

# Regulacija napona u mreži vjetroparka

---

Dubravac, Marina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:534199>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

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**

**REGULACIJA NAPONA U MREŽI VJETROPARKA**

**Diplomski rad**

**Marina Dubravac**

**Osijek, 2021.**

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MODELIRANJE VJETROPARKA U SVRHU REGULACIJE NAPONA</b> .....	<b>3</b>
<b>3. VJETROAGREGATI I MOGUĆNOST REGULACIJE NAPONA</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1. Vjetroagregat Tip-a 3</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2. Vjetroagregati Tip-a 4</b> .....	<b>9</b>
<b>4. KONFIGURACIJA VJETROPARKOVA</b> .....	<b>11</b>
<b>4.1. Vjetroпарк Gemini, Nizozemska</b> .....	<b>11</b>
<b>4.2. Vjetroпарк Korlat, Hrvatska</b> .....	<b>12</b>
<b>4.3. Testni model mreže vjetroparka</b> .....	<b>13</b>
<b>5. SIMULACIJA UTJECAJA DETALJNOG MODELA VJETROPARKA I VJETROPARKA MODELIRANOG JEDNIM GENERATOROM NA PRIJENOSNI SUSTAV</b> .....	<b>18</b>
<b>5.1. Opis zadatka</b> .....	<b>18</b>
<b>5.2. Provedba simulacije</b> .....	<b>20</b>
5.2.1. Ulazne vrijednosti vjetroparka .....	20
5.2.2. Ulazne vrijednosti prijenosnog sustava .....	22
<b>6. REZULTATI SIMULACIJE</b> .....	<b>27</b>
6.1.1. Bazni slučaj 1 .....	27
6.1.2. Slučaj A, scenarij 1 .....	27
6.1.3. Slučaj A, scenarij 2.....	28
6.1.4. Slučaj B, scenarij 3 .....	28
6.1.5. Slučaj B, scenarij 4.....	30
<b>6.2. Varijanta 2</b> .....	<b>30</b>
6.2.1. Bazni slučaj 2 .....	30
6.2.2. Slučaj C, scenarij 5 .....	31
6.2.3. Slučaj C, scenarij 6 .....	31
6.2.4. Slučaj D, scenarij 7.....	32
6.2.5. Slučaj D, scenarij 8.....	33
<b>6.3. Usporedba napona na priključnoj sabirnici</b> .....	<b>34</b>
6.3.1. Bazni slučaj 1, slučaj A – scenarij 1 i scenarij 2 .....	34
6.3.2. Bazni slučaj 1, slučaj B – scenarij 3 i scenarij 4.....	34
6.3.3. Bazni slučaj 2, slučaj C – scenarij 5 i scenarij 6.....	35
6.3.4. Bazni slučaj 2, slučaj D – scenarij 7 i scenarij 8 .....	36
<b>6.4. Gubici vjetroparka</b> .....	<b>36</b>
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>38</b>

<b>LITERATURA .....</b>	<b>39</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>41</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>41</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>42</b>

## 1. UVOD

Klimatske promjene kojima je Zemlja pogođena uvjetovale su implementaciju obnovljivih izvora električne energije u postojeći elektroenergetski sustav (EES). Vjetropark (VP) predstavlja skup (najčešće nekoliko desetaka) vjetroagregata u kojima se kinetička energija vjetra pretvara u mehaničku energiju u vjetroturbini, a mehanička energija u električnu energiju u generatoru. VP-i se mogu podijeliti na pučinske (*eng. Offshore*) i kopnene (*eng. Onshore*). U tradicionalnim EES-ima koristili su se sinkroni generatori za regulaciju jalove snage i napona, ali u modernim sustavima sve veću važnost dobiva korištenje obnovljivih izvora energija u vidu regulacije napona. Postoje različiti tipovi vjetroagregata, međutim, u modernim VP-ima koriste se oni vjetroagregati kod kojih je regulacija napona moguća.

Autori u literaturi [1] iznijeli su tri različite strategije za regulaciju napona na mjestu priključka VP-a s EES-om te su usporedili prednosti i mane svake strategije na temelju provedene simulacije i analize. U literaturi [2] predstavljena je usporedba regulacije napona u tradicionalnim sustavima i regulacije napona pomoću VP-a. Dobiveno je da regulacija napona pomoću VP-a učinkovitije ublažava naponske neprilike u odnosu na tradicionalne metode regulacije pomoću sinkronog generatora. Kao dokaz, VP je implementiran i simuliran u prijenosni sustav Grčke. Autori u literaturi [3] bavili su se problem prenapona uslijed rada u pretvaračkih komponenti za različite topologije mreže VP-a. U literaturi [4] korišten je detaljan model mreže VP-a u kojem su uzete u obzir sve snage vjetroagregata, kabeli i ostali parametri, dok je u prethodnim literaturama korišten pojednostavljeni model mreže.

U diplomskom radu opisane su različite literaturi koje se bave problematikom VP-a. Nakon toga, naglasak se stavio na vjetroagregate koji sudjeluju u regulaciji napona mreže. Posebno su opisana dva tipa vjetroagregata kod kojih je regulacija napona moguća. Pronađena su dva različita, postojeća VP-a i dani su svi njihovi dijelovi. Na temelju tih dvaju VP-a načinjen je testni model mreže VP-a. Taj model priključen je na prijenosni sustav Hrvatske te su se ispitali različiti scenariji utjecaja VP-a na prijenosni sustav,

Diplomski rad sastoji se od sedam poglavlja. U drugom poglavlju navedena je i opisana literatura u kojoj se autori bave VP-ovima i regulacijom napona pomoću VP-a. U trećem poglavlju opisani su vjetroagregati kod kojih je regulacija napona moguća, prikazani su modeli tih vjetroagregata i njihove pogonske karte. U četvrtom poglavlju dane su konfiguracije postojećih VP-ova, jednog pučinskog i jednog kopnenog, dani su vjetroagregati, trafostanice

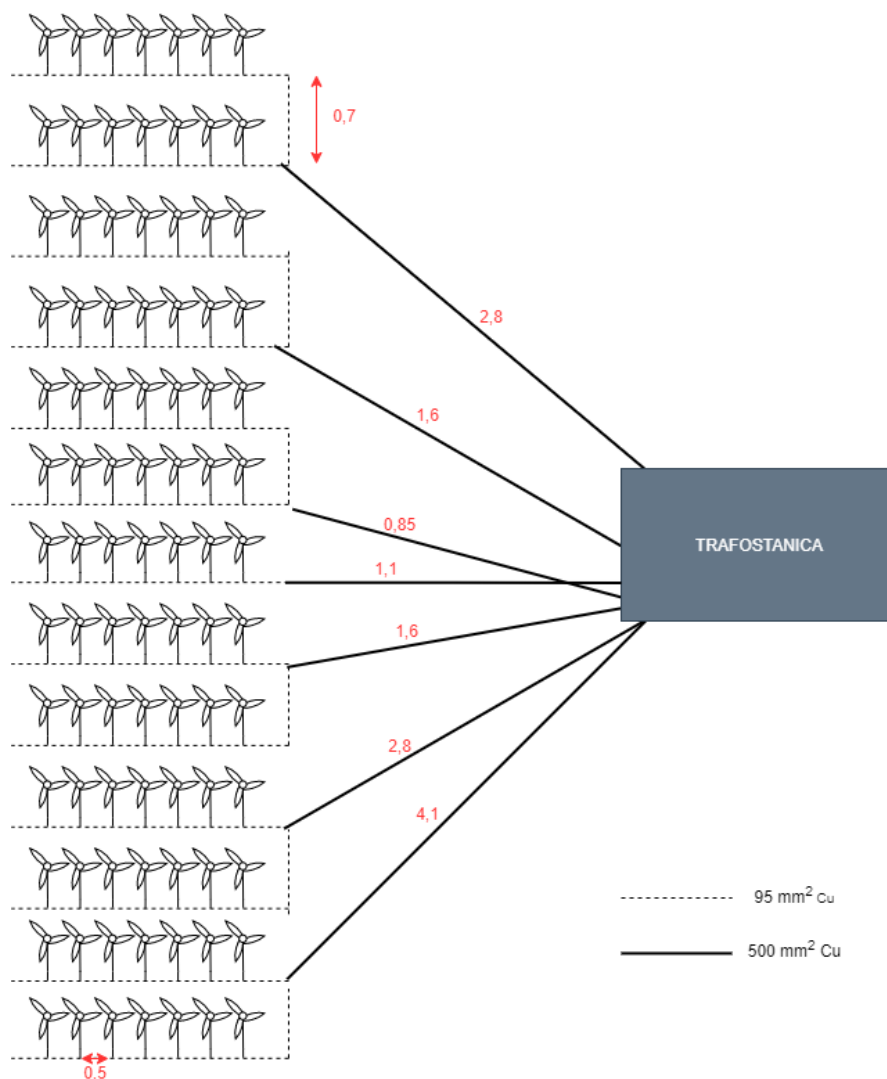
(TS) i kabeli korišteni u tim VP-ovima i prikazana je jedan testni model mreže VP-a sa svim parametrima na temelju kojeg se radila simulacija utjecaja detaljnog i pojednostavljenog modela VP-a u petom poglavlju. Simulacija je provedena u programu PowerWorld Simulator 22 [5]. U šestom poglavlju prikazani su rezultati simulacije. U zadnjem, sedmom poglavlju dan je osvrt na rezultate simulacije i napisana su zaključna razmatranja.

## 2. MODELIRANJE VJETROPARKA U SVRHU REGULACIJE NAPONA

Prema pregledu dosadašnjih znanstvenih istraživanja vidi se da postoji interes te razvijena svijest o važnosti istraživanja regulacije napona pomoću VP-a. Autori u literaturi [1] koristili su tri strategije regulacije napona: centraliziranu, decentraliziranu i distribuiranu. Za kontrolu napona na mjestu spoja VP-a i elektroenergetskog sustava (PCC, eng. *Point of Common Coupling*), najčešće se koristi hijerarhijska kontrola [1]. Hijerarhijska kontrola sastoji se od centralne upravljačke jedinice VP-a (WFCC, eng. *Wind Farm Centralized Control*) koja se nalazi na PCC-u i lokalne upravljačke jedinice (WTLC, eng. *Wind turbine local control*) koja se nalazi kod svakog vjetroagregata. WFCC nadzire snagu i napon PCC-a, a WTLC osigurava održavanje referentne vrijednosti snage i napona na mjestu priključenja pojedine vjetroagregata. Referentne vrijednosti koje prati WTLC dolaze od WFCC-a. Autori u literaturi [6] navode kako se ovisno o referentnom signalu koji WFCC šalje WTLC, hijerarhijska kontrola može podijeliti na centraliziranu kontrolu (strategiju) napona (CVC, eng. *Centralized voltage control*) i distribuiranu kontrolu (strategiju) napona (DVC, eng. *Distributed voltage control*). U CVC strategiji, regulacija napona vrši se samo sa WFCC-om koji za kontrolu napona PCC-a treba reaktivnu snagu koju dobiva od lokalnih vjetroagregata te im stoga šalje vrijednosti reaktivne snage koju svaki WTLC treba slijediti. DVC strategija temelji se na konceptu sekundarne regulacije napona, u kojoj primarna regulacija napona na WTLC neovisno regulira napon, a sekundarna regulacija napona u WFCC služi za praćenje i uklanjanje pogrešaka. Za obje strategije potrebna je komunikacija između WFCC-a i lokalnih WTLC-a. U suprotnosti sa konceptom hijerarhijske kontrole napona VP-a, znanstvenici istražuju i koncept decentralizirane strategije kontrole napona VP-a (DCVC, eng. *Decentralized voltage control*) za koju WFCC nije potreban te nema potrebe za komunikacijom između WTLC i WFCC-a. Jedan od mogućih oblika DCVC je predstavljen u literaturi [7] u kojoj se reaktivna snaga ili napon PCC-a procjenjuju na temelju modela unutarnje impedancije VP-a. U radu [1] prikazani su nedostaci i prednosti svake strategije. Teorijska analiza potvrđena je rezultatima simulacije u programskom paketu MATLAB [8]. VP-a je modeliran i simuliran u RTDS-u (Real Time Digital Simulator) [9] i prikazuje mogućnost kontroliranja reaktivne snage, a samim time i napona.

U literaturi [2] istaknuto je kako su preventivne i korektivne mjere regulacije napona razvijene za tradicionalne elektroenergetske sustave u kojima nisu u tolikoj mjeri zastupljeni obnovljivi izvori energije. U tradicionalnim elektroenergetskim sustavima korišteni su sinkroni

generatori za regulaciju reaktivne snage, dok se danas sinkroni generatori zamjenjuju generatorima iz obnovljivih izvora energije spojenih preko energetske pretvarača. U radu [2], provedena je analiza regulacije napona pri lošim naponskim uvjetima u prijenosnoj mreži na temelju reaktivne snage iz VP-a te je izveden zaključak usporedbom strategije za tradicionalne elektroenergetske sustave i nove strategije koja uključuje korištenje VP-a za regulaciju napona. Kao rezultat dobiveno je da nova strategija učinkovitije ublažava naponske nepravilnosti u odnosu na tradicionalnu strategiju. Radi provjere izvodljivosti i učinkovitosti nove strategije, ona je implementirana i simulirana u elektroenergetski sustav Grčke. Na slici 2.1. [2] prikazan je detaljan model VP-a ukupne snage 210 MW koji se sastoji od 91 vjetroagregata pojedinačne snage 2,3 MW. Parametri kabela dani su na slici. Udaljenost od TS označena je crvenom bojom.



Slika 2.1. Model VP-a [2]



U svom istraživanju, autori u literaturi [2] nisu koristili detaljan model VP-a, već su ga pojednostavili – cijeli VP je modeliran sa samo jednim vjetroagregatom (čija izlazna snaga odgovara zbroju snaga svih 91 vjetroagregata) i nadomjesnom impedancijom koja obuhvaća sve impedancije kabela i vodova unutar VP-a. Na slici 2.2. [2] prikazana je pojednostavljeni model VP-a a sa slike 2.1. [2]. Model se sastoji od:

$\overline{Z_{eq}}$  = ekvivalentne impedancije nastale sumom impedancija kabela, vjetroagregata i transformatora,

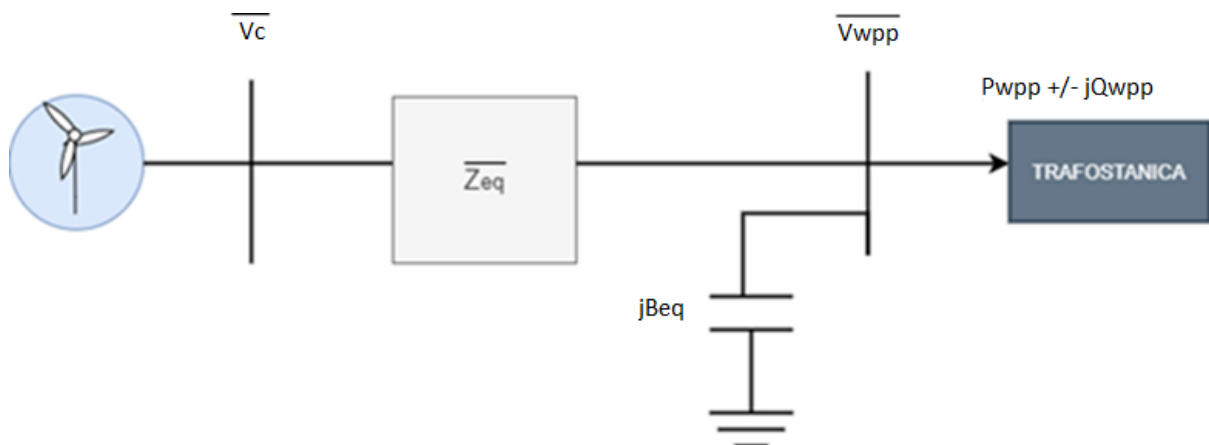
$jB_{eq}$ = ekvivalentne susceptancije nastale sumom susceptancija kabela,

$\overline{V_c}$  = maksimalno dozvoljenog napona pretvarača,

$\overline{V_{wpp}}$  = napona mreže u točki spajanja s VP-om,

$P_{WPP}$ = djelatne snage koju je proizveo VP,

$jQ_{WPP}$ = reaktivne snage koju je proizveo VP.



Slika 2.2. Pojednostavljeni model VP-a [2]

U literaturi [3] obrađen je problem generiranja prenapona u različitim topologijama VP-a uslijed rada pretvaračkih komponenti. Korištene topologije VP-a su: radijalna, jednostrani prsten, dvostrani prsten i zvijezda. Na temelju precizne i sveobuhvatne analize predložena je metodologija za smanjenje prenapona u radijalnoj topologiji. Predložena metodologija primijenjena je na VP ZAFARANA [10] u Egiptu u programskom paketu DIGSILENT [11].

Za razliku od literatura [1], [2] i [3], u kojim je simulacija provedena tako što je ukupna snaga VP-a dobivena sumom pojedinačnih snaga vjetroagregata, u literaturi [4] predstavljen je

detaljan model VP-a u kojemu je modelirana svaki vjetroagregat zasebno, prikupljeni su svi parametri sustava pri tome uzimajući u obzir gubitke u sustavu. Literatura [4] pruža nove spoznaje za bolje razumijevanje ograničenja VP-a u vidu pružanja stabilnosti sustava, posebno dugoročne stabilnosti napona. Iz navedene literature uočava se potreba za danjim istraživanjima regulacije napona VP-a.

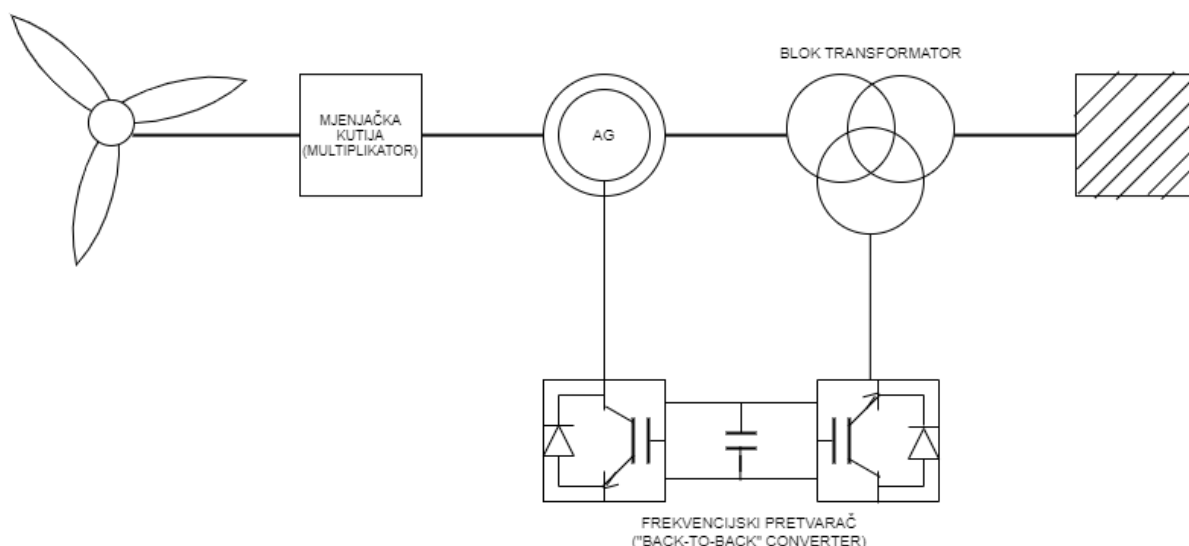
### 3. VJETROAGREGATI I MOGUĆNOST REGULACIJE NAPONA

Prema literaturi [12] princip rada vjetroagregata zasniva se na dva procesa. Prvi je proces pretvorbe kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju. Drugi proces je pretvorba mehaničke u električnu energiju koja se preko generatora prenosi dalje prema elektroenergetskoj mreži. Autori u literaturi [12] navode da se vjetroagregati mogu klasificirati prema regulaciji mehaničke snage te se, nadalje, mogu podijeliti prema regulaciji brzine vrtnje. Stoga, vjetroagregati se dijele na one s fiksnom brzinom vrtnje (Tip 1), ograničenom promjenjivom brzinom vrtnje (Tip 2), promjenjivom brzinom vrtnje s djelomičnim (Tip 3) ili potpunim (Tip 4) spajanjem na mrežu preko frekvencijskog pretvarača. U literaturi [12] autori su naveli još jedan tip vjetroagregata koji su nazvali Tip 5, koji je preko sinkronog stroja direktno spojen na srednjonaponsku mrežu. Budući da je tema diplomskog rada regulacija napona VA na PCC-u, u nastavku će biti opisani oni tipovi vjetroagregata kod kojih je regulacija moguća, dakle, Tip 3 i Tip 4.

#### 3.1. Vjetroagregat Tip-a 3

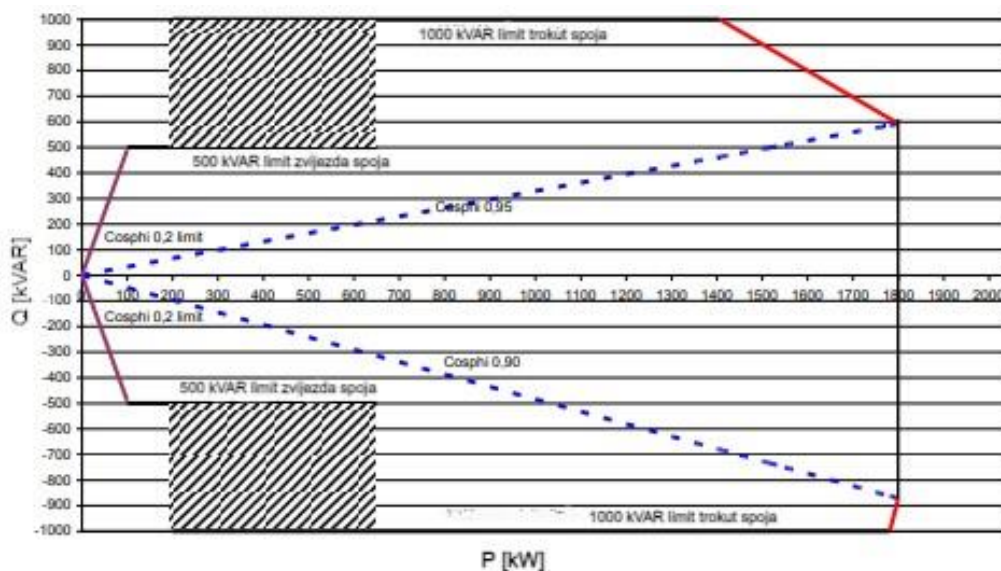
Vjetroagregat Tip-a 3, koja u svojoj konfiguraciji koristi asinkroni motor s kliznim kolutima, opće je poznata pod nazivom dvostruko napajani asinkroni generator. Rotorski namot spojen je preko „back-to-back“ pretvarača s mrežom, dok je stator direktno spojen na mrežu. Pored snage koja se prenosi u mrežu preko statora, snaga se prenosi i preko frekvencijskog pretvarača kada je brzina vrtnje veća od sinkrone brzine. Kada je brzina vrtnje manja od sinkrone brzine vrtnje tok snage je od mreže preko oba pretvarača te od rotora prema statoru. To je omogućeno zbog četverokvadrantnog načina rada pretvarača. Dakle, ovaj tip vjetroagregata ima velik raspon brzina vrtnje, od -40% do +30%. Prednost ovakvog tipa je što omogućuje odvojenu kontrolu djelatne i reaktivne snage prilikom asinkronog pokretanja. U industrijskim pogonima, kao što je VP, koristi se vektorsko upravljanje zasnovano na orijentaciji polja (*engl. Field Oriented Vector Control*). Zbog toga je moguće upravljati generatorom čak i pri značajnim mrežnim smetnjama.

Na slici 3.1. [12] prikazan je shematski prikaz vjetroagregata Tip-a 3. Rotor je preko frekvencijskog pretvarača spojen na tercijar blok transformatora, a stator je direktno spojen na blok transformator.



Slika 3.1. Vjetroagregat Tip 3 [12]

Na slici 3.2. [13] prikazana je realna pogonska karta vjetroagregata Tip-a 3, Vestas V-90 1.8 MW. Može se uočiti da se statorski namot prespaja u spoj zvijezda pri manjim P i Q. Spajanjem u spoj zvijezda javlja se manja struja magnetiziranja što rezultira manjim gubicima i većim klizanjem dok je rotorski napon nepromijenjen. Crvene linije prikazuju termička ograničenja namota pri poduzbuđenom i naduzbuđenom generatoru. Također, na slici se može uočiti i maksimalno ograničenje djelatne snage pri nazivnoj vrijednosti snage.

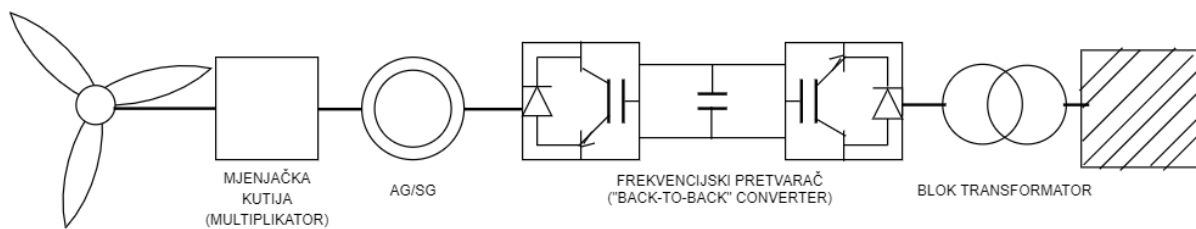


Slika 3.2. Pogonska karta vjetroagregata Tipa 3 Vestas V-90 1.8 MW [13]

## 3.2. Vjetroagregati Tip-a 4

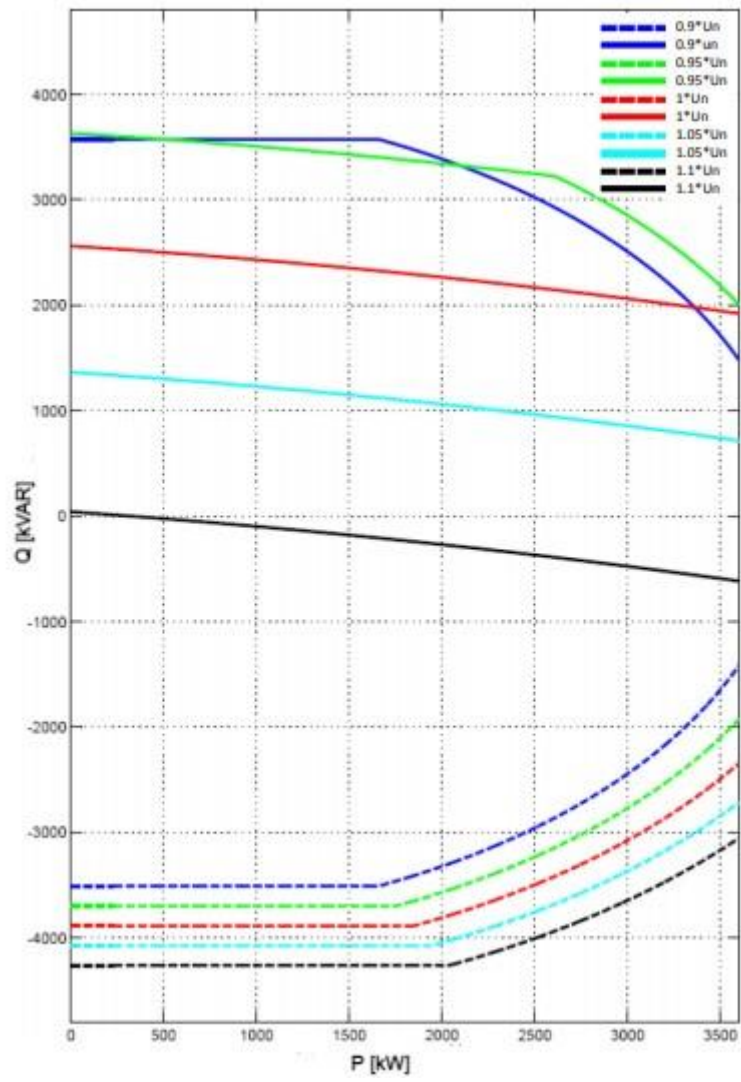
Vjetroagregat Tip-a 4 nudi fleksibilnost u radu zbog toga što je generator izravno spojen na mrežu preko frekvencijskog pretvarača. Na temelju sposobnosti pretvarača da regulira djelatnu i reaktivnu snagu, nema ograničenja u izboru generatora. Stoga, mogu se koristiti asinkroni generatora s kaveznim ili klizno-kolutnim rotorom, sinkroni generator s permanentnim magnetima i sl. Ovaj tip vjetroagregata može imati mjenjačku kutiju, ali i ne mora, ovisno o generatoru.

Na slici 3.3. [12] prikazana je shema vjetroagregata Tip-a 4 kod koje je generator izravno spojen na elektroenergetski sustav preko frekvencijskog pretvarača.



Slika 3.3. Vjetroagregat Tip 4 [12]

Na slici 3.4. [14] prikazana je stvarna pogonska karta VA Tip-a 4, Siemens 3.6 MW. Budući da se kod vjetroagregata Tip-a 4 prenosi nazivna djelatna snaga vjetroturbine, frekvencijski pretvarači moraju biti konstruirani za takav prijenos. Frekvencijski pretvarač se može podijeliti na dva dijela: pretvarač na mrežnoj strani – GSC (*eng. Grid Side Converter*) i pretvarač na generatorskoj strani – MSC (*eng. Machine Side Converter*). Ako mrežna pravila zahtijevaju, GSC prenosi dodatnu jalovu snagu, a MSC služi za magnetiziranje generatora. Budući da je generator potpuno odvojen od mreže preko frekvencijskog pretvarača, on nema utjecaja na pogonsku kartu vjetroagregata – ona je određena GSC-om.



Slika 3.4. Pogonska karta vjetroagregata Tip-a 4 Siemens 3.6 MW [14]

## **4. KONFIGURACIJA VJETROPARKOVA**

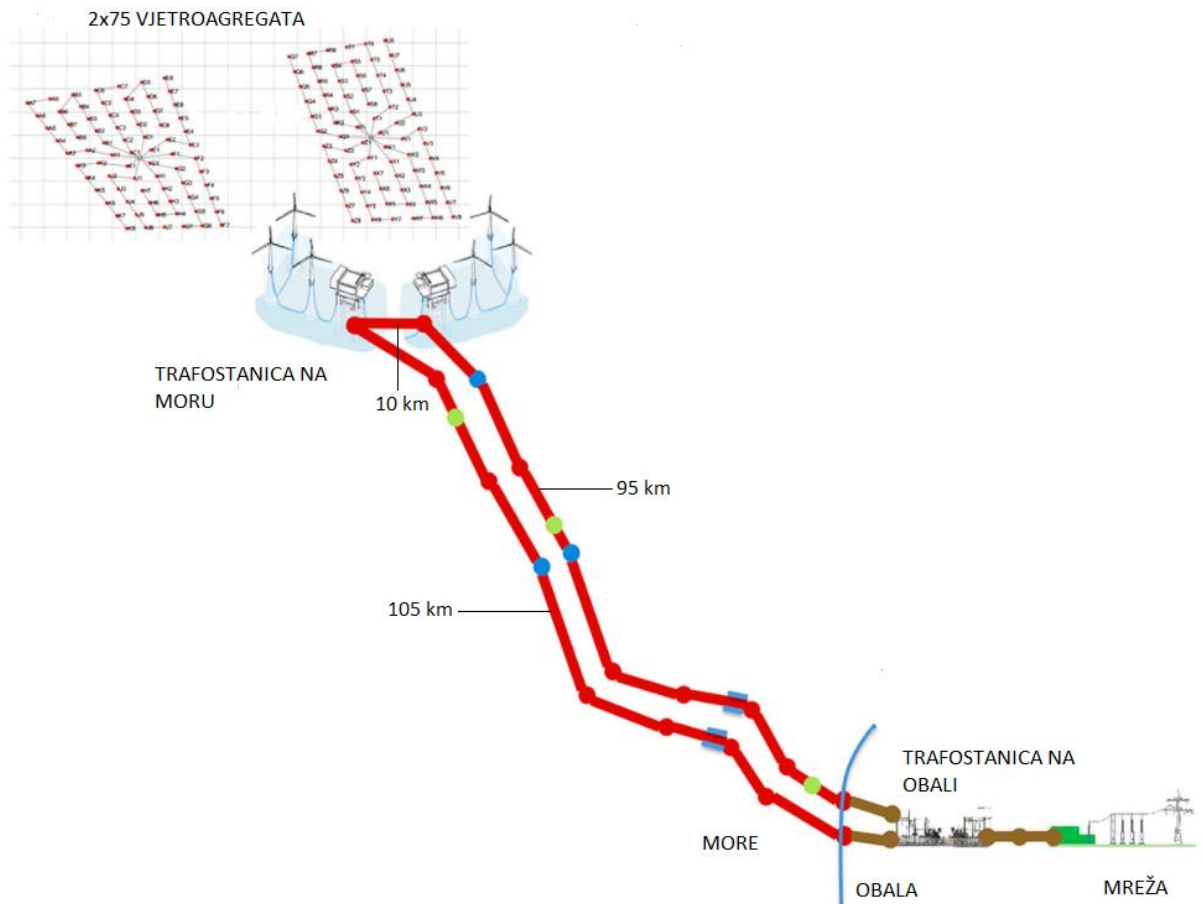
Prije same provedbe simulacije utjecaja VP na PCC-u s mrežom dan je primjer dva VP-a – VP-a Gemini [15] u Nizozemskoj, koji se nalazi na pučini i VP-a Korlat [16] u Hrvatskoj, koji se nalazi na kopnu.

### **4.1. Vjetropark Gemini, Nizozemska**

VP Gemini [15] smješten je u nizozemskom dijelu Sjevernoga mora, 85 km od nizozemske obale.

VP se sastoji od 150 vjetroagregata Siemens 4.0 pojedinačne snage 4 MW i promjera rotora 130 m. Svaki vjetroagregat generira električnu energiju napona 690 V. Transformator u vjetroagregatu podiže napon na 33 kV. Također, povezuje se 7-8 vjetroagregata u zajedničku petlju kojima se u trafostanici na pučini poveća napon na 230 kV te se kabelom dugim 85 km električna energija vodi do trafostanice na kopnu u kojoj se energija pretvara u viši napon (380 kV) te se spaja na prijenosnu mrežu i prenosi dalje u elektroenergetski sustav. Korišteni kabeli raspoređeni su u 3 dionice, dugačke 95,10 i 105 km i položene u oblik prstena. Promjer kabela je 30 cm, a težina im je 90-140 kg/m. Kabel se sastoji od 3 jezgre oko kojih je gumeni ispun koji im daje okrugli oblik. Osim 3 jezgre, unutar ispuna se nalazi i optički kabel koji povezuje kontrolne jedinice i vjetroagregate. Pomoću optičkog kabela prenose se informacije o funkcioniranju pojedinog vjetroagregata. Vanjska strana kabela zaštićena je čeličnim oklopom kako bi se kabel zaštitio od ribarskih mreža ili komada stijena koji bi mogli pasti na njega.[14]

Na slici 4.1. [15] prikazana je konfiguracija VP-a Gemini na kojem je vidljiv raspored vjetroagregata, položaj kabela i smještaj TS.



Slika 4.1. Konfiguracija VP-a Gemini [15]

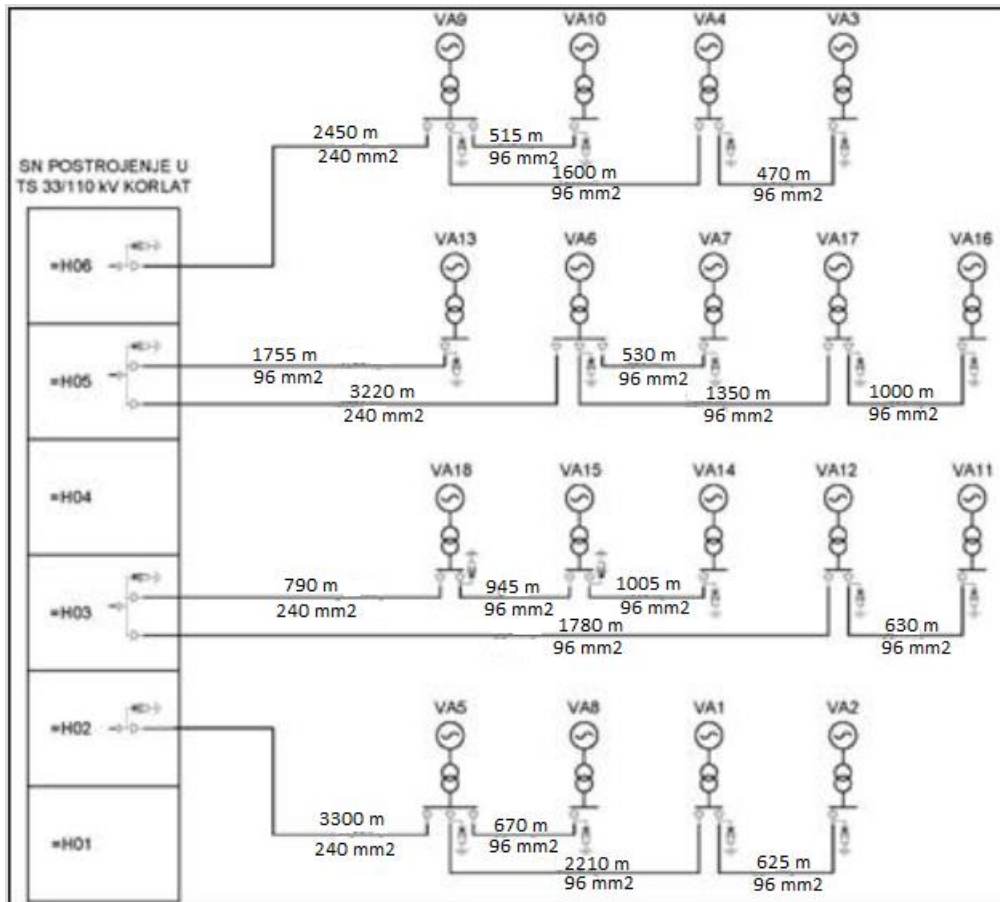
## 4.2. Vjetropark Korlat, Hrvatska

VP Korlat [16] smješten je nedaleko sela Korlat, 4 km od Benkovca u Republici Hrvatskoj.

VP se sastoji od 18 vjetroagregata Nordex N131/3500 pojedinačne snage 3,5 MW i promjera rotora 131 m. Trafostanice u vjetroagregatima podižu napon na 33 kV koji se kabelima ukupne duljine 12 km vodi do TS 30(33)/110 kV. TS 30(33)/110 kV priključena je na prijenosnu mrežu uvodom i izvodom dalekovoda 110 kV Zadar-Benkovac, duljine 4 km. Priključak na sabirnice 33 kV izveden je sa 6 izvoda koji se sastoje od 3 jednožilna kabela položena u trolist. Presjek korištenih vodiča je 240/16 mm<sup>2</sup> i 95/16 mm<sup>2</sup>. [16]

Na slici 4.2.[15] prikazana je konfiguracija VP-a Korlat ukupne snage 63 MW. Na slici je vidljiv razmještaj vjetroaregata te duljine i presjeci kabela.





Slika 4.2. Konfiguracija VP-a Korlat [16]

### 4.3. Testni model mreže vjetroparka

Na slici 4.4. prikazan je testni model mreže VP-a. VP se sastoji od 23 vjetoagregata Vestas V150-4,2 MW[17], promjera rotora 150 m. Podatci o vjetoagregatu dani su u tablici 4.1. Ukupna snaga VP-a je 96,6 MW. Nazivni napon mreže VP-a na slici je 33 kV. Izabrani vjetrogregat pripada vjetroagregatu Tip-a 4, odnosno moguć je potpuno prijenos energije. Vjetoagregati su spojeni preko TS 0,69/33 kV te 33 kV kabelima do TS 33/110 kV, koje se sastoji od dva potpuno jednaka transformatora nazivne snage 63 MVA koji rade paralelno. U tablici 4.2. prikazani su korišteni kabeli. Kabeli su odabrani iz kataloga proizvođača Elka d.o.o.[18], svi su aluminijski, vodoravnog oblika i položeni u zemlju. U tablici 4.2. dan je presjek korištenih kabela,  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ , nazivna struja i nazivna snaga. U katalogu je dan istosmjerni otpor  $R_{01}$  koji je bilo potrebno preračunati u izmjenični otpor  $R_1$ . Prema literaturi [19] izmjenični otpor se dobije iz:

$$R_1 = k_R \cdot R_{01} = k_S \cdot k_B \cdot k_K \cdot R_{01}, \quad (4-1)$$

gdje se uzima samo koeficijent skin efekta i istosmjerni otpor. Koeficijent skin efekta računa se prema literaturi [19] kao:

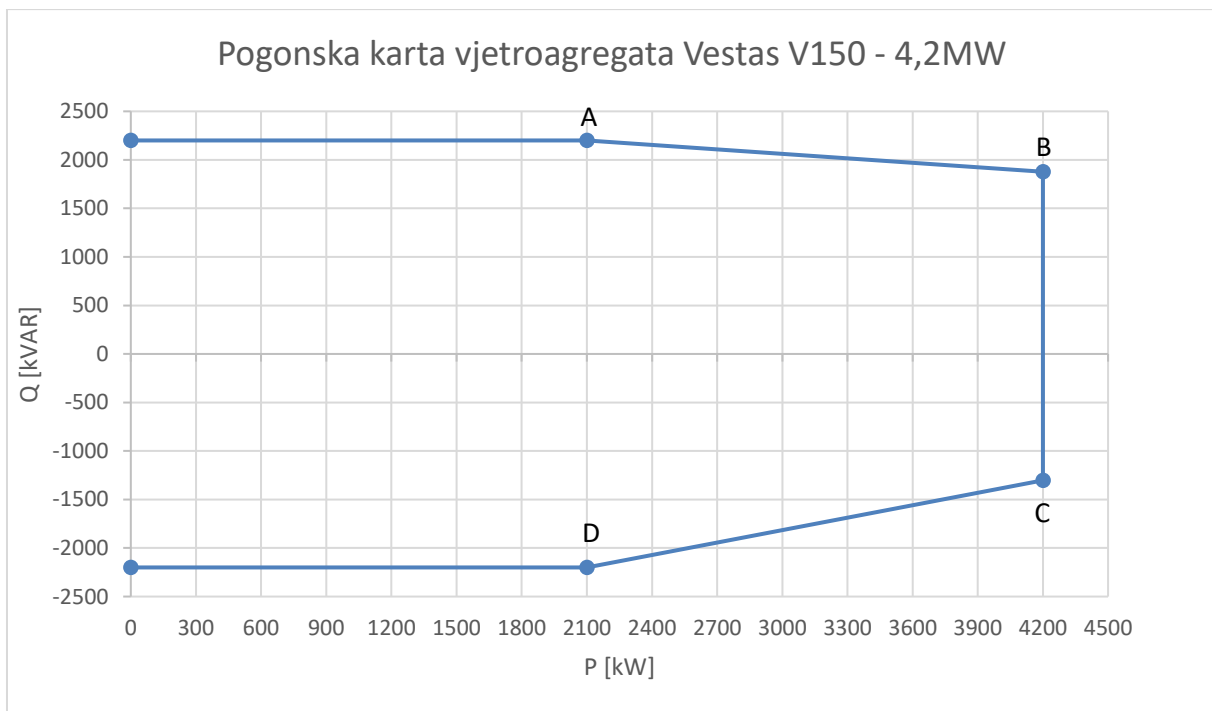
$$k_s = 1 + \frac{82,3 \cdot 10^{-6}}{R_{01}^2} - \frac{5420 \cdot 10^{-12}}{R_{01}^4}. \quad (4-2)$$

U tablici 4.1. prikazane su tehničke specifikacije o vjetroagregatu Vestas V150-4,2 MW [17].

Tablica 4.1. Podatci o korištenom vjetroagregatu.

<b>NAZIVNA SNAGA [MW]</b>	4,2
<b>MINIMALNA BRZINA VJETRA [m/s]</b>	3
<b>MAKSIMALNA BRZINA VJETRA [m/s]</b>	22,5
<b>PROMJER ROTORA [m]</b>	150
<b>TIP PRETVARAČA</b>	Tip 4

Na slici 4.3. [20] prikazan je pogonska karta vjetroagregata Vestas V150-4,2 MW [16] pri naponu 1,10 p.u. nazivnog napona. Koordinate točaka su: A (2100, 2200), B (4200, 1877), C (4200, -1304), D (2100,-2200).



Slika 4.1. Pogonska karta vjetroagregata Vestas V150-4,2 MW [20]

U tablici 4.2. dani su podatci o kabelima korištenim pri simulaciji.

*Tablica 4.2. Podatci o korištenim kabelima.*

<b>PRESJEK</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>R<sub>1</sub></b> [Ω/km]	<b>L<sub>1</sub></b> [mH/km]	<b>C<sub>1</sub></b> [μF/km]	<b>NAZIVNA</b> <b>STRUJA</b> [A]	<b>NAZIVNA</b> <b>SNAGA</b> [MVA]
35	0,8681	0,76	0,118	155	8,86
70	0,4432	0,69	0,144	235	13,43
120	0,2533	0,65	0,164	315	18,00
240	0,1257	0,59	0,207	458	26,18
400	0,0788	0,55	0,253	591	33,78

U tablici 4.3. dani su podatci o presjeku kabela između sabirnica i duljini njihove trase.

*Tablica 4.3. Podatci o presjeku kabela između sabirnica i duljina njihove trase.*

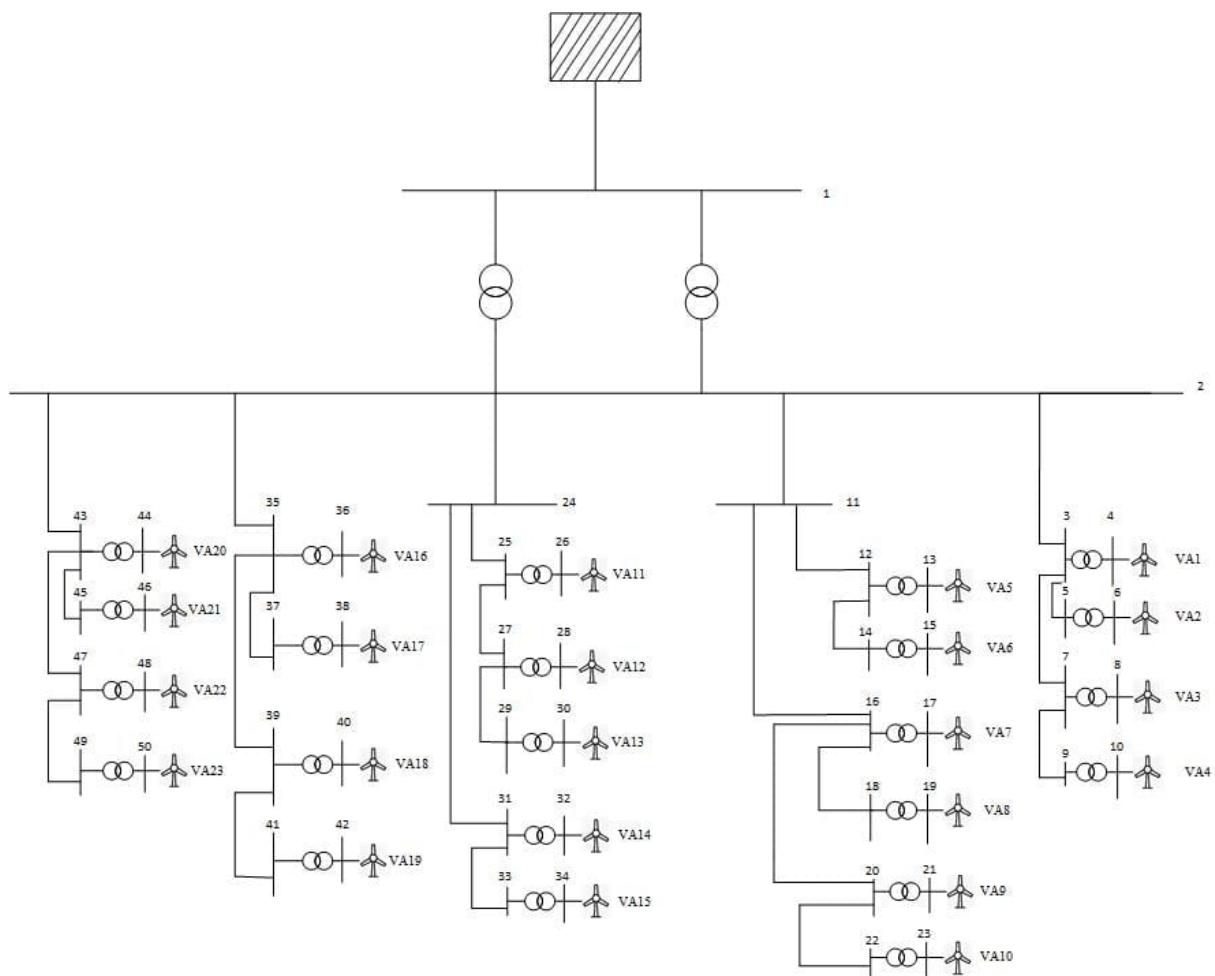
<b>OD-DO</b>	<b>PRESJEK</b> <b>KABELA</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>DULJINA</b> <b>TRASE</b> <b>KABELA</b> [m]
2-3	240	2500
3-5	35	650
3-7	70	1450
7-9	35	450
2-11	400	1350
11-12	70	600
11-16	240	1600
12-14	35	500
16-18	35	480
16-20	70	1200
20-22	35	900
2-24	240	1200

24-25	120	200
24-31	70	1450
25-27	70	530
27-29	35	600
31-33	35	1050
2-35	240	1200
35-37	35	1500
35-39	70	470
39-41	35	500
2-43	240	2900
43-45	35	630
43-47	70	1500
47-49	35	540

U tablici 4.4. dani su podaci o transformatorima korištenim pri simulaciji.

*Tablica 4.4. Podatci o korištenim transformatorima.*

<b>TRANSFORMATOR</b>	<b>BROJ TRANSFORMATORA</b>	<b>NAZIVNA SNAGA [MVA]</b>	<b>u<sub>K</sub> [%]</b>	<b>P<sub>CU</sub> [kW]</b>
0,69/33 kV	23	8	8	-
33/110 kV	2	63	11	150

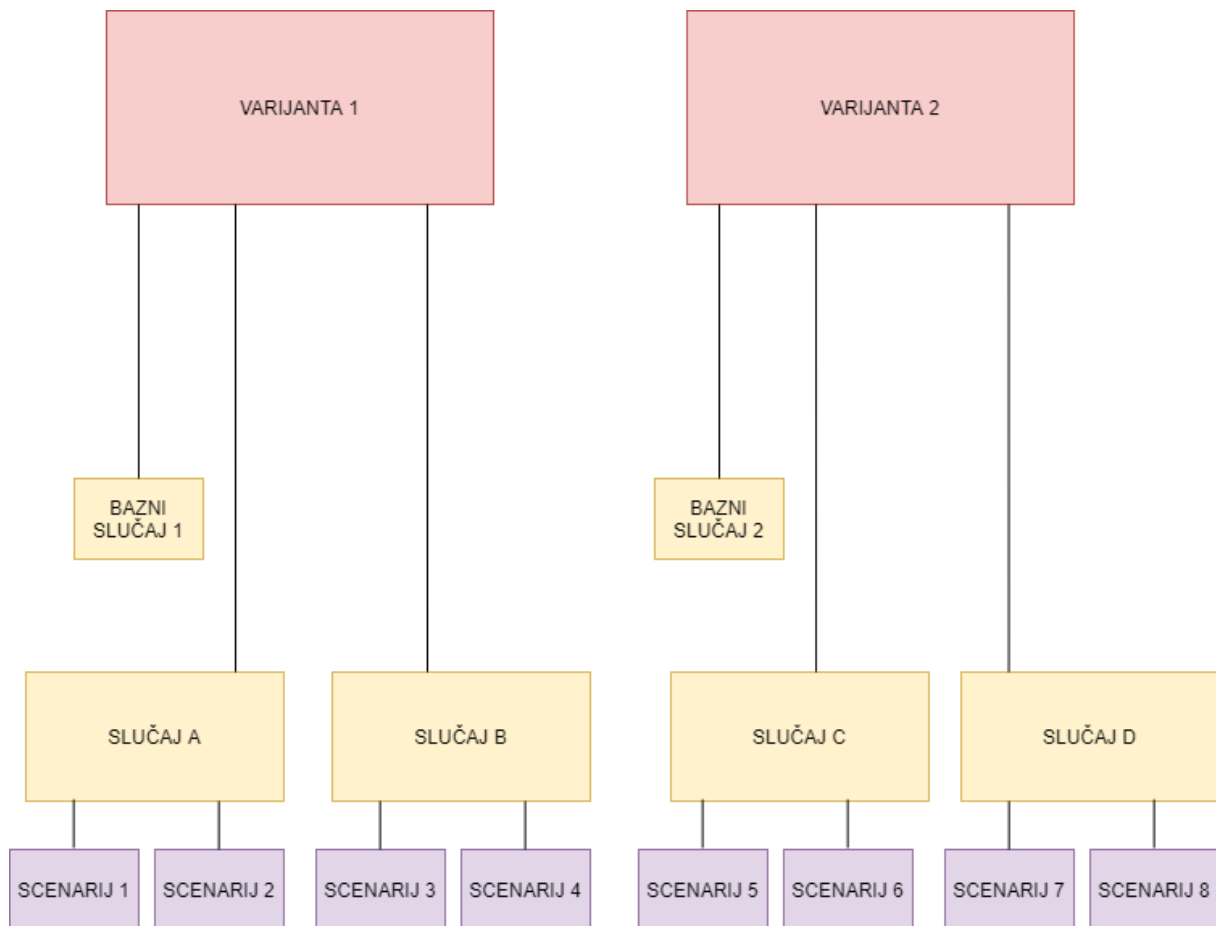


Slika 4.4. Model testne mreže VP-a

## **5. SIMULACIJA UTJECAJA DETALJNOG MODELA VJETROPARKA I VJETROPARKA MODELIRANOG JEDNIM GENERATOROM NA PRIJENOSNI SUSTAV**

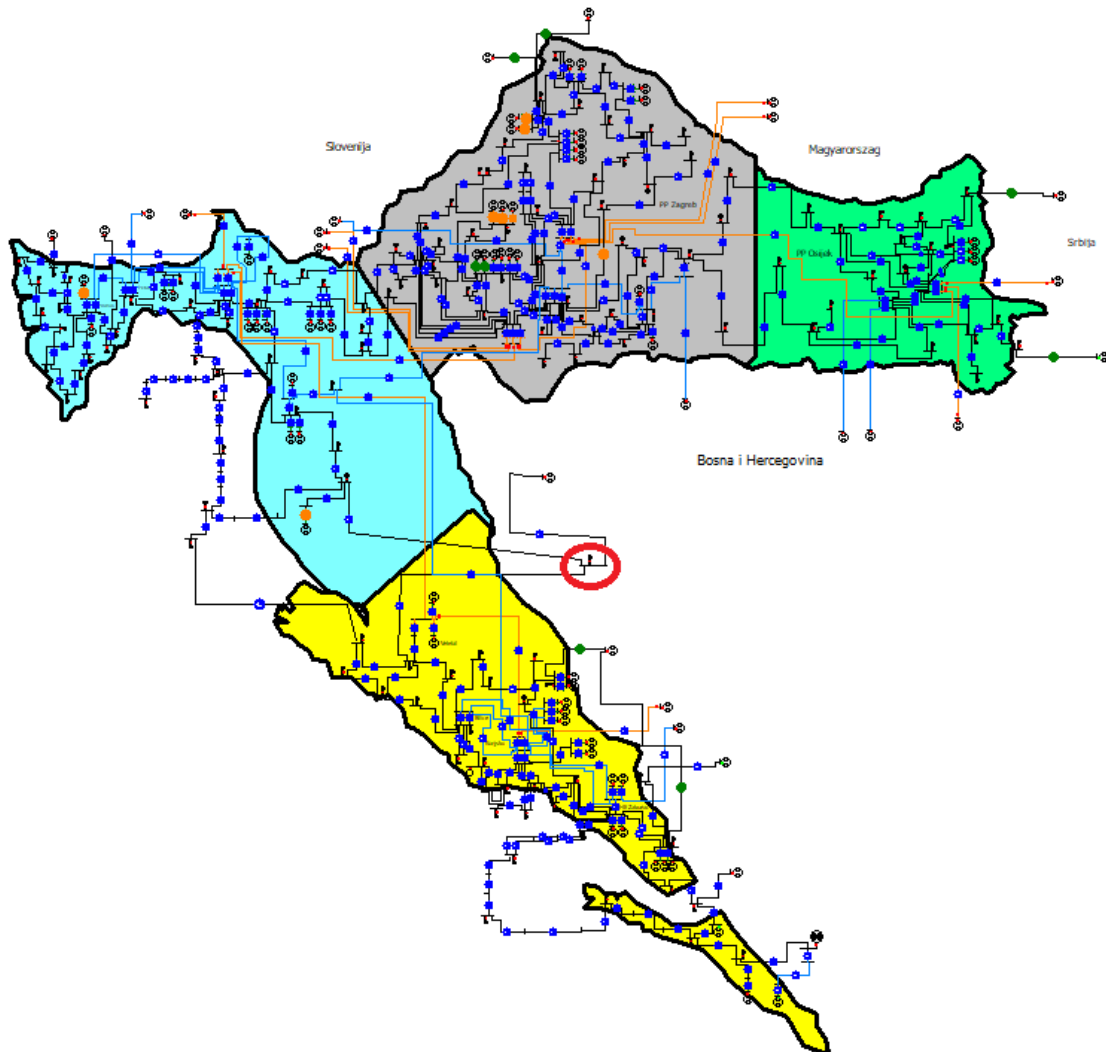
### **5.1. Opis zadatka**

Na slici 5.1. prikazan je shematski prikaz simulacije. Simulacija se sastoji od dvije varijante. Prva varijanta predstavlja sustav pri maksimalnom opterećenju i maksimalnoj proizvodnji. Druga varijanta predstavlja sustav pri minimalnom opterećenju i minimalnoj proizvodnji. Bazni slučaj 1 je osnovni slučaj kada VP nije priključen na prijenosnu mrežu pri varijanti 1. Bazni slučaj 2 je osnovni slučaj kada VP nije priključen na prijenosnu mrežu pri varijanti 2. Slučaj A označava da je sustav bez regulacije napona pri varijanti 1. Slučaj B označava da je sustav s regulacijom napona pri varijanti 1. Slučaj C označava da je sustav bez regulacije napona pri varijanti 2. Slučaj D predstavlja da je sustav s regulacijom napona pri varijanti 2. Svaki od ta četiri sustava dijeli se na dva scenarija. Scenarij 1 znači da je priključen detaljan model VP-a pri slučaju A i varijanti 1. Scenarij 2 znači da je priključen generator kojim je modeliran VP pri slučaju A i varijanti 1. Scenarij 3 znači da je priključen detaljan model VP-a pri slučaju B i varijanti 1. Scenarij 4 znači da je priključen generator kojim je modeliran VP pri slučaju B i varijanti 1. Scenarij 5 znači da je priključen detaljan model VP-a pri slučaju C i varijanti 2. Scenarij 6 znači da je priključen generator kojim je modeliran VP pri slučaju C i varijanti 2. Scenarij 7 znači da je priključen detaljan model VP-a pri slučaju D i varijanti 2. Scenarij 8 znači da je priključen generator kojim je modeliran VP pri slučaju D i varijanti 2. Čvor na koji se priključuje VP na prijenosnu mrežu je čvor Gračac koji je zaokružen crvenom bojom na slici 5.2. koja prikazuje prijenosni sustav Hrvatske. Za potrebe simulacije gledana su i dva susjedna čvorišta čvora Gračac – Lički Osik i Obrovac.



*Slika 5.1. Opis zadatka*

Na slici 5.2. prikazan je prijenosni sustav Hrvatske prikazan u programu PowerWorld Simulator 22 [5]. Crvenom bojom zaokružen je čvor (sabirnica) na koji se priključuje VP. Taj čvor je izvučen na stranu zbog potrebe za prostorom za ucrtavanje VP-a.



Slika 5.2. Prijenosni sustav Hrvatske s označenim priključnim čvorom

## 5.2. Provedba simulacije

### 5.2.1. Ulazne vrijednosti vjetroparka

Nakon što su se izabrali vjetroagregati, odredili transformatori i kabeli i njihovi parametri, VP je nacrtan u program PowerWorld Simulator 22 [5]. Podatke je bilo potrebno prilagoditi zahtjevima samog programa, stoga su se neki podatci morali preračunati.

Budući da se unose podatci u relativnim jedinicama (per unit, p.u.), bilo ih je potrebno izračunati  $Z_T$  transformatora prema formuli [19]:

$$Z_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{nT}}, \quad (5-1)$$



gdje je  $S_B$  bazna snaga i iznosi 100 MVA, a  $S_{nT}$  nazivna snaga transformatora. Pomoću gubitaka u bakru  $P_{CU}$  dobije se  $R_T$  prema formuli [19]:

$$R_T = P_{CU} \cdot \frac{S_B}{S_{nT}^2}. \quad (5-2)$$

Iz  $Z_T$  i  $R_T$  dobije se izraz za  $X_T$  [19]:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}. \quad (5-3)$$

U tablici 5.1. dani su iznosi za  $R_T$  i  $X_T$  za transformatore 33/110 kV. Ta dva transformatora su potpuno jednaka zato imaju iste vrijednosti tih veličina.

*Tablica 5.1. Iznosi  $R_T$  i  $X_T$  za transformatore 33/110 kV u p.u..*

<b><math>R_T</math> [p.u.]</b>	<b><math>X_T</math> [p.u.]</b>
0,003780	0,174560

Izrazi za  $R_1$ ,  $L_1$  i  $C_1$  dani su relativnim jedinicama – p.u. Dobili su se tako da su se u PowerWorld Simulator 22 [5] unijele duljine trase kabela u km te su se vrijednosti  $L_1$  i  $C_1$  pomnožile s  $2\pi f$  kako bi se dobile vrijednosti  $X_{L1}$  i  $X_{C1}$ . Mreža je radijalno strukturirana.

U tablici 5.2. dani su presjeci kabela po trasi, duljine trase te  $R_1$ ,  $X_{L1}$  i  $X_{C1}$  u p.u.

*Tablica 5.2. Parametri kabela po trasi.*

<b>OD-DO</b>	<b>PRESJEK KABELA [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>DULJINA TRASE KABELA [m]</b>	<b><math>R_1</math> [p.u.]</b>	<b><math>X_{L1}</math> [p.u.]</b>	<b><math>X_{C1}</math> [p.u.]</b>
2-3	240	2500	0,028856	0,042551	0,001770
3-5	35	650	0,051815	0,013057	0,000262
3-7	70	1450	0,059011	0,028854	0,000714
7-9	35	450	0,035872	0,009866	0,000182
2-11	400	1350	0,009774	0,021420	0,001168
11-12	70	600	0,024419	0,011939	0,000296
11-16	240	1600	0,018468	0,027233	0,001133
12-14	35	500	0,039858	0,010962	0,000202

16-18	35	480	0,038263	0,010524	0,000194
16-20	70	1200	0,048837	0,023879	0,000591
20-22	35	900	0,071826	0,019733	0,000363
2-24	240	1200	0,013851	0,020425	0,000824
24-25	120	200	0,004652	0,003750	0,000112
24-31	70	1450	0,059012	0,028854	0,000714
25-27	70	530	0,021570	0,010546	0,000261
27-29	35	600	0,047829	0,013155	0,000242
31-33	35	1050	0,083701	0,023021	0,000424
2-35	240	1200	0,013851	0,020425	0,000850
35-37	35	1500	0,119572	0,032890	0,000606
35-39	70	470	0,019128	0,009353	0,000232
39-41	35	500	0,039858	0,010962	0,000202
2-43	240	2900	0,033473	0,049359	0,002054
43-45	35	630	0,050221	0,013813	0,000254
43-47	70	1500	0,061046	0,029849	0,000739
47-49	35	540	0,043046	0,011839	0,000218

### 5.2.2. Ulazne vrijednosti prijenosnog sustava

Parametri prijenosnog sustava dani su u literaturi [21].

Pri maksimalnoj potrošnji, proizvodnja elektrana u sustavu Republike Hrvatske prikazana je u tablici 5.3.

*Tablica 5.3. Proizvodnja za varijantu 1.*

Naziv elektrane	Generirana snaga [MW]
Mladost	150,06
EL-TO Os.	27
Sis. G1	195,29
Sis. G2	195,29
TE-TO G3	100
TE-TO G4	60
TE-TO G5	60
TE-TO G 6	50
EL-TO Zg. G1	25
EL-TO Zg. G2	25
HE Dubr. G1	7,42

HE Dubr. G2	7,42
HE Āak. G1	15,42
HE Āak. G2	15,42
HE Var. G1	40
HE Var. G2	40
Goj. G1	20
Goj. G2	20
Goj. G3	11
Vin. G1	15,29
HE Vin. G2	15,29
Vin. G3	15,29
TE Rij. G	295,29
HE Rij. G1	9
HE Rij. G2	9
Plomin 2	195,29
Plomin 1	95,29
Senj G1	58,42
Senj G2	60,42
Senj G3	58,42
Sklope G1	23
HE Vel. G1	95,29
HE Vel. G2	95,29
Orl. G1	51,42
Orl. G2	51,42
Orl. G3	51,42
Trogir	198,3
HE Per. G1	14,02
HE Per. G2	14,02
Zak. G2	88,42
Zak. G3	84,42
Zak. G1	88,42
Zak. G4	88,42
HE Kralj. generatori	10
HE Kralj. generatori	10
HE Kralj. generatori	15
HE Dubr. G1	92,42
El-To G3	25

Pri minimalnoj potrošnji, proizvodnja je smanjena na taj naĉin da su smanjene proizvodnje onih elektrana koje su najskuplje zbog goriva – termoelektrane na plin, mazut i sl. Proizvodnja iz hidroelektrana ostala je netaknuta. U tablici 5.4. prikazana je proizvodnja sustava Republike Hrvatske za minimalnu potrošnju.

Tablica 5.4. Proizvodnja za varijantu 2.

Naziv elektrane	Generirana snaga [MW]
Mladost	158,64
EL-TO Os.	0
Sis. G1	0
Sis. G2	0
TE-TO G1	0
TE-TO G2	0
TE-TO G3	0
TE-TO G4	0
TE-TO G5	0
TE-TO G 6	0
EL-TO Zg. G1	0
EL-TO Zg. G2	0
HE Dubr. G1	12,17
HE Dubr. G2	12,17
HE Ćak. G1	20,17
HE Ćak. G2	20,17
HE Var. G1	40
HE Var. G2	40
Goj. G1	20
Goj. G2	20
Goj. G3	11
Vin. G1	20,04
HE Vin. G2	20,04
Vin. G3	20,04
TE Rij. G	0
HE Rij. G1	9
HE Rij. G2	9
Plomin 2	195,29
Plomin 1	0
Senj G1	63,17
Senj G2	65,17
Senj G3	63,17
Sklope G1	23
HE Vel. G1	100,04
HE Vel. G2	100,04
Orl. G1	56,17
Orl. G2	56,17
Orl. G3	56,17
Trogir	198,3
HE Per. G1	18,77
HE Per. G2	18,77
Zak. G2	93,17
Zak. G3	89,17
Zak. G1	93,17
Zak. G4	93,17

HE Kralj. generatori	10
HE Kralj. generatori	10
HE Kralj. generatori	15
HE Dubr. G1	97,17
El-To G3	0

U tablici 5.5. prikazana je proizvodnja i potrošnja razvrstana prema područjima, a preuzeta iz programa PowerWorld Simulator 22 [5]. Prijenosni sustavi podijeljeni su na područja ovisno o tome gdje se nalaze i njima upravljaju neovisni operatori. U tablici je prikazana i razmjena (uvoz i izvoz) električne energije s drugim prijenosnim sustavima. Tablica 5.5. odnosi se na varijantu 1, a tablica 5.6. odnosi se na varijantu 2. Za priključeni VP dodalo se područje pod nazivom Vjetropark iz kojeg su se izvukli gubici VP-a prikazani u rezultatima simulacije.

*Tablica 5.5. Prikaz područja za varijantu 1.*

Area Num	Area Name	AGC Status	Gen MW	Load MW	Shunt MW	Tot Sched MW	Int MW	ACE MW	Lambda	Loss MW
1	Hrvatska	Off AGC	2841,32	2989,44		0	- 224,21	- 224,21	Off Control	76,09
2	Mađarska	Off AGC	420			0	416,7	416,7	Off Control	3,3
3	Slovenija	Off AGC	-591,58			0	- 592,61	- 592,61	Off Control	1,03
4	BiH	Off AGC	251,29			0	250,51	250,51	Off Control	0,77
5	Srbija	Off AGC	150,06			0	149,61	149,61	Off Control	0,45

Tablica 5.6. Prikaz područja za varijantu 2.

Area Num	Area Name	AGC Status	Gen MW	Load MW	Shunt MW	Tot Sched MW	Int MW	ACE MW	Lambda	Loss MW
1	Hrvatska	Off AGC	1821,11	1793,61		0	-46,59	-46,59	Off Control	74,09
2	Mađarska	Off AGC	420			0	416,6	416,6	Off Control	3,4
3	Slovenija	Off AGC	-586,83			0	-587,78	-587,78	Off Control	0,95
4	BiH	Off AGC	256,04			0	255,12	255,12	Off Control	0,91
5	Srbija	Off AGC	158,64			0	157,93	157,93	Off Control	0,7

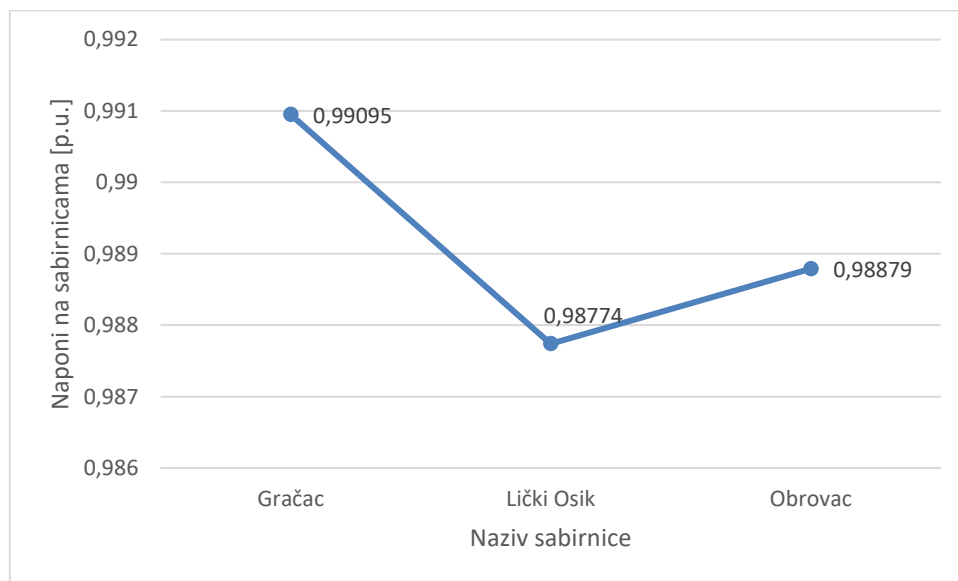
## 6. REZULTATI SIMULACIJE

U sljedećim poglavljima i potpoglavljima prikazani su rezultati provedene simulacije. Rezultati su obrađeni i grafički prikazani u programskom alatu Excel.

### 6.1. Varijanta 1

#### 6.1.1. Bazni slučaj 1

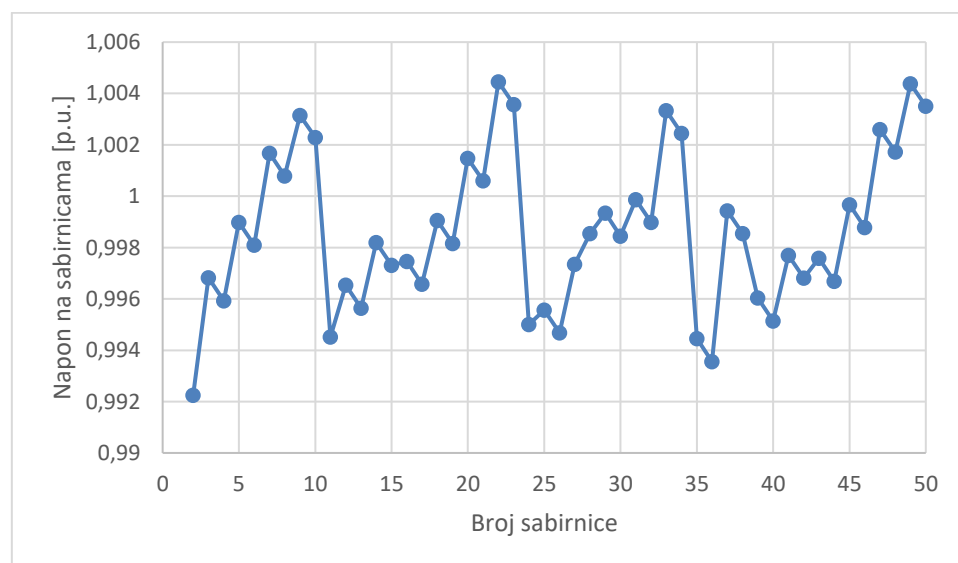
Na slici 6.1. prikazani su naponi na priključnoj sabirnici (čvoru) Gračac i susjednim sabirnicama Lički Osik i Obrovac u p.u. pri baznom slučaju 1.



Slika 6.1. Naponi na priključnoj sabirnici i susjednim sabirnicama

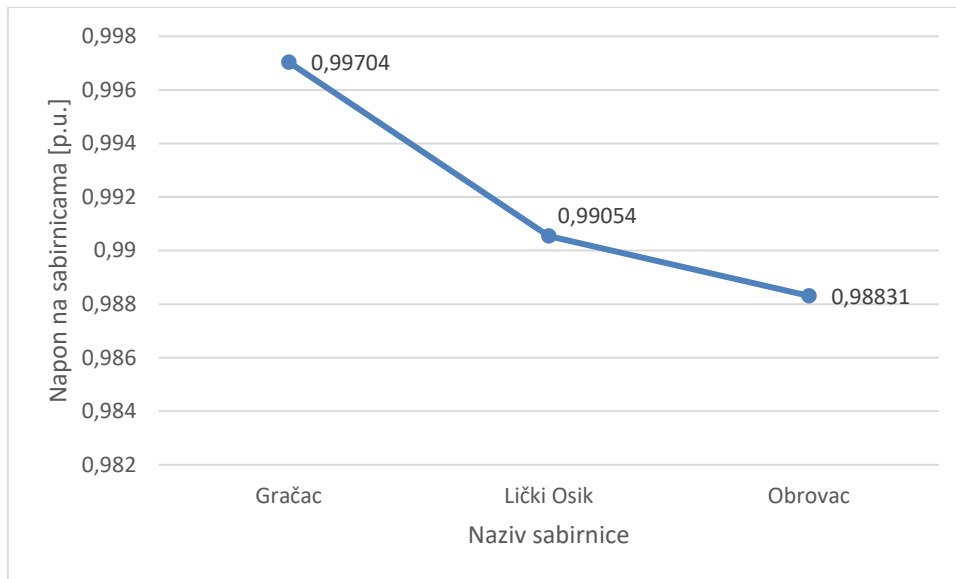
#### 6.1.2. Slučaj A, scenarij 1

Na slici 6.2. prikazan je napona unutar mreže VP-a.



Slika 6.2. Napon na sabirnicama VP-a

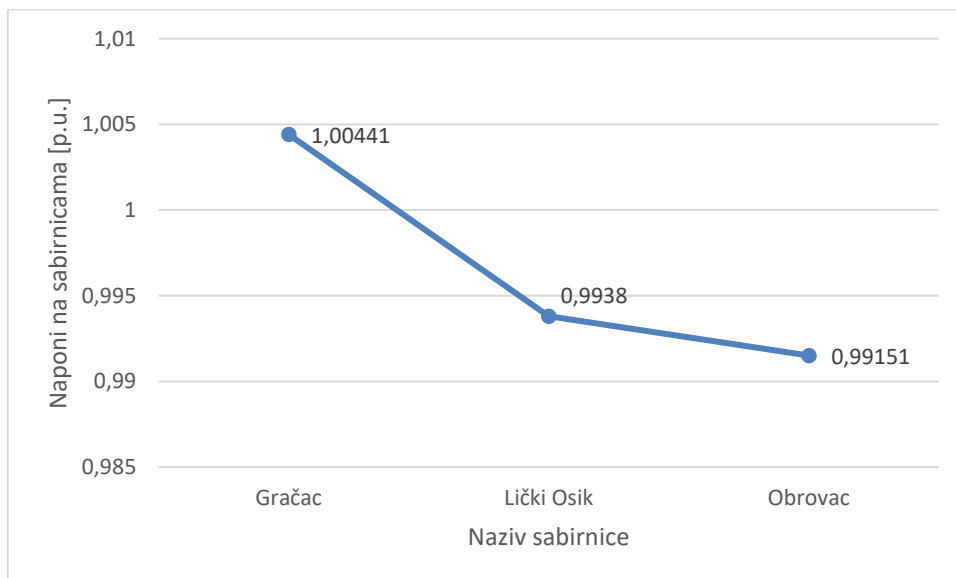
Na slici 6.3. prikazan je napon na priključnoj sabirnici i na susjednim sabirnicama.



*Slika 6.3. Napona na priključnoj i susjednim sabirnicama*

#### 6.1.3. Slučaj A, scenarij 2

Na slici 6.4. prikazan je napon na priključnoj i susjednim sabirnicama.



*Slika 6.4. Napon na priključnoj i susjednim sabirnicama*

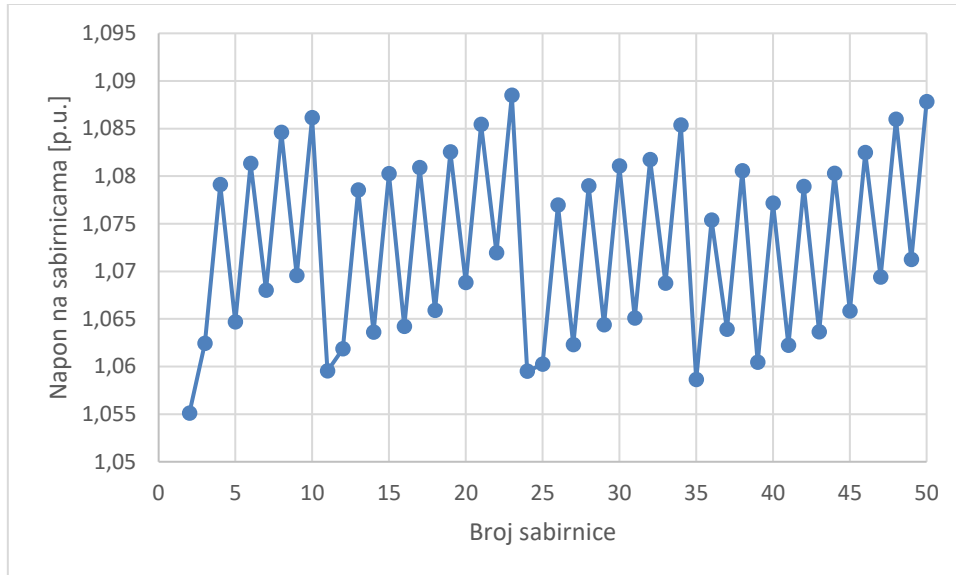
#### 6.1.4. Slučaj B, scenarij 3

VP je spojen na sabirnicu Gračac, uključen je alat AVR (Avaliability Voltage Regulation) i napon je postavljen na vrijednost 1,1. Uključena je i mogućnost Use Power Capability Curve



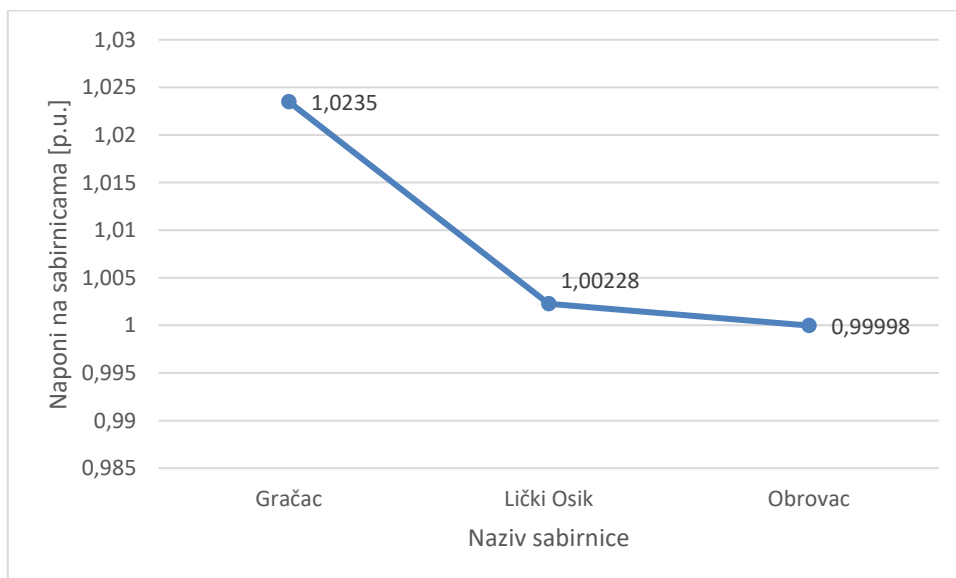
(Korištenje pogonske karte), prethodno su uneseni podaci o pogonskoj karti prikazani na slici 4.1.

Na slici 6.5. prikazani su naponi u mreži VP-a.



Slika 6.5. Naponi unutar mreže VP-a

Na slici 6.6. prikazani su naponi na priključnoj sabirnici Gračac i na susjednim sabirnicama Lički Osik i Obrovac.

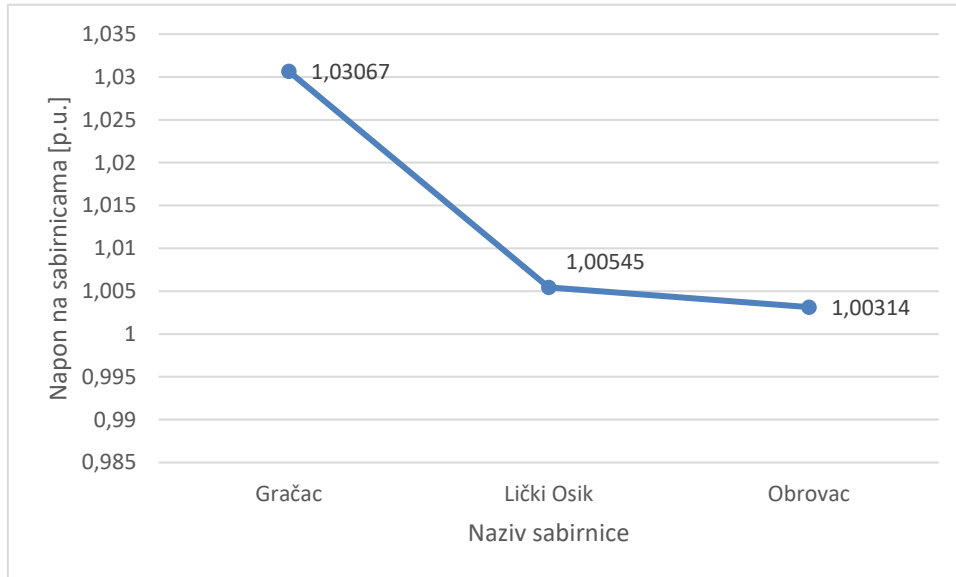


Slika 6.6. Napona na priključnoj i susjednim sabirnicama

### 6.1.5. Slučaj B, scenarij 4

VP je modeliran generatorom kojem je također podešen na AVR (Availability Voltage Regulation), postavljena je vrijednost napona na 1,1. Uključen je Use Power Capability Curve, koji je dobiven tako što su se vrijednosti točaka sa slike 4.1. pomnožile s brojem vjetroagregata.

Na slici 6.7. prikazani su naponi na priključnoj i susjednim sabirnicama.

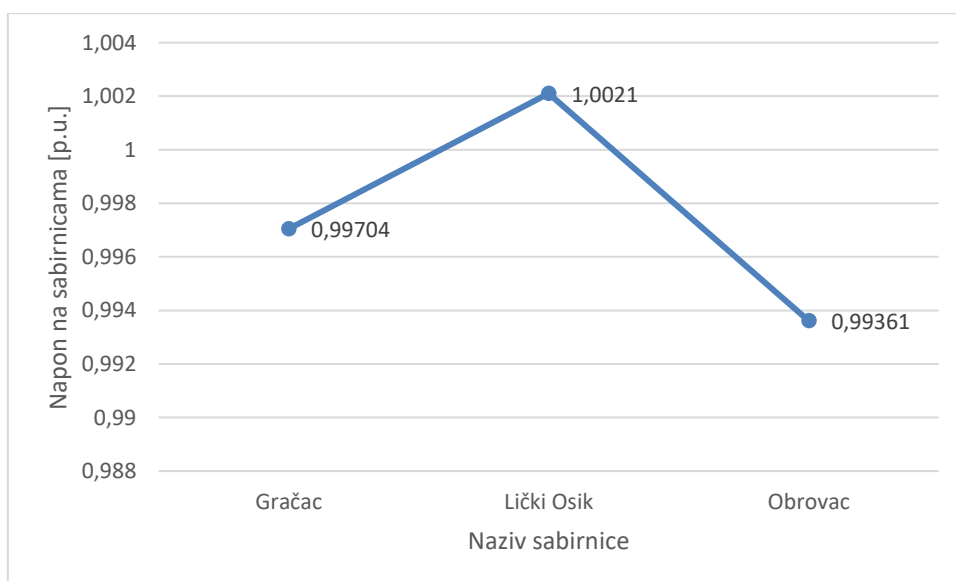


Slika 6.7. Naponi na priključnoj i susjednim sabirnicama

## 6.2. Varijanta 2

### 6.2.1. Bazni slučaj 2

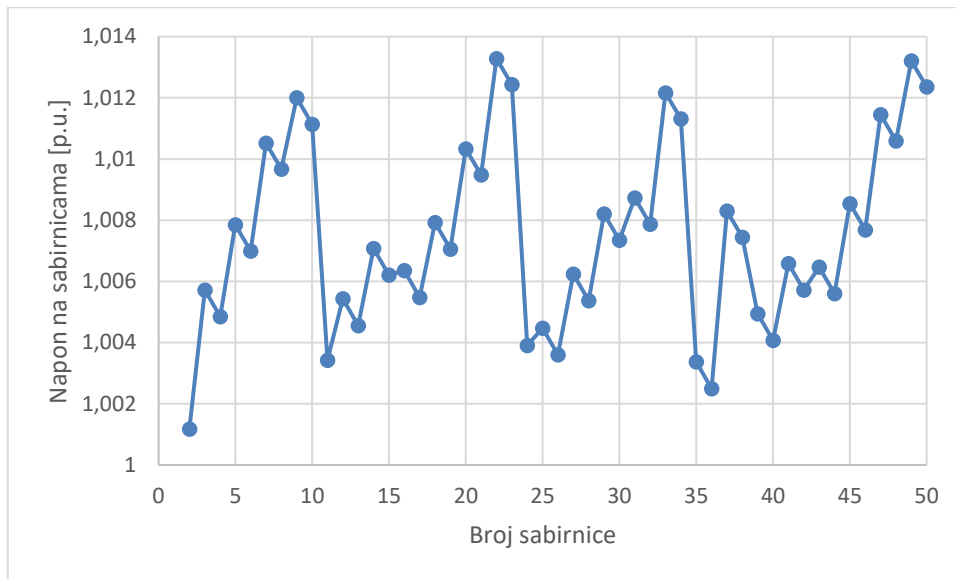
Na slici 6.8. prikazan je napon na priključnoj sabirnici i susjednim sabirnicama.



Slika 6.8. Napon na priključnoj i susjednim sabirnicama

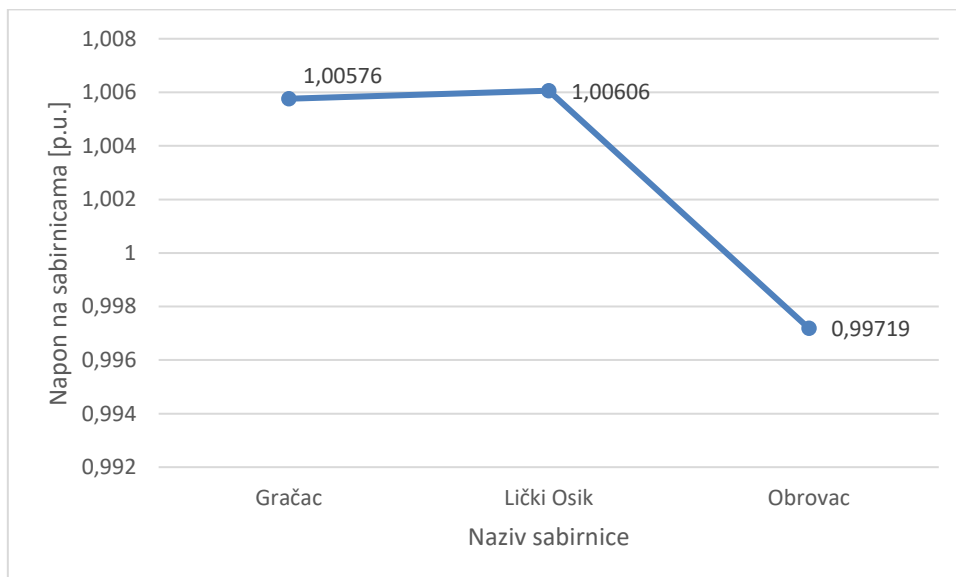
### 6.2.2. Slučaj C, scenarij 5

Na slici 6.9. prikazan su naponi unutar mreže VP-a.



Slika 6.9. Naponi unutar mreže VP-a

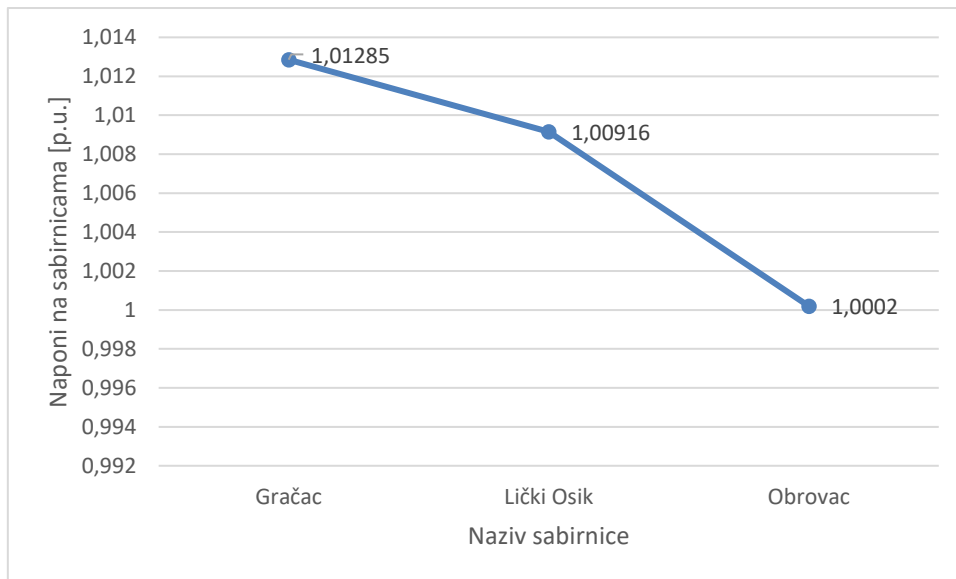
Na slici 6.10. prikazani su naponi na priključnoj i susjednim sabirnicama.



Slika 6.10. Naponi na priključnoj i susjednim sabirnicama

### 6.2.3. Slučaj C, scenarij 6

Na slici 6.11. prikazani su napona na priključnoj i susjednim sabirnicama.

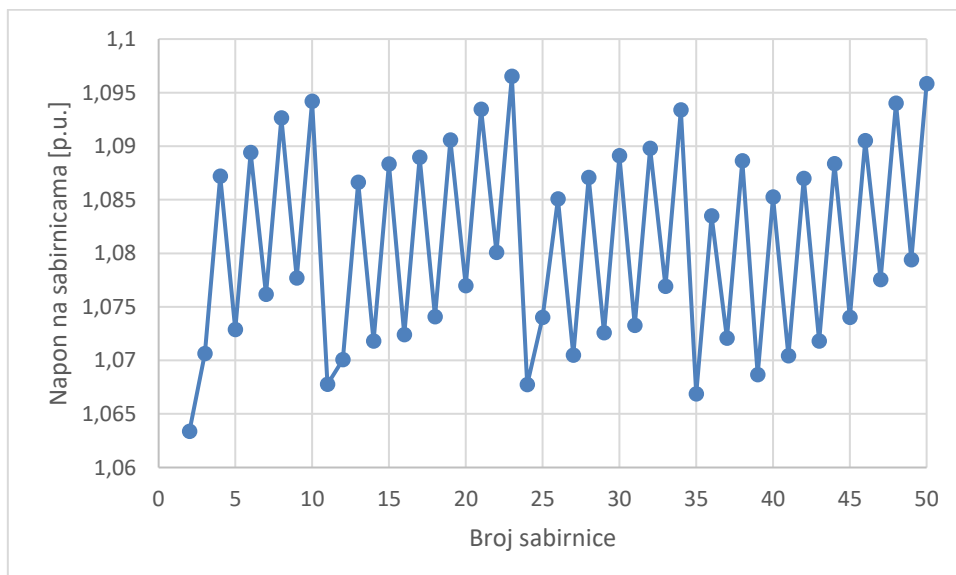


Slika 6.11. Naponi na priključnoj i susjednim sabirnicama

#### 6.2.4. Slučaj D, scenarij 7

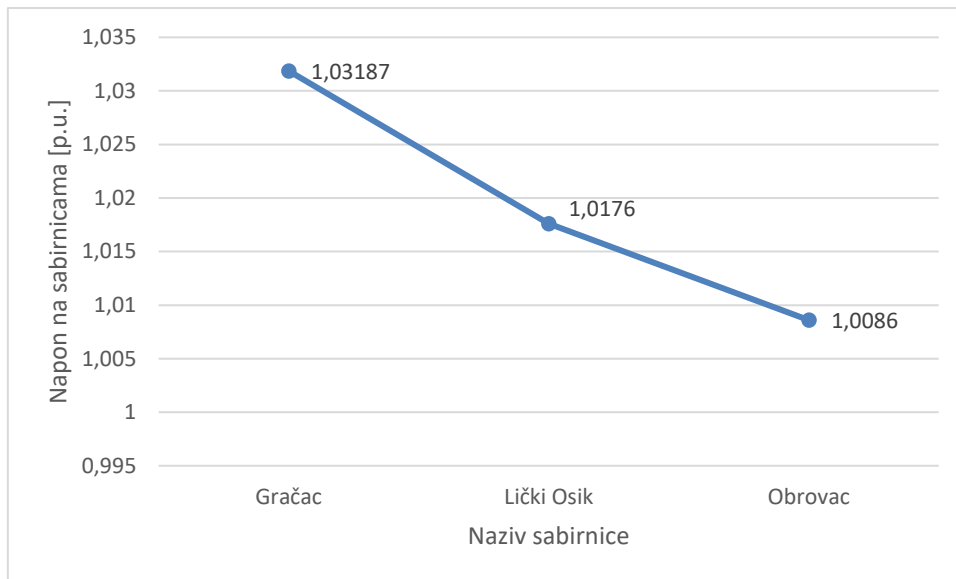
VP je spojen na sabirnicu Gračac, uključen je alat AVR (Avaliability Voltage Regulation) i postavljena je vrijednost napona na 1,1. Uključen je Use Power Capability Curve, prethodno su uneseni podatci o pogonskoj karti prikazani na slici 4.1.

Na slici 6.12 prikazani su naponi unutar mreže VP-a.



Slika 6.12. Naponi unutar mreže VP-a

Na slici 6.13. prikazan su naponi na priključnoj sabirnici i susjednim sabirnicama.

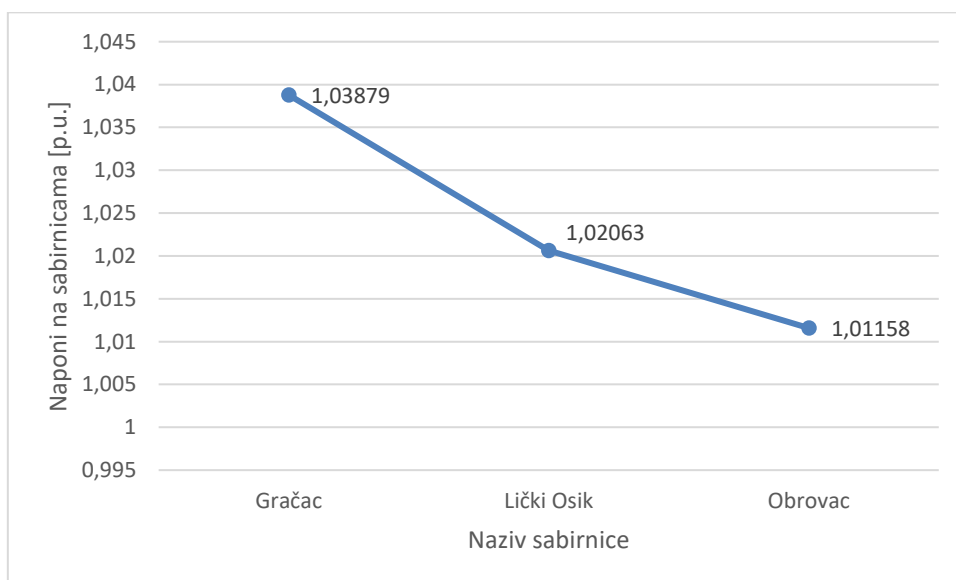


*Slika 6.13. Naponi na priključnoj i susjednim sabirnicama*

#### 6.2.5. Slučaj D, scenarij 8

VP je modeliran generatorom kojem je također podešen na AVR (Availability Voltage Regulation) i postavljena je vrijednost napona na 1,1. Uključen je Use Power Capability Curve, koji je dobiven tako što su se vrijednosti točaka sa slike 4.1. pomnožile s brojem vjetroagregata.

Na slici 6.14. prikazan je napon na priključnoj i susjednim sabirnicama.

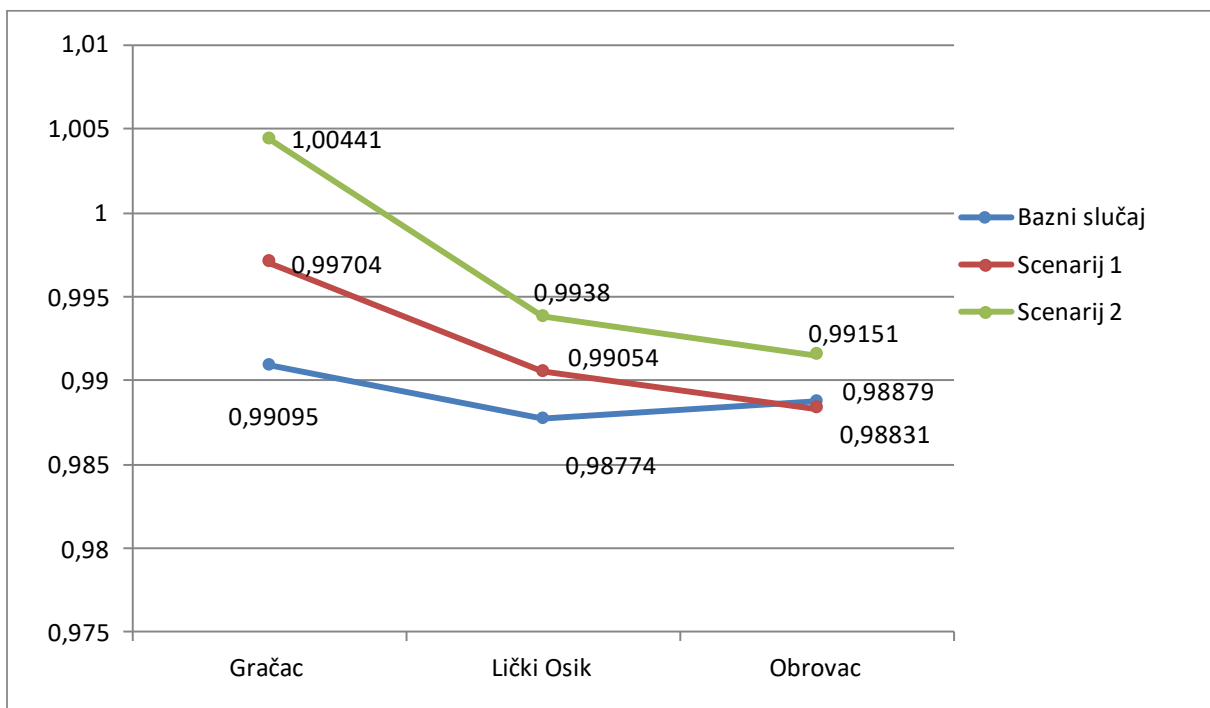


*Slika 6.14. Napon na priključnoj i susjednim sabirnicama*

### 6.3. Usporedba napona na priključnoj sabirnici

#### 6.3.1. Bazni slučaj 1, slučaj A – scenarij 1 i scenarij 2

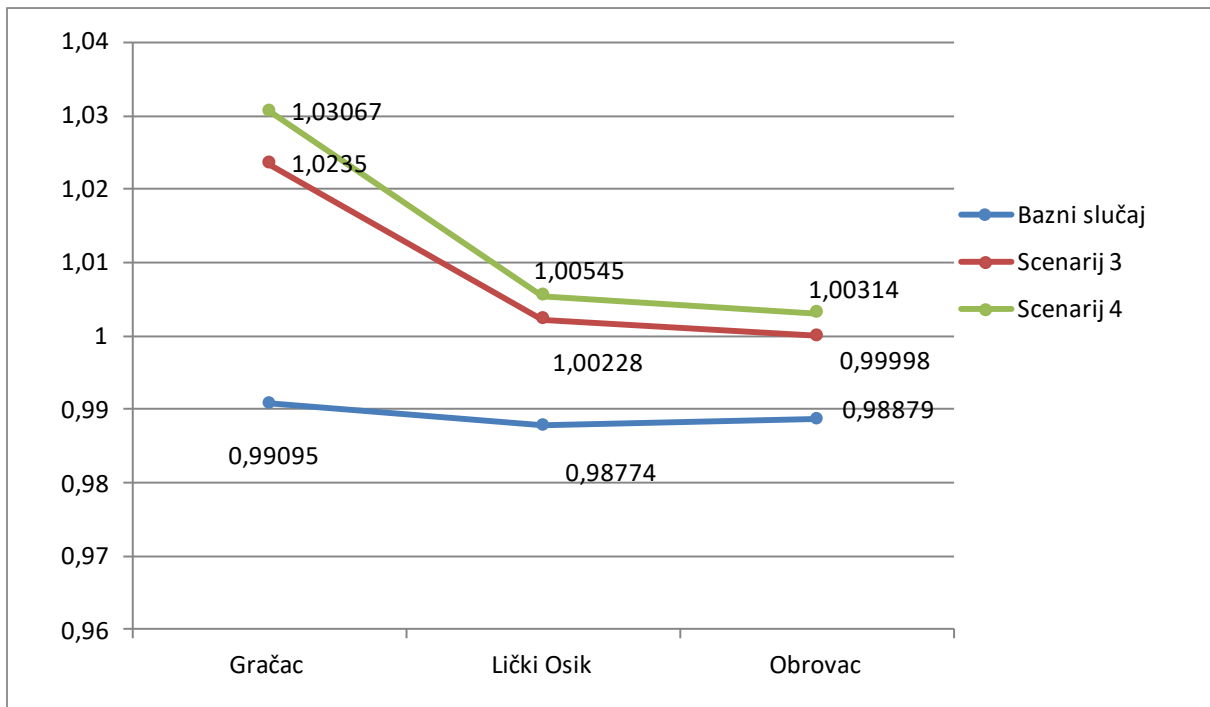
Na slici 6.15. prikazana je usporedba napona na priključnoj sabirnici i susjednim sabirnicama baznog slučaja 1, scenarija 1 i scenarija 2 koji pripadaju slučaju A. Napon na priključnoj sabirnici najviši je kod scenarija 2. Razlog tomu je što unutar mreže VP-a postoje gubici, padovi napona u kabelima i sl. stoga VP ne daje maksimalnu snagu u mrežu. Kod scenarija 2 nema gubitaka te generator daje maksimalnu snagu u mrežu.



Slika 6.15. Bazni slučaj 1, scenarij 1 i scenarij 2 pri slučaju A

#### 6.3.2. Bazni slučaj 1, slučaj B – scenarij 3 i scenarij 4

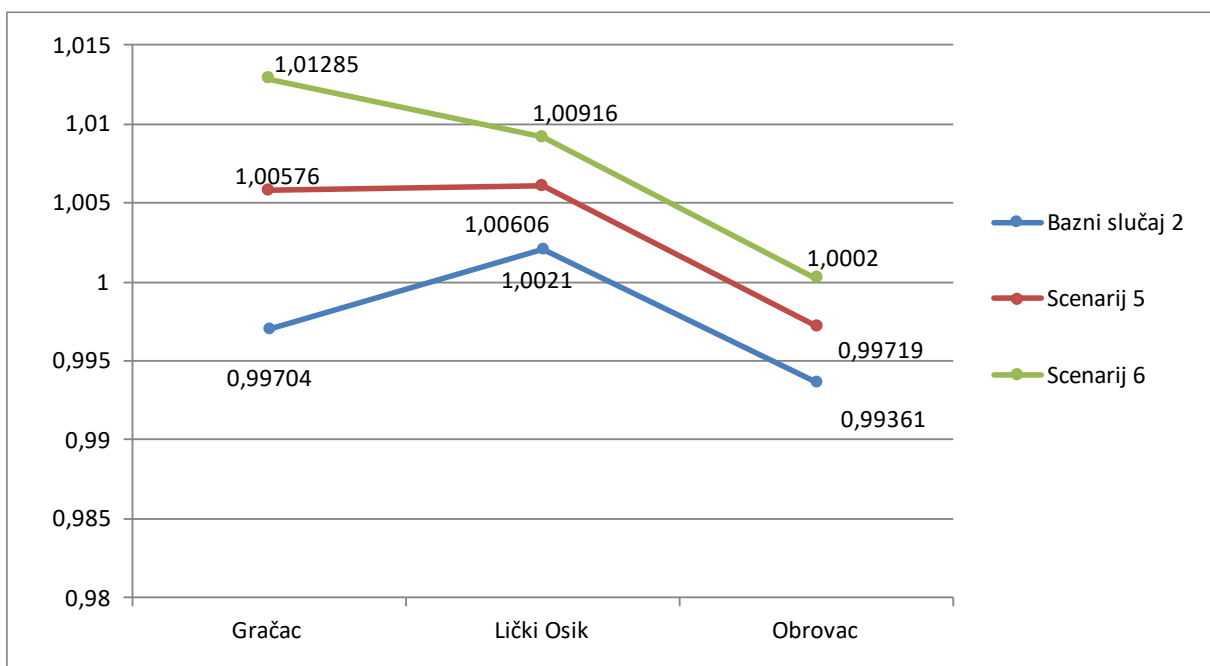
Na slici 6.16. prikazana je usporedba napona na priključnoj sabirnici i susjednim sabirnicama baznog slučaja 1, scenarija 3 i scenarija 4 koji pripadaju slučaju B. Prilikom regulacije napona napon na priključnoj sabirnici veći je pri scenariju 4 iz istog razloga kao i u prethodnom potpoglavlju. Zbog regulacije naponi su viši u odnosu na prethodni slučaj. Naponi na priključnoj sabirnici scenarija 3 i scenarija 4 se razlikuju tek u drugoj decimali ili 0,69% što je sa stajališta operatora prijenosnog sustava zanemarivo.



Slika 6.16. Bazni slučaj 1, scenarij 3 i 4 pri slučaju B

### 6.3.3. Bazni slučaj 2, slučaj C – scenarij 5 i scenarij 6

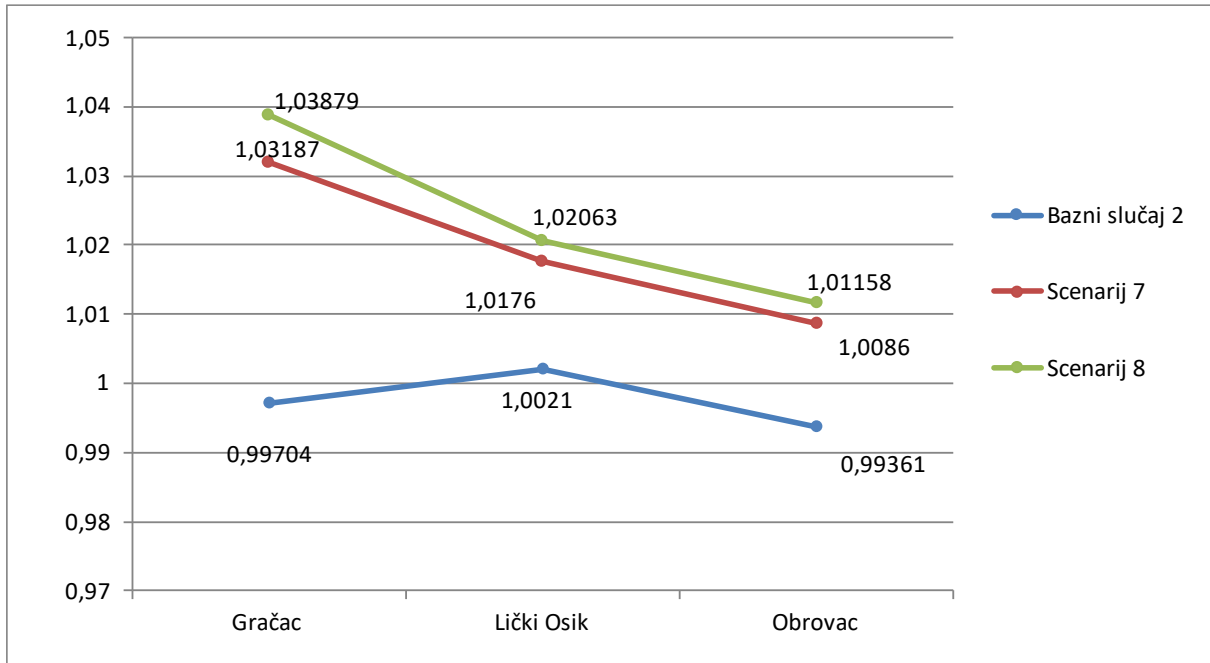
Na slici 6.17. prikazana je usporedba napona na priključnoj i susjednim sabirnicama baznog slučaja 2, scenarija 5 i scenarija 6 pri slučaju 2. Naponi su viši pri minimalnom opterećenju i minimalnoj proizvodnji.



Slika 6.17. Bazni slučaj 2, scenarij 5 i 6 pri slučaju C

#### 6.3.4. Bazni slučaj 2, slučaj D – scenarij 7 i scenarij 8

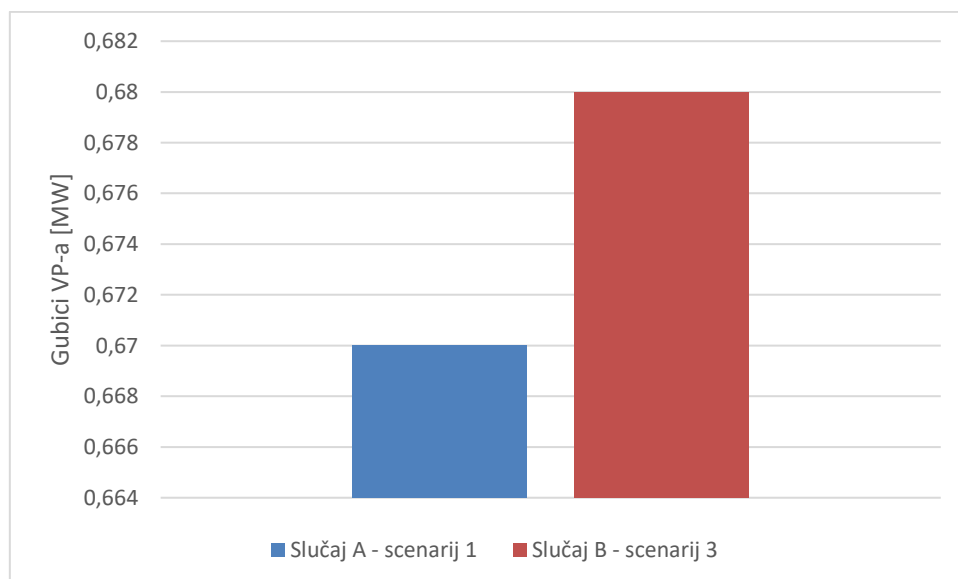
Na slici 6.18. prikazan je napon na priključnoj sabirnici i susjednim sabirnicama pri baznom slučaju 2, scenariju 7 i scenariju 8 pri slučaju D. Pri regulaciji napona naponi su viši u usporedbi s slučajem C -scenarijem 3 i scenarijem 4 te se napon na priključnoj sabirnici razlikuje tek na trećoj decimali ili 0,67%.



Slika 6.18. Bazni slučaj 2, scenarij 7 i scenarij 8 pri slučaju D

#### 6.4. Gubici vjetroparka

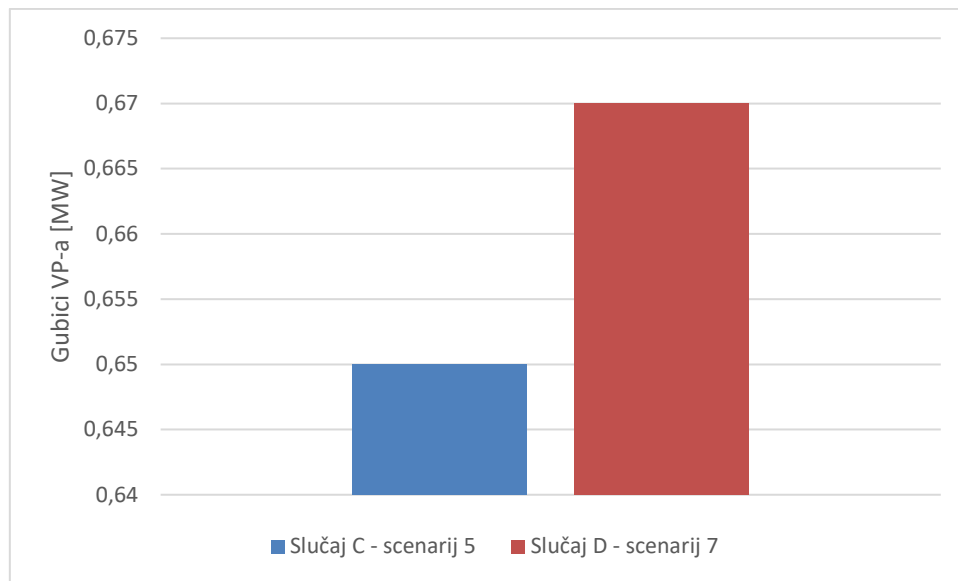
Na slici 6.19. dani su gubici VP-a pri varijanti 1.



Slika 6.19. Gubici VP-a pri varijanti 1



Na slici 6.20. dani su gubici VP-a pri varijanti 2.



*Slika 6.20. Gubici VP-a pri varijanti 2*

U obje varijante gubici su veći prilikom regulacije napona. Gubici ovise o kvadratu struje. Prilikom regulacije napona, VP daje u mrežu jalovu snagu koja doprinosi gubicima svojom strujom, zbog toga su gubici prilikom regulacije veći.

## **7. ZAKLJUČAK**

Na temelju provedene simulacije utjecaja detaljnog modela VP-a i generatora kojim je modeliran VP mogu se izvesti zaključna razmatranja s dva različita stajališta – sa stajališta operatora prijenosnog sustava i sa stajališta vlasnika VP-a. Sa stajališta operatora prijenosnog sustava može se zaključiti da nije bitno je li simulacija provedena ako je priključen detaljan model VP-a ili model s jednim generatorom jer se naponi na priključnoj sabirnici razlikuju za 0,69% pri varijanti 1 i 0,67% pri varijanti 2. Gubici unutar mreže VP-a nisu u nadležnosti operatora prijenosnog sustava. Sa stajališta vlasnika VP-a postavlja se pitanje o isplativosti VP-a jer se javljaju gubici unutar same mreže VP-a. U odnosu na dobit, gubici su puno manji, ali opet postoje. Jedna od mogućnosti kompenzacije gubitaka je dogovor s operatorom prijenosnog sustava u svrhu ostvarivanja dobiti zbog regulacije napona. Iako je VP u odnosu na cijeli prijenosni sustav ima gotovo 30 puta manju snagu, prema dobivenim rezultatima zaključeno je da je regulacija napona pomoću mreže VP moguća.

## LITERATURA

- [1] S.Asadollah, R.Zhu, M. Liserre, Analysis of Voltage Strategies for Wind Farms, 2019., IEEE Transactions on Sustainable Energy, klasa 11, br. 2, April 2020, str. 1002-1012.
- [2] M.Sarkar, T.Souxes, A.D.Hansen, P.E.Sorensen, C.D.Vournas, Enhanced Wind Power Plant Control Strategy During Stressed Voltage Conditions, 2020., vol. 8, July str.120025-120035.
- [3] M.Elshahed, A.Ragab, M.Gilany, M.Sayed, Investigation of switching over-voltages with different wind farm topologies, str. 1-13.
- [4] M.Sarkar, M.Altin, P.E.Sorensen, A.D.Hansen, Reactive Power Capability Model of Wind Power Plant Using Aggregated Wind Power Collection System, 2019. Energies 2019, 12, 1607, str. 1-19.
- [5] Službena stranica programa PowerWorld Simulator 22,  
dostupno na: <https://www.powerworld.com/> (pregledano 5.7. 2021.)
- [6] J. Martinez, P. C. Kjar, P. Rodriguez, and R. Teodorescu, Comparison of two voltage control strategies for a wind power plant, in Proc. IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo., 2011, str. 1–9.
- [7] S. Asadollah, R. Zhu, M. Liserre, and C. Vournas, Decentralized reactive power and voltage control of wind farms with type-4 generators, in Proc. IEEE Manchester PowerTech, 2017, str-1–6.
- [8] Službena internetska stranica programa MATLAB, dostupno na:  
<https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (pregledano 12.4.2021.)
- [9] Službena internetska stranica programa RTDS, dostupno na:  
<https://www.rtds.com/> (pregledano 12.4.2021.)
- [10] Podatci o vjetroparku ZAFARANA, Egipat, dostupno na:  
[https://www.thewindpower.net/windfarm\\_en\\_4106\\_zafarana-1.php](https://www.thewindpower.net/windfarm_en_4106_zafarana-1.php)
- [11] Službena internetska stranica proizvođača programa DIGSILENT, dostupno na:  
<https://www.digsilent.de/en/>

- [12] 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, 2009., 10-1109/PES.2009.5275330, str. 1-5.
- [13] General Specification V-90-1.8-2.0 MW 50 Hz VCS, 2010., klasa 1, br. 0004-6207 V05, str. 1-79.
- [14] S. E. Gryning i dr.. Long-term Profiles of Wind and Weibull Distribution Parameters Up To 600 m In a Rural Coastal And an Inland Suburban Area. Boundary-Layer Meteorology, 2014., 150:167-184.
- [15] Službena internetska stranica vjetroparka Gemini,  
dostupno na: <https://www.geminiwindpark.nl/index.html> (pregledano 10.6.2021.)
- [16] Vjetroelektrana Korlat – tehnički opis,  
dostupno na: <http://www.ho-cired.hr/vijesti/418-vjetroelektrana-korlat> (pregledano 12.6.2021.)
- [17] Službena stranica tvrtke Vestas,  
dostupno na: [https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v150-4\\_2\\_mw#!](https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v150-4_2_mw#!)  
(pregledano 1.7.2021.)
- [18] Službena stranica tvrtke Elka d.o.o.,  
dostupno na: [http://elka.hr/wp-content/uploads/2019/05/Energetski-srednjenaponski-kabeli-do-36-kV-Power-cables-up-to-36-kV\\_r2.pdf](http://elka.hr/wp-content/uploads/2019/05/Energetski-srednjenaponski-kabeli-do-36-kV-Power-cables-up-to-36-kV_r2.pdf)(pregledano 5.7.2021.)
- [19] D. Šljivac, S. Nikolovski, Elektroenergetske mreže, ETFOS, Osijek, 2003.
- [20] General Description 4 MW Platform, br. 0067-7060-V00, str. 1-37, 2017.
- [21] Fekete, Krešimir; Nikolovski, Srete; Baus, Zoran, Simulation of Power Flow in Croatian Power System // Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation (EUROSIM 2007) / Zupančič, Borit ; Karba, Rihard ; Blažič, Sašo (ur.).  
Ljubljana: ARGESIM - ARGE Simulation News, 2007. (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

## **SAŽETAK**

U ovome diplomskome radu bilo je potrebno pronaći različite literature koje se bave temom regulacije napona pomoću mreže vjetroparka. Svaka od njih je ukratko opisana i međusobno su uspoređene. Nakon toga, opisani su vjetroagregati i procesi pretvorbe energije u njima. Spomenuti su svi tipovi vjetroagregata, ali je naglasak stavljen na vjetroagregate kod kojih je regulacija napona moguća – Tip 3 i Tip 4. Prikazani su i opisani modeli ta dva vjetroagregata i njihove pogonske karte. U sljedećem poglavlju dan je pregled dva postojeća vjetroparka – jednog pučinskog koji se nalazi u Nizozemskoj i jednoga kopnenog koji se nalazi u Hrvatskoj. Prikazane su njihove konfiguracije i kratak opis trafostanica i kabela koji se koriste u tim vjetroparkovima. Osim postojećih, prikazan je jedan samostalno konfigurirani vjetropark sa detaljnim opisom vjetroagregata, trafostanica i kabela korištenih pri konfiguraciji. Završetkom teorijskog dijela, proveda se testnog modela vjetroparka u PowerWorld Simulatoru 22. Na temelju teorijskog dijela i dokaza simulacijom izveo se zaključak o mogućnosti regulacije napona pomoću vjetroparka.

Ključne riječi: regulacija napona, vjetroagregat, vjetropark

## **ABSTRACT**

In this thesis, it was necessary to find various literature dealing with the topic of voltage regulation using a wind farm network. Each of them is briefly described and compared with each other. After that, wind turbines and energy conversion processes in them are described. All types of wind turbines are mentioned, but the emphasis is placed on wind turbines where voltage control is possible - Type 3 and Type 4. Models of these two wind turbines and their power capability curves are presented and described. The next chapter provides an overview of the two existing wind farms - one offshore located in the Netherlands and one onshore in Croatia. Their configurations and a brief description of the substations and cables used in these wind farms are shown. In addition to the existing ones, one self-configured wind farm is established with a detailed description of the wind turbines, substations, and cables used in the configuration. At the end of the theoretical part, a test model of the wind farm was conducted in PowerWorld Simulator 22. Based on the theoretical part and the simulation evidence, a conclusion was made about the possibility of voltage control using a wind farm.

Keywords: voltage control, wind turbine, wind farm

## **ŽIVOTOPIS**

Marina Dubravac rođena je 24.7.1997. godine u Osijeku. Završila je Osnovnu školu Josipa Kozarca u Semeljcima. Tijekom osnovnoškolskog obrazovanja sudjeluje na natjecanjima iz matematike na svim razinama. Nakon završene osnovne škole upisuje Gimnaziju Antuna Gustava Matoša u Đakovu, opći smjer. Gimnaziju završava 2016. godine i upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektrotehnika. Na 2. godini preddiplomskog studija opredjeljuje se za smjer elektroenergetika. Za diplomski studij odabire modul DEC-Industrijska energetika. Sudjelovala je u izradi stručnog rada za OTTO 2020. Aktivno se bavila sportom-rukometom. Osvojila je nekoliko državnih prvenstava i sudjelovala je na svjetskom prvenstvu. Predstavljala je fakultet i sveučilište na državnoj razini.