

Simulacija rada prijenosne mreže s vjetroelektranama i pohranom energije u stvarnom vremenu

Grgić, Vlado

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:200:308865>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

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

**SIMULACIJA RADA PRIJENOSNE MREŽE S
VJETROELEKTRANAMA I POHRANOM ENERGIJE U
STVARNOM VREMENU**

Diplomski rad

Vlado Grgić

Osijek, 2020.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit****Osijek, 21.09.2020.****Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

| | |
|---|---|
| Ime i prezime studenta: | Vlado Grgić |
| Studij, smjer: | Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika |
| Mat. br. studenta, godina upisa: | D-1152, 27.09.2019. |
| OIB studenta: | 22837233467 |
| Mentor: | Prof.dr.sc. Damir Šljivac |
| Sumentor: | Matej Žnidarec |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević |
| Član Povjerenstva 1: | Prof.dr.sc. Damir Šljivac |
| Član Povjerenstva 2: | Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić |
| Naslov diplomskog rada: | Simulacija rada prijenosne mreže s vjetroelektranama i pohranom energije u stvarnom vremenu |
| Znanstvena grana rada: | Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | U teorijskom dijelu opisati tehničke uvjete priključenja i rada vjetroelektrana u prijenosnoj mreži. U praktičnom dijelu u simulatoru Typhoon HIL na modelu prijenosne mreže s vjetroelektranama i pohranom energije izvršiti proračun strujno-naponskih prilika u stvarnom vremenu. Sumentor: Matej Žnidarec, mag.ing. Tema je otvorena za prijavu svim studentima smjera DEB. Kriterij dodjele: prosjek ocjena + ocjena iz kolegija OIE + Integracija OIE i NM. |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada): | Izvrstan (5) |
| Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina |
| Datum prijedloga ocjene mentora: | 21.09.2020. |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija: | Potpis: |
| | Datum: |

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

Osijek, 24.09.2020.

Ime i prezime studenta:

Vlado Grgić

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1152, 27.09.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

21

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Simulacija rada prijenosne mreže s vjetroelektranama i pohranom energije u stvarnom vremenu**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora Matej Žnidarec

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

Potpis studenta:

SADRŽAJ

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | UVOD | 1 |
| 1.1. | Zadatak diplomskog rada | 1 |
| 1.2. | Očekivani utjecaj vjetroelektrana na okolnu elektroenergetsku mrežu | 2 |
| 2. | KRITERIJ PRIKLJUČKA VJETROELEKTRANE NA MREŽU U REPUBLICI HRVATSKOJ | 4 |
| 2.1. | Raspon frekvencije | 4 |
| 2.1.1. | Tehnički zahtjevi obzirom na regulaciju frekvencije i upravljanje djelatnom snagom vjetroelektrane | 5 |
| 2.1.2. | Zahtjevi za regulaciju djelatnu snagu | 6 |
| 2.2. | Iznos napona | 7 |
| 2.2.1. | Regulacija napona | 8 |
| 2.2.2. | Regulacija faktora snage | 9 |
| 2.3. | Stanje u uvjetima kvara | 9 |
| 2.3.1. | Zaštita od kratkog spoja | 10 |
| 2.3.2. | Zaštita od elektromehaničkog njihanja | 11 |
| 2.3.3. | Zaštita od prijelaznih pojava | 11 |
| 2.3.4. | Dodatni uvjeti | 12 |
| 2.4. | Kvaliteta isporučene električne energije | 13 |
| 2.4.1. | Harmoničko izobličenja napona (THDI) | 13 |
| 2.4.2. | Treperenje napona | 14 |
| 2.4.3. | Nesimetričnost napona | 14 |
| 2.5. | Zahtjevi s obzirom na signale, komunikaciju i upravljanje | 14 |
| 2.6. | Posebni uvjeti za priključak vjetroelektrane | 15 |
| 2.6.1. | Zadržavanje priključka | 15 |
| 2.6.2. | Primarna regulacija frekvencije | 16 |
| 2.6.3. | Komunikacija sustava vjetroelektrane | 16 |
| 2.6.4. | Odziv izlazne snage vjetroelektrane na promjenu frekvencije mreže | 17 |
| 2.6.5. | Uvjeti u slučaju poremećenog pogona | 18 |
| 3. | MODELI ELEMENATA MREŽE | 19 |
| 3.1. | Izvedbe generatora u vjetroelektranama | 19 |
| 3.1.1. | Konfiguracija vjetroagregata tipa A - stalna brzina vrtnje | 21 |
| 3.1.2. | Konfiguracija vjetroagregata tipa B - promjenjiva brzina vrtnje u određenom rasponu ... | 22 |
| 3.1.3. | Konfiguracija vjetroagregata tipa C - promjenjiva brzina vrtnje | 22 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.4. | Konfiguracija vjetroagregata tipa D - promjenjiva brzina vrtnje u punom rasponu | 23 |
| 3.2. | Utjecaj vrste generatora na struju kratkog spoja | 24 |
| 3.3. | Vjetroagregati..... | 25 |
| 3.4. | Lokalna potrošnja | 29 |
| 3.5. | Transformatori..... | 30 |
| 3.6. | Kabeli | 31 |
| 3.7. | Prijenosna mreža | 32 |
| 3.8. | Baterijski sustav pohrane..... | 33 |
| 3.8.1. | Litij-ionske baterije..... | 34 |
| 3.8.2. | Model baterijskog sustava pohrane | 35 |
| 4. | SIMULACIJA UTJECAJA VJETROELEKTRANE NA PRIJENOSNU MREŽU U PROGRAMSKOM PAKETU OpenDSS..... | 37 |
| 4.1. | Zadatak simulacije..... | 37 |
| 4.2. | Programski paket OpenDSS | 37 |
| 4.2.1. | Programski kod..... | 38 |
| 4.3. | Modeliranje mreže..... | 38 |
| 4.3.1. | Modeliranje vjetroelektrane u OpenDSS-u | 40 |
| 4.3.2. | Modeliranje potrošnje u OpenDSS-u..... | 41 |
| 4.3.3. | Modeliranje transformatora u OpenDSS-u | 42 |
| 4.3.4. | Modeliranje kabela u OpenDSS-u..... | 43 |
| 4.3.5. | Modeliranje prijenosne mreže u OpenDSS-u..... | 44 |
| 4.3.6. | Modeliranje baterijskog sustava pohrane u OpenDSS-u..... | 45 |
| 4.4. | Rezultati simulacije | 47 |
| 4.4.1. | Referentni slučaj simulacije..... | 47 |
| 4.4.2. | Testni slučaj simulacije | 49 |
| 4.4.3. | Usporedba slučajeva sa i bez spremnikam energije..... | 52 |
| 4.4.4. | Iznos napona na glavnom mrežnom transformatoru | 52 |
| 4.4.5. | Razmjena djelatne snage elektrane s mrežom..... | 53 |
| 5. | ZAKLJUČAK..... | 55 |
| | LITERATURA..... | 56 |
| | SAŽETAK..... | 58 |
| | ABSTRACT | 59 |
| | ŽIVOTOPIS..... | 60 |
| | PRILOZI | 61 |

| | |
|------------------|----|
| PRILOG 4.1. | 61 |
|------------------|----|

1. UVOD

Potreba za električnom energijom sve je veća, a život bez nje postao je nezamisliv. Kako vrijeme odmiče sve više se javljaju trendovi povećanja udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Trenutno najveći potencijal imaju izvori koji koriste „beskonačnu“ energiju Sunca. Oni dolaze u različitim izvedbama, a najpoznatije su fotonaponske elektrane i vjetroelektrane. U 2019. godini u Europi je instalirano 15.4 GW nove proizvodnje iz vjetroelektrana. To je porast od 28% usporedbi s 2018. U Europi je instalirano ukupno 204.8 GW proizvodnje iz energije vjetra što znači da vjetroelektrane pokrivaju 15% europske potrebe za električnom energijom[1]. Također, valja spomenuti viziju energetske slike Europske unije koja predviđa da do 2050. godine energija vjetra postane dominantni dio proizvodnje električne energije s 50% udjela na tržištu[2].

Kako vjetroelektrane postaju bitan dio proizvodnje električne energije tako se i njihov pravilan rad, ali i pravilan rad elektroenergetskog sustava treba osigurati. Stoga, nadležne institucije propisuju pravila kako bi se osigurao pravilan rad i konkurentnost vjetroelektrana u prijenosu, distribuciji i proizvodnji električne energije.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada je opisati tehničke uvjete priključenja vjetroelektrane na prijenosnu mrežu. Naglasak se daje na uvjete propisane novim Mrežnim pravilima i dodatnim tehničkim uvjetima za priključak i pogon vjetroelektrane na prijenosnu mrežu. Rad se sastoji od dva dijela, teorijskog i praktičnog. Teorijski dio proteže se poglavljima 1, 2 i 3. U teorijskom dijelu bit će opisani uvjeti priključenja vjetroelektrane na prijenosnu mrežu, te njihov utjecaj. Također će bit opisane izvedbe generatora u vjetroelektranama i utjecaj vrste generatora na mrežu.

U praktičnom dijelu bit će opisana vremenska simulacija utjecaja vjetroelektrane na prijenosnu mrežu s i bez baterijskog sustava pohrane. Opisani će biti elementi mreže i način modeliranja u programskom paketu OpenDSS. Rezultati će pokazati utjecaj baterijskog sustava pohrane na strujno-naponske prilike u mreži.

1.2. Očekivani utjecaj vjetroelektrana na okolnu elektroenergetsku mrežu

Vjetroelektrane zbog svoje promjenjive prirode nepovoljno utječu na elektroenergetski sustav usporedbi s ostalim elektranama. Značajnost njihovog utjecaja na mjestu priključka promatra se kroz utjecaj na snagu kratkog spoja.

Ako je snaga kratkog spoja mala to znači da je impedancija mreže visoka, te to dovodi do relativno velikih promjena napona na mjestu priključka do kojeg dolazi ekstrakcijom ili injekcijom djelatne ili jalove snage. Također, snaga mreže ovisi o veličini generatora koji se na mrežu spaja. Stoga, odnos snage kratkog spoja mreže i priključnog generatora označava se s omjerom kratkog spoja[3].

Vrijednost omjera snage kratkog spoja prihvatljiva je, prema propisanim mrežnim pravilima, ako iznosi[4]:

- $S_k/S_p \geq 1000$ za srednji napon i
- $S_k/S_p \geq 150$ za niski napon,

gdje je S_k snaga kratkog spoja na mjestu priključka, a S_p snaga kratkog spoja priključnog generatora.

Spajanje na niski napon je poželjnije vlasniku elektrane zbog nižih troškova spajanja, ali to neće biti moguće ako će utjecaj na lokalnu mrežu biti nepovoljan.

Utjecaj vjetroelektrana na snagu kratkog spoja detaljnije će biti opisan u poglavlju 3.

Vjetroelektrane na lokalnu prijenosnu ili distributivnu mrežu utječu na sljedeći način[5]:

- Povećanje/smanjenje opterećenja na elementima okolne elektroenergetske mreže, ovisno o varijacijama u proizvodnji vjetroelektrane, potrošnji u sustavu i proizvodnji obližnjih elektrana.
- Povećanje statičkih varijacija napona, više prisutna kod distributivnih mreža manjih snaga kratkog spoja gdje je nazivna snaga priključne vjetroelektrane značajna u odnosu na snagu kratkog spoja priključnog čvora.
- Dinamička promjena napona, flikeri, viši harmonici i ostali naponski poremećaji koji su rezultat režima rada vjetroelektrane ovisno o karakteristikama vjetroagregata (vrsti generatora) i načinu priključka generatora na mrežu (direktno, preko energetskeg pretvarača, kombinirano).

- Utjecaj na promjenu snage kratkog spoja u priključnom čvoru i promijenjeni zahtjevi za zaštitu okolne mreže.

2. KRITERIJ PRIKLJUČKA VJETROELEKTRANE NA MREŽU U REPUBLICI HRVATSKOJ

Prema aktualnim Mrežnim pravilima iz 2017. i [6], principi priključka zadani su od strane Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS) i obuhvaćaju sljedeće načine priključka:

1. Priključak na najbližu transformatorsku stanicu (TS) 110/x kV jednostrukim ili dvostrukim dalekovodom (DV) 110 kV,
2. Priključak na jednu trojku postojećeg dalekovoda 2x110 kV uvodom/izvodom u transformatorskoj stranici 110/x kV na lokaciji vjetroelektrane,
3. Priključak na novi mrežni čvor 110 kV,
4. Uvod/izvod dalekovoda 110 kV u transformatorskoj stanici 110/x kV na lokaciji vjetroelektrane uz studiju utjecaja na elektroenergetski sustav.

Tehničke karakteristike za što kvalitetniju integraciju vjetroelektrane u elektroenergetski sustav dijele se na pet glavnih kriterija koji su ključni za ispravan pogon i vođenje vjetroelektrane u pripadajućem elektroenergetskom sustavu. Ti kriteriji su[6]:

1. Raspon frekvencije,
2. Iznos napona,
3. Stanje u uvjetima kvara,
4. Kvaliteta isporučene električne energije,
5. Zahtjevi obzirom na signale, komunikacije i upravljanje.

2.1. Raspon frekvencije

Glavni uvjeti iz područja frekvencije i djelatne snage koji se postavljaju na vjetroelektrane koja se priključuje u elektroenergetski sustav su[4]:

- Raspon iznosa frekvencije tijekom normalnih i poremećenih uvjeta pogona,
- Karakteristike vjetroelektrane u cijelom rasponu frekvencije sustava,
- Sudjelovanje vjetroelektrane u P/f regulaciji,
- Brzina promjene snage proizvodnje vjetroelektrane,
- Osiguravanje rezervne snage od strane vjetroelektrane.

2.1.1. Tehnički zahtjevi obzirom na regulaciju frekvencije i upravljanje djelatnom snagom vjetroelektrane

Nazivna frekvencija u hrvatskom elektroenergetskom sustavu iznosi 50.00 Hz. U normalnom pogonu, pri radu u interkonekciji frekvencija se održava u granicama od 49.95 Hz do 50.05 Hz, te se tijekom godine u tim granicama mora održavati 99.5 % prosjeka desetsekundnih mjernih intervala. U normalnom radu hrvatskog elektroenergetskog sustava u interkonekciji frekvencija nikad ne smije pasti ispod 47.00 Hz niti porasti iznad 52.00 Hz. U slučaju izoliranog rada u normalnim pogonskim uvjetima, frekvencija se održava u granicama od 49.50 Hz do 50.50 Hz. Frekvencija u granicama od 49.00 Hz do 51.00 Hz mora biti održavana tijekom svakog tjedna u 95.0 % prosjeka desetsekundnih mjernih intervala. Prema članku 89. iz Mrežnih pravila, u normalnim pogonskim uvjetima u izoliranom radu hrvatskog elektroenergetskog sustava, frekvencija mora biti održavana u granicama od 42.5 Hz do 57.5 Hz. U poremećenim uvjetima pogona elektroenergetskog sustava frekvencija se može kretati u granicama od 47.50 Hz do 51.50 Hz[4].

Zbog strogo određenih granica frekvencija u elektroenergetskom sustavu, vjetroelektrane imaju točno određene tehničke zahtjeve obzirom na frekvenciju i upravljanje djelatnom snagom [6]:

- $f < 47.0$ Hz isključenje vjetroelektrane u roku 0.3 sekunde.
- $47.0 \text{ Hz} < f < 47.5$ Hz isključenje vjetroelektrane u roku od 10 sekundi.
- $47.5 \text{ Hz} < f < 48.0$ Hz vjetroelektrane mora zadržati priključak barem 10 minuta.
- $48.0 \text{ Hz} < f < 48.5$ Hz vjetroelektrane mora zadržati priključak barem 20 minuta.
- $48.5 \text{ Hz} < f < 49.5$ Hz vjetroelektrane mora zadržati priključak barem 60 minuta.
- $49.5 \text{ Hz} < f < 50.5$ Hz vjetroelektrane mora zadržati priključak trajno.
- $50.5 \text{ Hz} < f < 51.5$ Hz vjetroelektrane mora zadržati priključak barem 60 minuta, u slučaju smanjenja snage minimalna brzina iznosi 2% od nazivne djelatne snage po 0.1 Hz odstupanja frekvencije iznad 50.5 Hz. Niti jedan generator vjetroelektrane ne smije biti pokrenut iznad 50.5 Hz.
- $f > 51.5$ Hz isključenje vjetroelektrane u roku 0.3 sekunde.

2.1.2. Zahtjevi za regulaciju djelatnu snagu

Osnovni i posebni zahtjevi za regulaciju djelatne snage koju proizvodna jedinica mora biti sposobna predati pri normalnom pogonu i pri dugotrajnom odstupanju pogonske frekvencije i napona elektroenergetskog sustava na visokonaponskoj strani blok-transformatora, prikazana je na slici 2.1.

Pri normalnim pogonskim uvjetima smatra se da je [4]:

- brzina promjene frekvencije: $\leq 0.5\%$ u minuti,
- brzina promjene napona: $\leq 5\%$ u minuti.

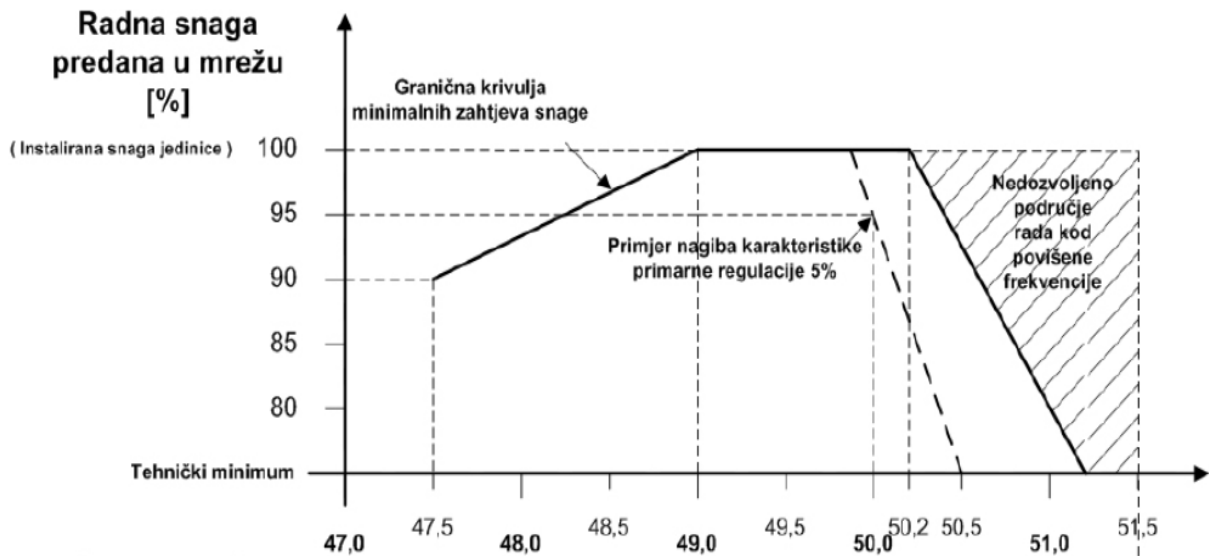
Sa slike 2.1. vidljivo je da svaka proizvodna jedinica pri povišenoj frekvenciji ($f > 50.20$ Hz) mora raditi sa smanjenom izlaznom snagom.

Proizvodna jedinica se može automatski odvojiti od mreže ako je granična vrijednost frekvencije prekoračena, u slučaju gubitka stabilnosti proizvodne jedinice, te pri prekoračenju graničnih vrijednosti napona.

Također, prema članku 131, mrežna pravila nalažu da točnost mjerenja frekvencije u elektroenergetskom sustavu regulacije brzine vrtnje proizvodne jedinice bude jednaka 10 mHz ili bolja[4].

„Pri frekvencijama jednakim ili manjim od 47.50 Hz proizvodna jedinica može se odvojiti od prijenosne mreže. Proizvodne jedinice od kojih je operator prijenosnog sustava zahtijevao otočni rad i prazni hod uz osiguranje napajanja vlastite potrošnje, te za isto sklopio ugovor, moraju pri frekvenciji jednakoj ili manjoj od 47.50 Hz prijeći u otočni rad, odnosno u prazni hod uz osiguranje napajanja vlastite potrošnje i biti spremne za ponovnu sinkronizaciju.

Odvajanje proizvodne jedinice od prijenosne mreže dopušteno je pri frekvencijama između 47.50 Hz i 51.5 Hz na način prikazan na slici 2.1[4].



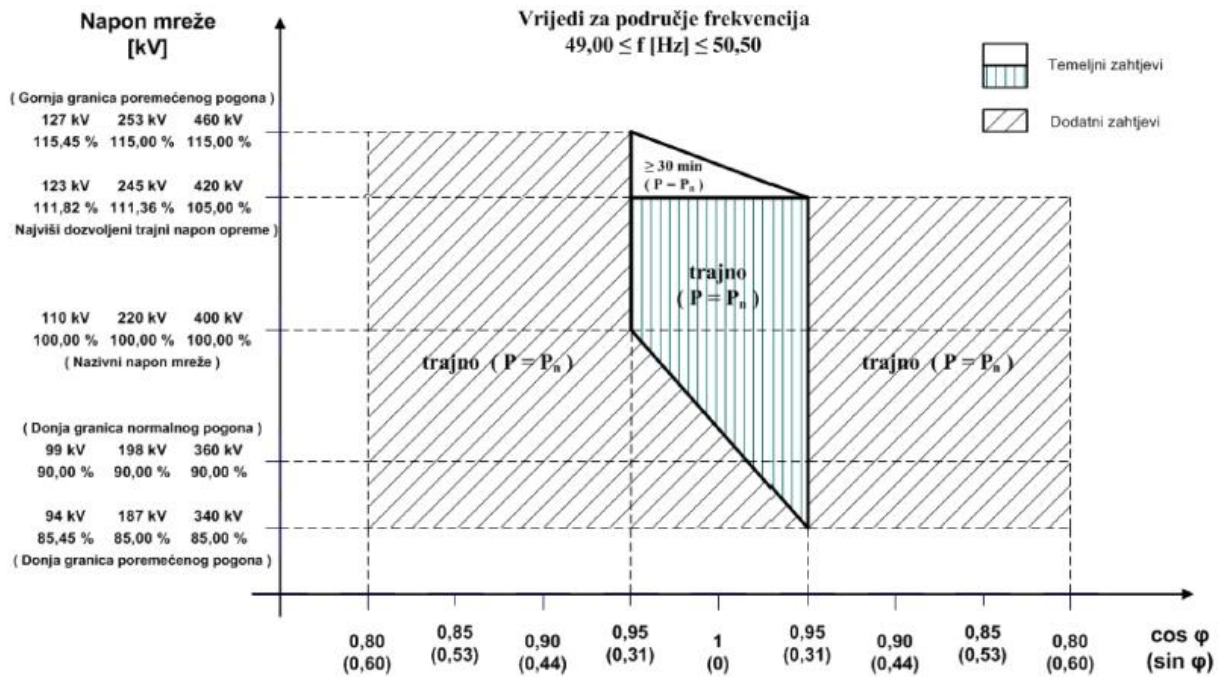
Slika 2.1.: Ponašanje proizvodne jedinice s obzirom na frekvenciju[4]

2.2. Iznos napona

Jalova snaga temelji se na oscilirajućoj razmijeni energije uskladištene u kapacitivnim i induktivnim komponentama elektroenergetskog sustava. Jalovu snagu proizvode kapacitivne komponente (npr. kondenzacijske baterije, kabeli), dok se troši u induktivnim komponentama (npr. transformatori, motori). Sinkroni generatori imaju mogućnost i proizvodnje i potrošnje jalove snage. Ako rade u naduzbuđenom režimu proizvode jalovu snagu, a troše je ukoliko rade u poduzbuđenom režimu. Regulacija napona se izvodi upravljanjem razine magnetiziranja generatora, gdje pri visokoj razini magnetiziranja dolazi do visokog iznosa napona i proizvodnje jalove snage[6].

Vjetroelektrane i transformatori induktivne su naravi te troše jalovu snagu koju moraju proizvesti u krugu elektrane ili preuzeti iz mreže. Ukoliko vjetroelektrana preuzima jalovu snagu iz mreže, smanjuje se raspoloživa termička opteretivost priključnih vodova za evakuaciju proizvedene djelatne snage. Iznos napona je lokalna osobina sustava, kao i jalova snaga koju nije moguće učinkovito prenijeti na velike udaljenosti. U cilju minimalizacije gubitaka neophodno je smanjiti tokove jalove snage jer oni doprinose gubicima djelatne snage, a uz to i većim gubicima u mreži. Ukoliko je preuzimanje jalove snage iz mreže neupravljano, može doći do lokalnog smanjenja napona. Isto tako, ukoliko je proizvodnja jalove snage neupravljana, dolazi do lokalnog povećanja napona. Zbog toga moguća je potreba za uključenjem okolnih generatora ili

kompenzacijskih uređaja u pružanju dodatne podrške putem upravljanja jalovom snagom. Stoga u cilju očuvanja kvalitete napona u mreži i izbjegavanja ne ravnopravnosti među korisnicima prijenosnog sustava i od vjetroelektrana se zahtjeva posjedovanje sposobnosti upravljanja jalovom snagom. Zahtjevi za isporuku jalove snage u prijenosnu mrežu proizvodne jedinice prikazani su na slici 2.2[4].



Slika 2.2.: Zahtjevi za isporuku jalove snage u prijenosnu mrežu proizvodne jedinice[4]

Iz toga proizlazi da su osnovni zahtjevi vezani uz napon na mreži na koji se priključuje vjetroelektrana sljedeći [6]:

- raspon iznosa napona,
- promjene napona,
- automatska regulacija napona i
- sposobnost proizvodnje jalove snage.

2.2.1. Regulacija napona

Vjetroelektrana treba zadržati trajno priključenje na prijenosnu mrežu pri maksimalnoj raspoloživoj snazi ili skraćenoj izlaznoj djelatnoj snazi pri normalnom rasponu napona, te pri rasponu napona koji se mogu javiti pri poremećaju ili kvaru prijenosne mreže. Ti rasponi napona propisani su mrežnim pravilima operatora prijenosnog sustava, te su prikazani u tablici 2.1.

Tablica 2.1.: Granice napona pri normalnom i poremećenom stanju za određene naponske razine[4]

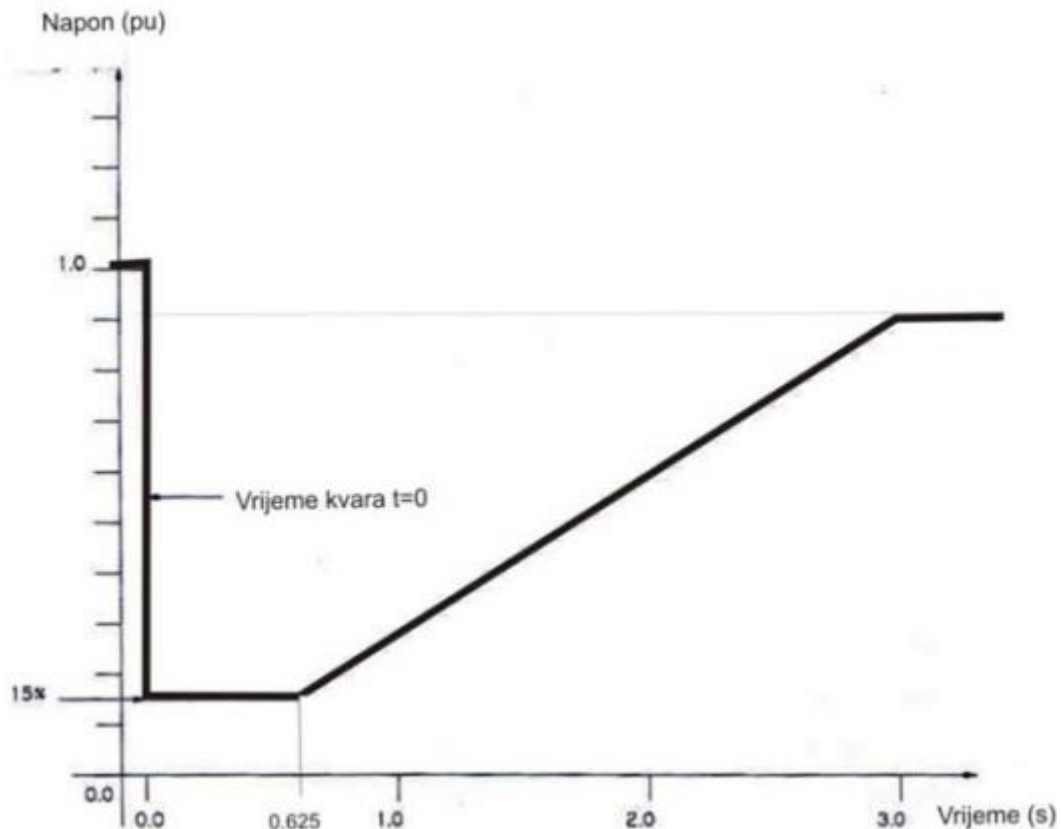
| Naponske razine | Normalni pogon | Poremećeni pogon |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 400 kV prijenosna mreža | 360-420 kV | 340-460 kV |
| 220 kV prijenosna mreža | 198-242 kV | 187-253 kV |
| 110 kV prijenosna mreža | 99-121 kV | 94-127 kV |

2.2.2. Regulacija faktora snage

Prema članku 136. iz [4], faktor snage treba biti u području od 0.85 induktivno do 0.9 kapacitivno. Moguć je dogovor između operatora prijenosnog sustava i proizvođača o većem opsegu faktora snage sinkronog generatora što se regulira ugovorom o priključenju.

2.3. Stanje u uvjetima kvara

„Svaka vjetroelektrana mora biti sposobna podnijeti propad napona na razinu od 15% nazivne vrijednosti u periodu od 625 ms bez gubitka priključka. Ukoliko iznos napona u čvorištu opada kvazi-stacionarno (ne mijenja se brže od 5% po minuti) na razinu ispod 90 % nazivne vrijednosti, do isključenja mora doći najranije poslije 3 sekunde kako je prikazano na slici 2.3“[6].



Slika 2.3.: Sposobnost prolaska vjetroelektrane kroz stanje kvara u sustavu[6]

Pravila koja proizlaze iz Mrežnih pravilima, a koji se odnose na zaštitu od kvara, te spadaju u pravila za priključenje novih korisnika prijenosne mreže, svrstavaju se u sljedeće kategorije:

- Zaštita od kratkog spoja
- Zaštita od elektromehaničkog njihanja
- Zaštita od prijelaznih pojava
- Dodatni uvjeti

2.3.1. Zaštita od kratkog spoja

Prema [4], kratki spojevi koji se dogode u blizini elektrane pri ispravnom djelovanju sustava zaštite, ako se uklone unutar 150 ms, ne smiju dovesti do nestabilnosti područja generatora ili odvajanja jedinice od prijenosne mreže, pod uvjetom da je na sučelju prijenosne mreže i proizvodne jedinice snaga bliskog trolnog kratkog spoja, nakon isključivanja kvara šesterostruko puta veća od nazivne djelatne snage proizvodne jedinice. Također, ne smije doći do automatskog prespajanja vlastite potrošnje na rezervni izvor energije. Ako proizvodna jedinica

ne može ispuniti te zahtjeve, pogon iste može biti moguć samo uz posebno odobrenje operatora prijenosnog sustava.

Isto tako, ukoliko dođe do kratkog spoja koji je udaljen od elektrane te se kvar otkloni unutar 5 sekundi, ne smije doći do prespajanja vlastite potrošnje na rezervni izvor kao ni do preventivnog odvajanja proizvodne jedinice od prijenosne mreže zbog nepovoljnog utjecaja napona prijenosne mreže na napon vlastite potrošnje[4].

2.3.2. Zaštita od elektromehaničkog njihanja

Elektromehanička njihanja proizvodne jedinice i sistemska elektromehanička njihanja u hrvatskom energetske sustavu imaju frekvenciju od 0.2 do 3 Hz. Ta njihanja ne smiju izazvati proradu zaštite koja bi uzrokovala isključenje proizvodne jedinice ili smanjenje djelatne snage jedinice. U hrvatskom energetske sustavu najslabija oscilatorna komponenta elektromehaničkog njihanja ne smije imati relativno prigušenje manje od 0.05. Ako njihanja imaju veće prigušenje od 0.05 ona ne smiju prouzročiti isključivanja proizvodnje jedinice proradom zaštite ili smanjenje djelatne snage jedinice[4].

Od proizvodnih se jedinica također zahtjeva mogućnost prigušenja vlastitih i sistemskih elektromehaničkih njihanja pomoću stabilizatora elektroenergetskog sustava (*PPS – Power System Stabilizator*). Svrha ove mjere je osiguranje statičke stabilnosti pogona u cijelom području pogonskog dijagrama, uz uvjet da je snaga trolnog kratkog spoja na visokonaponskoj strani najmanje jednaka četverostruko nazivnoj djelatnoj snazi, dok je napon jednak najmanje nazivnom naponu prijenosne mreže. To znači da ako je faktor snage 0.85 i faktor napona 1.0 ekvivalentna impedancija sustava iznosi najviše 30% nazivne impedancije generatora[4].

Sustav regulacije brzine vrtnje mora biti postavljan tako da prigušenje vlastitih i sistemskih elektromehaničkih njihanja ne bude manje od 0.05.

2.3.3. Zaštita od prijelaznih pojava

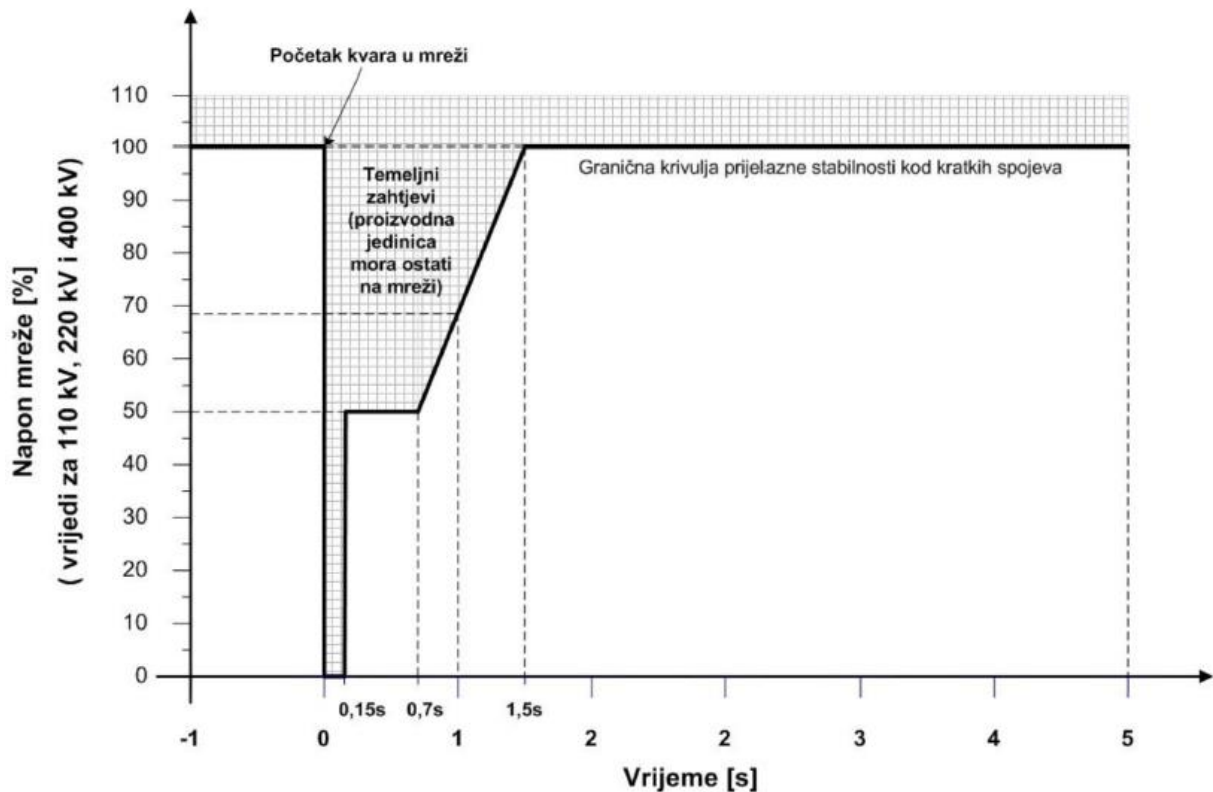
Ako dođe do gubitka statičke ili prijelazne stabilnosti, višekratno proklizavanje rotora generatora (asinkroni pogon) mora se izbjeći njegovim automatskim odvajanjem od prijenosne mreže.

Od proizvodne jedinice se traži da, ako napon na visokonaponskoj strani blok-transformatora padne ispod ili bude jednak 80% nazivnog napona prijenosne mreže, odvoji od prijenosne mreže.

U slučaju kada je napon između 0.8 p.u i 0.85 p.u, te ispod 1.15 p.u od proizvodne jedinice se traži ostanak u pogonu od minimalno 120 minuta.

Također, proizvodna jedinica se ne smije odvajati od prijenosne mreže sve dok je napon na visokonaponskoj strani blok-transformatora iznad granične krivulje koja je prikazana na slici 2.4.

Ovi zahtjevi vrijede za sve proizvodne jedinice priključene na sve naponske razine.



Slika 2.4.: Granična krivulja napona na priključku na prijenosnu mrežu vezana uz prijelaznu stabilnost proizvodne jedinice[4]

2.3.4. Dodatni uvjeti

Operator prijenosnog sustava, u uvjetima koji odstupaju od normalnog pogona, od proizvođača može tražiti ispunjenje dodatnih uvjeta u svrhu osiguranja pouzdanog pogona elektroenergetskog sustava. Dodatni uvjeti mogu biti [4]:

- Prijelaz proizvodne jedinice u prazni hod i osiguravanje napajanja vlastite potrošnje
- Sposobnost otočnog rada
- Sposobnost za crni start

Svaki od tih uvjeta definira se ugovorom o priključenju i ugovorom o pomoćnim uslugama.

U slučaju prijelaza proizvodne jedinice u prazan hod, jedinica mora moći osigurati uvjete za napajanje vlastite potrošnje. Pouzdani prijelaz mora biti osiguran i u slučaju prorade zaštite prijenosne mreže pri poremećaju u prijenosnoj mreži.

U slučaju prijelaza proizvodne jedinice u otočni način rada nužno je da sustav regulacije frekvencije i djelatne snage, te sustav regulacije uzbude proizvodne jedinice bude tako projektiran da sigurno može prijeći na bilo koje opterećenje između tehničkog minimuma i trajne snage proizvodne jedinice. Otočni način rada mora biti održiv više sati te mora biti sposoban regulirati udarno opterećenje od 10% nazivne djelatne snage[4].

2.4. Kvaliteta isporučene električne energije

Proizvodna postrojenja kao što su vjetroelektrane utječu na kvalitetu električnu energije na razini mreže, a najveći utjecaj imaju na okolicu gdje su priključene. Kao i svaka elektrana tako i vjetroelektrane moraju imati propisana pravila za isporuku električne energije. Prema članku 94 iz [4], kvaliteta napona na sučelju prijenosne mreže u uvjetima normalnog pogona, osim za slučaje nastale uslijed poremećaja i prekida napajanja ili nedopuštenog negativnog povratnog djelovanja, propisana je u skladu s normom *HRN EN 50160*. U mrežnim pravilima propisano je da svaki korisnik prijenosne mreže, u ovom slučaju vjetroelektrane, mora biti opremljen uređajima za mjerenje kvalitete napona i povratnog djelovanja korisnika u svrhu analize i utvrđivanja uzroka poremećaja. Uređaji moraju imati mogućnost registracije vremenskog tijeka prijelaznih pojava uzrokovanih poremećajem[4].

Glavne značajke kvalitete električne energije propisane od strane Mrežnih pravila su[4]:

- Harmoničko izobličenja napona [THDI]
- Treperenje napona
- Nesimetričnost napona

2.4.1. Harmoničko izobličenja napona (THDI)

Za nova postrojenja koja se spajaju na prijenosnu mrežu Mrežna pravila nalažu da u normalnim pogonskim uvjetima na mjestu preuzimanja imaju planiranu razinu ukupnog harmoničkog izobličenja napona u iznosu od[4]:

- 1.5% na 400 kV i 220 kV
- 3.0% za 110 kV

Vrijednosti gore navedene odnose se na 95% desetominutnih prosjeka efektivnih vrijednosti napona za razdoblje od tjedan dana.

Granične vrijednosti emisije ukupnog harmoničkog izobličenja napona određuje se proporcionalno snazi priključka korisnika. Za određivanje granične vrijednosti primjenjuje se postupak dan u *IEC/TR 61000-3-6*[4].

2.4.2. Treperenje napona

Prema [4], u normalnom pogonu u bilo kojem razdoblju od tjedan dana jakost dugotrajnih treperenja napona u 95% 120-minutnih intervala ne smije premašiti planiranu razinu od $P_{lt}=1.0$.

Kao i kod harmoničkog izobličenja napona, granična vrijednost emisije jakosti dugotrajnih treperenja napona određuje se proporcionalno snazi priključka postupkom danim u *IEC/TR 61000-3-6*.

2.4.3. Nesimetričnost napona

Prema članku 93 iz [4], mrežna pravila propisuju planiranu razinu nesimetričnosti napona u prijenosnoj mreži od 1.4%. Propisana vrijednost nesimetričnosti napona odnosi se na 95% 10-minutnih prosjeka efektivne vrijednosti inverzne komponente napona za razdoblje od tjedan dana.

Granične vrijednost emisije nesimetričnosti napona određuju se proporcionalno snazi priključka postupkom danim u *IEC/TR 61000-3-6*.

2.5. Zahtjevi s obzirom na signale, komunikaciju i upravljanje

Vlasnik elektrane koja se priključuje na prijenosnu mrežu dužan je ugraditi uređaje za razmjenu procesnih informacija u stvarnom vremenu. Razmjena informacija ostvaruje se računalnom komunikacijom, dok se vatrozidom onemogućuje pokretanje svake druge komunikacije osim one za ostvarivanje utvrđenih funkcija[4].

Informacije se dijele na temelju smjera podataka na :

- Informacije iz vjetroelektrane prema operatoru prijenosnog sustava,
- Upravljačke informacije od operatora prijenosnog sustava prema vjetroelektrani.

Vlasnik elektrane centrima vođenja operatora prijenosnog sustava prosljeđuje informacije o stanju opreme i izmjerenim vrijednostima trenutačnih pogonskih veličina.

Pod informacijama o stanju opreme spadaju položaj prekidača, rastavljača, rastavljača za uzemljivanje i regulacijske sklopke, koji su potrebni za pogon ili za proračun stanja elektroenergetskog sustava. Pod izmjerenim vrijednosti trenutačnih pogonskih veličina spadaju napon, frekvencija, djelatna i jalova snaga.

Operator prijenosnog sustava elektrani prosljeđuje informacije o načinu upravljanja. Te informacije su:

- Postavne vrijednosti djelatne snage, naloge za način regulacije i trenutni regulacijski zahtjev za sekundarnu regulaciju,
- Postavne vrijednosti jalove snage, u obliku planiranog rada ili u obliku trenutnog regulacijskog zahtjeva za regulaciju napona/jalove snage na razini elektroenergetskog sustava[4].

2.6. Posebni uvjeti za priključak vjetroelektrane

U novim Mrežnim pravilima koja su izdana 2017. godine dodani su posebni uvjeti za priključak vjetroelektrane. Njima se propisuje dužnost vlasnika elektrane o dostavi dinamičkog modela vjetroagregata i vjetroelektrane, te o uvjetima propisanih isključivo za vjetroelektrane, a tiču se komunikacije, regulacije snage, odziva elektrane, uvjetima u poremećenom radu i slično[4].

2.6.1. Zadržavanje priključka

Prema [4], vjetroelektrane moraju imati sposobnost zadržavanja priključka na prijenosnu mrežu tijekom promjene (pada) frekvencije koja se odvija brzinom do 0.07 Hz/s.

Kako izlazna snaga ovisi o brzini vjetra, spomenuta sposobnost zadržavanja priključka na prijenosnu mrežu ne podrazumijeva sposobnost održavanja izlazne snage vjetroelektrane tijekom

vremenskog intervala između dva jednogminutna intervala gdje najveća promjena srednje snage ne smije premašiti 10% odabrane priključne snage vjetroelektrane, te dva 15-minutna intervala gdje najveća promjena srednje snage ne smije premašiti 50% odabrane priključne snage vjetroelektrane. Također, naznačeno je da je priključna snaga vjetroelektrane najveća dozvoljena snaga koju vjetroelektrana smije isporučiti u prijenosnu mrežu pri frekvenciji većoj ili jednakoj od 50 Hz[4].

2.6.2. Primarna regulacija frekvencije

Vjetroelektrane moraju imati ugrađen upravljački sustav koji omogućuje traženi frekvencijski odziv za sudjelovanje u primarnoj regulaciji frekvencije.

Od upravljačkog sustava se traži sposobnost da u stvarnom vremenu prihvati i najkasnije za jednu minutu izvrši, u uvjetima poremećenog pogona, nalog operatora prijenosnog sustava o postavljanju referentne veličine djelatne snage proizvodnje. Smanjenje proizvodnje mora se izvršavati po stupnjevima od po 10% do 0% trenutne snage proizvodnje ili postavljanje slobodne proizvodnje.

Isto tako, od upravljačkog sustava se traži sposobnost da u stvarnom vremenu prihvati i najkasnije za jednu minutu izvrši, u uvjetima poremećenog pogona, nalog operatora o referentnoj veličini faktora snage, u rasponu od $\cos\varphi \geq 0.95$ (induktivno i kapacitivno), na priključku vjetroelektrane na prijenosnu mrežu. Operator prijenosnog sustava i vlasnik elektrane mogu se posebno dogovoriti ako je potrebno $\cos\varphi$ snage postaviti izvan područja $\cos\varphi \geq 0.95$ (induktivno i kapacitivno)[4].

2.6.3. Komunikacija sustava vjetroelektrane

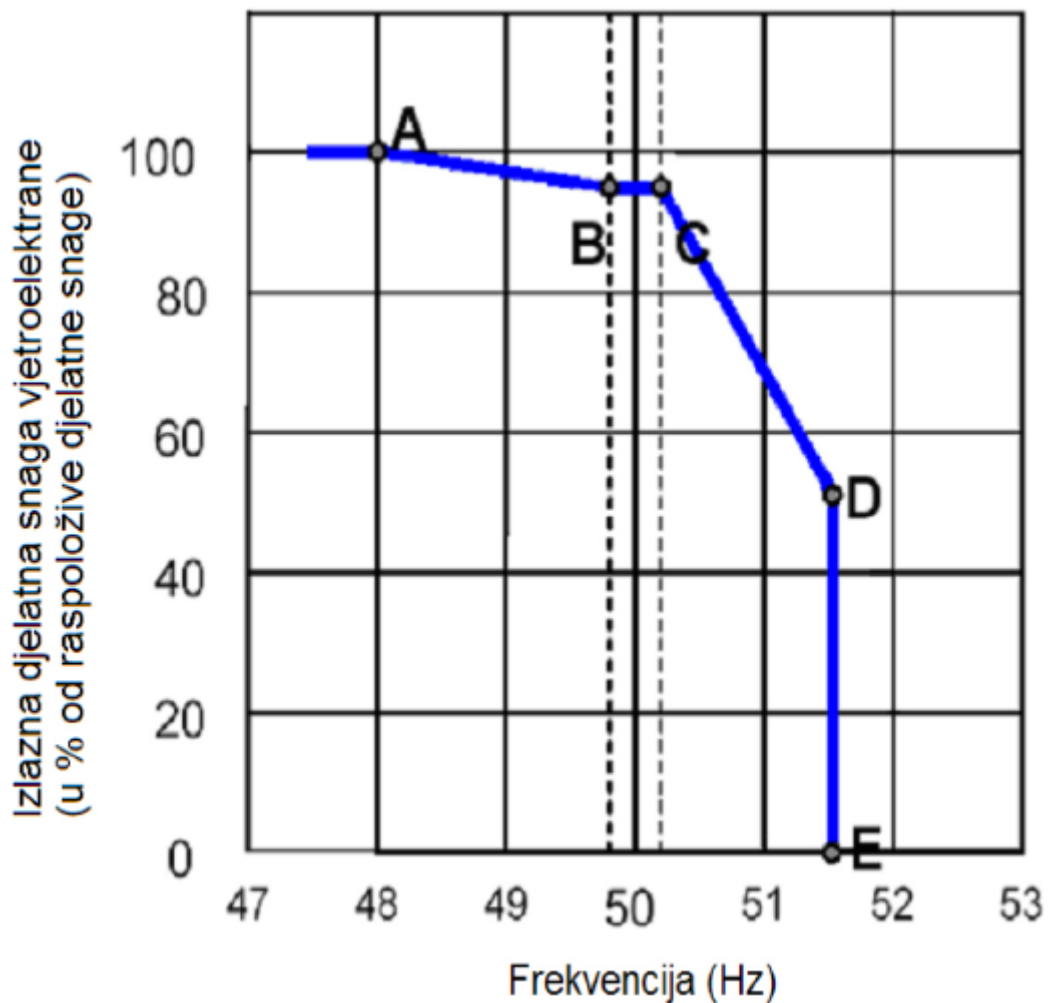
Komunikacija između upravljačkog sustava vjetroelektrane i svakog posebnog vjetroagregata mora biti projektirana tako da se bez kašnjenja osigura izvođenje svih, od operatora prijenosnog sustava, zadanih promjena u svrhu postizanja željenih rezultata.

Operator prijenosnog sustava mora imati mogućnost isključenja vjetroelektrane s prijenosne mreže[4].

2.6.4. Odziv izlazne snage vjetroelektrane na promjenu frekvencije mreže

U slučaju promjene frekvencije napona prijenosne mreže vjetroelektrana, zajedno sa svakim vjetroagregatom, mora zadovoljiti zahtjeve odziva izlazne snage na promjenu frekvencije propisane Mrežnim pravilima i prikazane na slici 2.5.

Operator prijenosnog sustava može od vjetroelektrane zahtijevati postavljanje frekvencijskog odziva vjetroagregata tako da se točke A, B i C na karakteristici prikazanoj na slici 2.5. postave na 100% raspoložive izlazne snage vjetroelektrane.



Slika 2.5.: Zahtjev odziva vjetroelektrane na promjenu frekvencije mreže[4]

Prema članku 160 iz [4], ako se frekvencija napona prijenosne mreže poveća iznad 51.5 Hz (točka E na slici 2.5.), proizvodna jedinice se mora isključiti. Isključene jedinice mogu se ponovo uključiti samo uz uvjet da je frekvencija prijenosne mreže manja ili jednaka 50.05 Hz i uz odobrenje operatora prijenosnog sustava.

2.6.5. Uvjeti u slučaju poremećenog pogona

Ukoliko dođe do poremećenog pogona elektroenergetskog sustava u kojem se zahtjeva smanjenje brzine promjene izlazne snage vjetroelektrane, operator prijenosnog sustava može izdati nalog za smanjenje koji se na razini vjetroelektrane mora izvršiti najkasnije za jednu minutu.

U slučaju isključenja prekidača zbog prorade zaštite, proizvođač je dužan dobiti dozvolu za ponovno uključenje prije ponovnog uključjenja prekidača.

U slučaju velike brzine vjetra, vjetroelektrana se ne smije naglo isključiti nego se njena snaga mora smanjivati na način naveden u prethodnom dijelu[4].

3. MODELI ELEMENATA MREŽE

3.1. Izvedbe generatora u vjetroelektranama

Vjetroagregati su se u proteklih 40 godina razvijale iz jednostavnih turbina s konstantnom brzinom vrtnje do sustava s potpuno promjenjivom brzinom vrtnje koja omogućuje aktivnu kontrolu proizvodnje. Kod tehnologija starijih generacija brzina rotora vjetroagregata određena je fiksnom frekvencijom prijenosne mreže, te je time ograničena maksimalna učinkovitost vjetroelektrana.

Sustavi s promjenjivom brzinom vrtnje s pomoću pretvarača energetske elektronike imaju mogućnost ne ovisiti o frekvenciji mreže te time povećati svoju učinkovitost. Rad s promjenjivom brzinom omogućuje optimizaciju rada, smanjenje mehaničkog opterećenja (izazvanim kočenjem) i donosi različite opcije za aktivnu kontrolu proizvodnje. Osnovno svojstvo sustava vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje je aktivna kontrola nagiba lopatica koja omogućuje potpunu kontrolu aerodinamike turbine. Odvajanje frekvencije prijenosne mreže i frekvencije rotora umanjuje kolebanje brzine vjetra i omogućuje rotoru da se ponaša kao zamašnjak za ubrzavanja i kočenje, te time ublažava utjecaj nagle promjene u snazi, naponu i momentu[2].

Iz stanja na tržištu vidljivo je da su sve više prisutni sustavi izvedeni s promjenjivom brzinom vrtnje. Ako se pogledaju neke od vodećih proizvođača vjetroturbina vidljivo je da su na tržištu uglavnom zastupljeni sustavi s promjenjivom brzinom vrtnje.

Paleta proizvoda Danskog proizvođača vjetroturbina *Vestas Wind Systems* prikazuje zastupljenost sustava s promjenjivom brzinom vrtnje. Vjetroagregati sa snagom od 2 MW izvedeni su s dvostruko napajanim generatorom s kliznim prstenovima jer vjetroagregati do 2 MW s takvom izvedbom imaju dobru učinkovitost i jeftiniji su od sustava s pretvaračem. Vjetroagregati proizvođača *Vestas* prikazane su u tablici 3.1[7].

Tablica 3.1.: Vjetroagregati proizvođača Vestas i njihove izvedbe[7]

| Klasa vjetroagregata | Naziv vjetroagregata | Izvedba |
|-----------------------------|---|---|
| 2 MW Platform | V120-2.2 MW V116-2.1 MW V110-2.0 MW V90-2.0 MW | Dvostruko napajan generator s kliznim prstenovima |
| 4 MW Platform | V150-4.2 MW V136-4.2 MW V136-3.45 MW V126-3.45 MW V117-4.2 MW V117-3.45 MW V112-3.45 MW V105-3.45 MW | Pretvarač s promjenjivom brzinom vrtnje u punom rasponu (eng. <i>Full scale</i>) |
| EnVentus Platform | V162-5.6 MW V150-5.6 MW V138-3.0 MW | Pretvarač s promjenjivom brzinom vrtnje u punom rasponu (eng. <i>Full scale</i>) |

Uzimajući u obzir veliki raspon dostupnih tehnologija, sustavi vjetroagregata mogu se podijeliti na četiri dominantne konfiguracije prikazane u nastavku. Vjetroagregati mogu biti opremljeni bilo kojim tipom trofaznog generatora, ali najčešće korišteni tipovi su [8]:

1. Asinkroni (indukcijski) generatori – koji se mogu podijeliti na:
 - Kavezne asinkrone generatore (engl. *Squirrel Cage Induction Generator – SCIG*)
 - Asinkrone generatore s namotanim rotorom i kliznim prstenovima (engl. *Wound Rotor Induction Generator – WRIG*) koji se dalje dijele na:
 - Opti-Slip TM asinkrone generatore (engl. *Opti-Slip Induction Generator – OSIG*)
 - Dvostruko napajane generatore (engl. *Doubly Fed Induction Generator – DFIG*)
2. Sinkroni generatori – koji se dijele na:
 - Generatore s namotanim rotora (engl. *Wound Rotor Synchronous Generator – WRSG*)

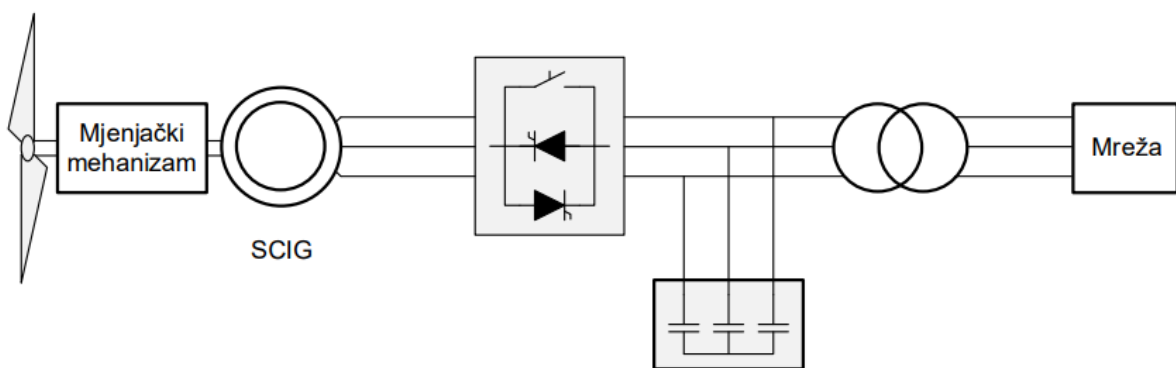
- Generatore s permanentnim magnetom (engl. *Parmanent Magnet Synchronous Generator* – PMSG)
3. Ostali potencijalni tipovi generatora:
- Visokonaponski generatori (engl. *High Voltage Generator* - HVG)
 - Generatori s poprečnim tokom (engl. *Transverse Flux Generator* – TFG)

Prema [9], najveću primjenu imaju dvostruko napajani asinkroni generatori s udjelom od 85% vjetroelektrana instaliranih danas.

Četiri dominantne konfiguracije vjetroagregata dijele se prema vrsti generatora, prema spoju na mrežu te prema kontroli snage i brzine vrtnje. Prema kontroli brzine vrtnje postoje vjetroagregati sa stalnom i promjenjivom brzinom vrtnje. Dominantne konfiguracije su sljedeće.

3.1.1. Konfiguracija vjetroagregata tipa A - stalna brzina vrtnje

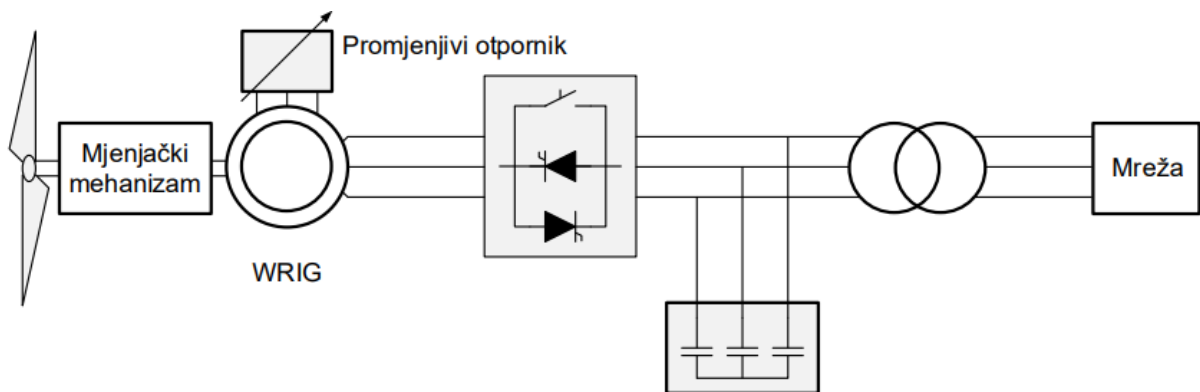
Vjetroagregat tipa A je fiksne brzine s malim odstupanjem od 1 do 2%. Generator koji se koristi u ovim vjetroagregatima je asinkroni generator s kaveznim rotorom (engl. *Squirrel Cage Induction Generator* – SCIG) koji je spojen direktno na mrežu preko blok-transformatora. Brzina vrtnje određena je mrežnom frekvencijom i izvedbom generatora. Postoje izvedbe s jednom ili dvije brzine vrtnje. Mogu biti upravljane pasivnom regulacijom metodom zavjetrine (engl. *passive stall control*), aktivnom regulacijom kuta zakreta lopatice rotora (engl. *active pitch control*) ili aktivnim kočenjem (engl. *active-stall*)[10]. Vjetroagregati koji koriste konfiguraciju A imaju mogućnost naponske kontrole i kontrole jalove snage[2]. Konfiguracija tipa A prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1.: Konfiguracija tipa A[5]

3.1.2. Konfiguracija vjetroagregata tipa B - promjenjiva brzina vrtnje u određenom rasponu

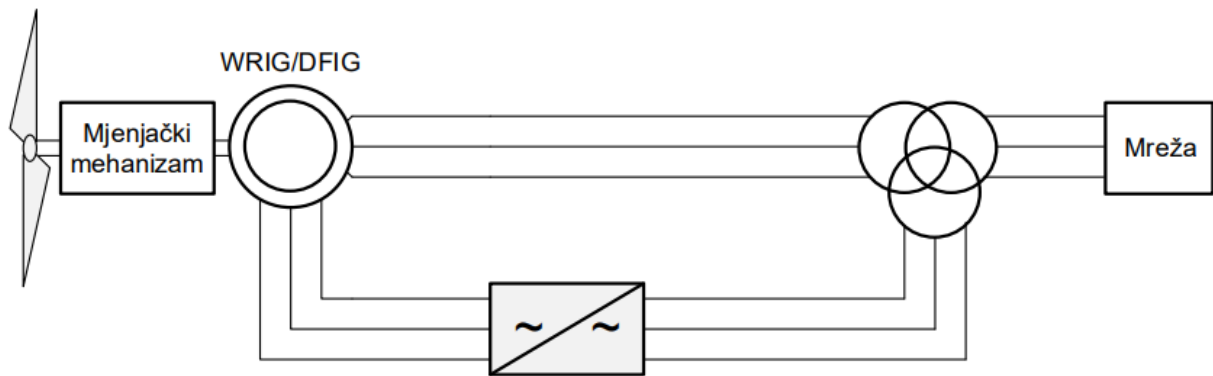
Vjetroagregat tipa B ima promjenjivo klizanje. Koristi asinkroni generator s namotanim rotorom (engl. *Wound Rotor Synchronous Generator* – WRSG) kod kojeg se klizanje može regulirati rotorskim otpornikom u rasponu od 0 do 10%. Vjetroagregat je direktno spojen na mrežu preko blok-transformatora. Snagom se može upravljati rotorskim otpornikom, ali to nije učinkovito jer se na taj način povećavaju toplinski gubici te se stoga snagom upravlja aktivnom regulacijom kuta zakreta lopatica rotora (engl. *active pitch control*)[5], [10]. Vjetroagregati koji koriste konfiguraciju B imaju mogućnost naponske kontrole i kontrole kvalitete snage[2]. Konfiguracija tipa B prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2.: Konfiguracija tipa B[5]

3.1.3. Konfiguracija vjetroagregata tipa C - promjenjiva brzina vrtnje

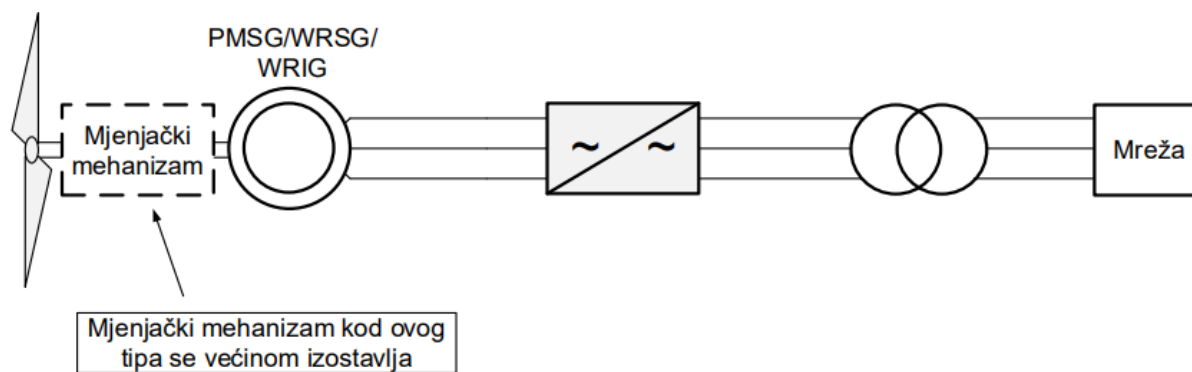
Vjetroagregat tipa C je promjenjive brzine. Ova izvedba kombinira prednosti konfiguracija prethodnih tipova s prednostima energetske elektronike te koristi asinkroni generator s namotanim rotorom i kliznim prstenovima (engl. *Wound Rotor Induction Generator* – WRIG) u kojem je rotor spojen na mrežu preko neizravnog frekvencijskog pretvarača. Generator se može magnetizirati i kroz stator i kroz rotor te se zbog toga ovaj tip konfiguracije naziva vjetroagregat s dvostruko napajanim asinkronim generatorom (engl. *Doubly Fed Induction Generator* – DFIG)[10]. Primjena energetske elektronike omogućuje kontrolu djelatne i jalove snage, te time aktivnu kontrolu napona. Osim tih mogućnosti, vjetroagregat tipa C ima mogućnost prolaska kroz kvar (engl. *fault ride through*). S ovom konfiguracijom približno 40% snage odlazi preko energetske elektronike u mrežu, dok ostatak odlazi direktno u mrežu. Varijacije u brzini mogu biti $\pm 40\%$ od sinkrone brzine[2]. Konfiguracija tipa C prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3.: Konfiguracija tipa C[5]

3.1.4. Konfiguracija vjetroagregata tipa D - promjenjiva brzina vrtnje u punom rasponu

Vjetroagregat tipa D je promjenjive brzine u punom rasponu. Zbog potpune razdvojenosti statora od mreže preko potpunog frekvencijskog pretvarača (engl. *full scale* – FSC) može se koristiti i sinkronim i asinkronim generatorom. To omogućuje proizvodnju električne energije nazivne frekvencije neovisno o brzini rotora. Može, ali i ne mora imati prijenosnik (engl. *gearbox*). Ako se prijenosnik ne koristi, izbor generatora je ili sinkroni generator s namotanim rotorom (WRSK) ili sinkroni generator s permanentnim magnetima (PMSG) [10], te se ovakva rješenja izvedbe još nazivaju i rješenja s izravnim pogonom (engl. *direct drive solution*). Kada se prijenosnik koristi, onda se koristi ili kavezni asinkroni generator (SCIG) ili sinkroni generator s permanentnim magnetima (PMSG). Upravljanje snagom vrši se preko kuta zakreta lopatica. Pretvarači koji se koriste u ovoj izvedbi su skuplji jer kompletna snaga prolazi kroz njih[10]. Vjetroagregat tipa D ima mogućnost kontrole djelatne i jalove snage, kontrolu napona, te mogućnost prolaska kroz kvar (engl. *fault ride through*)[2]. Danas su sve više zastupljeni u primjeni, a posebno za izvedbe vjetroagregata većih snaga od 2 MW što se može vidjeti iz prethodnog poglavlja. Konfiguracija vjetroagregata tipa D prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4.: Konfiguracija tipa D[5]

3.2. Utjecaj vrste generatora na struju kratkog spoja

Prema [11], vidljivo je da izvedba generatora i način spajanja na mrežu utječu na struju kratkog spoja priključka.

„Sinkroni generatori doprinose početnoj izmjeničnoj, udarnoj i rasklopnoj izmjeničnoj struji kvara (subtranzijentna i tranzijentna sastavnica vrijednosti struje kratkog spoja), a potonje je značajno veće nego li je trajna struja kratkog spoja“[5].

Sinkroni generatori će tijekom trajanja kvara gubiti napona za uzbuđu i time će se njihov utjecaj smanjivati.

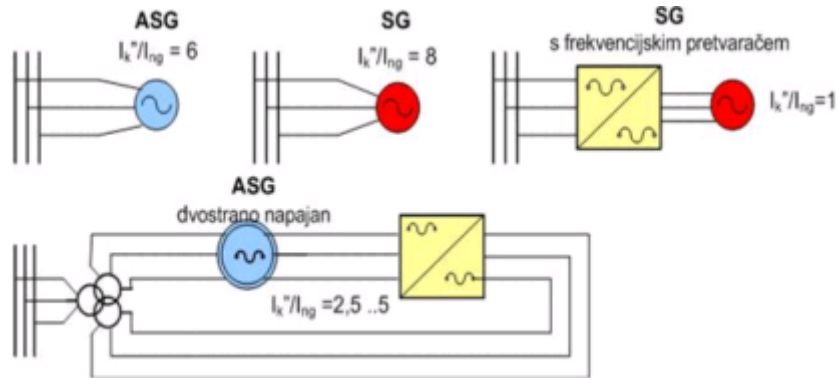
Asinkroni generatori doprinose početnoj izmjeničnoj, udarnoj i rasklopnoj izmjeničnoj vrijednosti struje kvara, a kod dvofaznih kvarova doprinose i trajnoj struji kratkog spoja.

Struja kratkog spoja se kod asinkronih generatora s vremenom smanjuje. Što generator ima veću snagu i veći broj polova, to je smanjivanje vrijednosti struje kratkog spoja sporije. Smanjivanje struje kratkog spoja je brže kod trofaznog kratkog spoja nego kod dvofaznog kratkog spoja.

Ako se promatra doprinos struji kratkog spoja kod izmjenjivača – vidljiva su dva načina vođenja:

- 1.) Izmjenjivači koji su vođeni mrežom - pri kratkom spoju izmjenjivač u mrežu daje istosmjernu struju čiji se učinak može zanemariti.
- 2.) Izmjenjivači koji su samoupravljeni - u slučaju kratkog spoja izmjenjivač u mrežu daje izmjeničnu struju i time utječe na iznos početne izmjenične i udarne struje kratkog spoja.

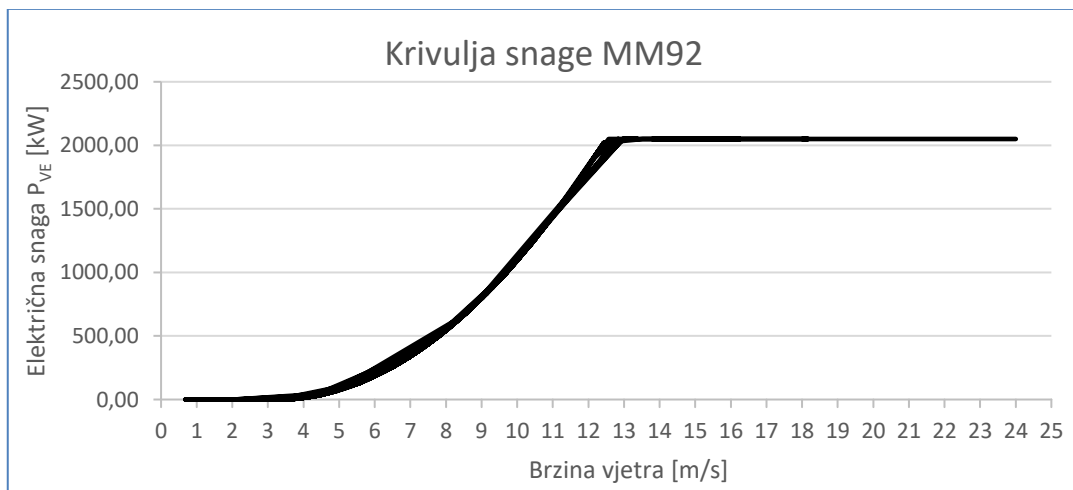
Iz slike 3.5 je vidljiv utjecaj spoja s izmjenjivačem koji je puno manji nego utjecaj ostalih spojeva. I_k''/I_{ng} je omjer koji se koristi za grube provjere, a označava omjer početne izmjenične struje trofaznog kratkog spoja (I_k'') i nazivne struje generatora (I_{ng}).



Slika 3.5: Doprinos generatora struji kratkog spoja na priključnicama ovisno o vrsti generatora[11]

3.3. Vjetroagregati

Za model vjetroagregata odabran je tip MM92 proizvođača Senvion. Prema [13], nazivnu snagu od 2.05 MW postiže pri brzini vjetra od 12.5 m/s. Namijenjen je za male i srednje brzine vjetra. Krivulja snage prikazana je na slici 3.6.



Slika 3.6.: Krivulja snage modela MM92[13]

Iz krivulje snage na slici 3.6., odnosno, iz nazivnih podataka vjetroagregata mogu se odrediti nekoliko karakterističnih točaka. Te karakteristične točke su [5]:

- V_{ci} - brzina uključenja. Predstavlja iznos brzine vjetra pri kojoj vjetroagregat započinje proizvoditi električnu energiju. U ovom slučaju brzina uključenja iznosi 3 m/s.
- V_r - nazivna brzina. Predstavlja iznos brzine vjetra pri kojoj vjetroagregat postiže nazivnu snagu. U ovom slučaju nazivna brzina iznosi 12.5 m/s.
- V_{c0} - brzina isključenja. Predstavlja iznos brzine vjetra pri kojoj zbog prevelikih mehaničkih naprezanja vjetroagregat prestaje s radom. U ovom slučaju brzina isključenja iznosi 24 m/s.
- P_r - nazivna snaga vjetroagregata. Predstavlja maksimalnu snagu koju vjetroagregat može dati. U ovom slučaju nazivna snaga iznosi 2.05 MW.

Prema [14, 15], krivulja snage vjetroagregata se može aproksimirati matematičkim izrazom. Matematički izraz opisan je u nastavku [14]:

$$P_{VE} = \begin{cases} 0 & , 0 \leq v_t < v_{ci} \\ (A + Bv_t + Cv_t^2)P_r & , v_{ci} \leq v_t < v_r \\ P_r & , v_r \leq v_t < v_{c0} \\ 0 & , v_t \geq v_{c0} \end{cases} \quad (3-1)$$

Izraz 3-1 segmentirano opisuje krivulju snage vjetroagregata. Prvi segment opisuje dio krivulje kada je brzina manja od brzine uključenja (3 m/s). Drugi segment opisuje dio krivulje kada je brzina vjetra između brzine uključenja (3 m/s) i nazivne brzine (12.5 m/s). Izlazna snaga tada ovisi o koeficijentima A, B i C koji ovise o brzini uključenja v_{ci} i nazivnoj brzini v_r . Koeficijenti se određuju prema sljedećim jednadžbama [14, 15]:

$$A = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4(v_{ci} \cdot v_r) \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \right] \quad (3-2)$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[4(v_{ci} + v_r) \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 - (3v_{ci} \cdot v_r) \right] \quad (3-3)$$

$$C = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[2 - 4 \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \right] \quad (3-4)$$

Proračunom su dobiveni rezultati koeficijenata koji iznose $A= 0.119122437$, $B= - 0.074500432$, te $C= 0.011597651$.

Treći segment opisuje dio krivulje u kojoj je brzina vjetra veća od nazivne brzine (12.5 m/s) i manja od brzine isključenja (24 m/s). U tom dijelu krivulje snage vjetroagregat proizvodi nazivnu snagu od 2.05 MW. Četvrti segment opisuje dio krivulje snage u kojem je brzina vjetra veća od brzine isključivanja (24 m/s), te je snaga u tom dijelu jednaka nuli.

Tehnički podaci vjetroagregata iz [13] prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1.: Tehnički podaci Senvion MM92[13]

| Projektni podaci | | Rotor | | Električni sustav | |
|-----------------------------------|----------|--|------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Nazivna snaga | 2,050 kW | Promjer rotora | 92.5 m | Nazivna frekvencija | 50/60 Hz |
| Brzina uključenja | 3 m/s | Površina koju opisuju lopatice rotora (A) | 6,720 m ² | Generator | Dvostruko napajan asinkroni generator |
| Nazivna brzina | 12.5 m/s | Brzina rotora | 7.5-15 o/min (+12.5 %) | Generatorska zaštita | IP 54 |
| Brzina isključenja | 24 m/s | Dužina lopatica | 45.2 m | Vrsta pretvarača | Frekvencijski pretvarač |
| Brzina ponovnog uključenja | 22 m/s | Maksimalna razina buke | 103.2 dB (A) | Transformator | ITS/ETS |

Snaga vjetroagregata određena je tako da su uzeti podaci o brzini vjetra mjereni u podnožju elektrane na 10 metara, te zatim preračunati na visinu gondole vjetroagregata od 80 metara. Taj proračun je napravljen koristeći formulu iz [5].

$$v = v_0 \left[\frac{H}{H_0} \right]^\alpha \quad (3-5)$$

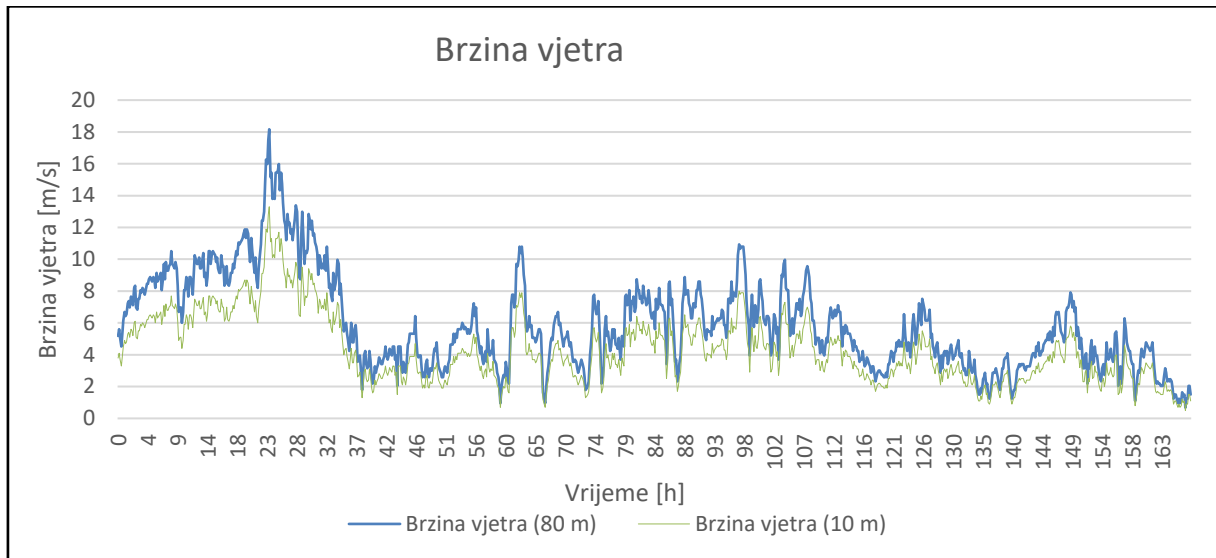
Gdje je:

v- brzina vjetra [m/s] na visini H [m],

v₀- referentna brzina vjetra [m/s] na visini H₀ (10 m),

α - koeficijent trenja koji ovisi o površini terena na kojoj se mjeri brzina vjetra. Koeficijent trenja iznosi 0.15 što prema predstavlja teren s visokom travom na ravnoj površini[16].

Brzina vjetra na visini od 80 metara prikazana je na slici 3.7. Na istom grafu prikazana je i brzina vjetra na 10 metara visine.



Slika 3.7.: Brzina vjetra na visini gondole

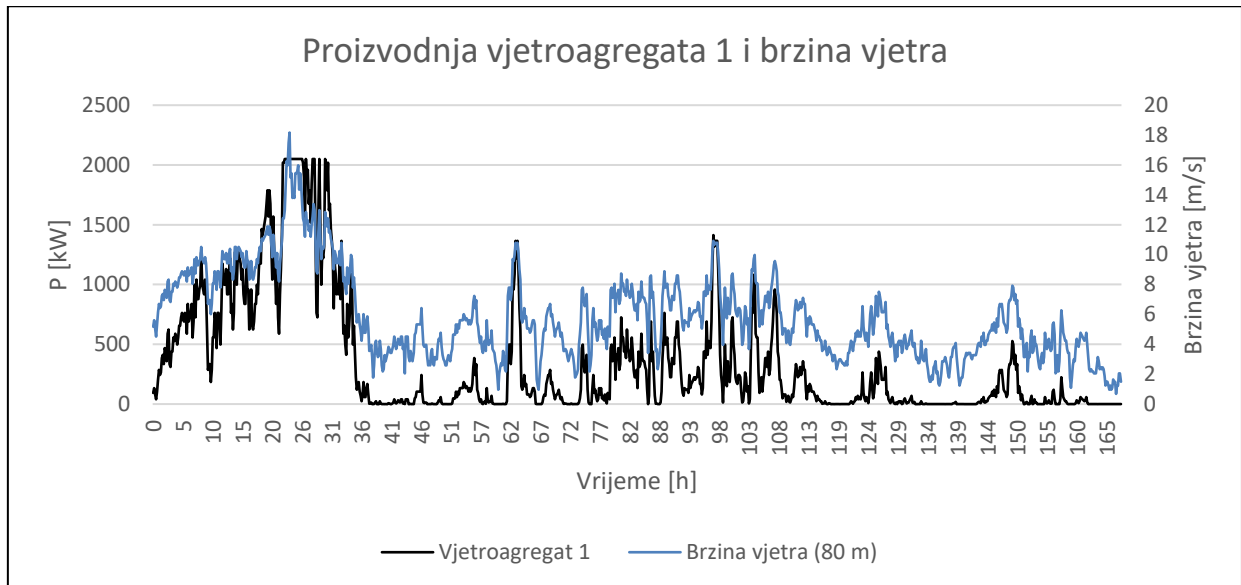
Nadalje, snaga vjetroagregata dobivena je koristeći formulu iz [14] [15]:

$$P = \begin{cases} 0 & , v < 3 \\ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta & , 3 \leq v < 12.5 \\ 2050 \text{ kW} & , 12.5 \leq v < 24 \\ 0 & , v \geq 24 \end{cases} \quad (3-6)$$

Gdje je: ρ - gustoća zraka -1.225 [kg/m³], A- površina koju opisuju lopatice rotora- 6720 [m²], v³- treća potencija brzine vjetra [m/s], c_p - učinkovitost rotora (mjenjao se u ovisnosti o brzini vjetra, odnosno, koeficijentima A, B i C) η - učinkovitost generatora i prijenosnika (0.9).

Proizvodnja vjetroagregata se međusobno razliku jedna od drugih. Različite vrijednosti generirane su uniformnom razdiobom kako bi se simulirao geografska udaljenost između vjetroagregata.

Grafički prikaz proizvodnje vjetroagregata 1 prikazan je na slici 3.8. Na istoj slici prikazana je brzina vjetra.



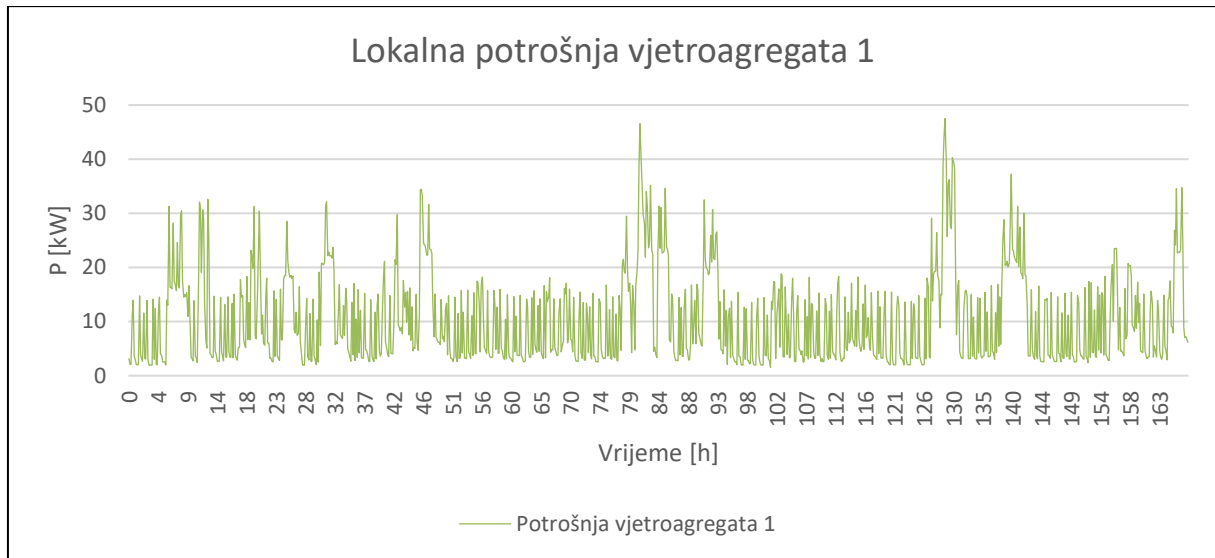
Slika 3.8.: Proizvodnja vjetroagregata 1 i brzina vjetra

Iz priloženog se vidi ovisnost proizvodnje vjetroagregata o brzini vjetra.

3.4. Lokalna potrošnja

Pod lokalnom potrošnjom spada energija koju elektrana koristi za napajanja vlastitih potreba kao što je napajanje rasvjete, sustava održavanja, energetskih pretvarača i sl.

Lokalna potrošnja modelirana je kao potrošač te se nalazi na sabirnici generatora. Potrošnja je skalirana tako da joj vršna vrijednost iznosi oko 2.5% radne proizvodnje vjetroagregata. Lokalna potrošnja prikazana je na slici 3.9.



Slika 3.9.: Lokalna potrošnja vjetroagregata 1

3.5. Transformatori

Transformatori su električni uređaji bez rotacijskih dijelova međuinduktiviteto^m povezuje dva električna kruga izmjenične struje i služi za transformaciju izmjenične struje određenog napona na viši ili niži napon u svrhu smanjivanja gubitaka transporta električne energije.

Mreža se sastoji od ukupno pet transformatora od kojih su tri vezana za vjetroagregate, jedan za pohranu, te jedan za prijenosnu mrežu kao glavni mrežni transformator na pragu elektrane. Parametri transformatora prikazani su u tablici 3.2.

Tablica 3.2.: Parametri transformatora

| | Transformatori vjetroatregata (TRGEN1, TRGEN2, TRGEN3) | Glavni mrežni transformator (TR_MREZA) | Transformator sustava pohrane |
|-----------------------------------|---|---|--|
| Broj faza | 3 | 3 | 3 |
| Broj namota | 2 | 2 | 2 |
| Spoj namota | Dy11 | Dy11 | Dy11 |
| Naponske razine | 10/0.69 kV | 110/10 kV | 10/0.40 kV |
| Nazivna prividna snaga | 2500 kVA | 8000 kVA | 2500 kVA |
| Napon kratkog spoja | 6% | 11.5% | 6% |
| Gubici praznog hoda | 1.1% | 1.1% | 1.1% |

3.6. Kabeli

Kabeli korišteni u simulaciji su standardizirani kabeli naziva NYY 4x240SM 0.6/1 kV i NAYSEY 3x50 RM 16 6/10 kV.

NYY 4x240SM 0.6/1 kV korišten je za spajanje vjetroatregata s pripadajućim transformatorima.

Kabel NAYSEY 3x50 RM 16 6/10 kV korišten je za spoj transformatora vjetroatregata i glavnog mrežnog transformatora, te za spajanje baterijskog sustava pohrane s glavnim mrežnim transformatorom. Parametri kabela prikazani su u tablici 3.3.

Valja spomenuti da se za spoj vjetroatregata s transformatorom koristilo pet kabela istog tipa, dok se za spoj baterijskog sustava pohrane i glavnom mrežnog transformatora koristilo sedam kabela. To je učinjeno kako bi kabeli mogli podnijeti nazivnu struju.

Tablica 3.3.: Parametri kabela

| | NY Y 4x240SM 0.6/1 kV | NAYSEY 3x50RM/16 6/10 kV |
|---|------------------------------|---------------------------------|
| Direktna komponenta otpora R_1 | 0.0774 [Ω /km] | 0.641 [Ω /km] |
| Direktna komponenta reaktancije X_1 | 0.07979646 [Ω /km] | 0.1140084 [Ω /km] |
| Direktna komponenta kapaciteta C_1 | 0 [F/km] | 0 [F/km] |
| Nulta komponenta otpora R_0 | 0.3096 [Ω /km] | 2.564 [Ω /km] |
| Nulta komponenta reaktancije X_0 | 0.3191859 [H/km] | 0.4560336 [H/km] |
| Nulta komponenta kapaciteta C_0 | 0 [F/km] | 0 [F/km] |
| Nazivna struja | 464 A | 146 A |

3.7. Prijenosna mreža

Mreža je modelirana kao element na koji se spaja vjetroelektrana. Početni parametri mreže prikazani su u tablici 3.4.

Tablica 3.4.: Parametri mreže

| | |
|--|----------|
| Parametri mreže (source) | |
| Frekvencija | 50 Hz |
| Broj faza | 3 |
| Referentni napon | 1.0 p.u. |
| Snaga jednofaznog kratkog spoja | 150 MVA |
| Snaga trofaznog kratkog spoja | 150 MVA |

3.8. Baterijski sustav pohrane

Sustavi pohrane su ključna komponenta u pružanju fleksibilnosti i potpore obnovljivim izvorima energije u integraciji u elektroenergetski sustav. Sustav može uravnotežiti centraliziranu i distribuiranu proizvodnju električne energije, dok istovremeno doprinosi energetske sigurnosti. Skladištenje energije će poboljšati odgovore na potražnju energije, fleksibilnost proizvodnje i pružiti nadopunu razvoju elektroenergetskog sustava. Skladištenje energije također može pridonijeti dekarbonizaciji i potaknuti integraciju većih udjela obnovljivih izvora energije. Stoga, skladištenje energije može dati sveobuhvatan doprinos energetskej slici svijeta, a posebno može doprinijeti tržištu električne energije i dekarbonizaciji[18].

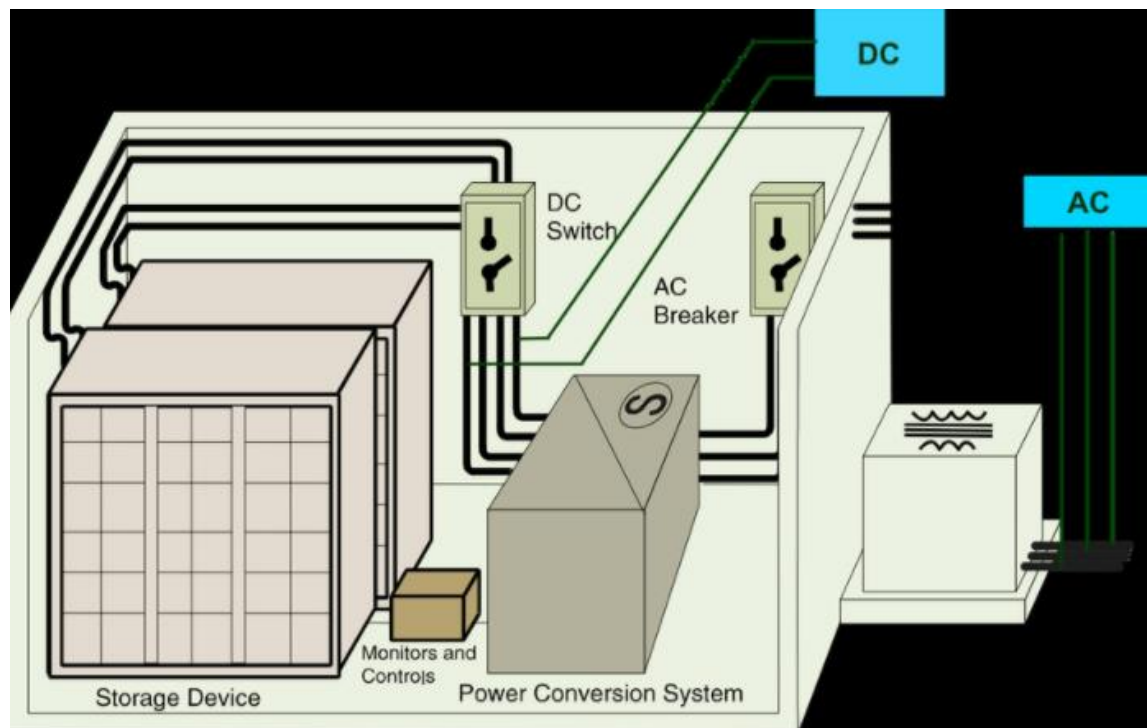
Svrha pohrane energije u elektroenergetskom sustavu je[19]:

- Upravljanje vršnim opterećenjem (engl. *peak load management*)
- Raspodjela opterećenja
- Osigurava energetske rezerve
- Regulira frekvenciju i napon
- Pomaže integraciji obnovljivih izvora energije
- Pomoćni izvor energije za vrijeme prekida isporuke energije

Za sustave pohrane koristi se nekoliko tehnologija. Te tehnologije su sljedeće:

- Mehanička – reverzibilne hidroelektrane, zamašnjaci, komprimirani zrak
- Toplinska
- Kemijska – vodik, sintetički prirodni plin
- Elektro kemijska – olovno-kiselinske, nikal-kadmij, nikal-metal hibrid, litij-ion, redoks protočne i dr.
- Električna – super kondenzatori

Shema baterijskog sustava pohrane prikazana je na slici 3.10.



Slika 3.10.: Shema baterijskog sustava pohrane [20]

Najvažnije karakteristike sustava pohrane su kombinacija snage, kapaciteta i vremena reagiranja. Na temelju se tih karakteristika određuje primjena određene tehnologije. Te tri karakteristike, zajedno s učinkovitošću i cijenom, imaju direktan utjecaj prihod koji sustavi pohrane mogu stvoriti na tržištu kroz usluge i pogodnosti. Najveću primjenu u elektroenergetskom sustavu imaju Litij-ionske baterije[18].

3.8.1. Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije komercijalno je predstavio Sony 1991. godine prvenstveno za upotrebu za potrošačke proizvode. Od tada su postale najprimijenjiva baterijska tehnologija za pohranu energije u energetsom sustavu. Litij-ionske baterije imaju svestranu primjenu i za manje razmjere pohrane kao što su električna vozila.

Litij-ionske baterije svoje ime su dobili po prijenosu litijevih iona između elektroda koji se odvija i pri skladištenju i pri korištenju energije. Umjesto metalnog litija, litij-ionske baterije koriste metalne okside obogaćene litijem kao katodu, dok ugljik služi kao anoda. Za razliku od

ostalnih baterijskih tehnologija koje punjenjem i pražnjenjem troše elektrode, litij-ionske baterije nude bolju učinkovitost jer kretanje iona ne troši elektrode.

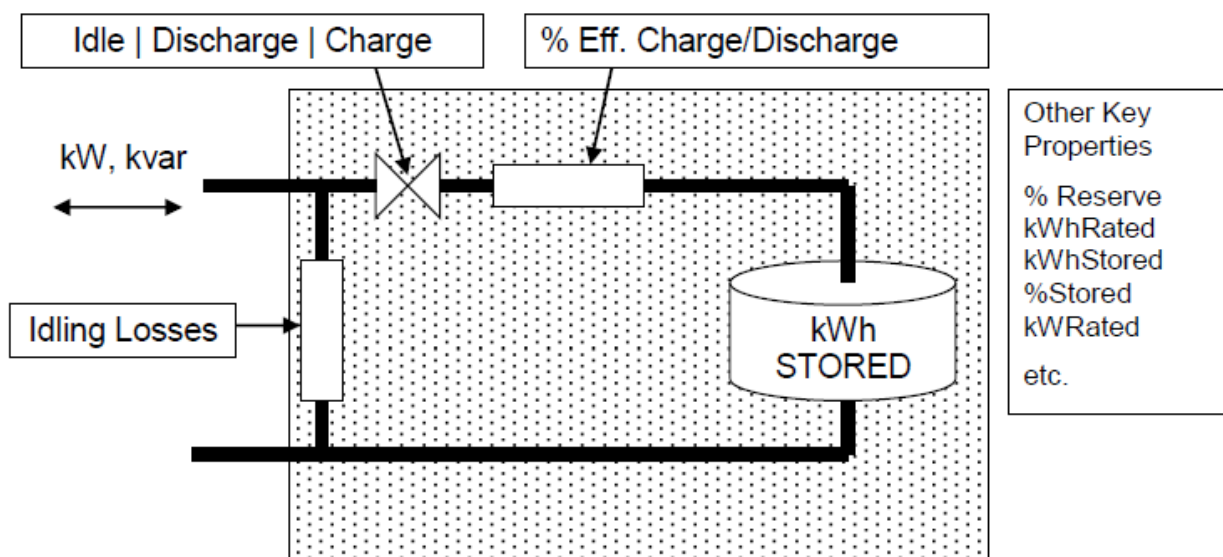
Za pohranu energije od 30 minuta do 3 sata najveću učinkovitost i gustoću energije imaju litij-ionske baterije. Za vremenski duže pohrane nisu toliko učinkovite. Litij-ionske baterije se mogu konfigurirati kako bi stvorili visok raspon napona, snage i kapaciteta. To omogućuje različite primjene u rasponu od nekoliko kilovata snage s par minuta pohrane pa sve do više megavata snage s višesatnom pohranom koja se može koristiti optimizaciji rada vjetroelektrana.

Litij-ionski baterijski sustavi imaju životni vijek od 20 godina zbog starenja i slabljenja baterijskog sustava pohrane[21].

Najveći baterijski sustav pohrane koji koristi litij-ionske baterije u svijetu je Gateway Energy Storage. Nazivna snaga tog postrojenja iznosi 250 MW, dok kapacitet iznosi 250 MWh. Nalazi se u Otay Mesa, Kalifornija. Koristi baterije proizvođača LG Chem. S radom je počeo u Kolovozu 2020, a do tada je titulu najvećeg litij-ionskog postrojenja imalo postrojenje Hornsdale Power Reserve sa snagom od 150 MW i kapacitetom od 193 MWh. Hornsdale je izgrađen 2018. godine te koristi baterije Američkog proizvođača Tesla[22].

3.8.2. Model baterijskog sustava pohrane

U OpenDSS-u element pohrane se ponaša kao generator s kojim se može upravljati da u pražnjenja proizvodi snagu, a da se u slučaju punjenja ponaša kao potrošač u granicama nazivne snage i nazivnog kapaciteta[23]. Na slici 3.11 prikazan je model pohrane sa svojim ključnim parametrima u OpenDSS-u.



Slika 3.11.: Model sustava pohrane u OpenDSS-u[23]

U drugom slučaju dodaje se baterijski sustav pohrane kako bi se promatrao utjecaj pohrane na strujno-naponske prilike u mreži. Baterija je preko energetskog pretvarača i transformatora spojena na glavni mrežni transformator. Parametri sustava pohrane prikazani su u tablici 3.6.

Tablica 3.6.: Parametri sustava pohrane

| | | | |
|---|---------|---|----------|
| Nazivni napon | 0.4 kV | Gubici radne snage u praznom hodu | 1% |
| Nazivna izlazna snaga | 1.6 MVA | Gubici jalove snage u praznom hodu | 1% |
| Kapacitet baterije | 30MWh | Učinkovitost punjenja baterije | 95 % |
| Faktor snage | 1 | Učinkovitost pražnjenja baterije | 96% |
| Minimalna dozvoljena razina napunjenosti | 20% | Spoj | Δ |
| Razina napunjenosti prije simulacije | 70 % | | |

4. SIMULACIJA UTJECAJA VJETROELEKTRANE NA PRIJENOSNU MREŽU U PROGRAMSKOM PAKETU OpenDSS

4.1. Zadatak simulacije

Zadatak simulacijskog dijela diplomskog rada je proučiti utjecaj vjetroelektrane na prijenosnu mrežu određene snage, te proučiti kako se s baterijskim sustavom pohrane može povoljno utjecati na strujno-naponske prilike u mreži. Vremenska simulacija je realizirana kao sedmodnevni period (168 sati) u kojem zbog injektiranja djelatne snage dolazi do povišenja napona. 168 sati podijeljeno je u 1008 desetominutnih koraka te je za svaki korak izvršen proračun toka snage. Integracijom baterijskog sustava pohrane nastoji se ograničiti maksimalna injektirana snaga vjetroelektrane tako da se za vrijeme povišenog napona pohrana puni, a za vrijeme nižeg napona prazni. Također, cilj simulacije je osigurati određenu minimalnu razmjenu snage s mrežom. Opis mreže i parametri elemenata mreže prikazani su u nastavku. Simulacija je odrađena u programskom paketu OpenDSS.

4.2. Programski paket OpenDSS

Programski paket OpenDSS razvio je Američki institut za istraživanje električne energije (engl. *The Electric Power Research Institute, Inc. EPRI*). EPRI je neovisna neprofitabilna organizacija koja provodi istraživanje i razvoj vezan uz proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije te se fokusira na rješavanju problema u mreži kao su pouzdanost, učinkovitost, pristupačnost, sigurnost i očuvanje okoliša. Institut je nastao 1972. godine iz potreba za razvojem Američkog energetskeg sustava na inicijativu Dr. Chauncey Starr.

OpenDSS je razvijen 1997. godine te je izvorno dizajniran da uvođenjem kvazistatičke vremenske analize proučava vremenski i lokacijski utjecaj distribuiranih izvora energije na elektroenergetski sustav [12].

OpenDSS je simulator električnog energetskeg sustava osmišljen da podrži integraciju mreže, sustave proizvodnje i pohrane, te modernizaciju mreže. Omogućuje inženjerima provođenje kompleksnih analiza koristeći fleksibilnu i prolagodljivu platformu koja je posebno namjenjena za suočavanje s trenutnim i budućim izazovima elektroenergetskog sustava te pruža temelj za razumijevanje i integraciju novih tehnologija [12].

Neke od mogućnosti programa OpenDSS su sljedeće[12]:

- Kvizistatičke vremenske analize
- Analize kratkog spoja
- Analize harmonika i flikera
- Dinamičke (elektro-mehaničke) analize
- Linearne i ne linearne analize
- Modeliranje - PV sustava, sustava vjetroelektrana, sustava pohrane energije, mikromreža i dr.

4.2.1. Programski kod

Kako OpenDSS ne sadrži grafičko sučelje, potrebno je napisati programski kod za modeliranje mreže. Programski kod korišten za modeliranje mreže i simulaciju nalazi se u prilogu 4.1.

Za mjerenje vrijednosti na svakom od elemenata korišten je element *MONITOR*. Dobivene vrijednosti za svaki od koraka simulacije, te za svaki pripadajući element sprema u zasebnu datoteku koja se nakon simulacije može koristiti. Za prikaz podataka korištena je naredba *SHOW*, dok je za izvoz podataka korištena naredba *EXPORT*.

4.3. Modeliranje mreže

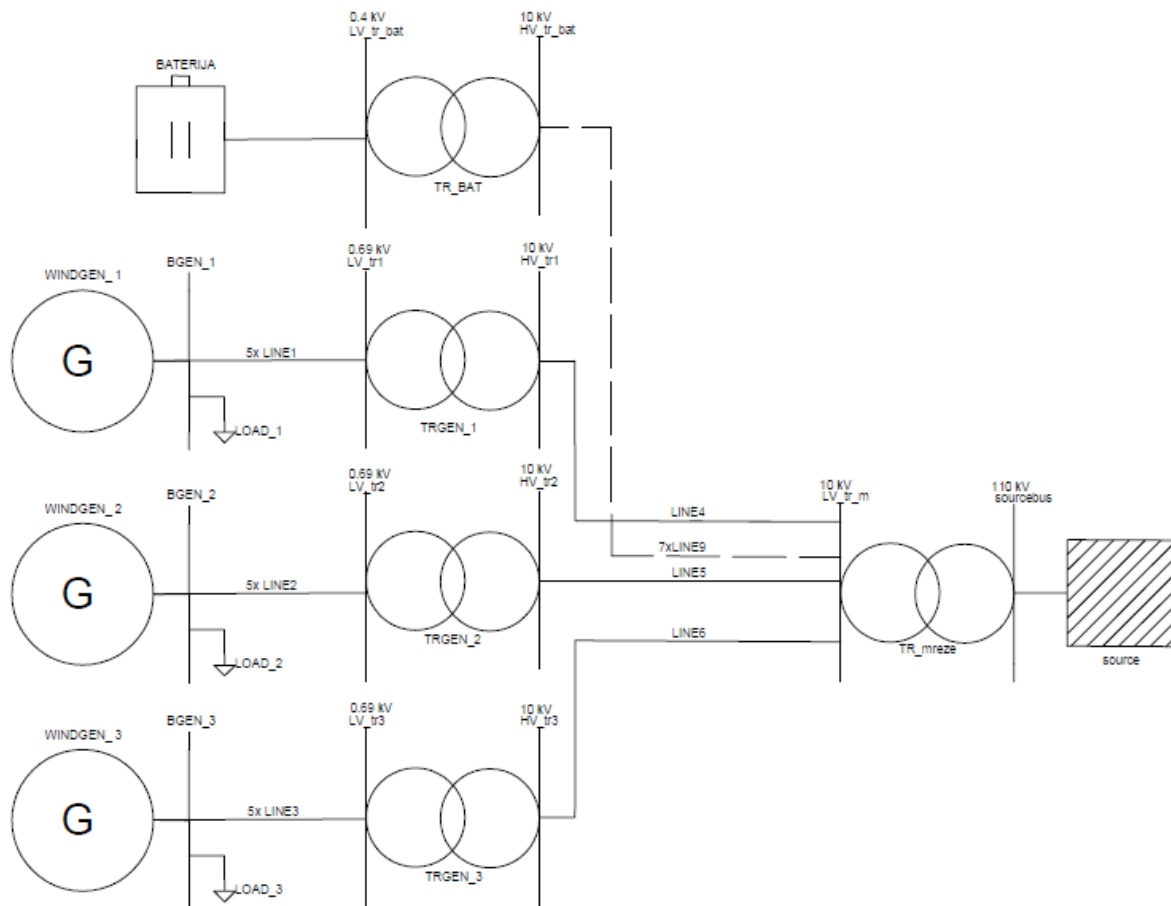
Promatran je utjecaj vjetroelektrane snage 6 MW koja se sastoji od tri vjetroagregata koji će u nastavku biti detaljnije opisani. Simulacijom se promatra utjecaj vjetroelektrane na 110 kV prijenosnu mrežu kroz sedam dana u obliku 1008 desetominutnih vrijednosti ili 168 sati. Za potrebe simulacije izrađena su dva slučaja. Slučaji su sljedeći:

- Referentni slučaj – simulira se rad i promatra utjecaj elektrane bez baterijskog sustava pohrane
- Testni slučaj – integrira se baterijski sustav pohrane i promatraju utjecaji na pogon.

Elektrana je modelirana tako da se tri generatora nazivnog napona 690 V spajaju preko kabela na zasebne transformatore 0.69/10 kV. Nadalje, kabelima se svaki transformator zasebno spaja na glavni mrežni transformator 10/110 kV koji je nadalje spojen na prijenosnu mrežu.

Sustav pohrane modeliran je tako da je baterijski sustav pohrane (baterija + energetski pretvarač) spojen, preko transformatora 0.4/10 kV te kabela, na glavni mrežni transformator 10/110 kV na pragu elektrane. Parametri svakog od elemenata bit će prikazani u nastavku rada.

Programski kod prikazan je u prilogu 4.1. Jednofazni dijagram mreže s nazivima koji odgovaraju programskom kodu prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1.: Jednofazni dijagram mreže

4.3.1. Modeliranje vjetroelektrane u OpenDSS-u

Načina modeliranja vjetroelektrane u software-u prikazan je na slici 4.2.

```

ILOADSHAPE
IPROIZVODNJA GENERATORA
IWINDGEN_1
New Loadshape.GEN_1 npts=1008 mininterval=10 mult=(file=GEN1.txt) UseActual=true
IWINDGEN_2
New Loadshape.GEN_2 npts=1008 mininterval=10 mult=(file=GEN2.txt) UseActual=true
IWINDGEN_3
New Loadshape.GEN_3 npts=1008 mininterval=10 mult=(file=GEN3.txt) UseActual=true

IVJETROAGREGATI
New Generator.WINDGEN_1 Bus1=BGEN_1 Phases=3 Conn=delta kv=0.69 model=1 kVA=2000 kw=0 kvar=0 daily=GEN_1 Vmin=0.1 Vmax=2
New Generator.WINDGEN_2 Bus1=BGEN_2 Phases=3 Conn=delta kv=0.69 model=1 kVA=2000 kw=0 kvar=0 daily=GEN_2 Vmin=0.1 Vmax=2
New Generator.WINDGEN_3 Bus1=BGEN_3 Phases=3 Conn=delta kv=0.69 model=1 kVA=2000 kw=0 kvar=0 daily=GEN_3 Vmin=0.1 Vmax=2
    
```

Slika 4.2.: Modeliranje vjetroelektrane u OpenDSS-u

Generatori su modelirani prema gore navedenim parametrima. U tablici 4.1 prikazane su naredbe za modeliranje vjetroelektrane.

Tablica 4.1.: Opis naredbi za modeliranje vjetroelektrane[17]

| Naredbe | Značenje |
|----------------|--|
| New Generator | Definiranje novog generatora |
| Loadshape | Učitavanje vrijednosti iz .txt datoteke u kojoj se nalaze radne snage za svaki od generatora |
| Npts | Broj točaka simulacije |
| Mininterval | Trajanje svake od točaka simulacije (desetminutne vrijednosti) |
| UseActual=true | Omogućuje učitavanje vrijednosti iz datoteka u obliku kW |
| Mult | Učitavanje multiplikatora za naredbu <i>loadshape</i> |
| Bus1 | Naziv sabirnice na koju se generator spaja |
| Phases | Broj faza generatora |
| Conn | Spoj |
| Kv | Bazni napon generatora |
| model | Definira kako će se rad generatora mijenjati s obzirom na napon. |
| kVA | Nazivna prividna snaga. |
| kW | Nazivna radna snaga generatora. Ukupna za sve faze |
| kVar | Nazivna jalova snaga. |
| daily | Naziv datoteke koja definira način rada kroz naredbu <i>loadshape</i> |
| Vmin, Vmax | Minimalna i maksimalna razina napona u p.u. pri kojim će generator raditi. |

4.3.2. Modeliranje potrošnje u OpenDSS-u

Način modeliranja potrošnje u software-u prikazan je na slici 4.3.

```

IPOTROŠNJA
New Loadshape.LOAD_1 npts=1008 minterval=10 mult={file=POTROSNJA_GEN_1.txt} UseActual=true
New Loadshape.LOAD_2 npts=1008 minterval=10 mult={file=POTROSNJA_GEN_2.txt} UseActual=true
New Loadshape.LOAD_3 npts=1008 minterval=10 mult={file=POTROSNJA_GEN_3.txt} UseActual=true

New Load.LOAD_PP_1 Phases=3 Bus1=BGEN_1 conn=delta kV=0.69 kVA=50 PF=0.95 model=1 Daily=LOAD_1 Vmin=0.1, Vmax=2
New Load.LOAD_PP_2 Phases=3 Bus1=BGEN_1 conn=delta kV=0.69 kVA=50 PF=0.95 model=1 Daily=LOAD_2 Vmin=0.1, Vmax=2
New Load.LOAD_PP_3 Phases=3 Bus1=BGEN_1 conn=delta kV=0.69 kVA=50 PF=0.95 model=1 Daily=LOAD_3 Vmin=0.1, Vmax=2
    
```

Slika 4.3.: Modeliranje potrošnje u OpenDSS-u

U tablici 4.2 prikazane su naredbe korištene za modeliranje potrošnje.

Tablica 4.2.: Opis naredbi za modeliranje potrošnje[17]

| Naredbe | Značenje |
|----------------|---|
| New Load | Definiranje nove potrošnje |
| Loadshape | Učitavanje vrijednosti iz .txt datoteke u kojoj se nalaze snaga za svaku od potrošnji |
| Npts | Broj točaka simulacije |
| Mininterval | Trajanje svake od točaka simulacije (desetnominutne vrijednosti) |
| UseActual=true | Omogućuje učitavanje vrijednosti iz datoteka u obliku kW |
| Mult | Učitavanje multiplikatora za naredbu <i>loadshape</i> |
| Bus1 | Naziv sabirnice na koju se potrošnja spaja |
| Phases | Broj faza potrošnje |
| Conn | Spoj |
| Kv | Bazni napon potrošnje |
| model | Definira kako će se rad potrošnja mijenjati s obzirom na napon |
| kVA | Nazivna prividna snaga |
| PF | Nazivni faktor snage |
| daily | Naziv datoteke koja definira način rada kroz naredbu <i>loadshape</i> |
| Vmin, Vmax | Minimalna i maksimalna razina napona u p.u. pri kojim će potrošnja raditi. |

4.3.3. Modeliranje transformatora u OpenDSS-u

Način modeliranja transformatora u software-u prikazan je na slici 4.4.

```

!TRANSFORMATORI
New Transformer.TRGEN_1 Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr1 LV_tr1] Conns=[delta Wye] kVs=[10, 0.69] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 NormHKVA =2500 LeadLag=Euro %imag=1.1
New Transformer.TRGEN_2 Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr2 LV_tr2] Conns=[delta Wye] kVs=[10, 0.69] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 NormHKVA =2500 LeadLag=Euro %imag=1.1
New Transformer.TRGEN_3 Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr3 LV_tr3] Conns=[delta Wye] kVs=[10, 0.69] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 NormHKVA =2500 LeadLag=Euro %imag=1.1
New Transformer.TR_MREZA Phases=3 Winding=2 Buses=[sourcebus LV_tr_m] Conns=[delta Wye] kVs=[110, 10] kVAs=[8000, 8000] XHL=11.5 LeadLag=Euro %imag=1.1
!New Transformer.TR_BAT Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr_bat LV_tr_bat] Conns=[delta Wye] kVs=[10, 0.4] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 LeadLag=Euro %imag=1.1
    
```

Slika 4.4.: Modeliranje transformatora u OpenDSS-u

Transformatori su modelirani s gore navedenim parametrima. Naredbu za modeliranje transformatora TR_BAT predhodi „!“ te se na taj način transformator isključuje iz simulacije. Na isti način se odvajaju svi elementi sustava pohrane kako bi se simulirao način rada u referentnom slučaju. U tablici 4.3 prikazane su naredbe za modeliranje transformatora.

Tablica 4.3.: Opis naredbi za modeliranje transformatora[17]

| Naredbe | Značenje |
|-----------------|--|
| New Transformer | Definiranje novog transformatora |
| Phases | Broj faza transformatora |
| Winding | Broj namota |
| Busses | Nazivni sabirnica transformatora (visokonaponska, niskonaponska) |
| Conns | Način spoja primara i sekundara |
| kVs | Naponske razine primara i sekundara |
| kVAs | Prividna snaga transformatora |
| XHL | Gubici kratkog spoja [%] |
| NormHKVA | Maksimalna prividna snaga u normalnom radu za visokonaponsku stranu transformatora |
| LeadLag | Definiranje veze između niskonaponske i visokonaponske razine. Euro=Dy11 |
| %imag | Gubici magnetiziranja |

4.3.4. Modeliranje kabela u OpenDSS-u

Način modeliranja kabela u software-u prikazan je na slici 4.5.

```
!LINECODES
!NYY 4x240SM 0.6/1kV - 0.69 kV kabel
New LineCode.LV_kabel nphases=3 R1=0.0774 X1=0.07979646 C1=0 R0=0.3096 X0=0.3191859 C0=0 normamps=464 BaseFreq=50 units=km
!NAYSEY 3x50rm/16 6/10kV - 10 kV kabel
New LineCode.SN_kabel nphases=3 R1=0.641 X1=0.1140084 C1=0 R0=2.564 X0=0.4560336 C0=0 normamps=146 BaseFreq=50 units=km

!KABELI VJETROAGREGATA
New Line.LINE1_1 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_2 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_3 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_4 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_5 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km

New Line.LINE2_1 Bus1=BGGEN_2 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_2 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_3 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_4 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_5 Bus1=BGGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km

New Line.LINE3_1 Bus1=BGGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_2 Bus1=BGGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_3 Bus1=BGGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_4 Bus1=BGGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_5 Bus1=BGGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km

New Line.LINE4 Bus1=HV_tr1 Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.5 Unit=km
New Line.LINE5 Bus1=HV_tr2 Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.4 Unit=km
New Line.LINE6 Bus1=HV_tr3 Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.3 Unit=km

!KABELI POHRANE
!New Line.LINE9_1 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
!New Line.LINE9_2 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
!New Line.LINE9_3 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
!New Line.LINE9_4 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
!New Line.LINE9_5 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
!New Line.LINE9_6 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
!New Line.LINE9_7 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05 Unit=km
```

Slika 4.5.: Modeliranje kabela u OpenDSS-u

U programskom kodu prvo su definirani tipovi kabla korišteni u simulaciji naredbom *linecode*. Modelirani su prema gore navedenim parametrima. U tablici 4.4 prikazani su naredbe potrebne za modeliranje kabela.

Tablica 4.4.: Opis naredbi za modeliranje kabela[17]

| Naredbe | Značenje |
|----------|---|
| Linecode | Definiranje impedancije kabela |
| nphases | Broj faza kabela |
| R1 | Direktna komponenta otpora |
| X1 | Direktna komponenta reaktancije |
| C1 | Direktna komponenta kapaciteta |
| R0 | Nulta komponenta otpora |
| X0 | Nulta romponenta reaktancije |
| C0 | Nulta komponenta kapaciteta |
| normamps | Nazivna struja |
| BaseFreq | Nazivna frekvencija |
| unit | Mjerna jedinica duljine |
| New Line | Definiranje novog kabela |
| Bus1 | Naziv sabirnice na početku kabela |
| Bus2 | Naziv sabirnice na kraju kabela |
| Phases | Broj faza kabela |
| Linecode | Dodjeljivanje kabela parametre linijskog koda |
| Length | Duljina kabela |

4.3.5. Modeliranje prijenosne mreže u OpenDSS-u

Način modeliranja prijenosne mreže u software-u prikazan je na slici 4.6.

```
!DEFINIRANJE PRIJENOSNE MREŽE  
new Circuit.WIND_FARM  
Edit Vsource.source basekv=110 pu=1.0 angle=0 Phases=3 MVAsc3=150 MVASC1=150
```

Slika 4.6.: Modeliranje prijenosne mreže u OpenDSS-u

Svaka simulacija u OpenDSS-u počinje s glavnom mrežom, stoga su naredbom *edit* parametri mreže postavljeni na gore navedene. U tablici 4.5 prikazani su parametri potrebni za modeliranje prijenosne mreže.

Tablica 4.5.: Opis naredbi za modeliranje prijenosne mreže[17]

| Naredbe | Značenje |
|--------------|---------------------------------------|
| New Circuit | Definiranje naziva simulacije |
| Edit Vsource | Postavljanje nazivna prijenosne mreže |
| Basekv | Nazivni napon na sabirnici mreže |
| Pu | Napon u p.u |
| Angle | Nazivni kut prve faze |
| phases | Broj faza |
| MVAsc3 | Snaga trofaznog kratkog spoja |
| MVAsc1 | Snaga jednofaznog kratkog spoja |

4.3.6. Modeliranje baterijskog sustava pohrane u OpenDSS-u

Način modeliranja baterijskog sustava pohrane u software-u prikazan je na slici 4.7.

```

IBATERIJSKI SUSTAV POHRANE I REŽIM RADA
New Loadshape.RAD_BATERIJE npts=1008 mininterval=10 mult=(file=BAT_mult.txt)
New Storage.BATERIJE Bus1=LV_tr_bat Phases=3 Conn=delta kV=0.4 kVA=1600 kWrated=1600 kWhrated=30000 pf=1 %stored=70 %reserve=20
~ Balanced=Yes %idlingkW=1 %idlingkvar=1 %EffDischarge=96 %EffCharge=95
~ DispMode=FOLLOW daily=RAD_BATERIJE
    
```

Slika 4.7.: Modeliranje baterijskog sustava pohrane u OpenDSS-u

Naredbom *loadshape* modeliran je režim rada baterijskog sustava pohrane. Postavljanje režima rada biti će detaljnije opisan u nastavku rada. Parametri sustava pohrane postavljeni su prema gore navedenim podacima. U tablici 4.6 prikazane su naredbne za modeliranje baterijskog sustava pohrane.

Tablica 4.6.: Opis naredbi za modeliranje baterijskog sustava pohrane[17]

| Naredbe | Značenje |
|---------------|---|
| New Load | Definiranje nove potrošnje |
| Loadshape | Učitavanje vrijednosti iz .txt datoteke u kojoj se nalazi snaga baterijskog sustava pohrane |
| Npts | Broj točaka simulacije |
| Mininterval | Trajanje svake od točaka simulacije (desetnominutne vrijednosti) |
| Mult | Učitavanje multiplikatora za naredbu <i>loadshape</i> |
| New Storage | Definiranje novog sustava pohrane |
| Bus1 | Naziv sabirnice na koju se baterijski sustav pohrane |
| Phases | Broj faza pohrane |
| Conn | Spoj |
| kV | Bazni napon sustava pohrane nakon izmjenjivača |
| kVA | Nazivna prividna snaga |
| kWrated | Nazivna izlazna snaga |
| kWhrated | Nazivni kapacitet pohrane u kWh |
| pf | Nazivni faktor snage za pražnjenje. |
| %stored | Trenutno stanje napunjenosti u % |
| %reserve | Minimalna razina do koje će se pohrana prazniti, osim u izvanrednim situacijama. |
| Balanced | Izjednačenje svih faza |
| %idlingkW | Gubici radne snage u praznom hodu |
| %idlingkvar | Gubici jalove snage u praznom hodu |
| %EffDischarge | Učinkovitost pražnjenja pohrane |
| %EffCharge | Učinkovitost punjenja pohrane |
| DispMode | Opis u nastavku |
| daily | Naziv datoteke koja definira način rada kroz naredbu <i>loadshape</i> |

Naredbom *DispMode* postavlja se način upravljanja sustavom pohrane kroz režim rada pohrane. U ovom slučaju korišten je način *FOLLOW*. Na taj način element *STORAGE* prati krivulju režima rada opisanu u .txt datoteci sve dok se *STORAGE* ne napuni ili isprazni. Element se prazni ako je vrijednost krivulje pozitivna, a puni ako je vrijednost krivulje negativna.

Prema [17], osim *FOLLOW* načina rada postoji još i :

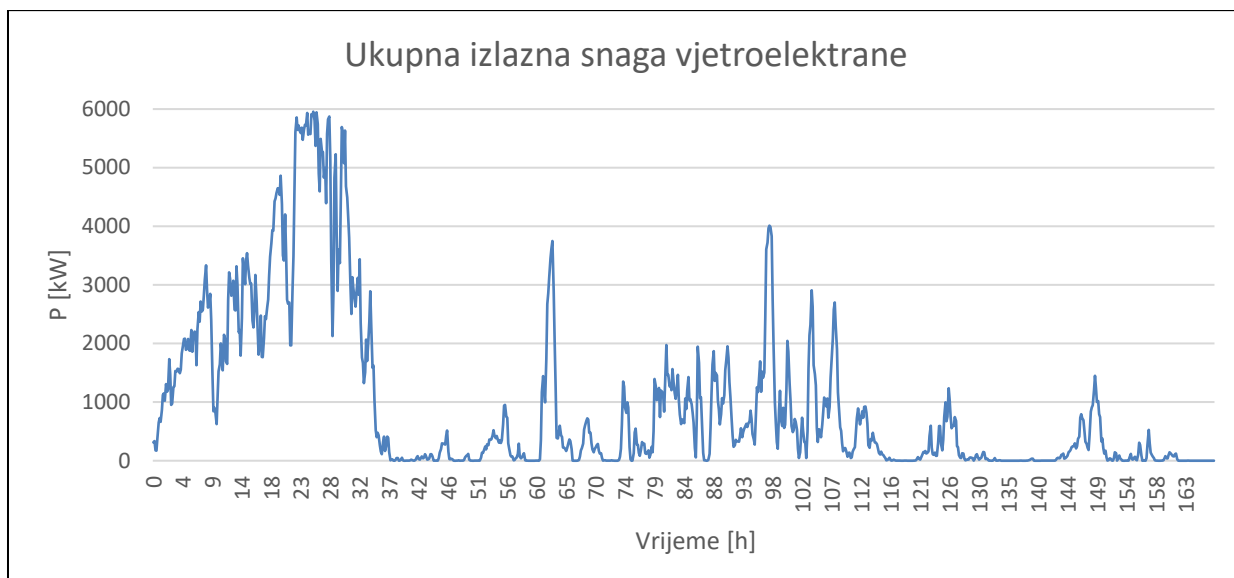
- *DEFAULT*
- *EXTERNAL*
- *LOADLEVEL*
- *PRICE*

Kod načina upravljanja *DEFAULT*, *STORAGE* element se puni ili prazni na određenu vrijednost krivulje režima rada koja se naknadno definira. *EXTERNAL* način rada omogućuje kontrolu *STORAGE* elementa preko vanjskog elementa upravljanja. Vanjski element upravljanja prati jednu od odabranih mjerenih vrijednosti i sukladno odabranim pravilima regulira rad *STORAGE* elementa. Na isti način funkcioniraju *LOADLEVEL* i *PRICE* gdje se prati cijena električne energije na tržištu i za cilj ima maksimiziranje financijske dobiti[17].

4.4. Rezultati simulacije

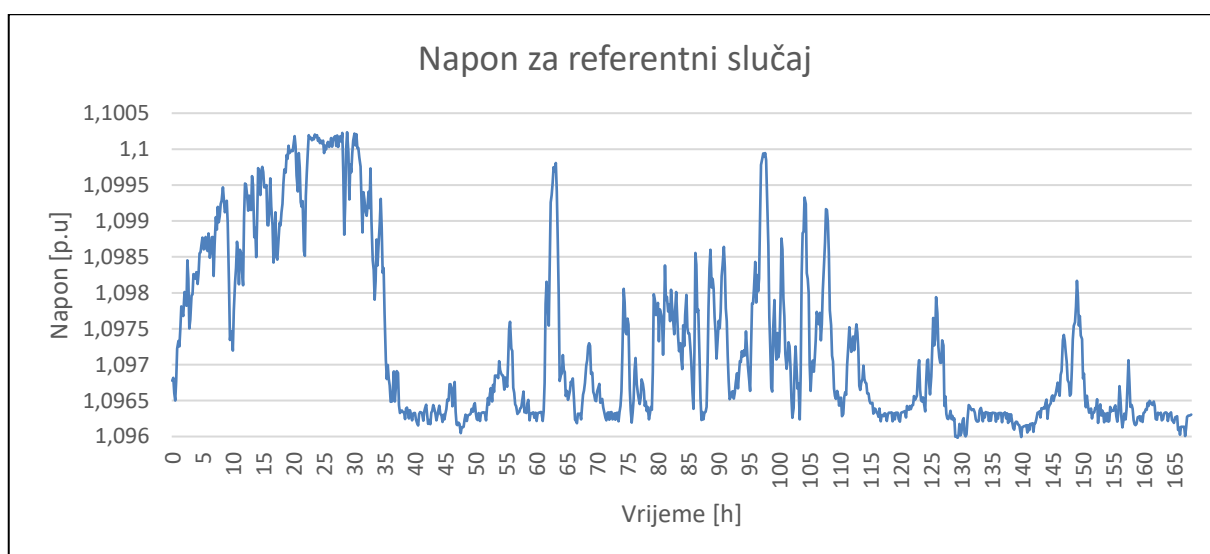
4.4.1. Referentni slučaj simulacije

Za referentni slučaj promatrano je stanje u mreži i utjecaj vjetroelektrane s tri vjetroagregata pojedinačnih snaga 2 MW, te ukupne snage 6 MW. Jednofazni dijagram mreže je prikazan na slici 4.1. Simulacija se odvija u 168 sati, odnosno 7 dana. Referentni napon prijenosne mreže je namješten tako da je blizu gornje granice dozvoljenog napona od $\pm 10\%$ nazivnog napona i iznosi 1.09757 p.u. Time se simulira povišeni napon u mreži. Ukupna proizvodnja vjetroelektrane prikazana je na slici 4.8.



Slika 4.8: Ukupna izlazna snaga vjetroelektrane

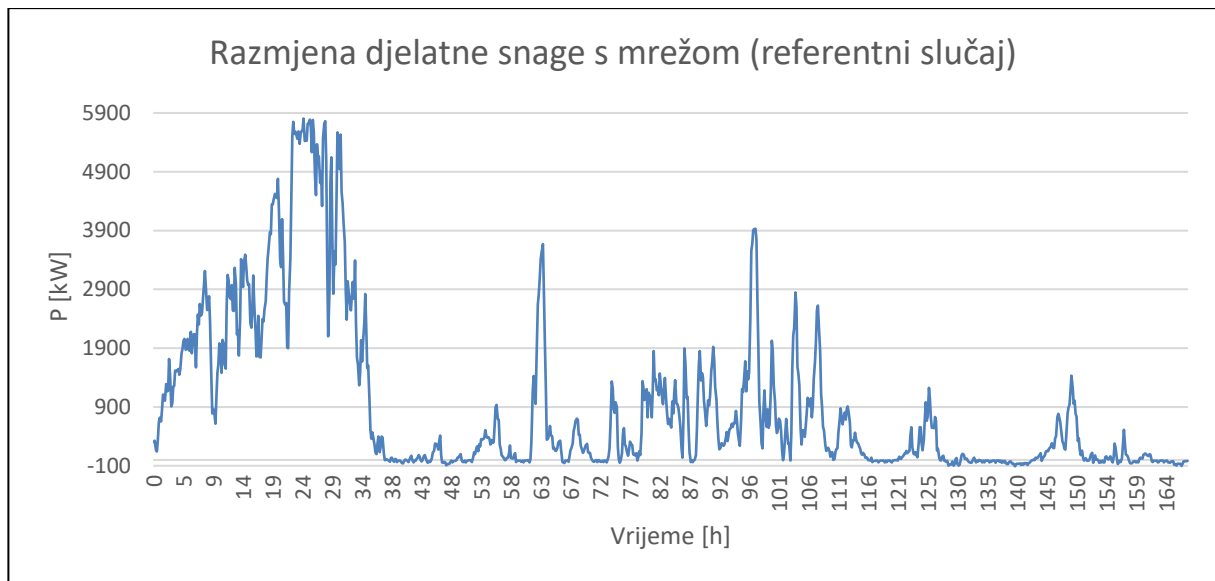
Utjecaj vjetroelektrane na napon u mreži prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9.: Napon na glavnom mrežnom transformatoru (slučaj bez pohrane)

Iz priloženoj je vidljivo kako zbog injektiranja djelatne snage u mrežu od strane vjetroelektrane dolazi do povišenja napona iznad dozvoljene granice od 1.1 p.u. Do porasta dolazi u periodu najveće proizvodnje, odnosno u periodu od 18 do 30 sati simulacije.

Razmjena snage vjetroelektrane s prijenosnom mrežom mjerene na glavnom mrežnom transformatoru prikazana je na slici 4.10.



Slika 4.10.: Razmjena djelatne snage s mrežom za slučaj bez pohrane

Iz grafa je vidljiva povećana proizvodnja u periodima gdje napon prelazi dozvoljenu granicu od 1.1 p.u. Vjetroelektrana ima vlastitu potrošnju koja iznosi oko 2.5 % proizvodnje. Kada je brzina vjetra manja od 3 m/s vjetroelektrana ne proizvodi električnu energiju, te istu energiju uzima iz mreže. Zbog toga je na grafu vidljiv period s negativnim vrijednostima koji označava uzimanje električne energije iz mreže radi napajanja vlastite potrošnje vjetroelektrane.

4.4.2. Testni slučaj simulacije

Iz prvog, odnosno referentnog slučaja vidljivo je da napon u mreži prelazi dozvoljene granice rada.

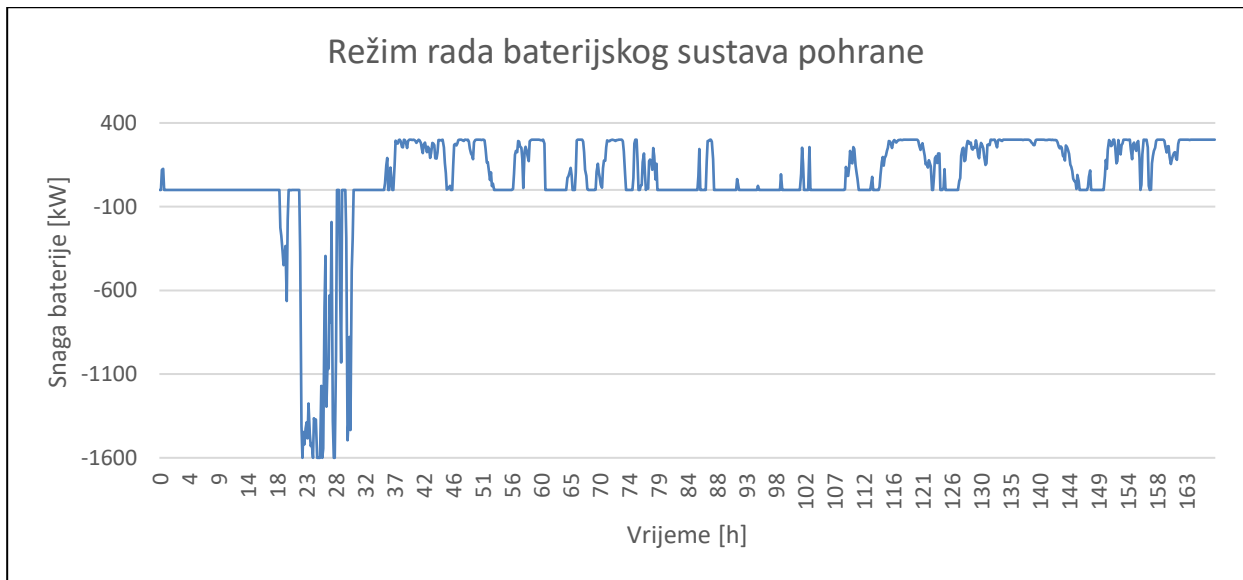
Kako bi se osigurao napon unutar granica dozvoljenog za rad i kontinuirana predaja električne energije u mrežu uz elektranu se integrira baterijski sustav pohrane. Parametri baterijskog sustava pohrane opisani su u poglavlju 3.8.2, a shema spoja je prikazana na slici 4.1.

Sustavom pohrane nastoji se napon u mreži dovesti u dozvoljene granice u periodu gdje on prelazi napon od 1.1 p.u kako ne bi došlo do smanjenja proizvodnje ili reagiranja zaštite.

Način rada baterijskog sustava pohrane projektiran je tako da prati proizvodnju vjetroelektrane. U periodu kada vjetroelektrana električnu energiju proizvodi snagom većom od 4200 kW baterijski sustav pohrane se puni, a kada električnu energiju proizvodi snagom manjom od 250 kW, sustav pohrane se prazni, odnosno, isporučuje snagu u mrežu. Na taj se način zadržava kontinuirana minimalna proizvodnja vjetroelektrane, te elektrana ni u kojem trenutnu ne vuče

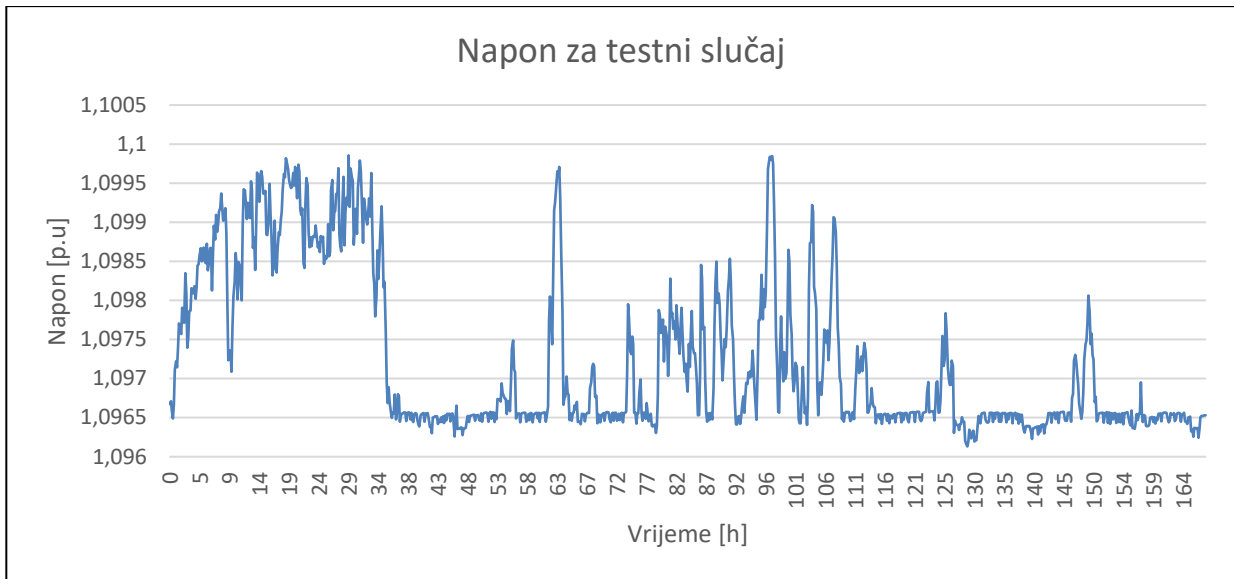
snagu iz mreže kako bi zadovoljila lokalnu potrošnju. Režim rada baterijskog sustava pohrane prikazan je na slici 4.11.

Pozitivne vrijednosti na grafu označavaju period pražnjenja pohrane, dok negativne vrijednosti predstavljaju period punjenja pohrane.



Slika 4.11.: Režim rada baterijskog sustava pohrane

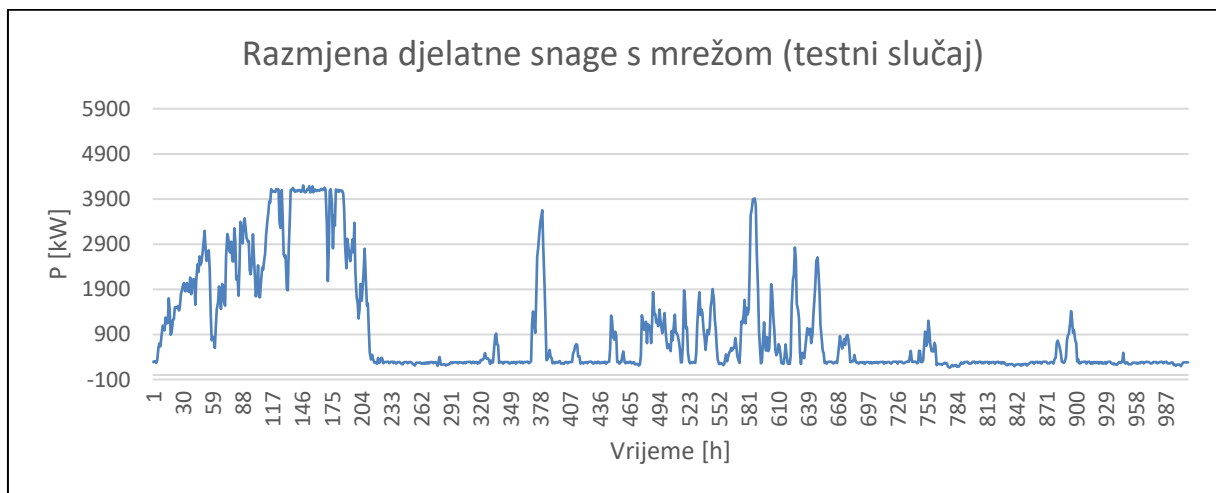
Integracijom baterijskog sustava pohrane dolazi do promjena u naponu na glavnom mrežnom transformatoru gdje je za referentni slučaj zabilježen nedozvoljeni porast napona. Napon nakon integracije sustava pohrane prikazan je na slici 4.12.



Slika 4.12.: Napon nakon integracije baterijskog sustava pohrane

Iz grafa je vidljivo da period u kojem je napon nakon integracije pohrane, koji je prelazio nedozvoljene granice, sada unutar dozvoljenih granica. Najniži napon, koji je i dalje znatno visok, ali unutar granica, sada je konstantan i prati minimalnu isporuku snage s mrežom.

Promatrana je i razmjena djelatne snage s mrežom. Slika 4.13 prikazuje snagu na pragu vjetroelektrane, odnosno snagu na glavnom mrežnom transformatoru.



Slika 4.13.: Snaga na glavnom mrežnom transformatoru (slučaj s pohranom)

Na slici 4.13 vidljivo je da snaga ne prelazi 4200 kW pri najvećoj brzini vjetra. Sva snaga iznad 4200 kW korištena je na punjenje baterijskog sustava pohrane, te je time napon doveden u područje ispod 1.1 p.u. Osigurana je i kontinuirana isporuka električne energije s minimalnom snagom od 250 kW.

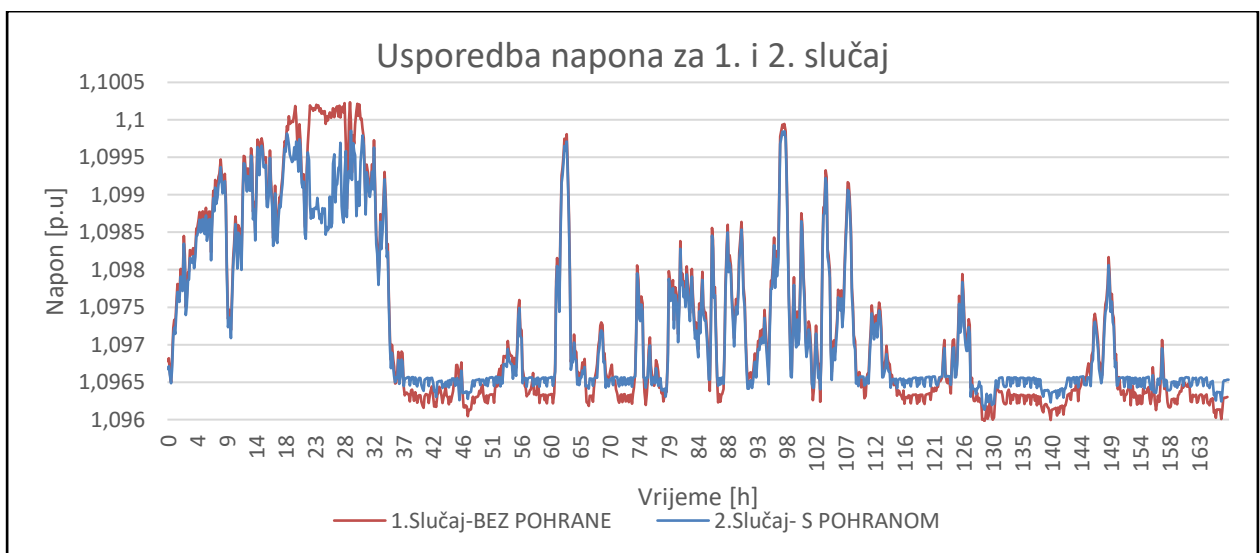
4.4.3. Usporedba slučajeva sa i bez spremnikam energije

Za usporedbu dvaju slučajeva promatrane su dvije bitne vrijednosti mjerene na pragu elektrane, odnosno na glavnom mrežnom transformatoru, a te vrijednosti su:

- Iznos napona na glavnom mrežnom transformatoru
- Razmjena djelatne snage elektrane s mrežom

4.4.4. Iznos napona na glavnom mrežnom transformatoru

Referentni napon prijenosne mreže postavljen je blizu gornje granice dozvoljenog napona od $\pm 10\%$ nazivnog napona i iznosi 1.09757 p.u. Injektiranjem djelatne snage vjetroelektrane u mrežu napon raste iznad nedozvoljene granice od 1.1 p.u. Napon na pragu elektrane, odnosno, napon na glavnom mrežnom transformatoru za oba slučaja prikazan je na slici 4.14.

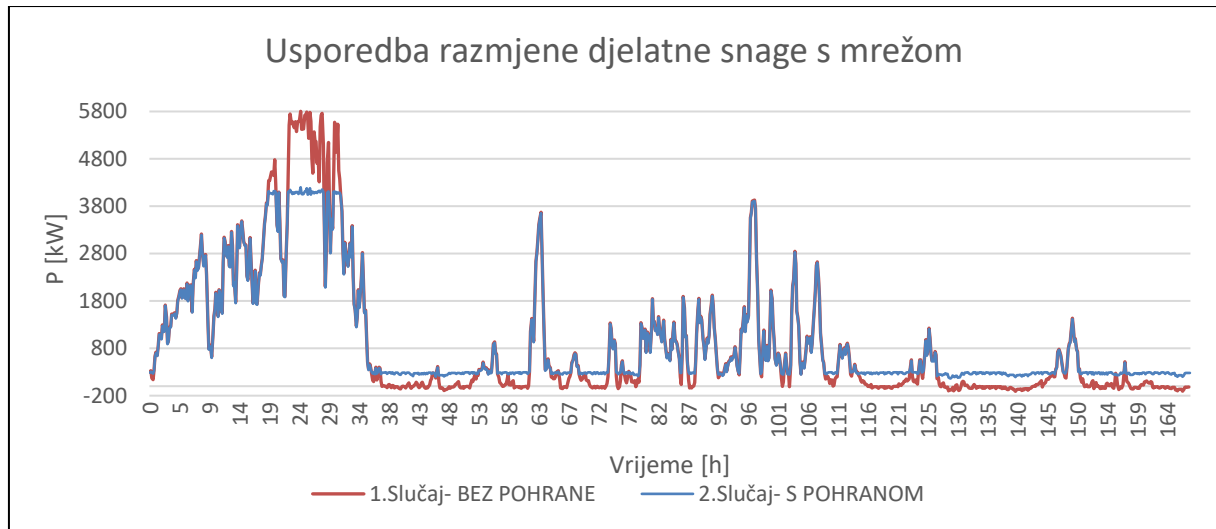


Slika 4.14.: Usporedba napona na glavnom mrežnom transformatoru

Sa slike 4.14 se može primijetiti utjecaj dodavanja nove proizvodnje u obliku vjetroelektrane. Napon u već povišenom periodu raste iznad nedozvoljenih granica. U testnom slučaju integracijom baterijskog sustava pohrane i implementacijom režima rada prikazanog na slici 4.14 dolazi do smanjenja napona u periodu gdje je prelazio nedozvoljenu granicu. Period u kojem je napon prelazio nedozvoljenu granicu korišten je za punjenje baterijskog sustava pohrane, te time rezultirao padom napon u tom dijelu simulacije. Na ovaj način prikazan je povoljan utjecaj baterijskog sustava pohrane na sustave promjenjive proizvodnje kao što su vjetroelektrane.

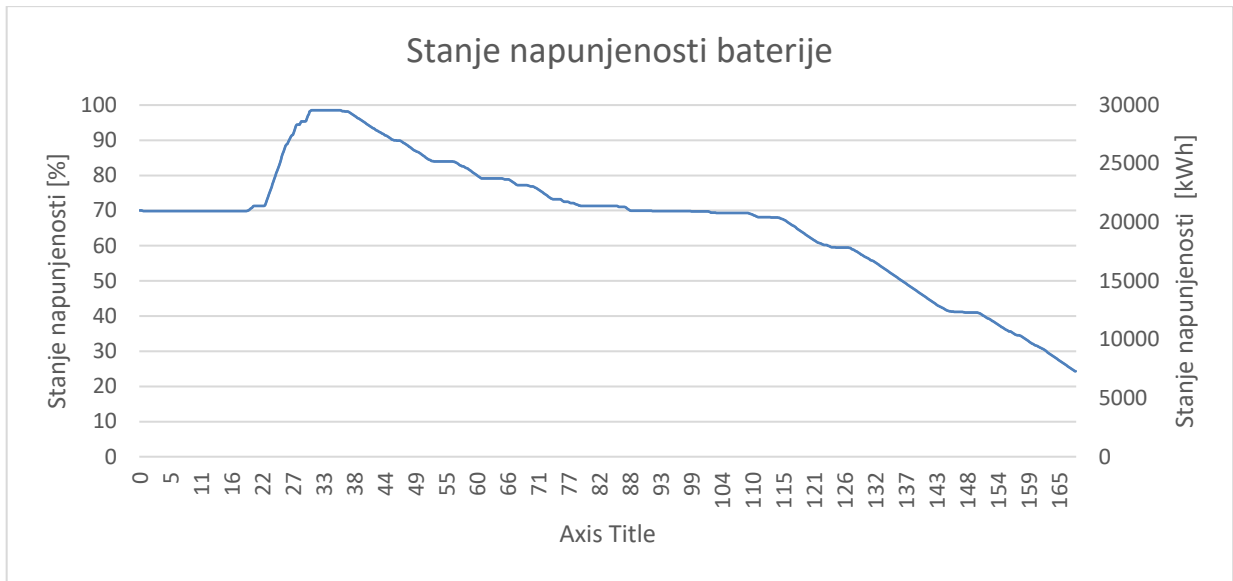
4.4.5. Razmjena djelatne snage elektrane s mrežom

Integracijom baterijskog sustava pohrane dolazi do znatne promjene u tokovima snage. Razmjena djelatne snage elektrane s mrežom za oba slučaja prikazana je na slici 4.15.



Slika 4.15.: Snaga na glavnom mrežnom transformatoru za oba scenarija

Sa slike 4.15 je vidljiv utjecaj baterijskog sustava pohrane na tokove snaga. U referentnom slučaju bez pohrane najveća snaga proizvodnje iznosi oko 5800 kW. Period najveće proizvodnje traje između 20.-tog i 30.-tog sata simulacije. U istom periodu dolazi do nedozvoljenog povišenja napona. Integracijom baterijskog sustava pohrane postiže se upravljanje vršnim opterećenjem, odnosno „*peak shaving*“. Višak snage nakon *peak shaving*-a koristi se za punjenje baterijskog sustava pohrane, te je ta ista snaga kasnije korištena za održavanje minimalne snage isporuke od 250 kW što je vidljivo s grafa. Stanje napunjenosti baterije u kWh prikazana je na slici 4.16. Ako usporedimo donji dio grafa za oba slučaja, vidljiva je minimalna snaga isporuke testnog slučaja (250 kW), dok se za referentni slučaj vide periodi u kojem elektrana nije proizvodila električnu energiju zbog brzine vjetera manje od brzine uključenja (3 m/s), te je snagu uzimala iz mreže kako bi zadovoljila lokalnu potrošnju.



Slika 4.16.: Stanje napunjenosti baterije

5. ZAKLJUČAK

Vjetroelektrane igraju veliku ulogu u novoj energetskej slici svijeta i borbi za klimatske promjene. S brojnim prednostima dolaze i nedostaci u obliku nepredvidljivosti vjetra što može uzrokovati probleme za elektroenergetski sustav. Stoga je njihov rad potrebno regulirati. U Hrvatskoj je za propisivanje pravilnog rada i uvjeta priključenja odgovoran Hrvatski Operator prijenosnog sustava.

U simulacijskom dijelu diplomskog rada prikazan je utjecaj vjetroelektrane na prijenosnu mrežu. U referentnom slučaju napon prelazi dozvoljene granice, te u isto vrijeme, kada brzina vjetra nije dovoljna za proizvodnju električne energije, vjetroelektrana uzima energiju iz mreže kako bi zadovoljila potrebe vlastite potrošnje.

U testnom slučaju je uz vjetroelektranu integriran baterijski sustav pohrane kako bi se promatrao utjecaj pohrane na strujno-naponske prilike. Iz analize rezultata je vidljiv pozitivan utjecaj u dvije stavke. Upravljenjem vršnim opterećenjem (engl. *peak load management*) je nedopušteni napon doveden u granice dozvoljenog. Snaga iz tog perioda korištena je za punjenje baterijskog sustava pohrane. Snagom pohranjenom u baterijama se nadalje, u periodu kada je brzina vjetra manja od brzine uključenja i kada vjetroelektrana ne proizvodi električnu energiju, osigurava minimalna predaja snage u mrežu od 250 kW. Time je prikazan povoljan utjecaj sustava pohrane na mrežu, te na proizvodnju vjetroelektrana.

Razvoj baterijskih sustava pohrane bit će ključan u integraciji rastuće količine obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav, a posebno za ostvarivanje strategije Europske Unije koja nalaže da vjetroelektrane postanu dominantan proizvođač električne energije za Europu s udjelom na tržištu električne energije od 50%[2].

LITERATURA

- [1] I. Komusanac, G. Brindley, D. Fraile „Wind energy in Europe in 2019“, Wind Europe, Brussels, Belgium, 2020.
- [2] F. V. Hulle, N. Fichaux „Powering Europe: wind energy and the electricity grid“, European Wind Energy Association, Brussels, Belgium, 2010.
- [3] M. Bollen and F. Hassan, „Integration of distributed generation in the power system“, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2011.
- [4] Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o „Mrežna pravila prijenosnog sustava“, Narodne novine, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [5] D. Šljivac, D. Topić, „Obnovljivi izvori električne energije“, FERIT, Osijek, Hrvatska, 2018.
- [6] HEP – Operator prijenosnog sustava d.o.o, „Dodatni tehnički uvjeti za priključak i pogon vjetroelektrana na prijenosnoj mreži“, Narodne novine, Zagreb, Hrvatska 2008.
- [7] Vestas „2MW Platform“, Denmark 2019, <https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform#!> , 15.06.2020.
- [8] T.Ackermann, „Wind Power in Power Systems“ 2nd edition John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2012.
- [9] W. Jiang „Solar Feeds“, Toronto, Canada 2018, <https://solarfeeds.com/wiki/solar-energy/>, 20.06.2020.
- [10] M. Krpan, I. Kuzle „Sudjelovanje vjetroelektrana s promjenjivom brzinom vrtnje u primarnoj regulaciji frekvencije“, Hro Cigre, Šibenik, Hrvatska 2017.
- [11] Damir Karavidović „Mrežna pravila distribucijskog sustava“, Cired, Zagreb, Hrvatska, 2013.
- [12] Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA 2018, <https://www.epri.com/pages/sa/openss>, 15.07.2020.
- [13] Senvion „MM92“, Hamburg, Germany 2018, <https://www.senvion.com/global/en/products-services/wind-turbines/mm/mm92/>, 30.08.2020.
- [14] Billinton R., Hua C., Ghajar R. „A sequential Simulation Technique for Adequacy Evaluation of Generating Systems Including Wind Energy“, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 11, 1996.

- [15] Billinton R., Gan I. „Wind Power Modeling and Application in Generating Adequacy“, WESCANEX 93. „Communications Computers and Power in the Modern Enviroment.“ Conference Proceedings, IEEE, 1993.
- [16] G.M Masters „Renewable and Efficient Electric Power Systems“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, 2004.
- [17] Electric Power Research Institute „Reference Guide – The Open Distribution System Simulator (OpenDSS), Electric Power Reaserch Institute, Palo Alto, USA 2019.
- [18] European Commission „Energy storage – the role of electricity“, Brussels, Belgium, 2019.
- [19] A. Hina Fathima „Hybrid – Renewable Energy System in Microgrids“, Elsevier Ltd., India, 2018.
- [20] Sandia National Laboratories, USA 2020., sandia.gov, 18.09.2020.
- [21] Windpower Engineering & Development „How three battery types work in grid-scale energy storage systems“, USA 2019., <https://www.windpowerengineering.com/how-three-battery-types-work-in-grid-scale-energy-storage-systems/> 18.09.2020.
- [22] Wikipedia „Battery storage power station“, 2019.,https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_storage_power_station, 18.09.2020.
- [23] Electric Power Research Institute „OpenDSS Storage element and Storagecontroller element“, Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, 2019.

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu se simulirao utjecaj vjetroelektrane na prijenosnu mrežu. Vremenska simulacija se radila u programskom paketu OpenDSS. Radilo se o dva slučaja. U prvom, referentnom slučaju promatrao se utjecaj vjetroelektrane na prijenosnu mrežu u vrijeme kada je proizvodnja električne energije povišena. U drugom, testnom slučaju, implementiran je baterijski sustav pohrane kako bi se promatrao njegov utjecaj na strujno-naponske prilike u mreži. Za zaključak se može reći da primjena baterijskog sustava pohrane uz vjetroelektrane utječe povoljno na strujno-naponske prilike u mreži, te da će se takvi sustavi sigurno naći primjenu u razvoju elektroenergetskog sustava i porastu zastupljenosti obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije.

Ključne riječi: Mrežna pravila, vjetroelektrane, prijenosna mreža, OpenDSS, baterijski sustav pohrane

ABSTRACT

In this thesis, the impact of a wind farm on the transmission network is simulated. For the time simulation Software OpenDSS was used. There were two case study. In the first case study, the impact of the wind farm on the transmission grid was observed at the time when power production was increased. In the second case study, a battery storage system was implemented to observe its impact on voltage conditions. In conclusion, the application of battery storage systems with wind farms has a favorable effect on the current and voltage condition in the grid, and that such systems will find a use in the development of the power system because of increased presence of the renewable energy sources in electricity production.

Key words: Grid rules, wind farms, transmission grid, OpenDSS, battery storage system

ŽIVOTOPIS

Vlado Grgić je rođen 06.09.1993. u Vinkovcima. Osnovnu školu Zrinskih je pohađao u Nuštru. Nakon završetka osnovne škole 2009. upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića smjer tehničar za mehatroniku u Vinkovcima. Nakon položene državne mature upisuje stručni studij elektrotehnike u Osijeku 2013. godine. Nakon završetka stručnog studija upisuje razlikovnu godinu, te zatim sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika.

PRILOZI

PRILOG 4.1.

```
clear
!POSTAVLJANJE FREKVENCije
Set DefaultBaseFrequency=50
!DEFINIRANJE MREŽE
new Circuit.WIND_FARM
!POSTAVLJANJE BAZNIH NAPONA
Set Voltagebases=[110, 10, 0.69, 0.40]
Set DefaultBaseFrequency=50
Set Emergvminpu = 0.0
Set Emergvmaxpu = 2.0
Set Normvminpu = 0.5
Set Normvmaxpu = 1.5
!DEFINIRANJE MREŽE
Edit Vsource.source basekv=110 pu=1.09757 angle=0 Phases=3 MVAsc3=150 MVASC1=150
!LOADSHAPE
!PROIZVODNJA GENERATORA
!WINDGEN_1
New Loadshape.GEN_1 npts=1008 minterval=10 mult=(file=GEN1.txt) UseActual=true
!WINDGEN_2
New Loadshape.GEN_2 npts=1008 minterval=10 mult=(file=GEN2.txt) UseActual=true
!WINDGEN_3
New Loadshape.GEN_3 npts=1008 minterval=10 mult=(file=GEN3.txt) UseActual=true
!POTROŠNJA
New Loadshape.LOAD_1 npts=1008 minterval=10 mult=(file=POTROSNJA_GEN_1.txt)
UseActual=true
New Loadshape.LOAD_2 npts=1008 minterval=10 mult=(file=POTROSNJA_GEN_2.txt)
UseActual=true
New Loadshape.LOAD_3 npts=1008 minterval=10 mult=(file=POTROSNJA_GEN_3.txt)
UseActual=true
!VJETROAGREGATI
New Generator.WINDGEN_1 Bus1=BGEN_1 Phases=3 Conn=delta kv=0.69 model=1 kVA=2000 kw=0
kvar=0 daily=GEN_1 Vmin=0.1 Vmax=2
New Generator.WINDGEN_2 Bus1=BGEN_2 Phases=3 Conn=delta kv=0.69 model=1 kVA=2000 kw=0
kvar=0 daily=GEN_2 Vmin=0.1 Vmax=2
New Generator.WINDGEN_3 Bus1=BGEN_3 Phases=3 Conn=delta kv=0.69 model=1 kVA=2000 kw=0
kvar=0 daily=GEN_3 Vmin=0.1 Vmax=2
!TRANSFORMATORI
New Transformer.TRGEN_1 Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr1 LV_tr1] Conns=[delta Wye]
kVs=[10, 0.69] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 NormHKVA =2500 LeadLag=Euro %imag=1.1
New Transformer.TRGEN_2 Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr2 LV_tr2] Conns=[delta Wye]
kVs=[10, 0.69] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 NormHKVA =2500 LeadLag=Euro %imag=1.1
New Transformer.TRGEN_3 Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr3 LV_tr3] Conns=[delta Wye]
kVs=[10, 0.69] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 NormHKVA =2500 LeadLag=Euro %imag=1.1
New Transformer.TR_MREZA Phases=3 Winding=2 Buses=[sourcebus LV_tr_m] Conns=[delta Wye]
kVs=[110, 10] kVAs=[8000, 8000] XHL=11.5 LeadLag=Euro %imag=1.1
!New Transformer.TR_BAT Phases=3 Winding=2 Buses=[HV_tr_bat LV_tr_bat] Conns=[delta Wye]
kVs=[10, 0.4] kVAs=[2500, 2500] XHL=6 LeadLag=Euro %imag=1.1
!BATERIJSKI SUSTAV POHRANE I REŽIM RADA
```

```

New Loadshape.RAD_BATERIJE npts=1008 minterval=10 mult=(file=BAT_mult.txt)
!New Storage.BATERIJE Bus1=LV_tr_bat Phases=3 Conn=delta kV=0.4 kVA=1600 kWrated=1600
kWhrated=60000 pf=1 %stored=56 %reserve=20
!~ Balanced=Yes %idlingkW=1 %idlingkvar=1 %EffDischarge=96 %EffCharge=95
!~ DispMode=FOLLOW daily=RAD_BATERIJE
!LINECODES
!NYY 4x240SM 0.6/1kV - 0,69 kV kabel
New LineCode.LV_kabel nphases=3 R1=0.0774 X1=0.07979646 C1=0 R0=0.3096 X0=0.3191859 C0=0
normamps=464 BaseFreq=50 units=km
!NAYSEY 3x50rm/16 6/10kV - 10 kV kabel
New LineCode.SN_kabel nphases=3 R1=0.641 X1=0.1140084 C1=0 R0=2.564 X0=0.4560336 C0=0
normamps=146 BaseFreq=50 units=km
!KABELI
!KABELI VJETROAGREGATA
New Line.LINE1_1 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_2 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_3 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_4 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE1_5 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr1 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_1 Bus1=BGEN_2 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_2 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_3 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_4 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE2_5 Bus1=BGEN_1 Bus2=LV_tr2 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_1 Bus1=BGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_2 Bus1=BGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_3 Bus1=BGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_4 Bus1=BGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE3_5 Bus1=BGEN_3 Bus2=LV_tr3 Phases=3 Linecode=LV_kabel Length=0.1 Unit=km
New Line.LINE4 Bus1=HV_tr1 Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.5 Unit=km
New Line.LINE5 Bus1=HV_tr2 Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.4 Unit=km
New Line.LINE6 Bus1=HV_tr3 Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.3 Unit=km
!KABELI POHRANE
!New Line.LINE9_1 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!New Line.LINE9_2 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!New Line.LINE9_3 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!New Line.LINE9_4 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!New Line.LINE9_5 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!New Line.LINE9_6 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!New Line.LINE9_7 Bus1=HV_tr_bat Bus2=LV_tr_m Phases=3 Linecode=SN_kabel Length=0.05
Unit=km
!OPĆA POTROŠNJA ELEKTRANE
New Load.LOAD_PP_1 Phases=3 Bus1=BGEN_1 conn=delta kV=0.69 kVA=50 PF=0.95 model=1
Daily=LOAD_1 Vmin=0.1, Vmax=2
New Load.LOAD_PP_2 Phases=3 Bus1=BGEN_1 conn=delta kV=0.69 kVA=50 PF=0.95 model=1
Daily=LOAD_2 Vmin=0.1, Vmax=2
New Load.LOAD_PP_3 Phases=3 Bus1=BGEN_1 conn=delta kV=0.69 kVA=50 PF=0.95 model=1
Daily=LOAD_3 Vmin=0.1, Vmax=2
!NAREDBE

```

```

!Preračunavanje na p.u vrijednosti
calcv
!MONITORI
!GENERATORI
! naponi i struje - polarni
!new monitor.UI_gen1 element=generator.WINDGEN_1 ppolar=yes mode=0
!new monitor.UI_gen2 element=generator.WINDGEN_2 ppolar=yes mode=0
!new monitor.UI_gen3 element=generator.WINDGEN_3 ppolar=yes mode=0
! snage - algebarski
!new monitor.S_gen1 element=generator.WINDGEN_1 ppolar=no mode=1
!new monitor.S_gen2 element=generator.WINDGEN_2 ppolar=no mode=1
!new monitor.S_gen3 element=generator.WINDGEN_3 ppolar=no mode=1
!BATERIJE
!new monitor.S_baterije element=storage.BATERIJE ppolar=no mode=1
!new monitor.NAPUNJENOST element=storage.BATERIJE mode=3
!new monitor.UP_BATERIJE element=storage.BATERIJE ppolar=yes mode=0
!TRANSFORMATOR MREZNI
new monitor.S_TRANS element=transformer.TR_MREZA terminal=2 ppolar=no mode=1
new monitor.UI_TRANS element=transformer.TR_MREZA ppolar=yes mode=0
new monitor.LOAD_mon1 element=load.LOAD_PP_1 ppolar=yes mode=1
!Preračunavanje na p.u vrijednosti
calcv
solve mode=daily stepsize=10m number=1008
!Prikaz rezultata monitora u obliku tekstualne datoteke
!show monitor S_gen1
show monitor UI_TRANS
!show monitor NAPUNJENOST
!plot loadshape object=LOAD_1
!plot loadshape object=GEN_1
show monitor S_TRANS
!show monitor LOAD_mon1
!show monitor S_baterije
!Plot samog monitora - napon u vremenu
plot monitor object=UI_TRANS Channels=[1, 3, 5] Bases=[63508.5296109, 63508.5296109,
63508.5296109]
plot monitor object=S_TRANS
!plot monitor object=LOAD_mon1
plot monitor object=NAPUNJENOST
plot monitor object=S_baterije
!Naponski profil ali samo za jedan trenutak
!plot profile phases=all
!export monitor object=S_TRANS

```

