onog optimalnog. Dakle, *Primjer 1* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,05 p.u., u situaciji 1 (pri maksimalnoj potrošnji), uz uvjet 1 (da VP regulira samo sebe) te poduvjet A (da radi pri maksimalnoj proizvodnji). *Primjer 2* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,1 p.u., u situaciji 1, uz uvjet 1 te poduvjet B (kada je proizvodnja smanjena na 50%). *Primjer 3* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,05 p.u., u situaciji 1, uz uvjet 1 te poduvjet A. *Primjer 4* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,1 p.u., u situaciji 1, uz uvjet 1 te poduvjet B. *Primjer 5* predstavlja sustav u situaciji 1, uz uvjet 2 (kada VP regulira udaljenu sabirnicu Gračac) te poduvjet A, dok se naponi na generatorima VP-a mijenjaju dok se ne dođe do optimalnog. *Primjer 6* predstavlja sustav u situaciji 1, uz uvjet 2 te poduvjet B, dok se naponi na generatorima VP-a također mijenjaju sve dok se ne dođe do napona na Gračacu koji je optimalnog. *Primjer 7* predstavlja sustav u situaciji 2 (pri minimalnoj potrošnji), kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,05 p.u., uz uvjet 1 te poduvjet A. *Primjer 8* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,1 p.u., u situaciji 2, uz uvjet 1 te poduvjet A. *Primjer 9* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,05 p.u., u situaciji 2, uz uvjet 1 te poduvjet B. *Primjer 10* predstavlja sustav kada je napon na svim generatorima postavljen na 1,1 p.u., u situaciji 2, uz uvjet 1 te poduvjet B. *Primjer 11* predstavlja sustav u situaciji 2, uz uvjet 2 te poduvjet A, dok se naponi na generatorima VP-a podešavaju dok se ne dođe do optimalnog. *Primjer 12* predstavlja sustav u situaciji 2, uz uvjet 2 te poduvjet B, dok se naponi na generatorima VP-a ponovno mijenjaju kako bi se došlo do onog koji je optimalan.



Slika 5.2. Postupak provedbe simulacije

## 6. REZULTATI I ANALIZA PRIMJERA

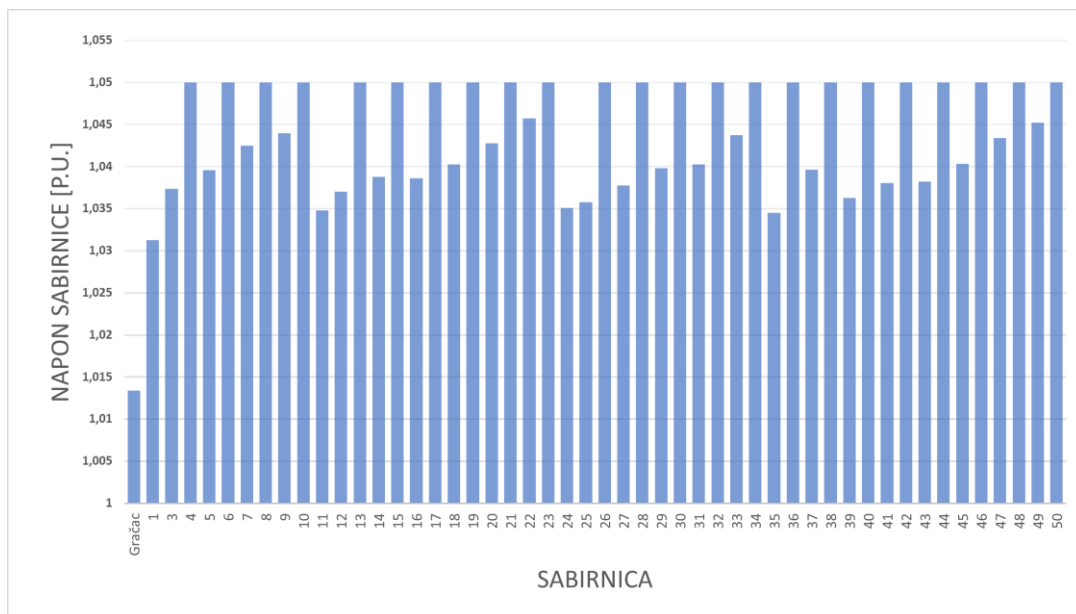
U idućem poglavlju konkretni primjeri su detaljnije prikazani i objašnjeni. Naglasak je stavljen na promatranje napona te gubitaka u vjetroparku. Dobiveni rezultati prikazani su pomoću grafikona i tablica rađenih u programskom alatu Excel te su na kraju uspoređeni.

### 6.1. Situacija 1

Situacija 1 odnosi se na simulacije koje su rađene pri maksimalnoj potrošnji i različitim uvjetima te poduvjetima. Uvjet 1 prema kojemu je rađeno predstavlja regulaciju samog VP, a uvjet 2 prikazuje kako VP regulira napon na sabirnici Gračac. Poduvjet A znači da je proizvodnja maksimalna, a poduvjet B da je smanjena na 50%. Primjeri su odrađeni za napon 1,05 p.u., 1,1 p.u., a u slučaju kada se regulira Gračac, tražen je optimalan napon.

#### 6.1.1. Primjer 1

Za prvi primjer obavljena je situacija 1 uz uvjet 1 i poduvjet A te uz napon svih generatora namještenih na 1,05 p.u. Naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani su na slici 6.1.

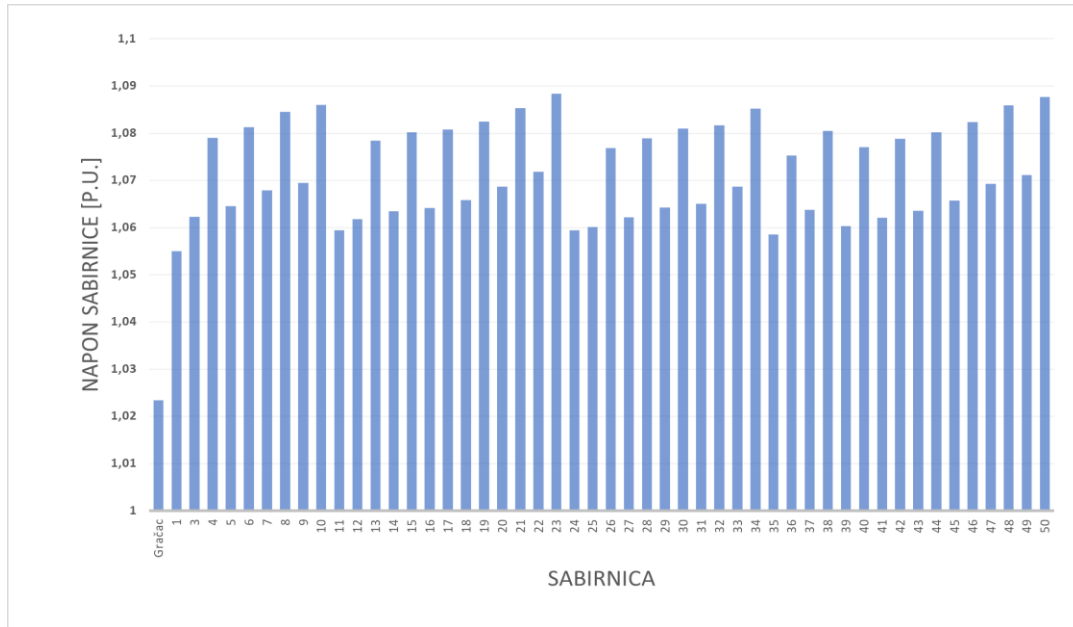


Slika 6.1. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

Generatori reguliraju svoju sabirnicu te je svaki uspio svoju sabirnicu izregulirati, ali zbog padova napona na elementima mreže normalno je da je na Gračacu napon snižen. Na sabirnicama na kojima nisu povezani vjetroagregati napon je također snižen, što je i očekivano.

### 6.1.2. Primjer 2

U drugom primjeru situacija 1 obavljena je također uz uvjet 1 i poduvjet A, ali je sada napon svih generatora namješten na 1,1 p.u. Naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani su na slici 6.2.

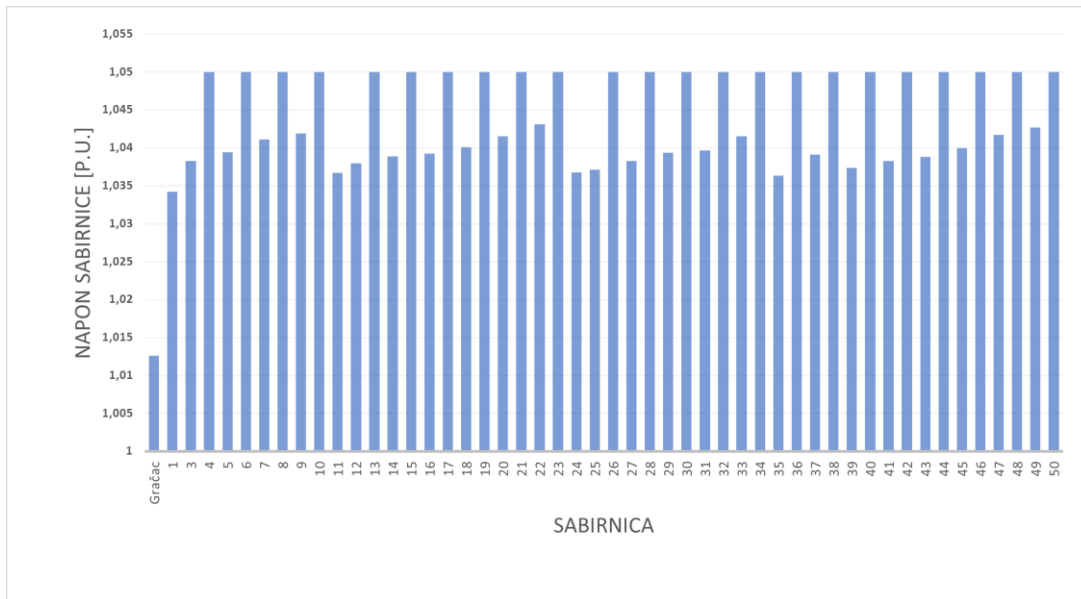


Slika 6.2. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

Iz grafikona se da iščitati da niti jedan generator nije uspio podići napon na svojoj sabirnici na 1,1 p.u. , jer generatori nemaju mogućnost dati toliko jalove snage u mrežu da bi napon bio 1,1 p.u. Sabirnica Gračac ponovno je dosta nižeg napona, zbog padova napona na elementima mreže te jer VA i u ovom slučaju samo sebe reguliraju.

### 6.1.3. Primjer 3

U trećem je primjeru predstavljena je situacija 1 uz uvjet 1, ali poduvjet B, gdje je proizvodnja namještena na 50%. Napon svih generatora namješten je ponovno na 1,05 p.u., a naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani su na slici 6.3.

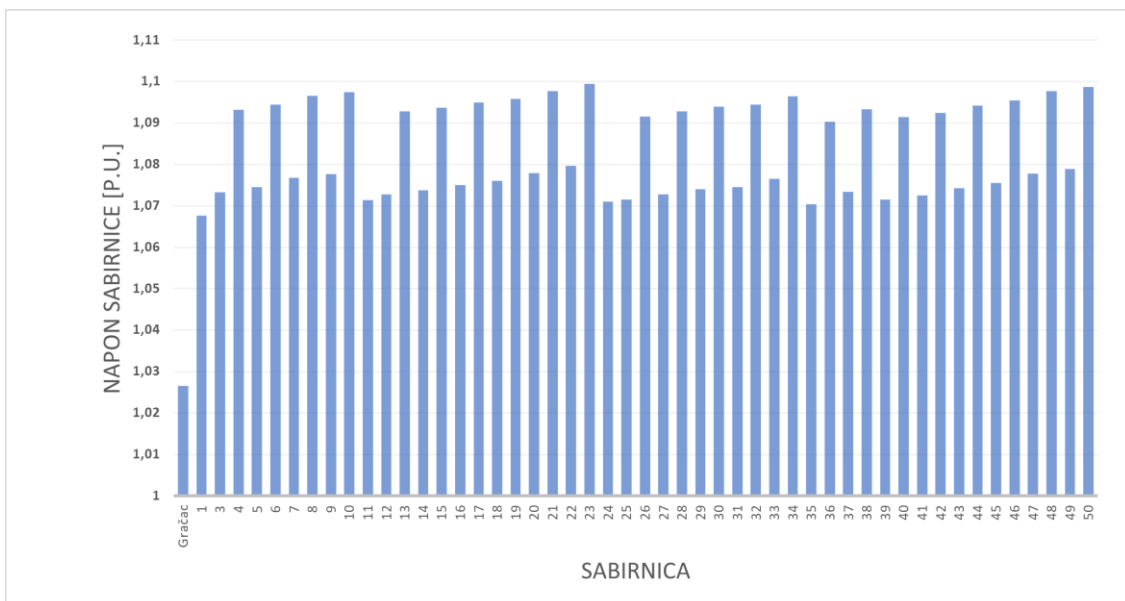


Slika 6.3. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

U petom primjeru su svi generatori uspjeli postići željenih 1,05 p.u. Napon sabirnice Gračac je viši i u ovom slučaju iznosi 1,013 p.u.

#### 6.1.4. Primjer 4

U četvrtom primjeru situacija 1 odrađena je uz uvjet 1 i poduvjet B, dok je napon svih generatora sada namješten na 1,1 p.u. Naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani su na slici 6.4.

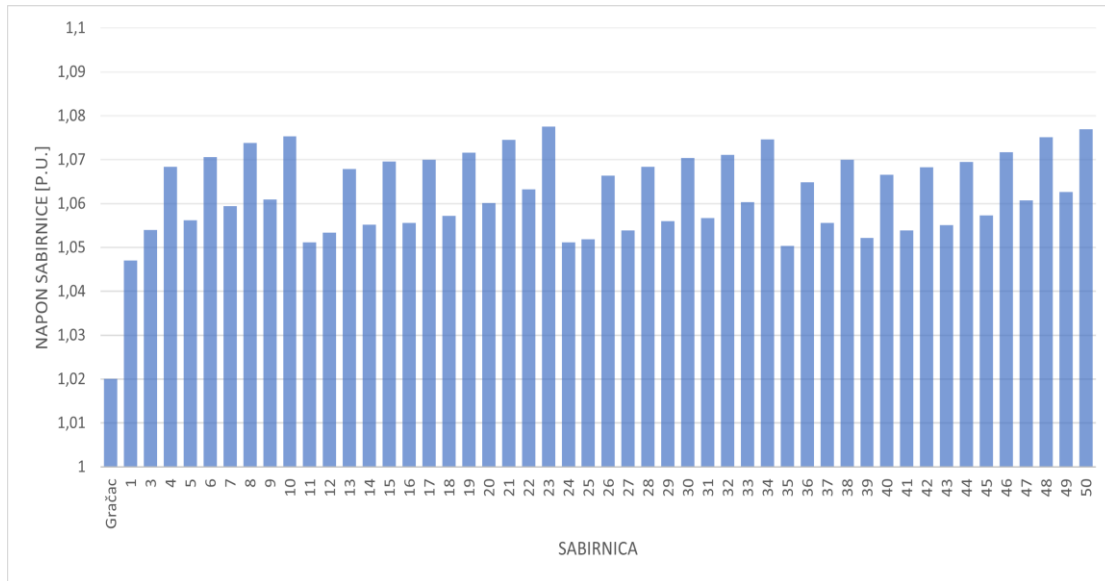


Slika 6.4. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

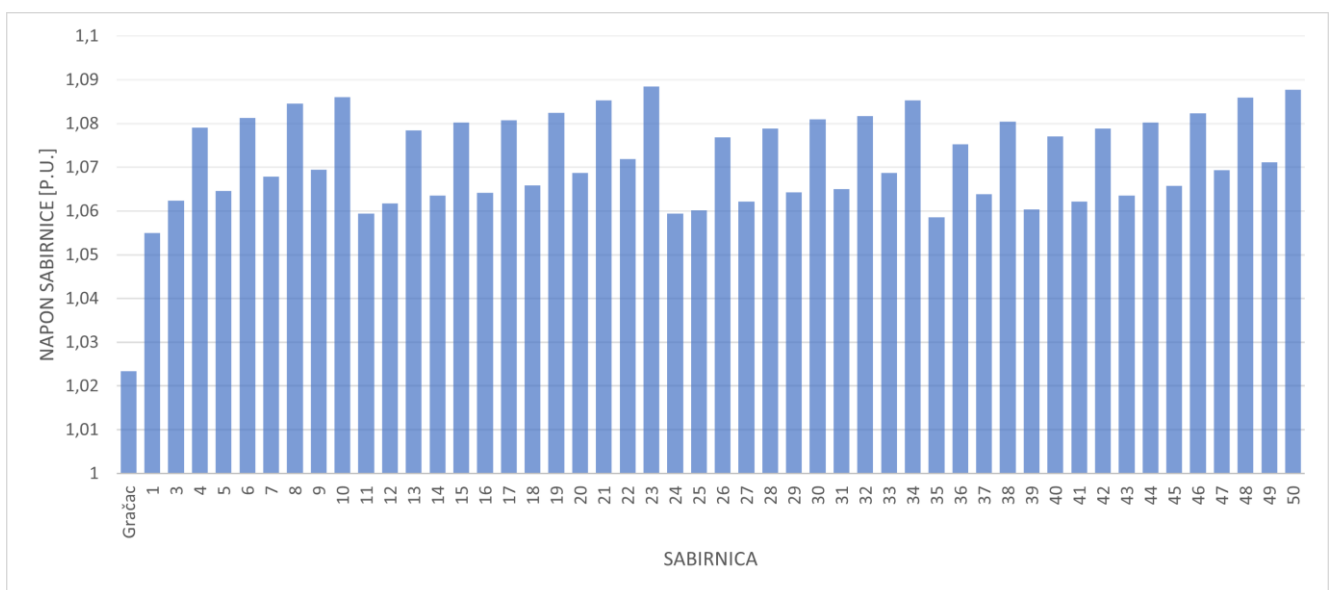
Na grafikonu se vidi da ni jedan VA nije uspio postići željeni napon, iako su više postigli nego u ostalim slučajevima. Na Gračacu je napon 1,027 p.u.

### 6.1.5. Primjer 5

U petom primjeru rađena je situacija 1 pri uvjetu 2 i poduvjetu A, a u njemu se nastojalo regulacijom napona postići onaj napon koji je optimalan. Na slikama 6.5. i 6.6. prikazani su naponi na sabirnicama VP-a te na sabirnici Gračac dok je napon VP-a postavljen na 1,02 te na 1,025 p.u.



Slika 6.5. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu na 1,02 p.u.



Slika 6.6. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu na 1,025 p.u.

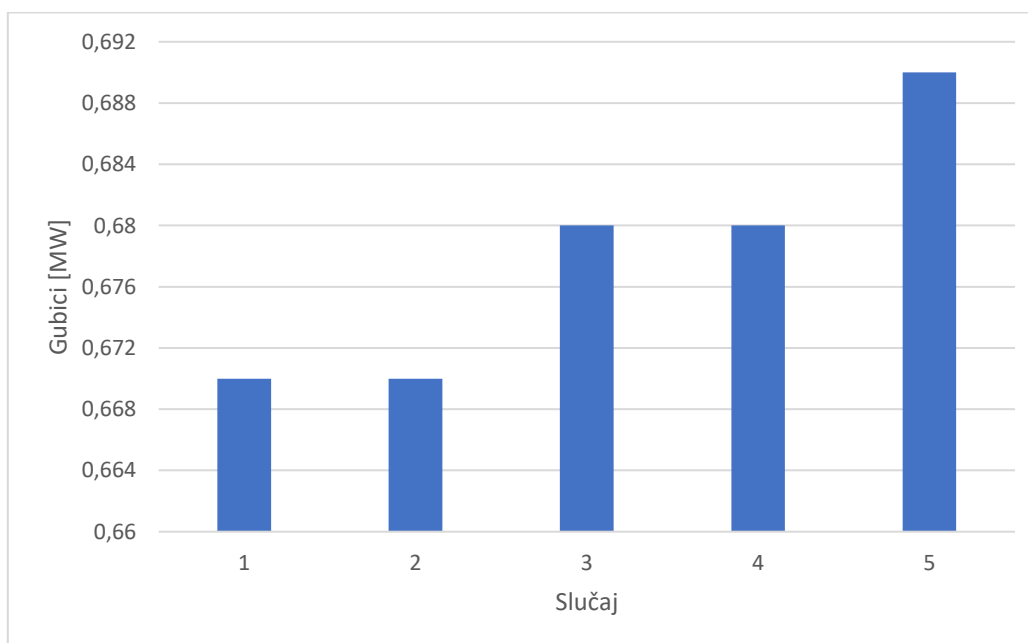


U tablici 6.1. prikazani su svi naponi na sabirnicama VA na koje su postavljeni te naponi na sabirnici Gračac, na koje napone ih je VA uspio podići.

*Tablica 6.1. Prikaz napona na koje su VA postavljeni te napona na koje je VP uspio izregulirati udaljenu sabirnicu Gračac*

| <b>Napon na sabirnicama VA i na Gračacu [p.u.]</b> |               |
|--|---------------|
| <b>VA</b>  | <b>Gračac</b> |
| 1,02000  | 1,02002       |
| 1,02200  | 1,02200       |
| 1,02350  | 1,02343       |
| 1,02500  | 1,02341       |
| 1,03000  | 1,02343       |

U slučaju kada je napon VA postavljen na 1,02 p.u., napon na sabirnici Gračac je također 1,02, odnosno VA je uspješno regulirao napon na Gračacu. Kada se napon VA poveća na 1,022, napon na Gračacu ponovno je uspješno reguliran na 1,02 p.u. Povećavanjem napona VA na 1,0235 p.u., napon na Gračacu dostigne napon od 1,02343 p.u., što znači da je VA izregulirao Gračac do malo nižeg napona od očekivanog. Nadalje, povećavanjem napona VA na 1,025 p.u. te 1,03 p.u., napon na sabirnici Gračac ponovno je dostigao samo napon od 1,02343 p.u. Dakle, regulacija napona moguća je do 1,02343 p.u. To znači da se napon VA može povećavati još više, ali on kada dostigne svoj maksimum, i dalje neće moći do kraja izregulirati Gračac, nego će samo povećavanjem napona rasti i gubici. Navedeni gubici su prikazani na slici 6.8. za svih 5 regulacija.

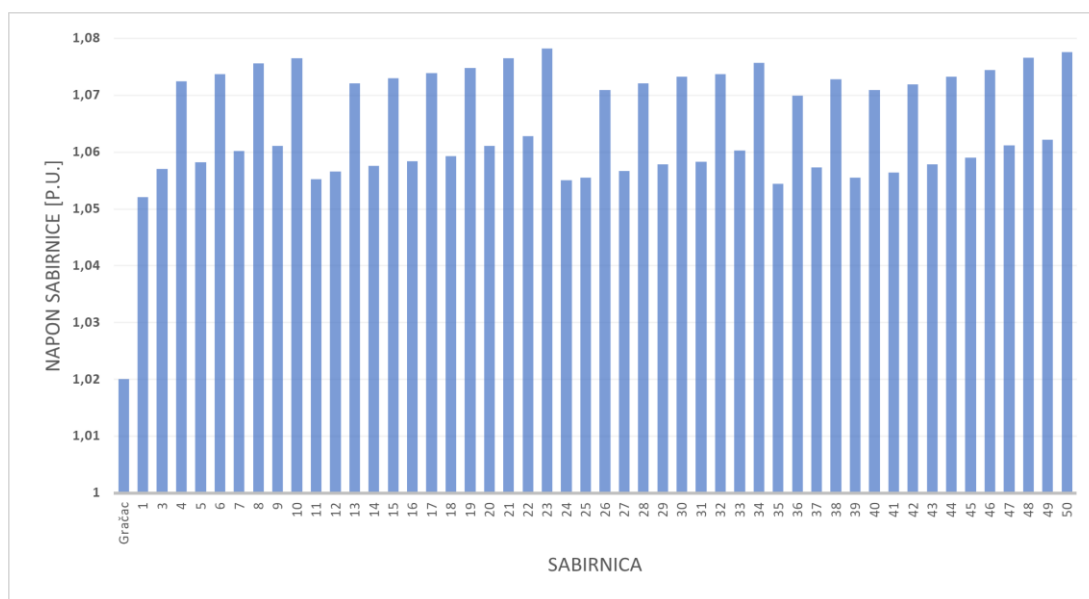


*Slika 6.8. Gubici VP-a svih pet primjera regulacije napona*

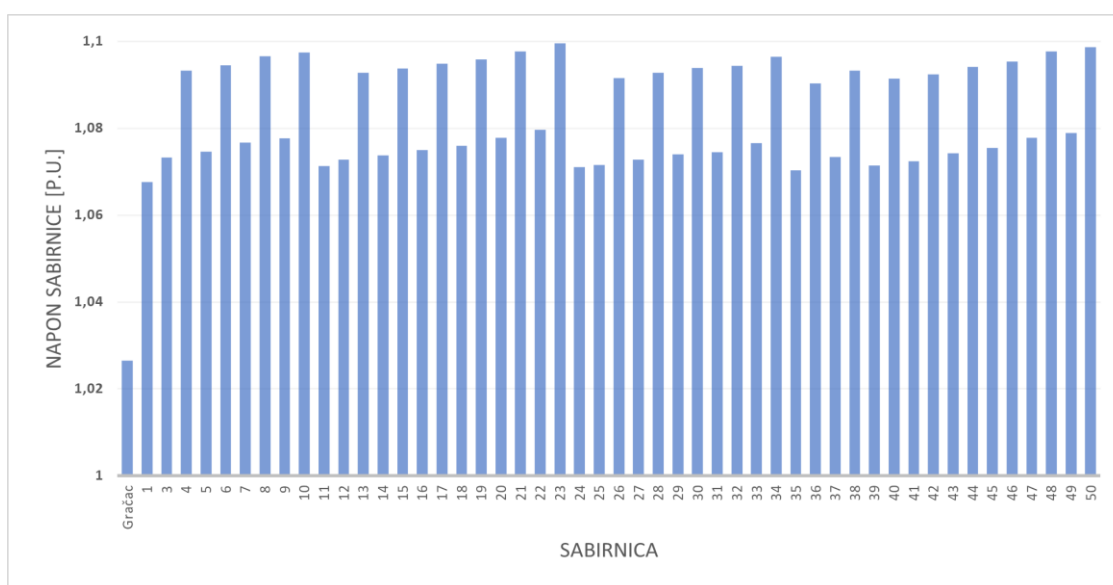
Gubici rastu zato što povećanjem napona u mreži sve više raste i jalova snaga, koja uzrokuje pojavu jalove struje. Ta struja kasni za naponom jer je induktivnog karaktera te se tako jalova snaga povećava, pa uzrokuje gubitke.

### 6.1.6. Primjer 6

U šestom primjeru rađena je situacija 1 pri uvjetu 2 te poduvjetu B, u njemu se također nastojalo regulacijom napona postići onaj napon koji je optimalan. Na slikama 6.9. i 6.10. prikazani su naponi na sabirnicama VP-a te na sabirnici Gračac dok je napon VP-a postavljen na 1,02 te na 1,027 p.u.



Slika 6.9. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu pri 1,02 p.u.



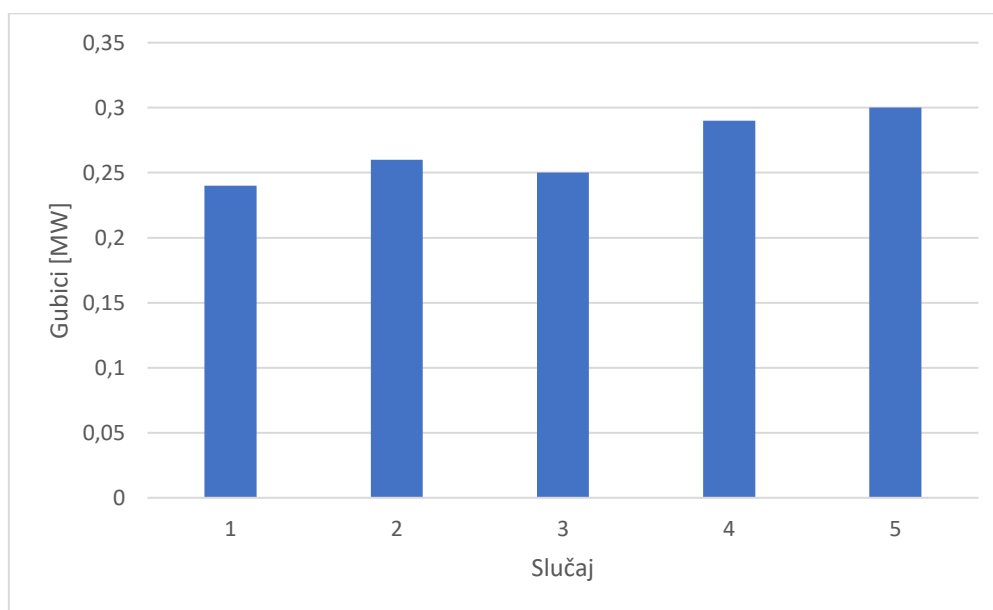
Slika 6.10. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu pri 1,027 p.u.

Tablica 6.2. daje prikaz napona na koje su VA postavljeni uz napone Gračaca na kojima ga VA drže.

*Tablica 6.2. Prikaz napona na koje su VA postavljeni te napona na koje je VP uspio izregulirati udaljenu sabirnicu Gračac*

| <b>Napon na sabirnicama VA i na Gračacu [p.u.]</b> |               |
|--|---------------|
| <b>VA</b>  | <b>Gračac</b> |
| 1,02000  | 1,02000       |
| 1,02300  | 1,02300       |
| 1,02500  | 1,02500       |
| 1,02600  | 1,02600       |
| 1,02700  | 1,02560       |

U slučaju kada je napon VA postavljen na 1,02 p.u., napon na sabirnici Gračac je također 1,02, odnosno VA je uspješno regulirao napon na Gračacu. Kada se napon VA poveća na 1,023, napon na Gračacu ponovno je uspješno reguliran na 1,023 p.u. Povećavanjem napona VA na 1,025 p.u., napon na Gračacu dostigne napon od 1,025 p.u., što znači da VA i dalje ima mogućnost izregulirati Gračac. Nadalje, povećavanjem napona VA na 1,026 p.u. napon na sabirnici Gračac ponovno je dostigao željeni napon od 1,026 p.u. Povećavanjem napona na 1,027 p.u., regulacija napona na Gračacu moguća je samo do 1,0256 p.u. te se daljnjim povećavanjem napon na Gračacu ne povećava. To znači da se napon VA može povećavati još više, ali on kada dostigne svoj maksimum, i dalje neće moći do kraja izregulirati Gračac, nego će samo povećavanjem napona rasti i gubici. Navedeni gubici su prikazani na slici 6.11. za svih 5 regulacija.



*Slika 6.11. Gubici VP-a svih pet primjera regulacije napona*

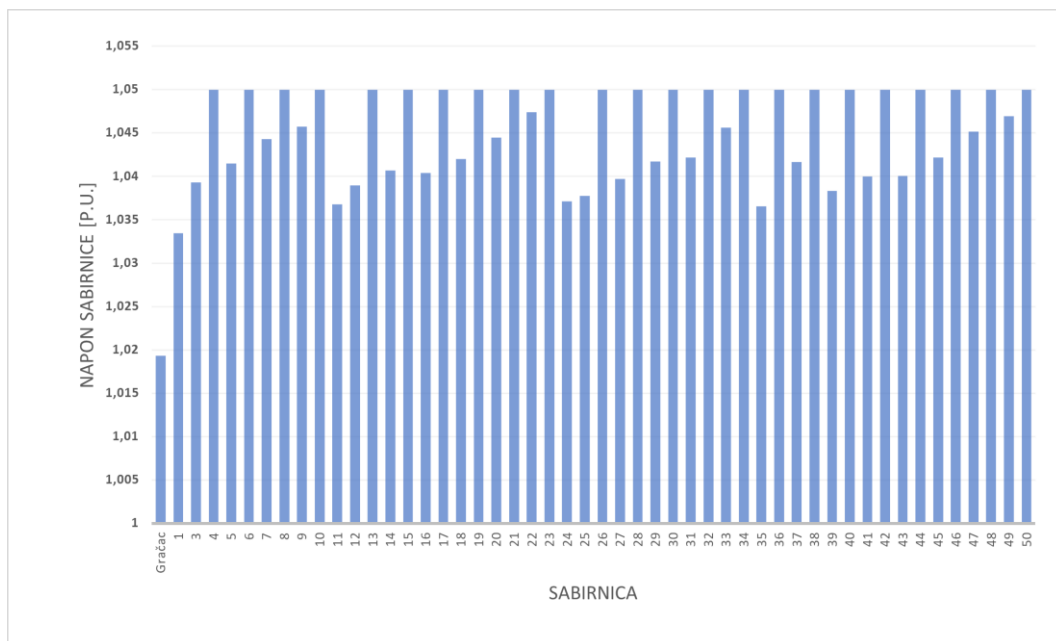
Gubici rastu zato što povećanjem napona u mreži sve više raste i jalova snaga, koja uzrokuje pojavu jalove struje.

## 6.2.Situacija 2

Situacija 2 odnosi se na simulacije koje su rađene pri minimalnoj potrošnji i različitim uvjetima te poduvjetima. Uvjet 1 prema kojemu je rađeno predstavlja regulaciju samog VP, a uvjet 2 prikazuje kako VP regulira napon na sabirnici Gračac. Poduvjet A znači da je proizvodnja maksimalna, a poduvjet B da je smanjena na 50%. Primjeri su odrađeni za napon 1,05 p.u., 1,1 p.u., a u slučaju kada se regulira Gračac, tražen je optimalan napon.

### 6.2.1. Primjer 7

U sedmom primjeru obavljena je situacija 2 uz uvjet 1 i poduvjet A, dok su naponi svih generatora namješteni na 1,05 p.u., a naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani su na slici 6.12.

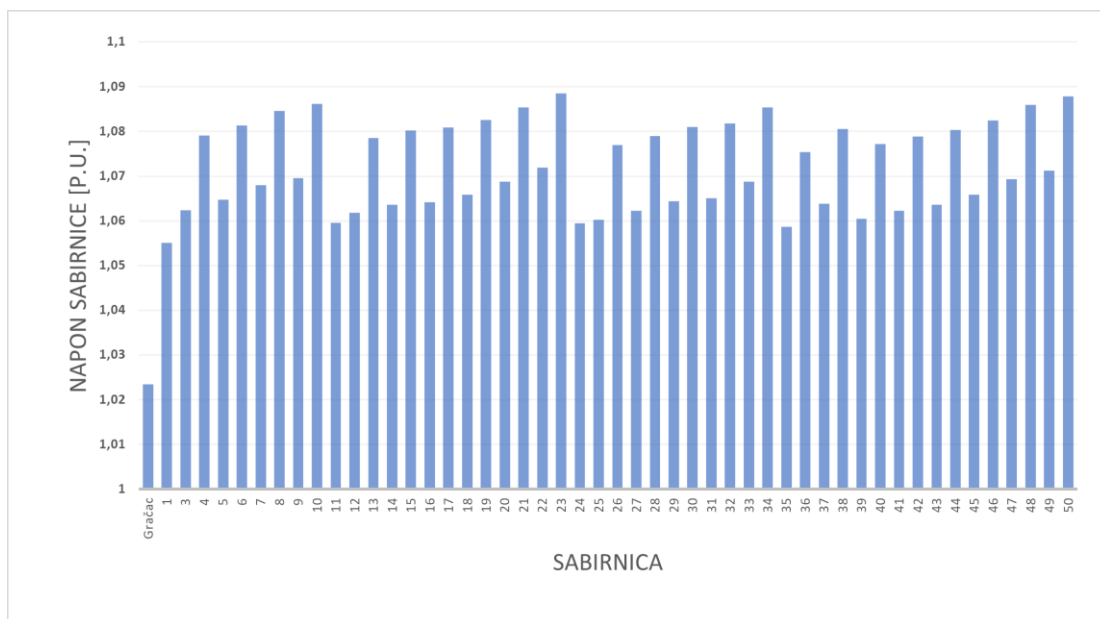


Slika 6.12. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

U ovom primjeru također svi su generatori uspjeli postići traženi napon, ali je napon na sabirnici Gračac nešto veći nego što je bio u prethodnim primjerima druge situacije.

### 6.2.2. Primjer 8

U osmom primjeru obavljena je situacija 2 s uvjetom 1 i poduvjetom A, dok je napon svih generatora namješten na 1,1 p.u. Naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani su na slici 6.13.

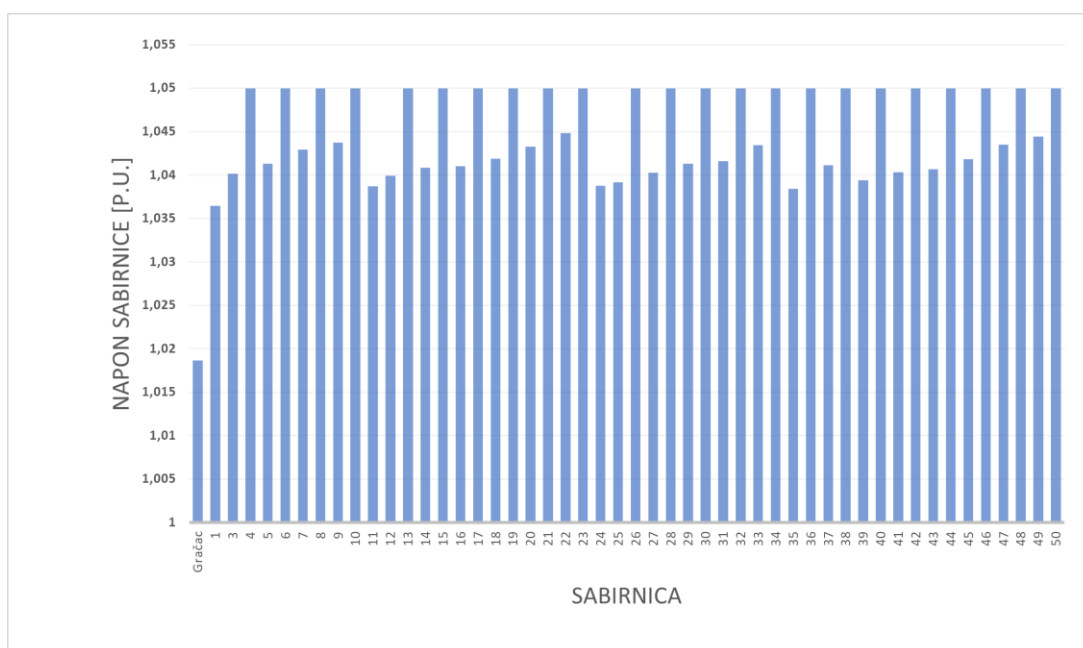


Slika 6.13. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

Ni u ovom slučaju generatori nisu postigli željeni napon, a napon na sabirnici Gračac malo je viši nego u prethodnom primjeru.

### 6.2.3. Primjer 9

U devetom primjeru prikazana je situacija 2 uz uvjet 1 te poduvjet B. Napon svih generatora vraćen je ponovno na 1,05 p.u. te su naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani na slici 6.14.

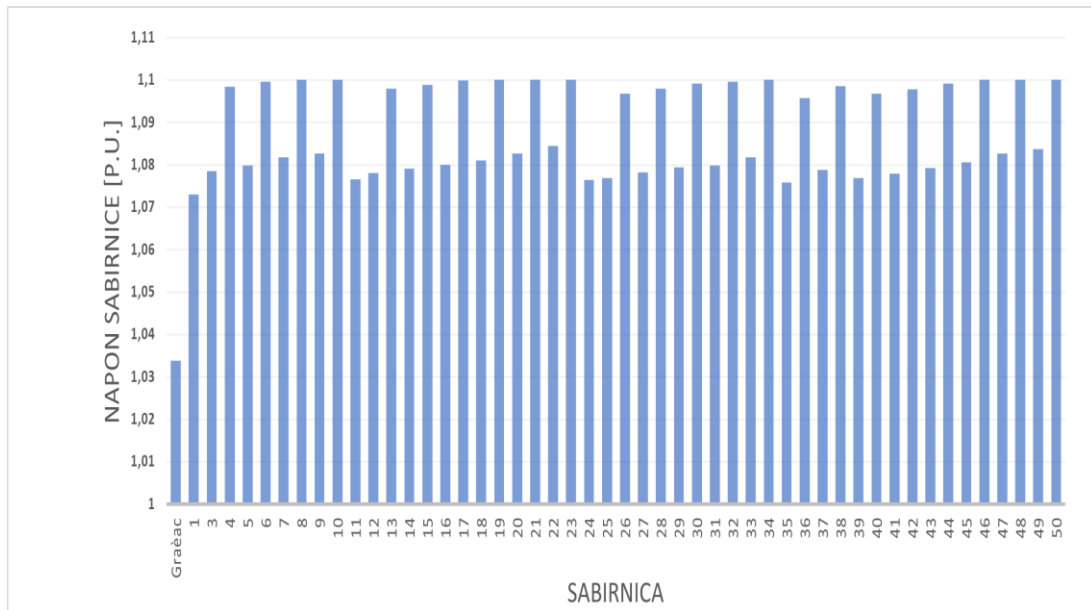


Slika 6.14. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

U ovom slučaju naponi su viši, odnosno svi generatori ponovno su postigli željeni postavljeni napon, dok druga polovica sabirnica ima napon viši nego u prethodnom primjeru. Sukladno tome, napon na sabirnici Gračac također je viši u ovom slučaju, a iznosi 1,018 p.u.

#### 6.2.4. Primjer 10

U desetom primjeru je situacija 2 prikazana uz uvjet 1 te poduvjet B. Napon svih generatora postavljen je sada na 1,1 p.u. te su naponi u VP-u i na sabirnici Gračac dani na slici 6.15.

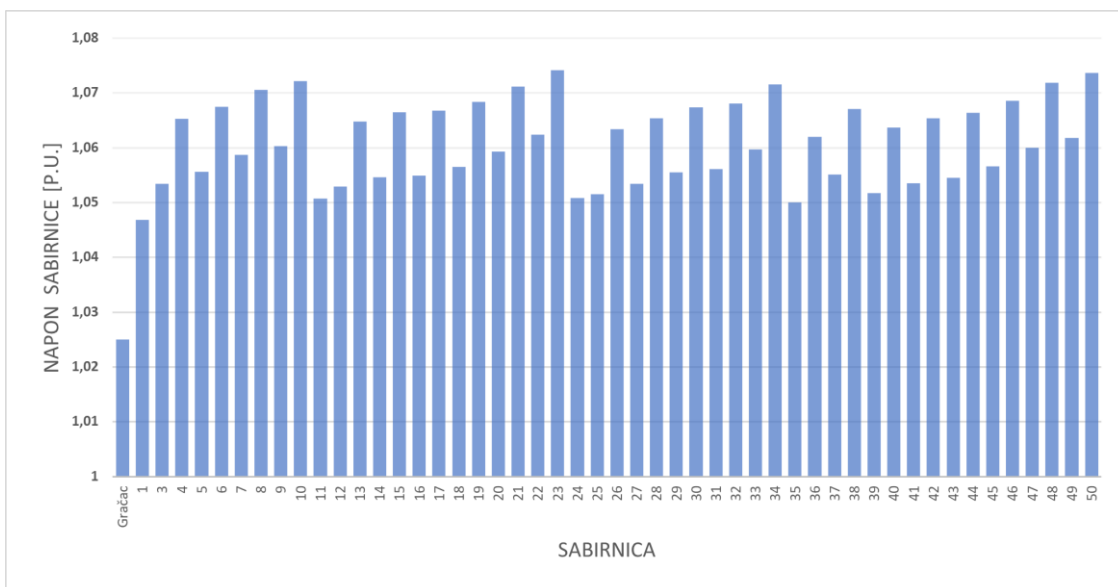


Slika 6.15. Naponi na sabirnicama VP-a te sabirnici Gračac

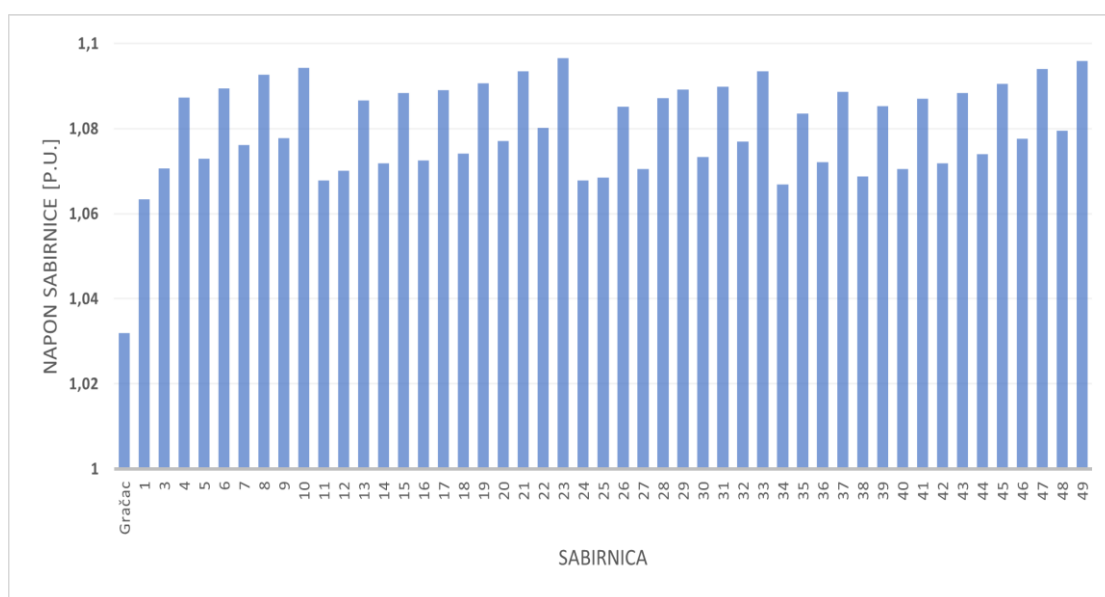
Iz grafikona je vidljivo da i dalje ni jedan generator nije uspio zadovoljiti ono što je zadano, ali i da je napon na Gračacu viši nego u prethodnom slučaju te iznosi 1,034 p.u.

#### 6.2.5. Primjer 11

U jedanaestom primjeru rađena je situacija 2 uz uvjet 2 i poduvjet A te se u njoj nastojalo regulacijom napona postići onaj napon koji je optimalan. . Na slikama 6.16. i 6.17. prikazani su naponi na sabirnicama VP-a te na sabirnici Gračac dok je napon VP-a postavljen na 1,025 te na 1,05 p.u.



Slika 6.16. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu na 1,025 p.u.



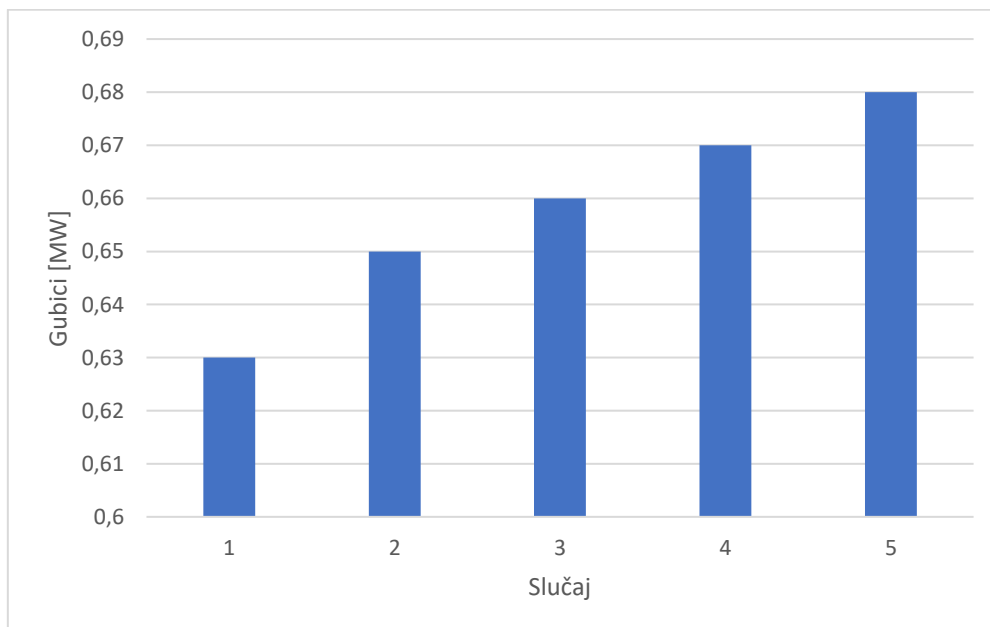
Slika 6.17. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu na 1,05 p.u.

U tablici 6.3. prikazani su svi naponi na sabirnicama VA na koje su postavljeni te naponi na sabirnici Gračac, na koje napone ih je VA uspio podići.

Tablica 6.3. Prikaz napona na koje su VA postavljeni te napona na koje je VP uspio izregulirati udaljenu sabirnicu Gračac

| Napon na sabirnicama VA i na Gračacu [p.u.] |         |
|---|---------|
| VA  | Gračac  |
| 1,02000                                     | 1,02000 |
| 1,02500                                     | 1,02500 |
| 1,03000                                     | 1,03000 |
| 1,03500                                     | 1,03190 |
| 1,05000                                     | 1,03190 |

U slučaju kada je napon VA postavljen na 1,02 p.u., napon na sabirnici Gračac je također 1,02, odnosno VA je uspješno regulirao napon na Gračacu. Kada se napon VA poveća na 1,025, napon na Gračacu ponovno je uspješno reguliran na 1,025 p.u. Povećavanjem napona VA na 1,03 p.u., napon na Gračacu dostigne napon od 1,03 p.u., što znači da VA i dalje regulira Gračac do očekivanog napona. Nadalje, povećavanjem napona VA na 1,035 p.u. te 1,05 p.u., napon na sabirnici Gračac ponovno je dostigao samo napon od 1,0319 p.u. Dakle, regulacija napona moguća je do 1,0319 p.u. To znači da se napon VA može povećavati još više, ali on kada dostigne svoj maksimum, i dalje neće moći do kraja izregulirati Gračac, nego će samo povećavanjem napona rasti i gubici. Navedeni gubici su prikazani na slici 6.17. za svih 5 regulacija.



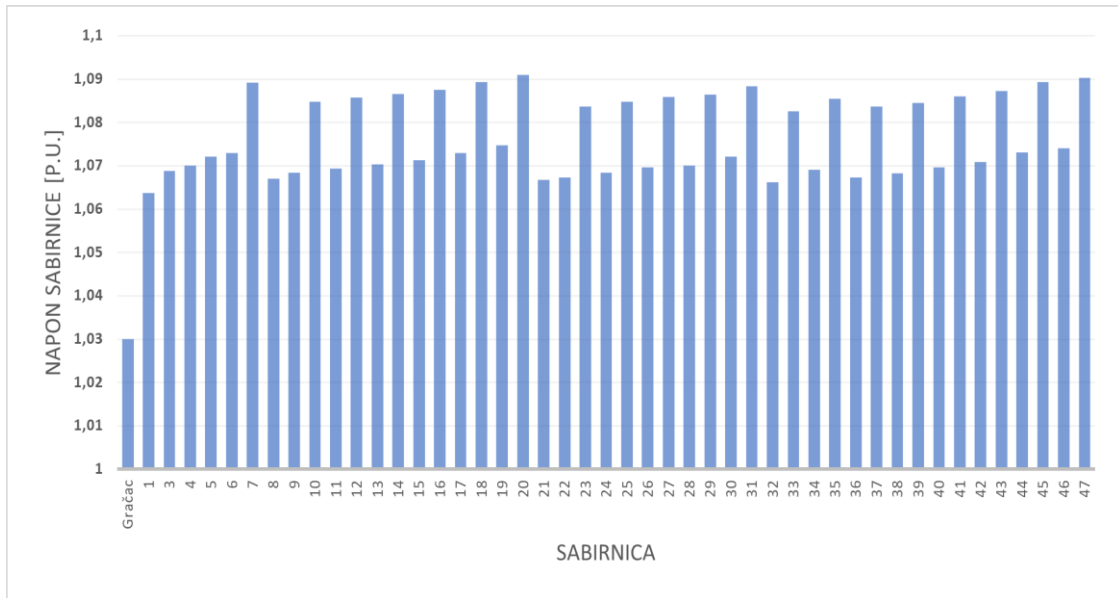
Slika 6.17. Gubici VP-a svih pet primjera regulacije napona

Gubici ponovno rastu zato što povećanjem napona u mreži sve više raste i jalova snaga, koja uzrokuje pojavu jalove struje zbog kašnjenja za naponom te se generatori preopterećuju.

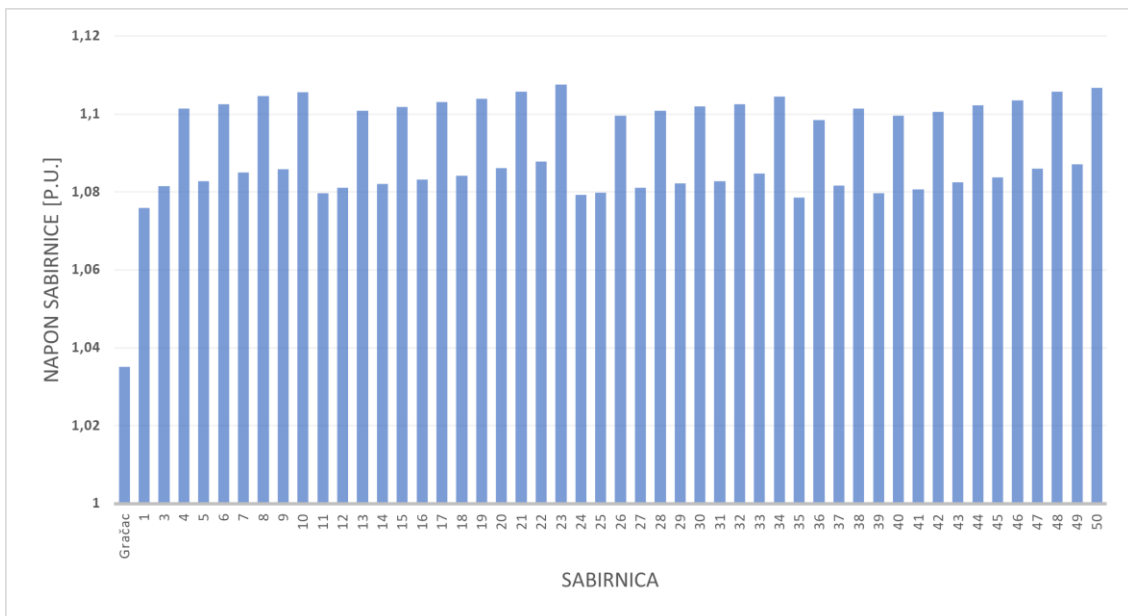


### 6.2.6. Primjer 12

U dvanaestom primjeru rađena je situacija 2 uz uvjet 2 i poduvjet B te se u njoj također nastojalo regulacijom napona postići onaj napon koji je optimalan. Na slikama 6.18. i 6.19. prikazani su naponi na sabirnicama VP-a te na sabirnici Gračac dok je napon VP-a postavljen na 1,03 te na 1,036 p.u.



Slika 6.18. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu pri 1,03 p.u.



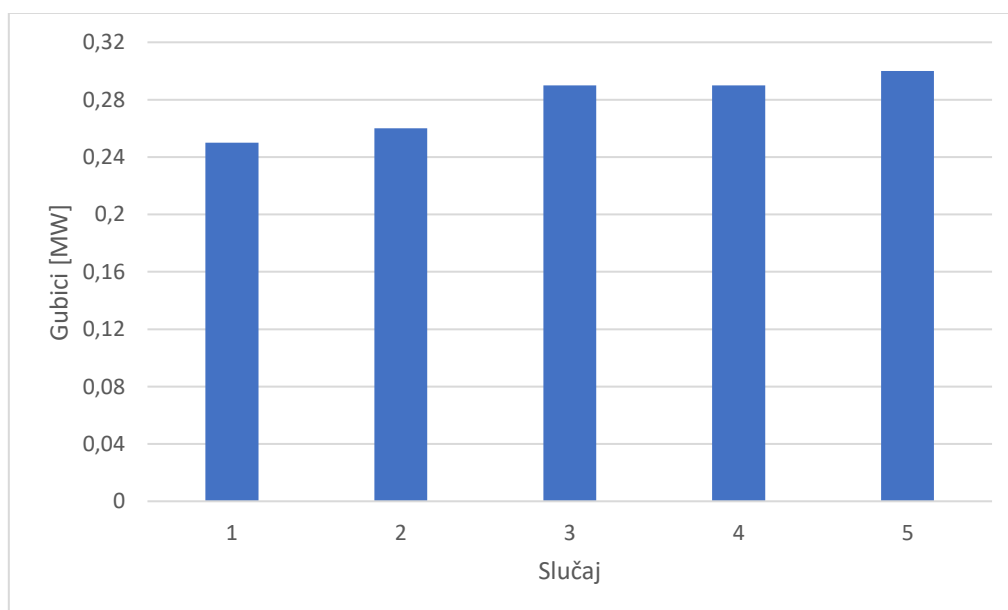
Slika 6.19. Naponi na sabirnicama VP-a i Gračacu pri 1,036 p.u.

U tablici 6.4. prikazani su svi naponi na sabirnicama VA na koje su postavljeni te naponi na sabirnici Gračac, na koje napone ih je VA uspio podići.

*Tablica 6.4. Prikaz napona na koje su VA postavljeni te napona na koje je VP uspio izregulirati udaljenu sabirnicu Gračac*

| <b>Napon na sabirnicama VA i na Gračacu [p.u.]</b> |               |
|--|---------------|
| <b>VA</b>  | <b>Gračac</b> |
| 1,03000  | 1,03000       |
| 1,03200  | 1,03200       |
| 1,03500  | 1,03500       |
| 1,03600  | 1,03510       |
| 1,04000  | 1,03510       |

U slučaju kada je napon VA postavljen na 1,03 p.u., napon na sabirnici Gračac je također 1,03, odnosno VA je uspješno regulirao napon na Gračacu. Kada se napon VA poveća na 1,032, napon na Gračacu ponovno je uspješno reguliran na 1,032 p.u. Povećavanjem napona VA na 1,035 p.u., napon na Gračacu dostigne napon od 1,035 p.u., što znači da VA i dalje ima mogućnost izregulirati Gračac. Nadalje, povećavanjem napona VA na 1,036 p.u. napon na sabirnici Gračac dostigao je napon od 1,0351 p.u., odnosno malo niži od željenog. Povećavanjem napona na 1,04 p.u., regulacija napona na Gračacu moguća je i dalje samo do 1,0351 p.u. te se daljnjim povećavanjem napon na Gračacu ne mijenja. To znači da se napon VA može povećavati još više, ali on kada dostigne svoj maksimum, i dalje neće moći do kraja izregulirati Gračac, nego će samo povećavanjem napona rasti i gubici. Navedeni gubici su prikazani na slici 6.20. za svih 5 regulacija.



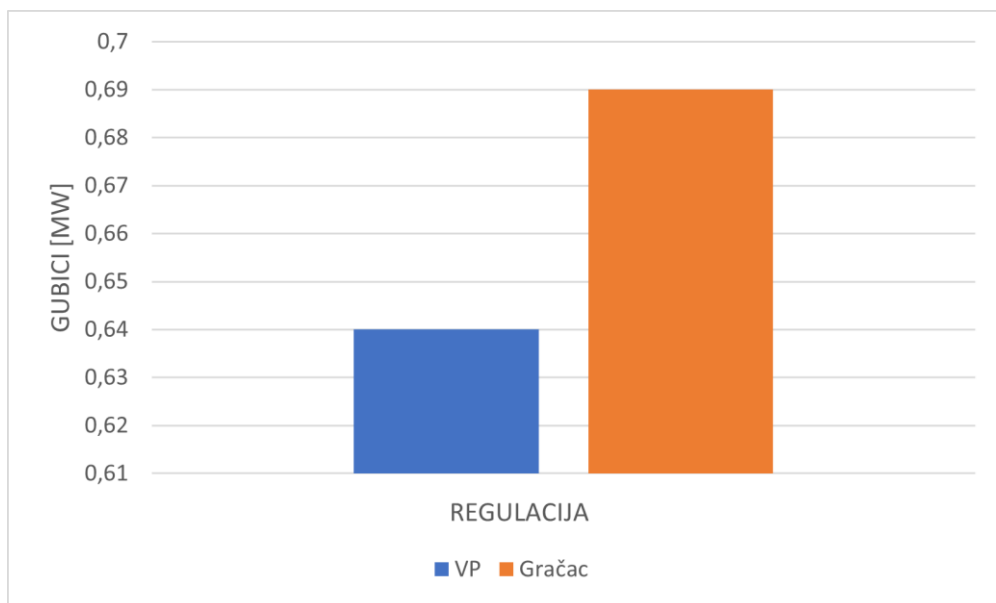
*Slika 6.20. Gubici VP-a svih pet primjera regulacije napona*

Gubici rastu zato što povećanjem napona u mreži sve više raste i jalova snaga, koja uzrokuje pojavu jalove struje zbog kašnjenja za naponom te se generatori preopterećuju.

### 6.3. Usporedba gubitaka

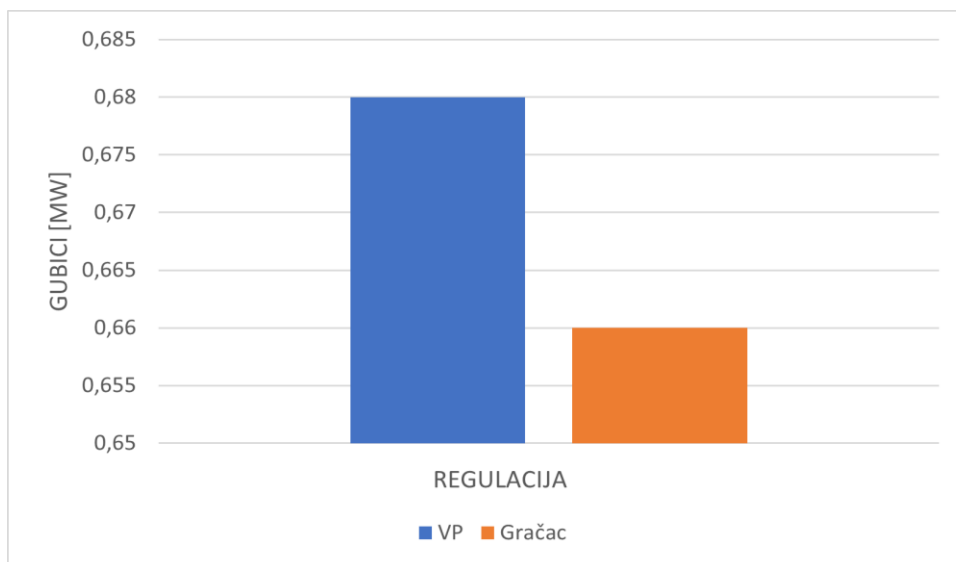
#### 6.3.1. Gubici pri maksimalnoj potrošnji

Slika 6.21. prikazuje usporedbu gubitaka VP-a kada VA u VP-u reguliraju samo svoje sabirnice te kada reguliraju sabirnicu Gračac, uz uvjet da su i proizvodnja i potrošnja maksimalne, tj. u situaciji 1, uz uvjet 1 i uvjet 2. Napon koji je postavljen na VA u ovim primjerima je 1,05 p.u.



Slika 6.21. Usporedba gubitaka pri regulaciji VP-a i Gračaca uz maks. potrošnju i napon 1,05 p.u.

Slika 6.22. prikazuje usporedbu gubitaka VP-a kada VA u VP-u reguliraju samo svoje sabirnice te kada reguliraju sabirnicu Gračac, uz uvjet da su i proizvodnja i potrošnja maksimalne, ali je sada napon na VA u ovim primjerima postavljen na 1,1 p.u.

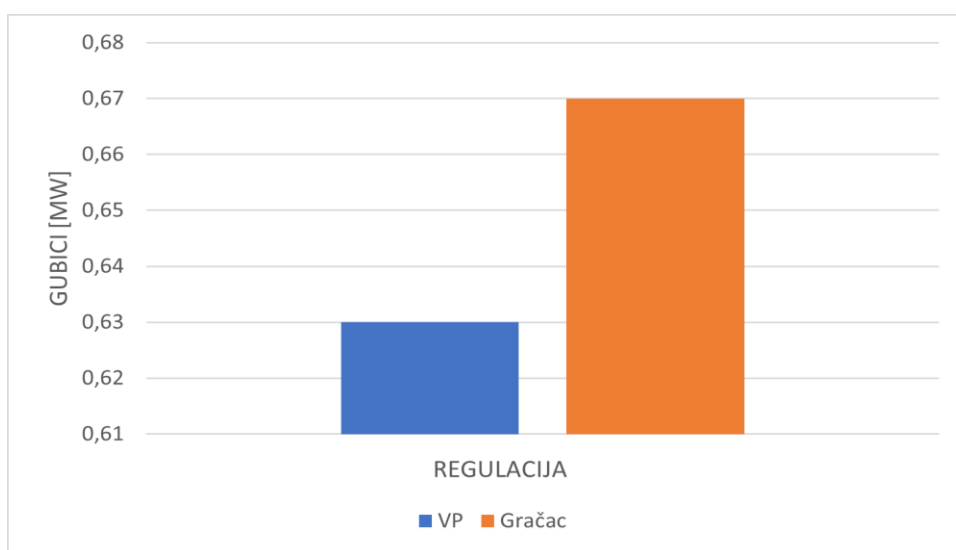


Slika 6.22. Usporedba gubitaka pri regulaciji VP-a i Gračaca uz maks. potrošnju i napon 1,1 p.u.

Iz priloženih grafikona vidljivo je da su gubici tijekom maksimalne potrošnje i maksimalne proizvodnje manji kada VA reguliraju samo svoju sabirnicu, ako su zadani naponi niži, odnosno postavljeni na 1,05 p.u., nego gubici VP-a kada on regulira Gračac. S druge strane, kada se napon na VA poveća na 1,1 p.u., gubici su veći ako VA reguliraju samo sebe, odnosno ako je napon viši, gubici su manji tijekom regulacije napona udaljene sabirnice, upravo iz razloga što se pomoću udaljene sabirnice regulira jalova snaga koja se injektira u mrežu.

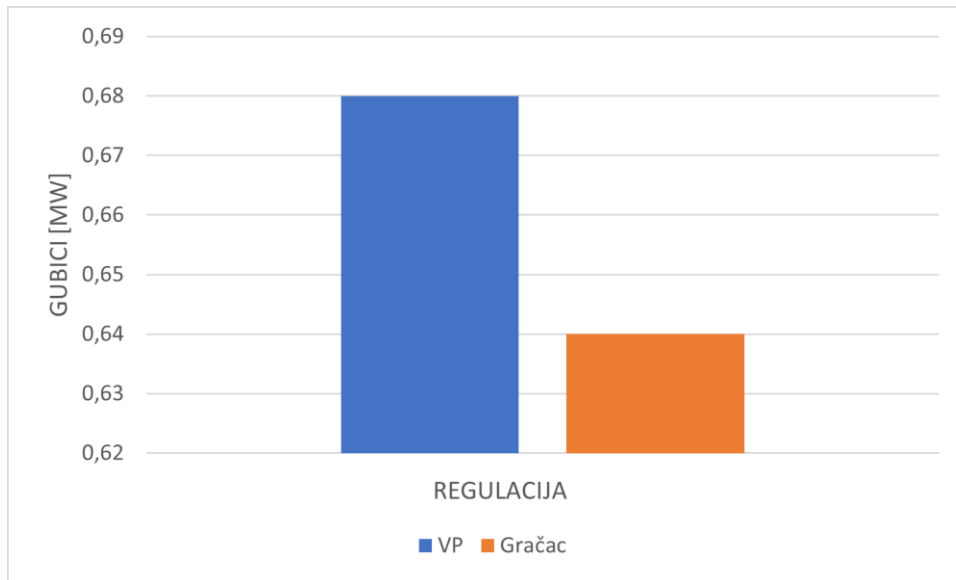
### 6.3.2. Gubici pri minimalnoj potrošnji

Slika 6.23. prikazuje usporedbu gubitaka VP-a kada VA u VP-u reguliraju samo svoje sabirnice te kada reguliraju sabirnicu Gračac, uz uvjet da je potrošnja smanjena na 50%, tj. u situaciji 2, uz uvjet 1 i uvjet 2. Napon koji je postavljen na VA u ovim primjerima je 1,05 p.u.



Slika 6.23. Usporedba gubitaka pri regulaciji VP-a i Gračaca uz min. potrošnju i napon 1,05 p.u.

Slika 6.24. prikazuje usporedbu gubitaka VP-a kada VA u VP-u reguliraju samo svoje sabirnice te kada reguliraju sabirnicu Gračac, uz uvjet da je potrošnja smanjena na 50%, ali je sada napon na VA u ovim primjerima postavljen na 1,1 p.u.



Slika 6.24. Usporedba gubitaka pri regulaciji VP-a i Gračaca uz maks. potrošnju i napon 1,1 p.u.

Iz priloženih grafikona vidljivo je da su gubici tijekom minimalne potrošnje ponovno manji tijekom nižeg napona (postavljenog na 1,05 p.u.) kada VA reguliraju samo svoju sabirnicu, nego gubici VP-a kada on regulira Gračac. S druge strane, kada se napon na VA poveća na 1,1 p.u., gubici su veći ako VA reguliraju samo sebe, odnosno ako je napon viši, gubici su manji tijekom regulacije napona udaljene sabirnice, upravo iz razloga što se pomoću udaljene sabirnice regulira jalova snaga koja se injektira u mrežu.

## 7. ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog diplomskog rada bio je prikazati koji su načini te koje prednosti regulacije naponskih prilika. U prijenosnoj mreži redovno dolazi do gubitaka uslijed različitih čimbenika i neprestano se pronalaze novi načini kako ih smanjiti. Konkretno, u ovom radu osvrst je bio na regulaciji napona pomoću VP metodom udaljene sabirnice. Primjeri koji su odrađeni prema modelu mreže prikazuju koliki su gubici u kojoj situaciji te se varijacijama različitih napona i potrošnje pokušava doći do optimalnog rješenja. Promatrajući gubitke pri maksimalnoj potrošnji, da se zaključiti da su pri nižem naponu od 1,05 p.u. gubici manji onda kada VA iz VP-a reguliraju samo svoje sabirnice, nego kada svi VA reguliraju udaljenu sabirnicu Gračac. Isto se događa i tijekom minimalne potrošnje, odnosno kada je potrošnja smanjena na 50%, tu su također gubici manji bez regulacije Gračaca. Nadalje, promatrajući gubitke tijekom maksimalne potrošnje uz viši napon, tj. napon od 1,1 p.u., gubici su veći kada VA reguliraju udaljenu sabirnicu Gračac, nego kada reguliraju sami sebe. Isto tako su veći i tijekom minimalne potrošnje. Razlog tomu je jalova snaga injektirana u prijenosnu mrežu, koja se regulira udaljenom sabirnicom te se tako smanjuju gubici. Gubici tijekom regulacije udaljene sabirnice nisu puno veći od gubitaka tijekom regulacije VP-a, stoga nema velike razlike između njih te je korisno regulirati napon i jedan i drugi način. No, optimalan način regulacije napona pomoću VP-a metodom udaljene sabirnice pri maksimalnoj te pri minimalnoj potrošnji ipak bi bio kada VP regulira samo sebe.

## LITERATURA

- [1] M.Dubravac, Diplomski rad: Regulacija napona u mreži vjetroparka, objavljeno 2021.
- [2] Službena stranica programa PowerWorld Simulator 22: <https://www.powerworld.com/> (pregled 26.05.2023.)
- [3] M.Sarkar, M.Altin, P.E.Sorensen, A.D.Hansen, Reactive Power Capability Model of Wind Power Plan Using Aggregated Wind Power Collection System, objavljeno 2019.
- [4] R.Tang, B.Luo, X.Deng, Y.Shen, Research on Reactive Power and Voltage Control for Wind Farm Based on coordinate control of DFIGs and SVG, objavljeno 2020.
- [5] Službena stranica programa MATLAB: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (pregled 26.05.2023.)
- [6] E.Toledo, L.Aromataris, G.Tarnowski, M.Oliveira, O.Perrone, H.Reversat, Voltage Control in Wind Power Generation Using DoublyFed Induction Generators, objavljeno 2013.
- [7] R.I.Putri, I.N.Syamsiana, M.Rifa'i, F.Aditya, Voltage control for variable speed wind turbine using buck converter based on PID controller, objavljeno 2020.
- [8] Službeni članak Hrvatskog Operatora Prijenosnog Sustava, „Mrežna pravila prijenosnog sustava“: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017\\_07\\_67\\_1585.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_67_1585.html) (pregled 18.09.2023.)
- [9] Pathak, A.K., Sharma, M. P., Bundele, M., A critical review of voltage and reactive power management of wind farms, Renewable and Sustainable Energy Reviews, objavljeno 2015.
- [10] M.Krstanović, Diplomski rad: Automatska regulacija napona u EES-u, objavljeno 2021.
- [11] S.Čehok, Diplomski rad: Metodologija regulacije napona prijenosne mreže, objavljeno 2022.
- [12] D.Vico, Diplomski rad: Regulacija napona u elektroenergetskoj mreži, objavljeno 2021.
- [13] M.Kolarik, Diplomski rad: Regulacija napona u SN mreži s distribuiranim izvorima, objavljeno 2016.
- [14] Hrvatska enciklopedija, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=62032> (pregled 15.09.2023.)
- [15] D.Kerep, Diplomski rad: Regulacija napona u distribucijskoj mreži, objavljeno 2019.

- [16] <https://electricaliq.com/what-is-oltc-or-on-load-tap-changer-in-transformer-working-principle/> (pregled 15.09.2023.)
- [17] A.Labinjan, Diplomski rad: Primjena FACTS uređaja u prijenosnim mrežama, objavljeno 2022.
- [18] L.Tomašković, Diplomski rad: Utjecaj vjetroekeltrana na okoliš, objavljeno 2015.
- [19] Hrvatska enciklopedija: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64999> (pregled 17.09.2023.)
- [20] Ž.Tomšić, M.Stenek, N.Mikulić, V.Marčec Popović, Analiza prostornih kapaciteta i uvjeta za korištenje potencijala obnovljivih izvora energije u republici hrvatskoj, Knjiga II, objavljeno 2020.
- [21] A.Čoga, Diplomski rad: Regulacija napona u sredjenaponskoj mreži ovisno o opterećenju, objavljeno 2021.
- [22] M.Jelčić, M.Kožul, Primjer konstrukcije vjetroagregata, objavljeno 2020.
- [23] Hrvatska enciklopedija, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64999> (pregled 18.09.2023.)
- [24] N. Orlović, Diplomski rad: Utjecaj vjetroelektrana na naponske propade u elektroenergetskom sustavu, objavljeno 2017.
- [25] E.H.Camm, M.R.Behnke, O.Bolado, M.Bollen, M.Bradt, C.Brooks, W.Dilling, M.Edds, W.J.Hejdak, D.Houseman, S.Klein, F.Li, J.Li, P.Maibach, T.Nicolai, J.Patiño, S.V.Pasupulati, N.Samaan, S.Saylors, T.Siebert, T.Smith, M.Starke, R.Walling, Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants, objavljeno 2009.
- [26] M.Dubravac, D.Topić, K.Fekete, Z.Šimić, Modelling of Wind Power Plant for Voltage Regulation Simulations, objavljeno 2022.
- [27] <https://www.petrol.hr/znanje-i-podrska/2021/clanci/vjetropark-ljubac-s-energijom-vjetra-do-odrzive-elektricne-energije-za-kucanstva-i-mobilnosti.html>
- [28] Službena stranica Google karti:  
<https://www.google.com/maps/@45.7867264,15.941632,12z?entry=ttu>
- [29] V.Akhmatov, Experience with Voltage Control from Large Offshore Windfarms: The Danish Case, Wind Energy, objavljeno 2009.



[30] <https://www.protenders.com/companies/seas-nve-energy-group/projects/nysted-1-wind-farm>

## SAŽETAK

Kako je električna energija u današnje vrijeme sve potrebija, tako se i elektroenergetski sustavi sve više razvijaju. Da bi njihov razvoj bio što učinkovitiji, sve češće se koriste obnovljivi izvori energije. U ovom radu riječ je o jednom od najisplativijih obnovljivih izvora energije, a to je vjetar. On se koristi zato kao izvor što je „besplatan“, ne zagađuje okoliš i nema štetnog otpada od njega. Vjetroelektrana (VA) ili vjetropark (VP) se sastoji od više vjetroagregata (VA) te se u njima kinetička energija vjetra pretvara u mehaničku, a potom u električnu. Neki VA imaju mogućnost regulacije naponskih prilika, a neki ne, no više se upotrebljavaju upravo oni koji mogu regulirati napon. Sami postupak regulacije odnosi se na prijenosnu mrežu, a mreža koja je ovdje korištena preuzeta je iz rada [1], jer se nastavlja na njega. U ovom radu ukratko je objašnjeno čemu služi VP. Naglasak samog rada stavljen je na vrste regulacije napona, gdje su prvo objašnjeni neki primjeri klasične regulacije, a potom i modernije. Zatim su pobliže objašnjeni VP, njihova uloga u regulaciji napona, načini izvedbe VA te su prikazana dva primjera VP-a, ovisno o lokaciji – kopneni i pučinski. Nakon toga, prikazan je model mreže VP-a na kojemu su odrađeni različiti primjeri simulacija, koji su pojašnjeni i blokovski. Konkretno, na primjeru VP s ukupno 23 VA rađena je regulacija napona pomoću udaljene sabirnice, gdje je VP isprva regulirao napone na sabirnicama VP, a zatim udaljenu sabirnicu Gračac. Cilj simulacija bio je pronaći optimalno rješenje za povećanje napona na sabirnici Gračac na način da ga se regulira naponom VP-a. Na samom kraju primjeri su opisani i objašnjeni te su prikazani različiti grafikoni. Rezultati svih primjera su uspoređeni, nakon čega je izveden zaključak.

## KLJUČNE RIJEČI

Napon, regulacija, vjetropark, vjetroagregat, sabirnica

## ABSTRACT

In today's world, as electrical energy becomes increasingly essential, electrical power systems are also evolving. To make their development more efficient, renewable energy sources are increasingly being used. This paper focuses on one of the most cost-effective renewable energy sources, which is wind energy. It is used because it is "free," does not pollute the environment, and has no harmful waste associated with it. A wind farm consists of multiple wind turbines, and in them, the kinetic energy of the wind is converted into mechanical energy and then into electrical energy. Some wind turbines have the ability to regulate voltage

conditions, while others do not, but those that can regulate voltage are more commonly used. The voltage regulation process itself relates to the transmission network, and the network used here is taken from reference [1] as it continues from that work. This paper briefly explains the purpose of a wind farm. The emphasis of the paper is on voltage regulation methods, where some examples of classical regulation are first explained, followed by more modern approaches. Next, wind farms (WFs) are explained in more detail, their role in voltage regulation, methods of implementing wind turbines, and two examples of WF are presented, depending on their location - onshore and offshore. Afterward, a model of the WF network [1] is presented, on which various simulation examples have been performed, explained, and depicted in block diagrams. Specifically, using the example of a WF with a total of 23 wind turbines, voltage regulation was performed using a remote busbar, where the WF initially regulated voltages at the WF busbars and then the remote busbar in Gračac. The aim of the simulations was to find an optimal solution to increase the voltage at the Gračac busbar by regulating it with the voltage of the WF. In the end, the examples are described, explained, and various graphs are shown. The results of all examples are compared, followed by a conclusion.

## **KEYWORDS**

Voltage, Regulation, Wind farm, Wind turbine, Busbar

## **ŽIVOTOPIS**

Amanda Mašić rođena je 19.05.1997. godine u Vinkovcima. Završila je Osnovnu školu, a potom i Opću gimnaziju u Županji. Nakon završetka gimnazije, 2016. godine upisuje se na preddiplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon dvije godine, opredjeljuje se za smjer elektroenergetika.