

# Utjecaj vjetroelektrane na naponsko treperenje u elektroenergetskom sustavu

---

**Pirić, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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:200:424407>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-09**

*Repository / Repozitorij:*

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





SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

DIPLOMSKI STUDIJ

**UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA NAPONSKO  
TREPERENJE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

**DIPLOMSKI RAD**

Student: Tomislav Pirić, D-918

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Zvonimir Klaić

**OSIJEK, 2017.**

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VJETROELEKTRANE .....	2
2.1. ENERGIJA VJETRA.....	2
2.2. POVIJEST VJETROELEKTRANA.....	3
2.2.1. DAVNA POVIJEST .....	3
2.2.2. 19. STOLJEĆE .....	4
2.2.3. 20. STOLJEĆE .....	5
2.2.4. MODERNA INDUSTRIJA VJETRA.....	7
2.3. VRSTE VJETROELEKTRANA .....	8
2.3.1. PRIOBALNE VJETROELEKTRANE .....	8
2.3.2. PLUTAJUĆE VJETROELEKTRANE.....	9
2.3.3. VISINSKE VJETROELEKTRANE .....	9
2.4. OSNOVNI DIJELOVI VJETROELEKTRANE.....	10
2.5. PRINCIP RADA VJETROELEKTRANE U EES I IZBOR GENERATORA ...	14
2.5.1. OPĆENITA SHEMA DJELOVANJA VJETROELEKTRANE .....	14
2.5.2. IZBOR GENERATORA U VJETROELEKTRANI .....	15
2.6. VJETROELEKTRANE U HRVATSKOJ.....	17
3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	20
3.1. OPĆENITO O KVALITETI ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	20
3.2. NORME ZA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	21
3.3. MONITORING (NADZIRANJE) KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	22
3.4. NORMA EN 50160 .....	24
3.5. TEMELJNI PARAMETRI NAPONA NORME EN 50160 .....	25
3.5.1. KOLEBANJE NAPONA.....	26
3.5.2. TREPERENJE (FLICKER).....	27

3.5.3.	NAPONI VIŠIH HARMONIKA I MEĐUHARMONIKA .....	28
3.5.4.	SIGNALNI NAPONI .....	30
3.5.5.	FREKVENCIJA OPSKRBNOG NAPONA .....	30
3.5.6.	NESIMETRIČNOST OPSKRBNOG NAPONA.....	31
3.5.7.	NAPONSKI PROPADI .....	32
3.5.8.	PREKID OPSKRBE .....	33
4.	UTJECAJ VE NA EE MREŽU - OPĆI PROBLEMI PRI PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	34
5.	PRAKTIČNI ZADATAK.....	42
5.1.	PROUČAVANJE FLIKERA NA PROMJENJIVOJ BRZINI VJETROTURBINE SA DVOSTRUKO NAPAJANIM INDUKCIJSKIM GENERATOROM.....	42
5.2.	UTJECAJ NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE UZROKOVANE RADOM VJETROELEKTRANA U SLABOM SUSTAVU NAPAJANJA .....	54
6.	ZAKLJUČAK.....	61
	SAŽETAK .....	62
	ABSTRACT .....	62
7.	LITERATURA .....	63
	ŽIVOTOPIS .....	65

## 1. UVOD

Sigurnost opskrbe energijom je uz trgovinsku bilancu kao makroekonomski i jedan od najznačajnijih strateških problema svake zemlje. Sadašnjom energetsom strategijom predviđa se da će tijekom narednih desetljeća znatnije porasti ovisnost Hrvatske o uvozu energije od sadašnjeg na razini 55 % do očekivanog uvoza u 2030. godini od preko 70 %. Takva energetska budućnost je vrlo nepovoljna i gospodarski i politički zbog sve veće ovisnosti o uvozu energije i energenata, što je posebno izraženo u vremenu sve izraženijih klimatskih promjena [1]. Klimatske promjene i emisije stakleničkih plinova postale su prioritetno globalno pitanje razvoja. Glavni je izazov dugoročni razvoj gospodarstva sa smanjenom emisijom ugljikovog dioksida. Glavni cilj je učinkovitije korištenje energije, korištenje obnovljivih izvora energije, korištenje izvora energije koji ne proizvode stakleničke plinove, te učinkovitiji transportni sustav s većom uporabom neutralnih goriva glede emisije CO<sub>2</sub> [2]. Prema Kyoto protokolu, koji je stupio na snagu 2005. godine, trebala bi se smanjiti emisija ugljičnog dioksida što bi rezultiralo manjim utjecajem na klimatske promjene te se iz tog razloga stvaraju programi za iskorištavanje obnovljivih izvora koji uključuju male hidroelektrane, vjetroelektrane, fotonaponske izvore, zemni plin, energiju iz otpada, te iz biomase. Također, prema Pariškom sporazumu koji je donesen 2015. godine, glavni cilj je ograničavanje globalnog zatopljenja na temperature znatno ispod 2 °C. Energija proizvedena iz obnovljivih izvora ima manju energetska vrijednost u odnosu na energiju koja je proizvedena pomoću fosilnih goriva, te su zbog toga njihove elektrane manje i uglavnom se priključuju na distribucijsku mrežu. Jedna od glavnih odlika obnovljivih izvora energije je da povećavaju samoodrživost elektroenergetskog sustava u slučajevima energetske krize u proizvodnji električne energije iz konvencionalnih izvora energije.[3]. U drugom poglavlju obrađena je tema u vezi vjetroelektrana. U trećem poglavlju opisana je kvaliteta električne energije te osnovni parametri napona norme EN 50160. Četvrto poglavlje opisuje probleme prilikom spajanja vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu. U petom poglavlju opisane su studije i to: proučavanje flikera na promjenljivoj brzini vjetroturbine sa dvostruko napajanim indukcijskim generatorom, te utjecaj na kvalitetu električne energije uzrokovane radom vjetroelektrana u slabom sustavu napajanja.

## 2. VJETROELEKTRANE

### 2.1. ENERGIJA VJETRA

Sva obnovljiva energije dolazi od Sunca. Sunce prema Zemlji zrači 1015 kWh po četvornome metru. Oko 1-2% energije sunca se pretvara u energiju vjetra. Proces dobivanja električne energije iz energije vjetra možemo podijeliti u nekoliko koraka. Prvi korak je pretvaranje kinetičke energije vjetra u kinetičku energiju koja okreće lopatice turbine vjetroagregata. Nakon toga se kinetička energija turbine pomoću generatora pretvara u električnu energiju. Maksimalna teorijska snaga vjetra koja prolazi kroz vjetroturbinu ovisi o brzini vjetra na treću potenciju, gustoći zraka, te površini kruga koji čini rotor u vrtnji te je prikazana izrazom (1).

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [\text{W}] \quad (1)$$

gdje je:

$P_v$ - teorijska snaga vjetra [W],

$\rho$  -gustoća zraka [ $\text{kg/m}^3$ ],

$A$ -površina kruga [ $\text{m}^2$ ],

$v$ -brzina vjetra [m/s].

Izraz je vrlo složen u primjeni kod vjetroelektrana jer:

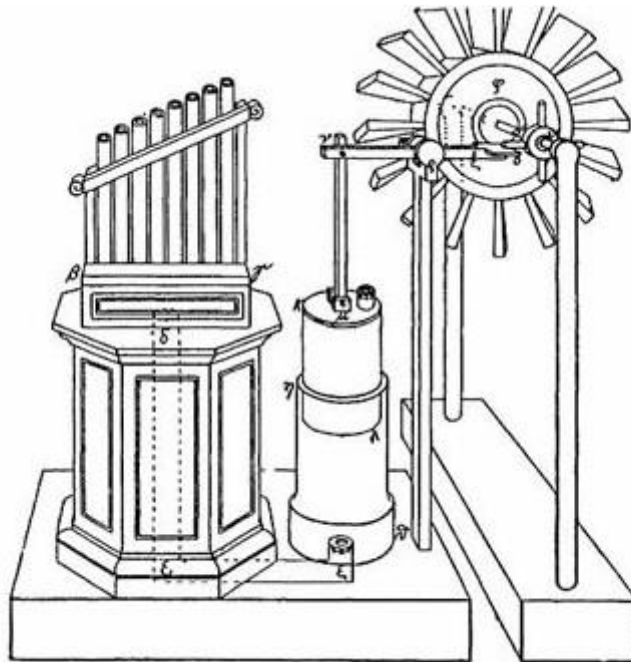
- brzina vjetra je promjenjiva na određenoj lokaciji u ovisnosti o vremenu.
- s porastom visine raste i brzina vjetra te je to jedan od glavnih razloga izgradnje vjetroelektrana na velikim visinama.
- nadmorska visina, temperatura, vlažnost utječu na gustoću zraka.
- promjer rotora može varirati u ovisnosti o izvedbi vjetroagregata te se teži izvedbi sa što većim promjerom rotora radi postizanja većih snaga [3].

## 2.2. POVIJEST VJETROELEKTRANA

Početak korištenja energije vjetra je započeo kada su ljudi prvi puta postavili jedra na brodove i na taj način si omogućili daleka putovanja, te prijenos robe i dobara na velike udaljenosti. Nakon toga se energija vjetra iskorištavala za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima te za pokretanje vodenih pumpi. Danas, s razvojem tehnologije, učinkovitosti i ekonomičnosti, iskorištavanje energije vjetra ima značajan utjecaj na proizvodnju električne energije, te se vjetar smatra kao jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora u budućnosti [4].

### 2.2.1. DAVNA POVIJEST

Jedan od najranijih početaka korištenja energije vjetra je "vjetreni rotor" (slika 2.1.) iz 1. stoljeća grčkog inženjera Herona Aleksandrijskog, koji je služio za pokretanje orgulja.



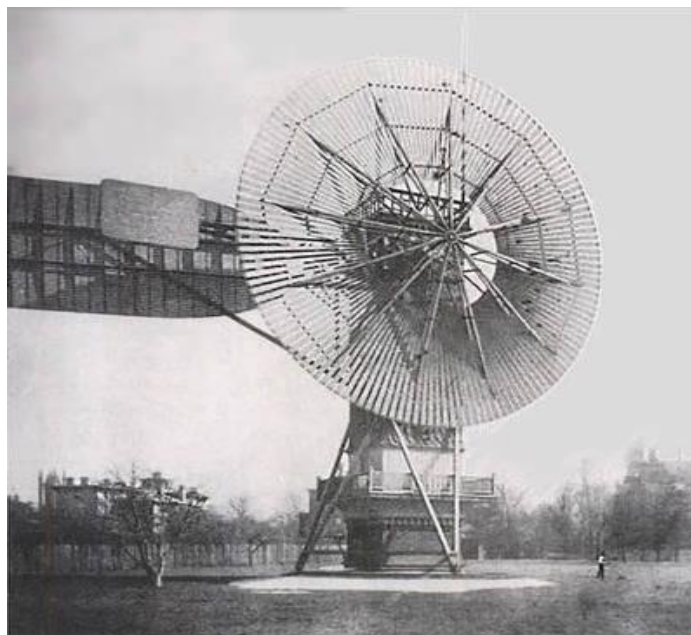
**Slika 2.1.** Vjetreni rotor (slika preuzeta iz [4])

Prve vjetrenjače koje su se upotrebljavale za praktičnu primjenu nalazile su se u pokrajini između Afganistana i Irana, a kao početak upotrebe navodi se razdoblje između 7. i 9. stoljeća. Izvedba tih vjetrenjača je bila s vertikalnom osi vrtnje i pravokutnim lopaticama s jedrima, te su se koristile za mljevenje i pumpanje vode. Također, upotreba ovakvih vjetrenjača je bila najviše raširena u Aziji i na Bliskom Istoku. Početkom 1180-tih godina, u sjeverozapadnoj Europi se počinju upotrebljavati vjetrenjače s horizontalnom osi vrtnje koje su se koristile za mljevenje. Ovakav tip vjetrenjače je bio konstrukcijski različit u odnosu na vjetrenjaču s vertikalnom osi vrtnje te se može smatrati da su to dva potpuno različita i neovisna otkrića. Također, vjetrenjače su se koristile za pumpanje morske vode za dobivanje soli na Siciliji i u Kini te za isušivanje delte Rajne u Nizozemskoj [4].

### **2.2.2. 19. STOLJEĆE**

Do početka 19-og stoljeća, u Danskoj je bilo instalirano 2500 vjetrenjača koje su se upotrebljavale za obavljanje mehaničkog rada sa ukupnom snagom od 30 MW. Između 1850. i 1900. na farmama srednjeg zapada SAD-a je instaliran velik broj vjetrenjača koje su se upotrebljavale za pokretanje pumpi za navodnjavanje. Prvu vjetrenjaču za proizvodnju električne energije, odnosno prvi vjetroagregat, je izradio profesor James Blyth 1887. godine u Škotskoj. Vjetroagregat je bio visine 10 metara u izvedbi s platnenim jedrima te je služio za punjenje akumulatora pomoću kojih je ostvareno osvjetljenje vikendice. Može se reći da je taj slučaj postao prekretnica za daljnji razvoj vjetroagregata jer je to prvi zabilježeni slučaj koji se napajao električnom energijom proizvedenom iz energije vjetra. 1887. godine, Charles F. Brush je konstruirao bolji i veći vjetroagregat (slika 2.2.) koji je imao rotor promjera 17 metara te je bio postavljen na 18 metara visok stup, no unatoč tome razvijao je snagu od 12 kW. Nedostatak ovog vjetroagregata je bio taj što je se okretao sporo i imao je 144 lopatice. Pomoću generatora su se punile akumulatorske baterije i na taj način se moglo napajati maksimalno 100 žarulja. Vjetroagregat je napušten 1908. godine nakon što je u pogon puštena elektrana za proizvodnju električne energije. 1890tih godina, danski znanstvenik Poul la Courje dizajnirao vjetroagregat za proizvodnju električne energije koji je se upotrebljavao za proizvodnju vodika pomoću kojeg su se izvodili pokusi u srednjoj školi Askov [4].





*Slika 2.2. Vjetroagregat Charlesa Brusha (slika preuzeta iz [4])*

### **2.2.3. 20. STOLJEĆE**

Početak 20. stoljeća pa sve do 1970-ih godina, razvoj vjetroagregata je bio usporen i ograničen, a najveći krivac za to su niske cijene ugljena i nafte. U prvoj četvrtini 20. stoljeća, Danska je bila jedna od vodećih zemalja po pitanju iskorištavanja energije vjetra, te su do 1908. godine bila instalirana 72 vjetroagregata snage 5-25 kW.

1950. godine Johannes Juul postaje prva osoba koja razvija vjetroagregat koji proizvodi izmjeničnu struju.

Tvrtka Jacobs Wind koja je osnovana u SAD-u 1927. godine, počela se baviti proizvodnjom vjetroagregata koji su se koristili na farmama za rasvjetu te za punjenje akumulatora. U sljedećih 30 godina proizvodnja vjetroagregata je konstantno rasla i dosegla brojku od 30 000, a bili su korišteni u Africi i na Antartici.

Darius je 1931. godine izumio vjetroagregat sa vertikalnom osi vrtnje koji je se bitno razlikovao od vjetroagregata sa horizontalnom osi vrtnje. Ovaj tip vjetroagregata je omogućavao iskorištavanje vjetra iz svih smjerova te nije bio potreban sustav za zakretanje, a

umjesto na vrh tornja vjetroagregata, generator i mjenjačka kutija su se mogli postaviti na razinu zemlje.

U Balaklavi (SSSR), na elektroenergetsku mrežu se priključuje vjetroagregat WIME-RD, te je radio od 1931. do 1942. godine. Može se reći da je on prethodnik modernih velikih vjetroagregata sa horizontalnom osi. Visina stupa mu je bila 30 metara, a promjer rotora sa tri lopatice također je bio 30 metara. Stup je bio čelični rešetkasti, snaga vjetroagregata 100 kW te je bio priključen na 6,3 kV distribucijsku mrežu. Godišnji faktor opterećenja iznosio je 32%, što je usporedivo sa brojkama današnjih vjetroagregata.

Vjetroagregat Smith-Putnam (slika 2.3.) je prvi vjetroagregat snage preko 1 MW koji je spojen na mrežu 1941. godine. Nalazio se na planini Grandpa's Knop u Castletonu (SAD). Snaga mu je bila 1,25 MW i imao je 1100 radnih sati te je prestao s radom zbog puknuća lopatice. Do puknuća je došlo zbog nedovoljnog ojačanja na slaboj točki zbog nedostatka materijala. Zbog ove tragedije su se tek nakon 40 godina počeli postavljati novi vjetroagregati sličnih dimenzija i snaga [4].



**Slika 2.3.** *Smith-Putnam vjetroagregat (slika preuzeta iz [4])*

#### 2.2.4. MODERNA INDUSTRIJA VJETRA

1970-tih godina ponovo je krenulo korištenje energije vjetra i upotreba vjetroagregata. Od 1973. do 1986. godine, tržište vjetroagregata se počelo uvelike razvijati. Mali pojedinačni vjetroagregati koji su se većinom upotrebljavali na farmama imali su nazivnu snagu od 1 kW do 25 kW, a međusobno povezani vjetroagregati razvijali su snagu od 50 kW do 600 kW. Kalifornija je sve do ratnih 1990-ih bila centar većine instalirane snage vjetroagregata sa proizvodnjom preko 3 TWh električne energije godišnje te sa 17 000 instaliranih vjetroagregata ukupne snage 700 MW, što je bilo dostatno za napajanje grada od 3 000 000 stanovnika.

U zadnjih 10 godina, korištenje energije vjetra poprima neslućene razvoje te je primijećen sve veći rast vjetroelektrana i razvoj vjetroagregata. Dimenzije vjetroagregata su se povećale više od dva puta, a snaga vjetroagregata za 10 puta. Može se reći da energija vjetra postaje jedan od uobičajenih izvora energije. U skorijoj budućnosti može doći do toga da energija vjetra zamijeni neke od klasičnih izvora energije koji se trenutno koriste. Svake godine se povećava instalirana snaga u vjetroelektranama, a broj zaposlenih raste munjevitom brzinom [4].



**Slika 2.4.** *Moderni vjetroagregat (slika preuzeta iz [5])*

## 2.3. VRSTE VJETROELEKTRANA

### 2.3.1. PRIOBALNE VJETROELEKTRANE

Priobalna vjetroelektrana (slika 2.5.) je smještena u priobalnom području gdje dubina vode iznosi najviše do 60 metara. Gradi se sa čvrstim temeljima, a udaljenost od obale je do 50 kilometara. Brzine vjetra su mnogo veće na moru u odnosu na kopno, a jedan od razloga je taj što voda ima manju površinsku hrapavost od kopna. Izgradnja priobalnih vjetroelektrana je skuplja u odnosu na kopnene vjetroelektrane. Razlog je taj što su im tornjevi viši kada se u obzir uzme i dio ispod vode. Električna energija se pomoću podmorskog kabla prenosi do kopna. Također, održavanje im je skuplje, a posebno se treba paziti na zaštitu od korozije te se zbog toga upotrebljavaju premazi i katodna zaštita. Predviđa se da će veličina priobalnih vjetroelektrana te njihova instalirana snaga i dalje rasti (preko 6MW), a broj vjetroagregata može biti veći od 100 [6].



**Slika 2.5.** Vjetroelektrana Lillgrund (slika preuzeta iz [6])

### 2.3.2. PLUTAJUĆE VJETROELEKTRANE

Plutajuća vjetroeletktrana (slika 2.6.) se postavlja na mjesta gdje nije moguće postaviti priobalnu vjetroeletktranu. Najčešće se postavljaju u dubokom moru na plutajuću strukturu. Njihova izvedba je vrlo složena što zahtjeva veće troškove, ali studije su pokazale da zbog pristupa većim brzinama vjetra imaju isplativost primjene. Najčešće se više pučinskih vjetroatregata povezuju u vjetroeletktranu kako bi se omogućio prijenos električne energije zajedničkim podmorskim kabelom [6].



**Slika 2.6.** *Plutajući vjetroatregat Hywind (slika preuzeta iz [6])*

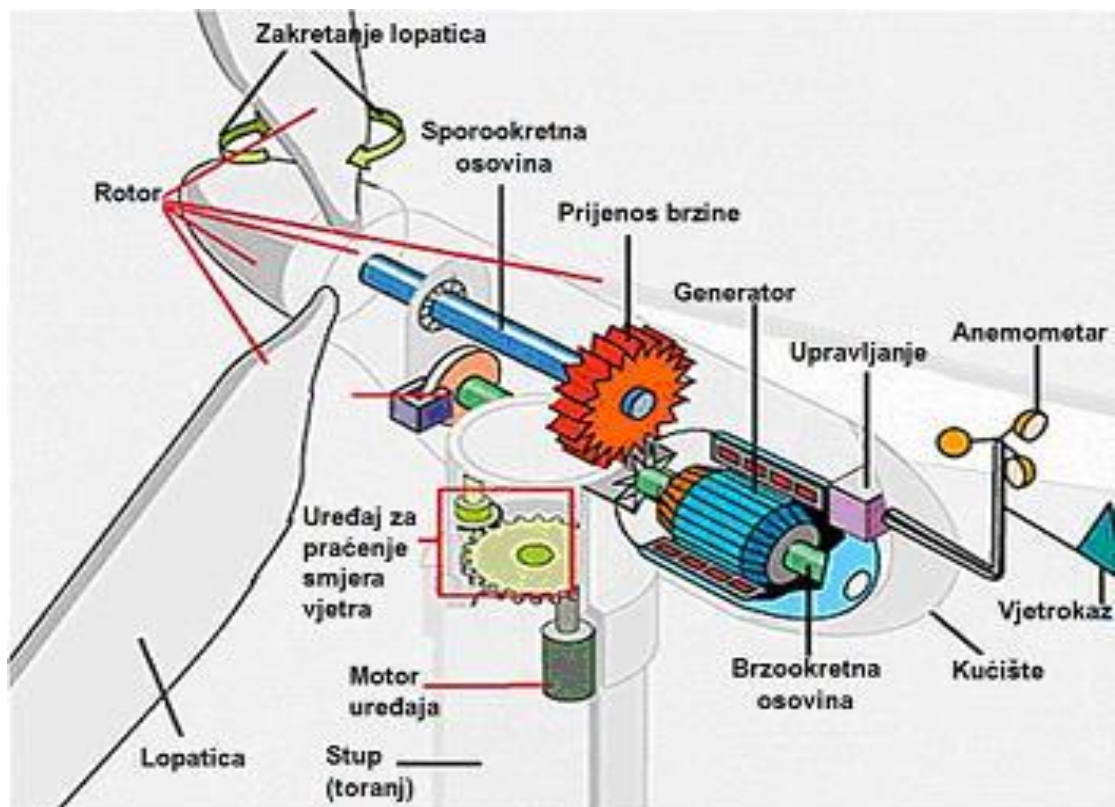
### 2.3.3. VISINSKE VJETROELEKTRANE

Princip rada ovakvog tipa vjetroeletktrane zasniva se na iskorištavanju energije vjetra u višim slojevima atmosfere. Mogu se podijeliti u dvije grupe: vjetroeletktrane koje iskorištavaju energiju vjetra na nižim visinama te vjetroeletktrane koje iskorištavaju energiju vjetra na višim

visinama. U zadnjih 20 godina napravljeno je desetak projekata i koncepata koji imaju šansu za realizaciju [6]

## 2.4. OSNOVNI DIJELOVI VJETROELEKTRANE

Na slici 2.7. prikazani su osnovni dijelovi vjetroagregata:



**Slika 2.7.** Osnovni dijelovi vjetroagregata (Slika preuzeta iz [7])

### Lopaticice:

Vjetroturbina obično ima sustav s dvije ili tri lopaticice. Prema načinu izvedbe, razlikujemo lopaticice s krilcima ili sa zakretnim vrhovima. Obje izvedbe služe kao sekundarni kočni sustavi, koji prilikom otkazivanja primarnog sustava tj. mehaničke kočnice, stvaraju moment kočenja pomoću zakretanja vrha lopaticice ili pomičnom ravnom površinom te se na taj način ograničava brzina vrtnje [7].

### Rotor:

Glavni dijelovi rotora su glavčina i lopatice. Ovisno o regulaciji snage, imamo dvije skupine izvedbe rotora:

- regulacija napadnog kuta tijekom rada vrši se zakretanjem lopatica. Lopatice se zakreću tako da se postave u optimalni položaj. Ovakav tip regulacije je vrlo složen i skup te se rotori izvede za primjenu za lopatice koje su duže od 25-30 metara. Također, pomoću posebnog motora za zakretanje može se mijenjati kut lopatica te se na taj način mijenja i napadni kut struje zraka [7].
- regulacija snage vjetroturbine vrši se pomoću aerodinamičkog efekta. Promjenom brzine vjetra na aeroprofilu mijenja se kut struje zraka te dolazi do poremećaja trokuta brzina tj. do porasta ili gubitka uzgona, U ovom slučaju omogućena je veća pretvorba energije vjetra u električnu energiju iz razloga što lopatice imaju unaprijed namješten kut za područje brzina [7].

### Kočnica:

Kada generator ispadne iz mreže, odnosno kada brzina vjete prijeđe maksimalnu vrijednost (isključnu vrijednost, približno 25 m/s), dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenje, te iz tog razloga mora postojati kočni sustav kako bi se sigurno zaustavio rotor. Također, bitno je reći da je zadatak ovog sustava održati brzinu vrtnje konstantnom, odnosno osigurati sustav čije je djelovanje dinamički uravnoteženo. Najčešća izvedba kočnog sustava je disk kočnica kojom se može upravljati mikroprocesorski, a može biti smještena na sporookretnoj osovini prije prijenosnika ili na brzookretnoj osovini generatora [7].

### Prijenosnik snage:

Prijenosnik vjetroturbine služi za spajanje sporookretne osovine s brzookretnom osovinom. Omogućava povećavanje brzine vrtnje sa 30-60 okretaja/minuti do 1200-1500 okretaja/minuti odnosno na brzinu koja je potrebna za proizvodnju električne energije. Prijenosnik se najčešće hladi zrakom, a podmazivanje se vrši sintetičkim uljem. Pri analiziranju načina prijenosa brzine vrtnje s vjetroturbinskog dijela na električni generatora, veliku ulogu imaju materijali izrade elementa sklopa, prijenosni omjer te vrsta prijenosa. Zbog cijene i težine prijenosnika, inženjeri istražuju mogućnost izravnog pogona generatora bez prijenosnika [7].

### Generator:

Turbinski dio vjetroelektrane s rotorom, kočnicama i prijenosnikom snage predstavlja važan dio cjelokupnog sustava, čija je funkcija pogon generatora. Kako bi generatorski sustav pravilno i sigurno funkcionirao, generator treba ispunjavati sljedeće zahtjeve:

- visok stupanj iskoristivosti u širokom krugu opterećenja i brzine okretaja,
- izdržljivost rotora na povećanim brzinama okretaja u slučaju otkazivanja svih zaštitnih sustava,
- izdržljivost, odnosno postojanost konstrukcija na visokim dinamičkim opterećenjima prilikom kratkih spojeva, te pri uključivanju i isključivanju generatora [7].

Na generator mogu utjecati razni klimatski uvjeti kao što su vlažnost, temperatura, slanost itd. te se zbog tih razloga pred generator postavlja jedan od glavnih zahtjeva, a to je njegova pouzdanost. Generatori se hlade zrakom. U vjetroagregate je moguća ugradnja sinkronih ili asinkronih generatora. Sinkroni generatori se upotrebljavaju za slabu ili prijenosnu mrežu, a asinkroni za jaku distribucijsku mrežu. Razne su podjele generatora, a neke od njih su:

Podjela generatora prema načinu rada:

- paralelni rad generatora s postojećom distributivnom mrežom,
- samostalni rad generatora,
- zajednički rad generatora s drugim izvorima.

Prema vrsti struje generatore dijelimo na:

- istosmjerni (zbog problema s pouzdanosti rijetko se primjenjuju),
- izmjenični.

Prema načinu okretanja postoje generatori s:

- promjenjivom brzinom vrtnje,
- nepromjenjivom brzinom vrtnje [7].



### Upravljački i nadzorni sustav:

Upravljački sustav je zadužen za cjelokupno upravljanje i nadziranje rada vjetrotubinskog-generatorskog sustava. Ako ovakav sustav nije u cijelosti smješten na vjetrotubinskoj jedinici, već je jednim dijelom na nekom udaljenom mjestu onda sustav zahtjeva posebnu telekomunikacijsku opremu [7].

### Oprema za zakretanje:

Oprema za zakretanje se koristi za zakretanje turbinsko-generatorskog sustava. Smještena je na vrhu stupa ispod kućišta vjetroturbine. Izravnavanje osi osovine rotora s pravcem vjetra odvija se pomoću pužnog prijenosa s velikim zupčastim prstenom koji je učvršćen na stupu. On na sebi ima ugrađenu kočnicu koja zbog velikih brzina vjetra onemogućuje zakretanje kućišta. Prilikom manjih poremećaja vjetra, zakretanje kućišta se regulira sustavom koji je izvan funkcije. Zakretanje kućišta se najčešće odvija jednom u deset minuta [7]

### Gondola:

Gondola ima dvije funkcije. Prva funkcija je zaštita generatorskog sustava od utjecaja okoliša, a druga je zaštita okoliša od buke koju sustav proizvodi [7].

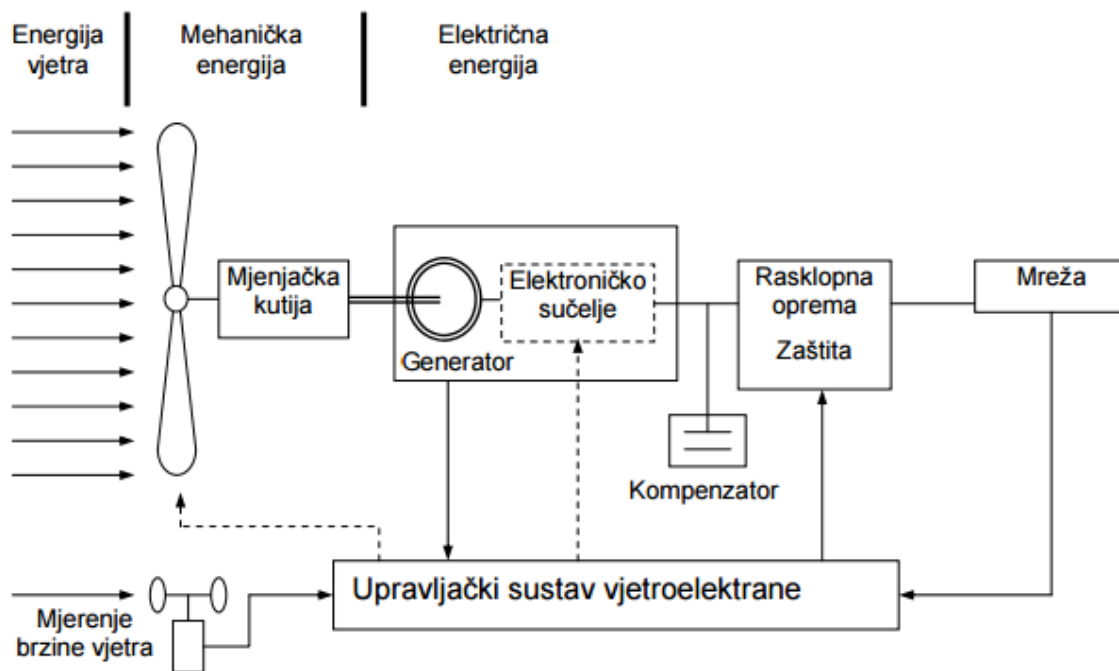
### Stup:

Stup je najčešće cjevaste izvedbe, ali može biti i rešetkaste, konusne, teleskopske, učvršćene ili povezane izvedbe. Cjevastu izvedbu karakterizira velika čvrstoća te velika otpornost na vibracije. Rešetkastu izvedbu karakterizira jednostavnost te se može rastaviti na manje dijelove pa je iz tog razloga prikladnija za montažu i transport. U unutrašnjosti stupa se najčešće nalaze stube, a kod velikih izvedbi se ugrađuje dizalo [7].

## **2.5. PRINCIP RADA VJETROELEKTRANE U EES I IZBOR GENERATORA**

### **2.5.1. OPĆENITA SHEMA DJELOVANJA VJETROELEKTRANE**

Vjetroelektrana podrazumijeva sustav za transformaciju energije gibajuće zračne mase odnosno vjetra u električnu energiju posredstvom vjetroturbine i generatora. Zbog razloga što se vjetar ne može uskladištiti, potrebno je utvrditi uvjete pogona sustava pri transformaciji energije vjetra u električnu energiju. Slika 2.8. prikazuje općenitu shemu djelovanja vjetroelektrane, te su prikazani elementi koji se projektiraju s obzirom na energiju vjetra, mehaničku energiju i električnu energiju. Za pretvorbu energije vjetra u mehaničku energiju zadužena je vjetroturbina. Najčešća izvedba vjetroturbine je s tri elise te se sa ovakvom izvedbom najlakše upravlja sa dinamikom rotora. Glavna prednost trokratnog rotora je u tome što se inercijski moment ne mijenja tijekom okretanja te je optički mirniji pri okretajima na manjoj brzini. Pomoću mehaničke spojke se ostvaruje spoj između vjetroturbine s električnim generatorom. Ona obično uključuje mjenjačku kutiju s prijenosnikom koji nižu brzinu vrtnje rotora vjetroturbine prilagođava višoj brzini vrtnje rotora generatora. Za pretvorbu kinetičke energije u električnu energiju, potrebna je brzina vrtnje rotora od 1 500 okretaja/minuti. Budući da se rotor okreće brzinom od 30-50 o/min, potrebna je upotreba prijenosnika. S prijenosnikom se pretvara spora rotirajuća sila (visokog okretnog momenta) u brzu rotaciju (niskog okretnog momenta) koja je potrebna za rad generatora. Iskoristivost energije je 98%, a gubici koji nastaju zbog trenja zupčanika prijenosnika se manifestiraju u obliku buke i topline [7].



**Slika 2.8.** Općenita shema djelovanja vjetroelektrane (slika preuzeta iz [7])

Neke vjetroturbinе u svojoj opremi sadrže i sustav za upravljanje kutom zakreta elisa pomoću kojeg se može vršiti regulacija izlazne snage. Pomoću sučelja koji je zasnovan na energetskeј elektronici, priključuje se vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje na mrežu. Jedinica za kompenzaciju jalove snage uključuje uređaj za korekciju faktora snage te filtre za više harmoničke članove. Rasklopna oprema mora biti projektirana na način koji bi omogućio glatko priključenje na mrežu. Konačno, upravljački sustav vjetroelektrane može biti izveden s različitim stupnjevima složenosti [7].

## 2.5.2. IZBOR GENERATORA U VJETROELEKTRANI

Proizvodne jedinice u vjetroelektranam su uobičajeno sinkroni ili asinkroni generatori. Obzirom na vrstu priključenja na mrežu, vjetroelektrane možemo podijeliti prema sljedećim osobinama agregata:

1. *Vjetroelektrana u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje koja se izravno priključuje na mrežu:*

- Za priključak vjetroelektrana na krutu mrežu najčešće se koriste asinkroni generatori. Karakteristike krute mreže su velika naponska i frekvencijska krutost. Najveće prednosti asinkronih generatora su jednostavnost i jeftina konstrukcija. Kako bi se omogućila početna sinkronizacija s mrežom, asinkroni generatori trebaju imati uklopive kondenzatorske baterije te priključni uređaj [7].
- Za otočni pogon se najčešće koriste sinkroni generatori. Za održavanje napona i frekvencije potrebni su uzbudni sustav i regulator brzine. Ovakav tip generatora se ne može pronaći u komercijalnim izvedbama sa stalnom brzinom u pogonu na krutu mrežu. Vjetroturbine koje imaju nazivnu snagu veću od 500 kW zahtijevaju uključivanje sustava za regulaciju kuta zakretanja elise propelera [7].
- Za primjenu u vjetroelektranama koje se koriste za potrebe elektroenergetskog sustava, prikladni su rotor s konstantnom brzinom vrtnje. Njihova brzina vrtnje je određena frekvencijom mreže [7].

## **2. Vjetroelektrana u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje:**

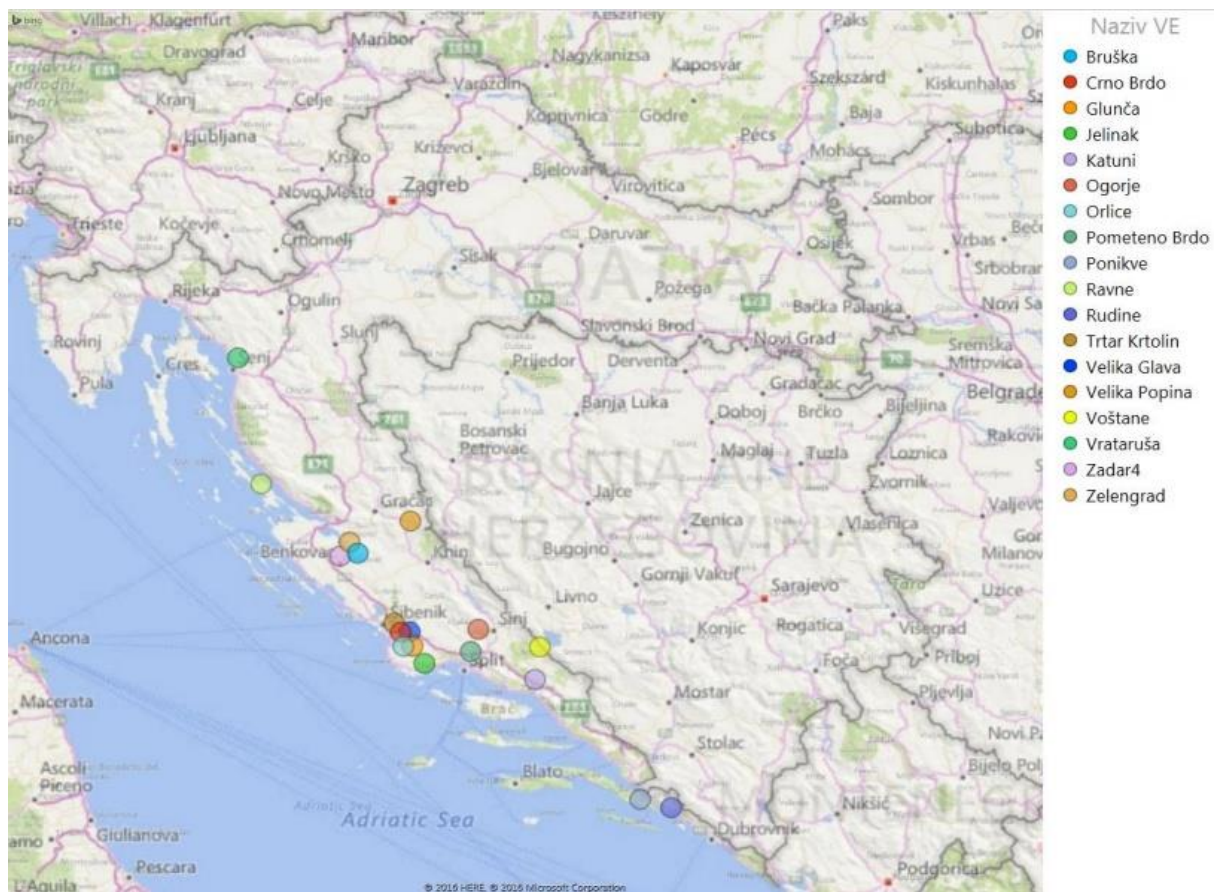
- Sinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu
- Asinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu
- Asinkroni generator s upravljivim promjenjivim klizanjem
- Asinkroni generator s nadsinkronom ili podsinkronom pretvaračkom kaskadom

U vjetroelektranama sa stalnom brzinom vrtnje te konstantnom frekvencijom koriste se mehaničko-hidraulički sustavi za regulaciju brzine vrtnje te se na taj način upravlja elisama turbine. Kod ovakve izvedbe vjetroelektrana, mogu se koristiti sinkroni ili asinkroni generatori. Asinkroni generatori zahtijevaju lokalni izvor jalove snage u svrhu podržavanja samoouzbuđene te za održavanje napona priključnicama. Iako sinkroni generatori imaju veći faktor efikasnosti i pouzdanosti, njihov nedostatak je nemogućnost zadržavanja sinkronizma pri većim brzinama vjetra ili zbog poremećaja nastalih u mreži poput kratkog spoja. Prilikom priključenja vjetroelektrana na slabu mrežu, prednost sinkronog generatora je sposobnost proizvodnje jalove snage. Pri priključenju na već izgrađenu mrežu, asinkroni generator je u prednosti jer je jeftiniji i robusniji te mu je jednostavniji sustav upravljanja. Vjetroelektrana sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom ima optimalan pogon samo za jedan

omjer između brzine vrha elise i brzine vjetra. To znači da se samo pri jednom omjeru postiže maksimalna djelatna snaga generatora. U slučaju da omjer odstupa od optimalnog, djelatna snaga generatora biti će manja od maksimalne. Čest slučaj je izvedba vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom. Takve vjetroelektrane imaju generator s promjenjivom brzinom vrtnje i vjetroturbinu koja rotira različitim brzinama vrtnje ovisno o promjenjivosti brzine vjetra te je zbog toga ostvariv pogon za bilo koju brzinu vjetra. U slučaju primjene asinkronog generatora izvedba uključuje diodni ispravljač u mosnom spoju za regulaciju djelatnog otpora rotora i promjenu brzina/moment karakteristike asinkronog stroja. U isto vrijeme se na mehaničko-hidrauličkoj strani smanjuju troškovi iz razloga što se regulacija brzine više ne izvodi na turbini te zbog toga turbina postaje jeftinija. Investitori se najčešće odlučuju za vjetroelektrane u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom uz upotrebu asinkronog generatora [7].

## **2.6. VJETROELEKTRANE U HRVATSKOJ**

Republika Hrvatska je kao članica Europske Unije obvezna ispuniti ciljeve do 2030. godine u vidu smanjenja emisije stakleničkih plinova za 40 % u odnosu na 1990. godinu. Također, postavlja se cilj udjela obnovljivih izvora energije do 27% i indikativni cilj smanjenja energetske potrošnje 27%. Time je na značaju dobila izgradnja vjetroelektrana jer bi upravo one uz hidroelektrane i fotonaponske ćelije trebale proizvoditi najveći udio električne energije [8]. U svibnju 2017. u Hrvatskoj je u redovnom pogonu bilo 17 vjetroelektrana ukupne snage 448,85 MW i odobrenom snagom priključenja u iznosu od 443, 35 MW (tablica 2.1.). Najviše vjetroelektrana smješteno je na lokacijama u Šibensko-kninskoj županiji (6), Zadarskoj županiji (5) i Splitsko-dalmatinskoj županiji (4) (slika 2.8.). Najveći broj vjetroelektrana (12) priključen je na 110 kV prijenosnu mrežu, dok su ostale priključene na srednjenaponsku distribucijsku mrežu (35, 30 i 10 kV) [9]. Prema različitim scenarijima iz Stručnih podloga za izradu strategije niskougličnog razvoja Republike Hrvatske predviđa se između 1200 i 2000 MW snage instaliranih vjetroelektrana do 2030. godine i između 3158 i 3618 MW snage vjetroelektrana do 2050. godine čime vjetroelektrane postaju najveći proizvođač energije iz obnovljivi izvora [8].



Slika 2.9. Lokacije VE u Hrvatskoj (slika preuzeta iz [9])

ž

**Tabela 2.1. Osnovni parametri VE u pogonu (preuzeto iz [9])**

No	WPP name	Location (county/municip.)	Total installed capacity (MW)	Total approved connected capacity (MW)	Connection voltage (kV)	In normal operation since
1	Ravne	Zadarska/Pag	5,95	5,95	10	2005
2	Trtar Krtolin	Šib-Knin/Šibenik	11,2	11,2	30	2007
3	Orlice	Šib-Knin/Šibenik	9,6	9,6	30	2009
4	Vrataruša	Prim-Goran/Senj	42	42	110	2010
5	Velika Popina	Zadarska/Gračac	9,2	9,2	35	2011
6	Pometeno Brdo	Split-Dalm/Split	20	20	110	2010 / 2011 / 2012 / 2015
7	Crno Brdo	Šib-Knin/Šibenik	10,5	10	10	2011
8	Bruška	Zadarska/Benkovac, Obrovac	36,8	36	110	2011
9	Ponikve	Dub-Neret/Ston	36,8	34	110	2012
10	Jelinak	Šib-Knin/Marina, Seget	30	30	110	2013
11	Voštane	Split-Dalm/Trilj	42	40	110	2013
12	Zadar4	Zadarska/Benkovac	9,2	9,2	10	2013
13	Velika Glava	Šib-Knin/Drniš, Šibenik, Unešić	43,7	43	110	2014
14	Zelengrad	Zadarska/Obrovac	42	42	110	2014
15	Ogorje	Split-Dalm/Muč	45	44	110	2015
16	Rudine	Dub-Neret/Dubrovačko primorje	34,2	34,2	110	2015
17	Glunča	Šib-Knin/Šibenik	20,7	23	110	2016
UKUPNO TOTAL			448,85	443,35		

### **3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE**

#### **3.1. OPĆENITO O KVALITETI ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Kvaliteta električne energije postaje sve značajnije pitanje i važna tema elektrodistributivnih organizacija za opskrbu električnom energijom, radnog osoblja, servisera i menadžera sektora za održavanje kao i potrošača, kako u industriji tako i javnom sektoru i domaćinstvima. Najvažnija definicija kvalitete električne energije odnosi se na onu povezanu uz potrošače prema kojoj je kvaliteta definirana kao bili koji problem povezan s naponskim, strujnim ili frekvencijskim odstupanjem koji uzrokuje kvar ili nepravilan rad na električnim uređajima potrošača. Kvaliteta električne energije se može definirati kao stanje energetskeg sustava u kojem isporučena energija te njeno korištenje ima utjecaj na rad opreme korisnika. Električni potrošači koji najviše pridonose povećanju produktivnosti, po pravilu imaju i najveći udio u pogoršanju kvalitete električne energije. To su u prvom redu uređaji i oprema čiji se rad zasniva na radu mikroprocesora i logičkih sklopova. Mikroprocesori imaju nelinearnu karakteristiku ovisnosti napona i struje, pa u svom radu doprinose stvaranju izobličenja standardnog sinusoidalnog vala napona i struje elektroenergetskog sustava. U isto vrijeme, ti isti generatori izobličenja, jako su osjetljivi na kvalitetu električne energije kojom se napajaju. U ovu grupu osjetljivih uređaja ili opreme mogu se uvrstiti računala, sigurnosni sustavi, upravljači proizvodnih procesa, elektroničke blagajne itd. Ovakvi uređaju su osjetljivi i na najmanje promjene napona ili frekvencije i mogu postati nepouzdan u radu ili pretrpjeti trajna oštećenja. Problematika koje se izravno nadovezuje uz rad ovakvih uređaja i opreme jesu ekonomske štete koje nastaju kao posljedica nepouzdanog rada odnosno napajanja gore spomenutih uređaja i opreme nekvalitetnom električnom energijom [11].



## 3.2. NORME ZA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za pojašnjenje pojma kvalitete električne energije bit će korišten pristup elektromagnetske kompatibilnosti (EMC), koji određuje uvjete za rad električnim aparatima. EMC pristup usvojen je od strane međunarodne zajednice u vidu normi. U svijetu se primjenjuju različite norme za različite parametre elektromagnetske kompatibilnosti, pa tako i za definiranje kvalitete električne energije.

Norme koje definiraju EMC:

- IEEE (Međunarodna),
- IEC (Međunarodna),
- EN (CENELEC Europska).

Norme koje definiraju kvalitetu električne energije:

- IEEE 1159 – 1995,
- EN 50160 – 1994,
- IEC 1000 – 4 – 30 – 2000.

Ove norme opisuju:

- Razinu elektromagnetskih smetnji (zračne i vodljive), koje oprema potrošača može generirati.
- Razinu elektromagnetskih smetnji (zračne i vodljive), na koje je oprema imuna (može podnijeti bez oštećenja ili gubitka funkcija).
- Razinu elektromagnetske kompatibilnosti, koja ima funkciju omogućivanja suglasja i koherentnosti normi za emisiju i normi za imunitet [11].

### **3.3. MONITORING (NADZIRANJE) KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Monitoring kvalitete električne energije je potreban da bi se označila elektromagnetska pojava na određenoj lokaciji i na određenoj točki mreže. U nekim slučajevima je svrha monitoringa da se utvrdi nekompatibilnost između izvora električne energije i opterećenja. Također se koristi da se procjeni električno okruženje na određenoj lokaciji, sa svrhom poboljšanja ili dobivanja osnovnih parametara kvalitete električne energije. Konačno, monitoring se može koristiti za predviđanje budućeg ponašanja priključene opreme. Ciljevi monitoringa su određeni izborom opreme, metodom prikupljanja podataka, izborom mogućnosti snimanja raznih događaja u vremenu, tehnikom analize podataka, te cjelokupnom razinom koju zahtjeva takav projekt. Cilj može biti jednostavan kao što je provjera stacionarne naponske regulacije, ali i kompleksna analiza harmonika u struji unutar razdjelne mreže. Može se reći da je monitoring uspješan ukoliko dobiveni podaci ispunjavaju ciljeve radi kojih je monitoring izvršen. Mjerenje elektromagnetske pojave kao kvalitete električne energije uključuje parametre koji se propagiraju kroz vodiče, i to u vremenskoj i frekventnoj domeni. Faktori okoline imaju također utjecaj na opterećenje. Ti faktori su: temperatura, vlaga, elektromagnetske smetnje, radio-frekventne smetnje. Jedan od razloga za stalan nadzor kvalitete električne energije je ekonomski. Ovo se posebno odnosi na procesna postrojenja koja mogu biti ometana nekvalitetnom isporučenom energijom. Kako iza svakog prekida proizvodnje proizlaze veliki gubici, nadzor znači kontrolu parametara isporučene energije, ali i sredstvo za uočavanje i lokaliziranje uočenih problema, koji mogu biti i na strani potrošača. Specifičan razlog za monitoring je i odabir opreme koja će raditi na danoj lokaciji i u danim uvjetima kvalitete isporučene energije. Ukoliko je mjerenjem utvrđena loša kvaliteta električne energije na određenoj lokaciji, pri odabiru opreme za rad treba voditi računa da je ona dovoljno otporna i sposobna raditi u takvim uvjetima, a to je zapravo zadovoljavanje kriterija elektromagnetske kompatibilnosti [11].

Parametri koje norme koriste za definiranje kvalitete električne energije su:

- mrežna frekvencija,
- amplituda napona napajanja,

- kolebanje napona napajanja,
- brze promjene napajanja,
- propadi napona,
- kratkotrajni prekidi napajanja,
- dugotrajni prekidi napajanja,
- privremeni mrežni prenaponi između faznih vodiča i zemlje,
- impulсни prenaponi između faznih vodiča i zemlje,
- nesimetrija napona,
- naponi međuharmonika,
- signalni naponi,
- valovitost napona.

Osnovni parametri mogu se podijeliti u dvije grupe:

a) Parametri stacionarne promjene: amplituda, frekvencija, spektar, modulacija, impedancija izvora, dubina usjeka, površina usjeka.

b) Parametri dinamičke promjene: brzina rasta, amplituda, trajanje, spektar, frekvencija, učestalnost rasta, energija, impedancija izvora.

S navedenim parametrima može se opisati svaka elektromagnetska smetnja. Kategorije i njihov opis bitni su za kvalificiranje mjernih rezultata, kao i za opis elektromagnetske pojave, koja može uzrokovati problem kvalitete električne energije. Glavni razlog za određivanje različitih kategorija elektromagnetskih pojava je što postoje različiti načini za rješavanje problema kvalitete električne energije koje one uzrokuju. Postoji više rješenja predviđenih za svaku kategoriju te je zbog toga veoma bitno ispravno svrstati događaje i elektromagnetske pojave radi analize [11].

### 3.4. NORMA EN 50160

Europsku normu EN 50160 značajke napona u javnim distributivnim električnim mrežama izradio je CENELEC BTTF 60-6, fizikalne karakteristike električne energije Europskog odbora za normiranje u elektrotehnici (CLC) ju je ratificirao 5. srpnja 1994. kao EN 50160. Norma definira niz bitnih karakteristika opskrbnog napona na mjestu predaje potrošaču u niskonaponskim i sredjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima. Međutim, te karakteristike nisu predviđene za uporabu kao vrijednosti elektromagnetske kompatibilnosti ili kao granične vrijednosti koje se iz postrojenja po vodovima prenose u javne razdjelne mreže. Dakle, ova norma ne predstavlja odredbe o elektrotehničkoj sigurnosti. Međutim, odredbe ove norme mogu biti korištene kao odredbe elektromagnetske suglasnosti ili ugovora o isporuci električne energije zaključnih između isporučitelja i potrošača električne energije kao i ugovora između kupca i isporučitelja električne opreme. Cilj je postavljanje graničnih vrijednosti kod normalnih radnih uvjeta. U niskonaponskim mrežama, pojavom kvarova dolazi do velikih smetnji. No kompletni ispad mreže ne može se opisati preko graničnih vrijednosti te zbog toga nema smisla zadavati stvarne granične vrijednosti. Norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične koje ne smiju biti premašene 95% vremena monitoringa. Mjeri se, zavisno od mjerene veličine, 10 sekundna ili 10 minutna srednja vrijednost mjerene veličine. Duljina mjerenja obuhvaća jedan tjedan. Iz registriranih podataka se nakon završetka mjerenja određuje vrijednost pojavljivanja, i podaci se prikazuju u odgovarajućoj formi. Međutim, norma ne vrijedi u izvanrednim situacijama kao što su nesvakidašnje vremenske neprilike ili prirodne katastrofe [11].

Norma mora definirati i opisati značajke napona u odnosu na:

- frekvenciju,
- amplitudu,
- valni oblik,
- simetriju u trofaznim mrežama.

Ovi parametri su podložni promjenama u tijeku normalnog rada, zbog promjene opterećenja, smetnjama koje se generiraju u opremi, te pojavljivanju kvarova uzrokovanih vanjskim čimbenicima. Navedene značajke su podložne stohastičkim promjenama u vremenu. Stoga norma dozvoljava da zadane granice parametara mogu biti premašene u nekim slučajevima [11].

### **3.5. TEMELJNI PARAMETRI NAPONA NORME EN 50160**

1. Kolebanje napona
2. Treperenje (Flikeri): kratkotrajni ( $P_{st}$ ) i dugotrajni ( $P_{lt}$ )
3. Naponi viših harmonika i međuharmonika
4. Signalni napon
5. Frekvencija opskrbnog napona
6. Nesimetričnost (asimetričnost) napona
7. Naponski propadi i/ili udarna prijelazna stanja, prenaponi
8. Prekidi opskrbe

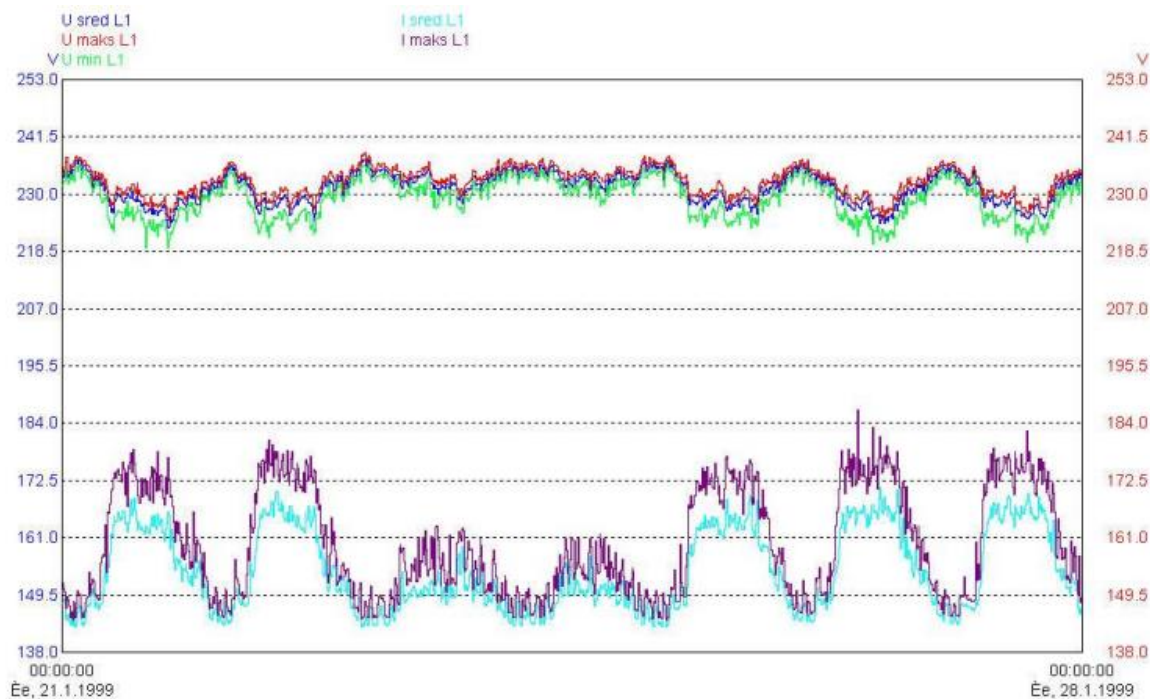
Granične vrijednosti parametara napona po preporuci EN 50160 nalaze se u tablici 3.1.

**Tabela 3.1.** Granične vrijednosti parametara napona po preporuci EN 50160

EN 50160			
POKAZATELJ	MJERNA JEDINICA	Obilježja niskog napona	Obilježja srednjeg napona
Promjene napona	V	$\pm 10 \% U_n$ za 95 % tjedna	$\pm 10 \% U_c$ za 95 % tjedna
		+10/-15 % $U_n$ za 5 % tjedna	
Kratki prekidi	Broj	< 3 min. – nekoliko desetaka do stotina godišnje	
Dugi prekidi	Broj	$\geq 3$ min. – < 10 – 50 godišnje	
Propadi	Broj	nekoliko desetaka do tisuću godišnje	
THD napona	% $U_n$	< 8 % $U_n$	
Treperenje	$P_{It}$	$P_{It} \leq 1$ , za 95 % tjedna	
Nesimetrija	% $U_n$	< 2 % $U_n$	
Frekvencija	Hz	$\pm 1 \% U_n$ za 99,5 % godine	
		+ 4/-6 % $U_n$ za 100 % vremena	

### 3.5.1. KOLEBANJE NAPONA

Iako možemo razlikovati polagane i brze promjene napona, generalno se može reći da je kolebanje napona prihvatljivo ako se pri normalnim pogonskim uvjetima, 95% svih 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona nalazi unutar +/- 10% vrijednosti normiranog nazivnog napona ( $U_N$ ). To znači da se od ukupno 1008, 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona izmjerenih tijekom jednog tjedna, njih 958 mora imati vrijednost unutar područja 207-253 V za nazivni napon od 230 V AC (slika 3.1.) [11].

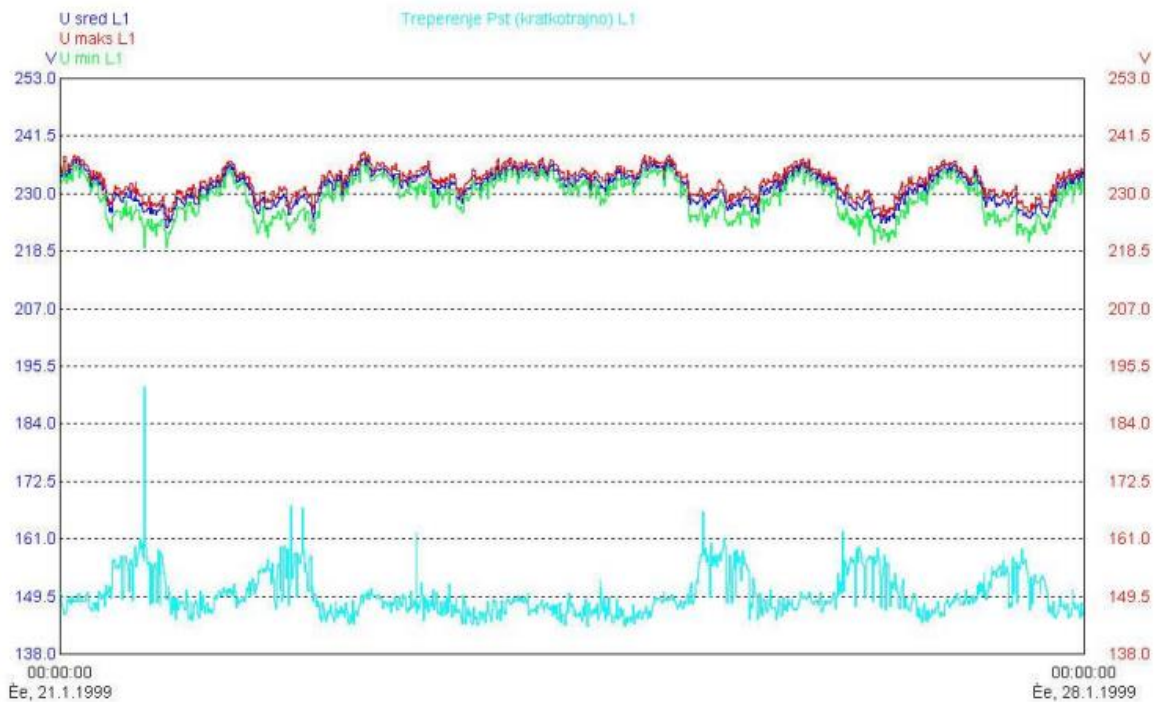


**Slika 3.1.** Kolebanje napona (preuzeto iz [11])

### 3.5.2. TREPERENJE (FLICKER)

Potreba za definiranjem i mjerenjem ovog parametra proizlazi iz činjenice da pri promjeni intenziteta svjetla u radnoj ili životnoj sredini može doći do negativnog utjecaja na ljudsko zdravlje, tj. na njihovu radnu i svaku drugu efikasnost. Može doći do glavobolje, nervoze, depresije, oštećenja vida itd. Fliker se definira na sljedeći način: Ako se u prostoriji nalazi 100 ljudi pod jednakim uvjetima, i ako se intenzitet svjetla promjeni toliko da to zapazi 50 od ukupno nazočnih ljudi, kaže se da fliker ima intenzitet 1. Ovo ometajuće djelovanje raste sa amplitudom promjene napona. Jakost flikera izračunava se prema formuli (1). Ona ne smije prijeći vrijednost 1 unutar 95% vremena radnog tjedna (slika 3.2.) [11].

$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{Psti^3}{12}} \quad (1)$$



**Slika 3.2.** Treperenje (flicker) napona (preuzeto iz [11])

### 3.5.3. NAPONI VIŠIH HARMONIKA I MEĐUHARMONIKA

Naponom višeg harmonika označava se sinusni napon sa frekvencijom koja je višekratnik osnovne frekvencije. Srednja vrijednost u periodu od 10 minuta efektivne vrijednosti napona jednog jedinog harmonika ne smije prijeći graničnu vrijednost u postocima koja je definirana u tablici 3.2., i to 95% vremena jednog tjedna. Dozvoljene vrijednosti viših harmonika prikazane su u tablici 3.2. i to:

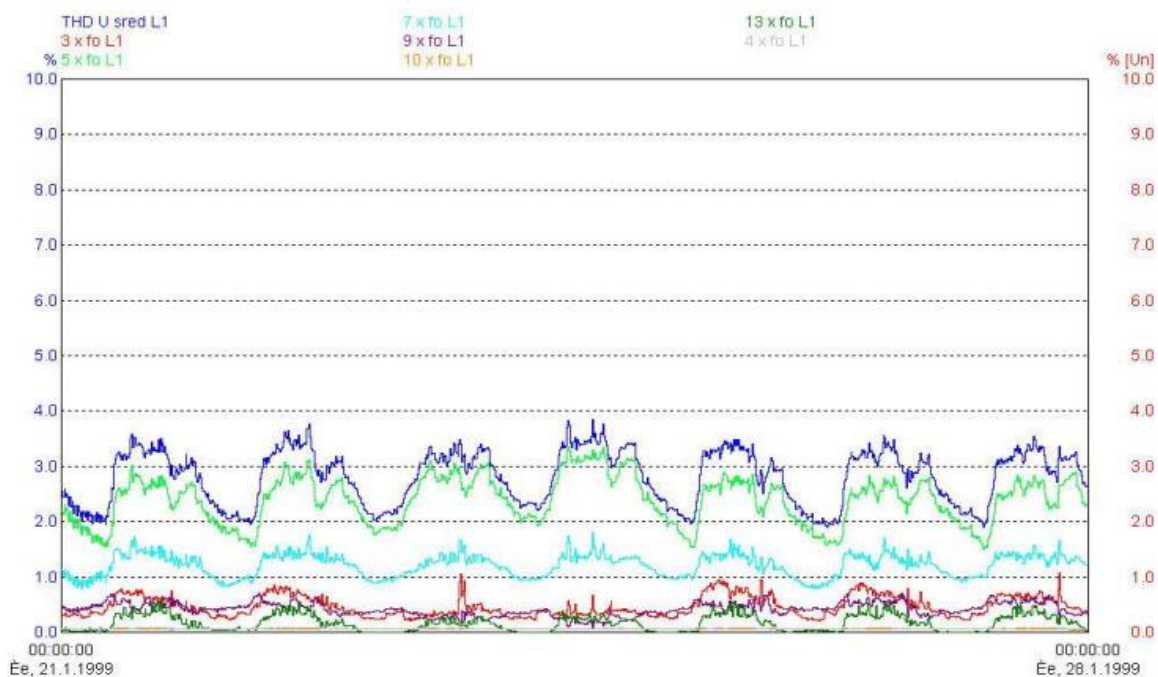
- a) Pojedinačno, njihove amplitude svedene na amplitudu temeljnog harmonika (slika 3.3., tablica 3.2.).
- b) Zajednički, pomoću ukupnog sadržaja viših harmonika THD, koji računamo prema formuli 2.



**Tabela 3.2.** Prikaz pojedinačnih graničnih vrijednosti viših harmonika (preuzeto iz [11])

Neparni harmonici				Parni harmonici	
nisu množivi sa 3		množivi sa 3			
broj harmonika	limit [%]	broj harmonika	limit [%]	broj harmonika	limit [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6-24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

$$THD = \sum_{h=2}^{40} (U_h)^2 \quad (2)$$



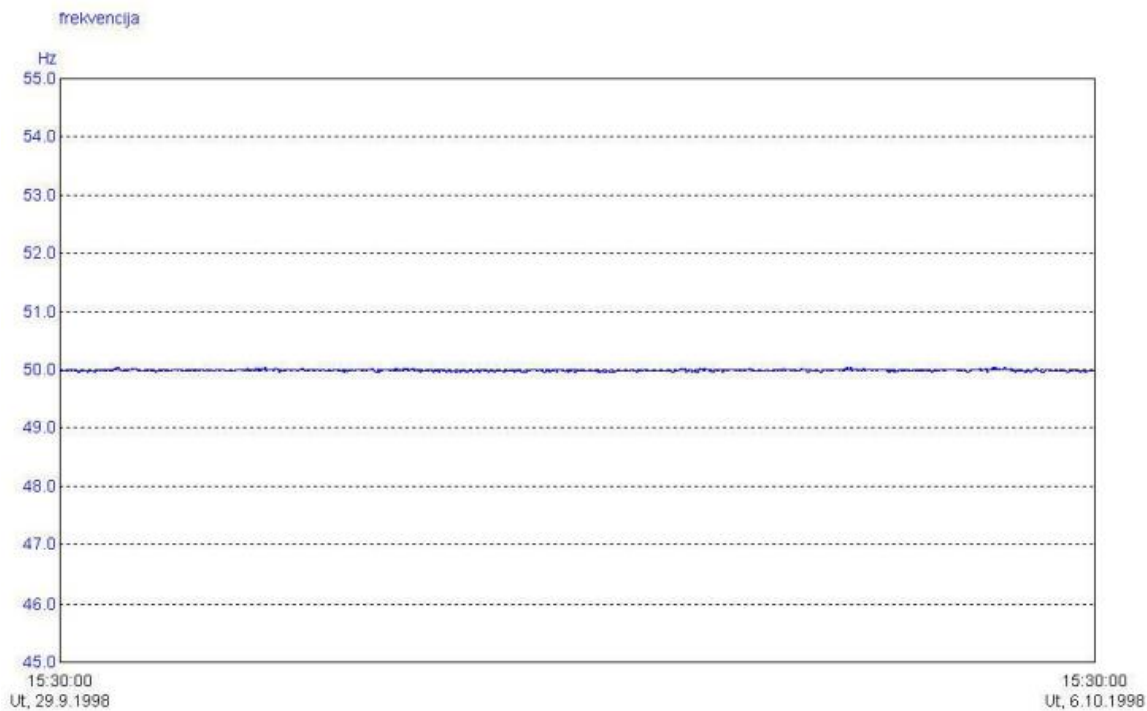
**Slika 3.3.** *Naponi viših harmonika i međuharmonika (preuzeto iz [11])*

### 3.5.4. SIGNALNI NAPONI

Isporučitelji električne energije se trebaju pridržavati sljedeće norme unutar frekvencijskog pojasa od 1-10 kHz, 99% svih 3-sekundnih srednjih vrijednosti signalnog napona tijekom jednog dana ne smiju prelaziti vrijednost od 5% nazivnog napona [11].

### 3.5.5. FREKVENCIJA OPSKRBNOG NAPONA

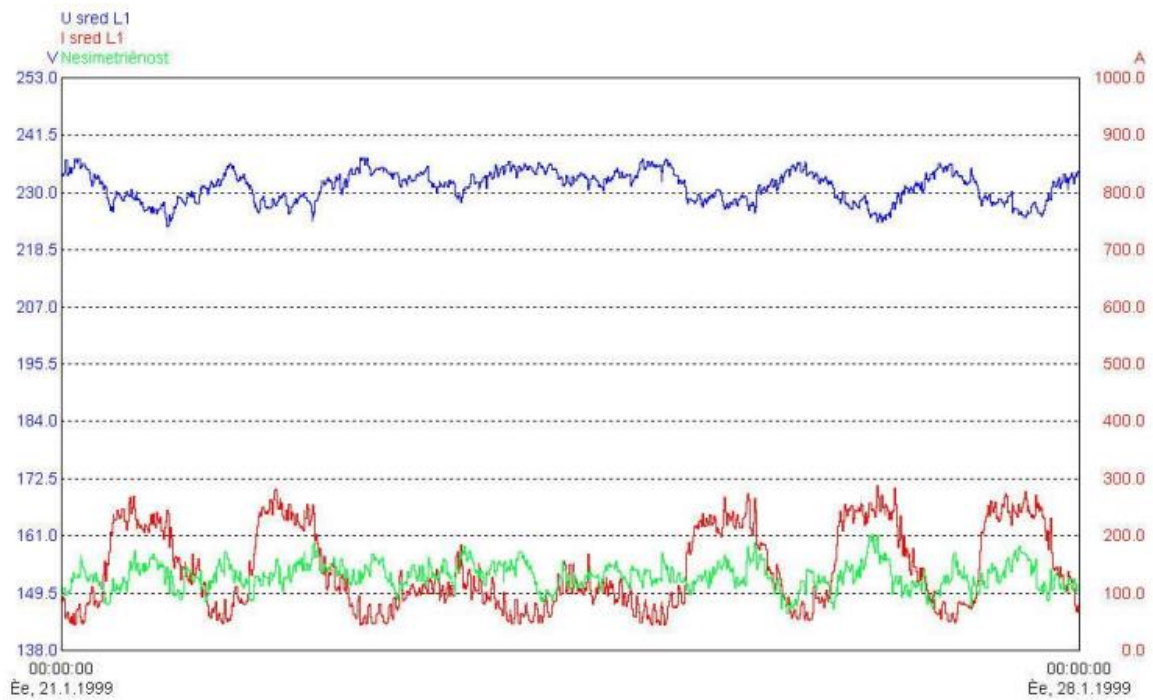
Frekvencija opskrbnog napona u mreži iznosi 50 Hz. U niskonaponskim i sredjenaponskim mrežama vrijedi pri normalnim pogonskim uvjetima 99,5 % svih 10-sekundnih srednjih vrijednosti temeljne frekvencije treba biti unutar pojasa: 50 Hz +/- 1%, a u 100 % vremena ne smije izlaziti izvan područja +4% / -6%. [11].



**Slika 3.4.** *Frekvencija opskrbnog napona (preuzeto iz [11])*

### **3.5.6. NESIMETRIČNOST OPSKRIBNOG NAPONA**

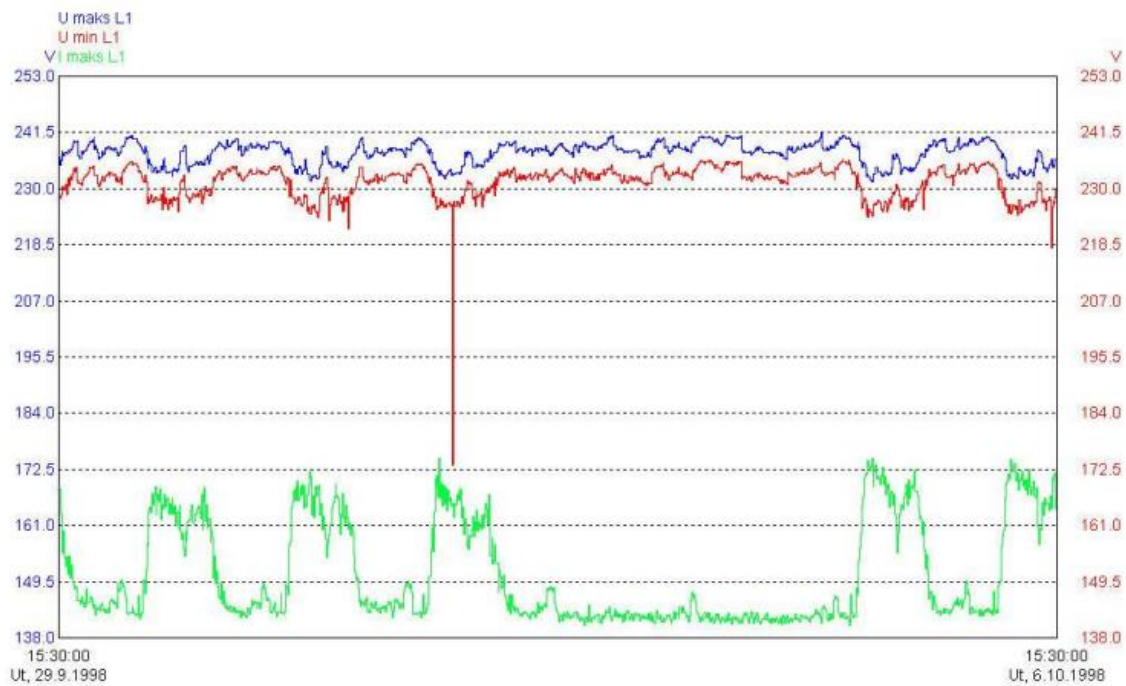
Ovaj parametar, definiira se na sljedeći način: Pri normalnim pogonskim uvjetima rada sve 10-minutne srednje vrijednosti efektivne vrijednosti inverzne komponente napona ne smije kod 95% srednjih vrijednosti svakog tjednog intervala prelaziti 2% odgovarajuće direktne (pozitivne) komponente (slika 3.5.) [11].



**Slika 3.5.** *Nesimetričnost opskrbnog napona (preuzeto iz [11])*

### 3.5.7. NAPONSKI PROPADI

Zbog kvarova koji nastaju u postrojenjima potrošača ili u javnoj distributivnoj mreži, javljaju se naponski propadi. Oni se definiraju na sljedeći način: propad označava kratkotrajno (od 10 ms do 1 minute) smanjenje opskrbnog napona na neku vrijednost u pojasu od 90% pa do 1% nazivnog napona, nakon čega se ponovo uspostavlja prvobitna vrijednost napona. Dozvoljeni broj propada tijekom jedne godine može biti u opsegu od 10 do 1000, te da je većina propada trajanja kraćeg od 1 s i amplitude manje od 60 % nazivnog napona (slika 3.6.) [11].



**Slika 3.6.** Naponski propadi (preuzeto iz [11])

### 3.5.8. PREKID OPSKRBE

Prekid opskrbe označava stanja gdje je opskrbni napona na mjestu predaje manji od 1% nazivnog napona. Prekidi mogu biti planirani i neplanirani, te kratkotrajni i dugotrajni. Trajanje oko 70 % kratkih prekida, do 3 minute, opskrbe godišnje mora biti kraće od 1 s. Za duge prekide opskrbnog napona tolerira se : 10-50 prekida opskrbnog napona godišnje, duljih od 3 minute [11].

## 4. UTJECAJ VE NA EE MREŽU - OPĆI PROBLEMI PRI PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE

U svrhu balansiranja polariziranih stavova o izgradnji vjetroelektrana potrebno je razmotriti tehničke i ekonomske aspekte koji su povezani s uvjetima njihovog priključenja na mrežu. Ekonomski se aspekti razmatraju tek odnedavno i uzimaju se u obzir samo u dereguliranim sustavima gdje postoji jasna razlika između proizvodnje energije i pružanja mrežnih usluga. S promjenom tokova djelatne i jalove snage nakon priključenja vjetroelektrane dolazi do izmjene naravi distribucijske mreže. Mreža poprima aktivnu narav uslijed čega se javljaju značajniji tehnički aspekti koje je potrebno razmotriti na odgovarajući način. U većini se zemalja pozornost usmjerava prema stvaranju propisa i pravila pomoću kojih se osigurava kvaliteta napajanja potrošača. Povećanom implementacijom obnovljivih izvora električne energije, poput vjetroelektrana, stvara komponentu neupravljivosti u elektroenergetskom sustavu. Na temelju vremenske prognoze moguće je predvidjeti srednju brzinu vjetra u kratkoročnom periodu, ali ne i dinamičke promjene, manje ili veće, koje se događaju oko srednje brzine vjetra. Dinamičke promjene brzine vjetra uzrokuju promjenjivost iznosa injektirane snage u mrežu što dovodi to poteškoća u regulaciji napona i frekvencije, odnosno u kvaliteti isporučene električne energije. Tehnički aspekti priključenja vjetroelektrane vezani su uz sljedeće probleme [10].

1. Regulacija napona i kompenzacija jalove snage - U svakom distribucijskom sustavu jasno je iskazana obveza napajanja potrošača uz održavanje napona u određenim granicama. Ovaj zahtjev često određuje troškove koji su pridruženi projektiranju i izvedbi distribucijske mreže. Priključivanje vjetroelektrane uzrokuje promjenu tokova snage i naponskih razina u ovisnosti o stanju opterećenja u mreži. Za regulaciju napona u čvorištima distribucijskog sustava koriste se transformator s regulacijom pod opterećenjem, te uređaji za kompenzaciju jalove snage (prigušnice, kondenzatori, sinkroni kompenzatori) [10].
2. Regulacija frekvencije i upravljanje snagom - Problem s frekvencijom javlja se u otočnom režimu rada distribucijske mreže na koji je priključena vjetroelektrana. Ukoliko u mreži nema drugih lokalnih distributivnih izvora reguliranog tipa, frekvenciju nije moguće održati u dopuštenom intervalu zbog tog što vjetroelektrana u

najčešćoj izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom nije u reguliranom pogonu. Do otočnog pogona distribucijske mreže može doći ispadom transformatora koji je lociran u pojnoj točki prema visokonaponskoj mreži [10].

3. Stabilnost napona i kuta - Ukoliko se na generatore distribuirane proizvodnje gleda samo kao na proizvođače energije, razmatranje stabilnosti ne poprima veće značenje. U slučaju kvara u mreži i ispadu distribuiranih generatora, gubi se jedan kratki period lokalne proizvodnje koja će nakon toga biti ubrzo ponovo uspostavljena. Nasuprot tome, ukoliko su distribuirani generatori značajni u podršci pogona cijelog elektroenergetskog sustava, prijelazne pojave u problemu stabilnosti poprimaju veliko značenje. U nestabilnom stanju, asinkroni generatori u vjetroelektranama ubrzavaju se i povlače veliku jalovu struju iz mreže što rezultira smanjivanjem napona u mreži [10].
4. Kvaliteta isporučene električne energije - Kvaliteta napajanja procjenjuje se obzirom na prijelazne pojave napona te na harmoničku izobličenost mrežnog napona. Ovisno o karakteristikama mreže i vjetroelektrane može doći do narušavanja kvalitete napona kod ostalih korisnika u distribucijskoj mreži. Promjenjivost brzine vjetra uvelike se preslikava na snagu koja se injektira u mrežu, te brzina i intenzitet tih promjena narušavaju kvalitetu mreže [10].
5. Zaštita - Zaštita pasivne distribucijske mreže podešena je s obzirom na smjer struje koja dolazi samo iz jednog izvora. Kvar se neutralizira proradom samo jednog zaštitnog uređaja. Ukoliko su na distribucijsku mrežu priključene vjetroelektrane, može doći do uvjeta pri kojima neće doći do prorade zaštite koji su podešeni s obzirom na samo jedan smjer napajanja kvara. Shema automatskog ponovnog uključivanja voda pogođenog kvarom od velikog je značenja za neprekidnost opskrbe potrošača električnom energijom. Ukoliko se takva shema primjenjuje na vodu koji je u bliskom spoju s vjetroelektranom, moguća je pojava velikih oštećenja zbog loše sinkronizacije [10].
6. Pouzdanost i raspoloživost - Pouzdanost povrata investicije predstavlja osnovni motiv investiranja u distribuiranu proizvodnju energije. Distribuirani generatori imaju znatno veći utjecaj na pouzdanost opskrbe krajnjeg potrošača nego na pouzdanost elektroprivrede. Međutim, ponekad i elektroprivreda ima koristi od distribuirane

proizvodnje, naročito u slučajevima kada zbog njezine primjene dolazi do odgađanja investicija u mreži te do ublažavanja vrlo visokih cijena električne energije [10].

Neke od tehničkih prepreka koje se mogu lokalno pojaviti unutar navedenih problema su: neodgovarajuće termičko dimenzioniranje opreme, previsoka razina struja kratkog spoja, neodgovarajuće postavke transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom, nestabilnost generatora, izloženost potrošača povećanom iznosu napona u stacionarnom stanju, narušavanje kvalitete isporučene električne energije, narušavanje sustava reda u sustavu zaštite [10].

Projektiranje distribucijskih mreža slijedi dvije temeljne ideje: isporuka električne energije potrošačima uz prihvatljivu kvalitetu napajanja u normalnim uvjetima pogona te zaštita integriteta sustava u slučaju da je dio mreže u stanju kvara. Obzirom na razdjelnu ulogu distribucijske mreže, potrebno je provesti tehničke uvjete napajanja ostalih potrošača nakon priključenja vjetroelektrana. U većini slučajeva distribucijska mreža nije projektirana za smještaj generatora. Ukoliko veličina izgradnje vjetroelektrane predstavlja značajan dio mrežne moći, njezino priključenje ima značajan utjecaj na karakteristike mreže. Mreža može ograničiti evakuaciju snage iz vjetroelektrane te je stoga potrebno analizirati vjetroelektranu kao komponentu sustava. Neophodno je provesti studijsku analizu kako bi se procijenila potreba za eventualnim izvođenjem pojačanja u mreži nakon priključenja vjetroelektrane. Studijska analiza obuhvaća proračun tokova snaga, proračun kratkog spoja te proračun stabilnosti [10].

Proračun tokova snaga koristi se u svrhu provjere normalnih pogonskih stanja elektroenergetske mreže. Uz zadane snage proizvodnje i opterećenja u sustavu, proračun tokova snaga rezultira iznosom napona u svim čvorištima elektroenergetskog sustava. Uz poznate napone po iznosu i kutu, računaju se tokovi snaga kroz sve elemente mreže. Proračun tokova snaga se zapravo koristi u svrhu određivanja stanja u mreži pri različitim iznosima snage opterećenja te različitim angažmanima proizvodnih jedinica [10].

Proračun kratkog spoja koristi se u svrhu prepoznavanja iznosa struje kvara pri različitim konfiguracijama mreže i mjestima kvara. Obzirom da pogreške pri otkrivanju kvara čine neprihvatljiv sigurnosni rizik, potrebno je projektirati distribucijski sustav tako da je struja kvara dovoljno velikog iznosa te da može biti prepoznata u svim uvjetima pogona. Također,



potrebno je razlikovati simetrične i nesimetrične kratke spojeve. Simetrični kratki spojevi obuhvaćaju sve tri faze na sličan način te kod njih ne dolazi do izmjene simetrije između napona i struja. Nesimetrični kratki spojevi uzrokuju nesimetričnost u mreži i zahtijevaju složenu analizu [10].

Proračun stabilnosti dinamičkog sustava oslanja se na diferencijalne jednačbe, a ne samo na algebarske jednačbe kao u stacionarnom stanju. Diferencijalne jednačbe se koriste u svrhu provjere sinkronosti pogona rotirajućih strojeva nakon poremećaja. Ukoliko je sinkronizam održan sustav se smatra stabilnim, a u protivnom nestabilnim. Svrha proračuna stabilnosti nalazi se u procjeni sposobnosti sustava da izdrži najteže opterećenje. Također, koristi se i pri određivanju ograničenja pogona elektroenergetskog sustava [10].

Navedene vrste proračuna koriste se za procjenu ozbiljnosti tehničkih problema koji se mogu pojaviti nakon priključenja vjetroelektrane na mrežu. Također, može doći do problema u vidu: promjenjivosti napona u mreži, povećanja razine struje kratkog spoja, kvalitete isporučene električne energije, zaštite, stabilnosti, pogona mreže te ekonomičnosti [10].

1. Promjenjivost napona u mreži - U svakom distribucijskom sustavu jasno je definirana obveza napajanja potrošača uz održavanje napona unutar dozvoljenih granica, te ovaj način često određuje troškove i način projektiranja distribucijske mreže. Razine distribucijskog napona različito su definirane u različitim zemljama, ali se u osnovi vode principom pogona radijalnog napajanja. Za regulaciju napona se koristi distribucijski transformator s promjenjivim prijenosnim omjerom i na taj način se u stanju maksimalnog opterećenja osigurava napajanje najudaljenijih potrošača uz prihvatljiv napon. U stanju minimalnog opterećenja, napon svih potrošača nalazi se neposredno ispod najviše dozvoljene vrijednosti napona. Najteža situacija javlja se kada je snaga opterećenja najmanja, a izlazna snaga lokalnog generatora teče unatrag prema pojnoj točki distribucijskog sustava. Izraz za povišenje napona u slabo opterećenoj mreži zbog priključenja generatora glasi:

$$\Delta V = \frac{(P \times R + Q \times X)}{V} \text{ (p.u.)} \quad (3)$$

gdje P i Q označavaju izlaznu djelatnu i jalovu snagu generatora, R i X djelatni otpor te induktivnu reaktanciju te V nazivni napon voda. Povišenje napona moguće je ograničiti reverziranjem toka jalove snage Q korištenjem asinkronog generatora ili

poduzbuđenog sinkronog generatora u kapacitivnom pogonu. Asinkroni generator najčešći je izbor u vjetroelektranama. Njegovo korištenje može biti učinkovit način ograničavanja povišenja napona u srednjenaponskim mrežama koje uglavnom imaju viši omjer  $X/R$ . Mali generatori se većinom priključuju na niskonaponsku mrežu dok točka priključenja većih generatora treba biti bilo na NN sabirnicama SN/NN transformatora ili za veće vjetroelektrane izravno SN ili VN mreži [10].

2. Povećanje razine kvara u mreži - U vjetroelektranama se za proizvodnju električne energije koriste se asinkroni i sinkroni generatori koji povećavaju razinu kvara u distribucijskom sustavu. U urbanim područjima gdje je postojeća razina kvara približno jednaka nazivnoj dimenzioniranosti rasklopne opreme, povećanje razine kvara može ugroziti priključenje novih generatora. Povećanje nazivne dimenzioniranosti rasklopne opreme može se pokazati vrlo skupim rješenjem, a ponegdje se očekuje da novi proizvodni objekti snose sami nove troškove. Doprinos novog generatora razini kvara smanjuje se uvođenjem impedancije između generatora i mreže. Impedanciju čine transformator ili prigušnica, ali se njihovom ugradnjom stvara trošak zbog povećanih gubitaka, te se povećavaju i promjene napona generatora [10].
3. Kvaliteta napajanja - Dva aspekta kvalitete napajanja smatraju se značajnima pri isporuci električne energije: prijelazne promjene i harmonička izobličenost mrežnog napona. Pri određenim okolnostima, vjetroelektrana može smanjiti kvalitetu napona kod ostalih korisnika distribucijske mreže. Vjetroelektrana uzrokuje prijelazne promjene napona u mreži tijekom normalnog pogona te može doći do pojave relativno velikih promjena iznosa struje prilikom uklapanja i isklapanja. Iznos struje u prijelaznim stanjima ograničava se pažljivim projektiranjem vjetroelektrane. Ukoliko se na slabu mrežu priključuje samo jedan generator, umjesto povišenja napona u stacionarnom stanju ograničavajućim faktorom postaju prijelazne promjene napona. Sinkroni generatori mogu se uključiti u pogon uz zanemarivo remećenje okolne mreže ako se sinkronizacija izvodi korektno. Za ograničavanje početne struje magnetiziranja asinkronih generatora koriste se tiristorskiupuštači u antiparalelnom spoju. Međutim, isključenje nazivno opterećenog generatora iz pogona može dovesti do značajnijih propada napona. Kod vjetroelektrana sa stalnom brzinom vrtnje javljaju se cikličke promjene izlazne struje generatora koje stvaraju flikere ako generatori nisu

odgovarajuće regulirani. Uvođenjem lokalne proizvodnje nekog drugog oblika podiže se razina kvara u mreži. Nakon priključenja generatora na mrežu poremećaji koje stvaraju potrošači ili udaljeni kvarovi stvaraju manje promjene napona i na taj način poboljšavaju kvalitetu napajanja. Nekvalitetnim projektiranjem elektroničkog sučelja vjetroelektrane prema mreži dolazi do injektiranja harmoničkih struja koje mogu uzrokovati neprihvatljivu izobličenost napona u mreži. Izravno priključeni generatori snižavaju harmoničku impedanciju distribucijske mreže te se time smanjuje harmonički napon na račun povećavanja harmoničke struje u elektrani. Na taj se način smanjuje mogućnost nastanka problema vezanih uz harmoničku rezonanciju. To je posebice značajno ako se koriste kondenzatorske baterije za popravljavanje faktora snage i kompenzaciju jalove snage asinkronog generatora u vjetroelektrani. Sličan utjecaj javlja se pri simetriranju napona u ruralnim srednjenaponskim sustavima koje se izvodi korištenjem asinkronog generatora. Asinkroni generator ima vrlo visoku impedanciju obzirom na nesimetrične napone i nastoji povući iz mreže velike iznose nesimetričnih struja. Time se simetriraju naponi u mreži na račun povećanih struja u generatoru uz posljedicu povećanog zagrijavanja [10].

4. Zaštita - Postoji više aspekata zaštite generatora priključenog na distribucijsku mrežu:
- zaštita opreme od unutarnjih kvarova,
  - zaštita distribucijske mreže koja je u kvaru od struje kvara koja dolazi iz generatora,
  - zaštita od gubitka pojne točke, odnosno od otočnog pogona,
  - utjecaj generatora na postojeću zaštitu u distribucijskom sustavu.

Zaštita generatora od unutarnjih kvarova dobro je poznata. Struja kvara koja teče iz distribucijske mreže koristi se za otkrivanje kvara. Metodologija koja se koristi u zaštiti bilo kojeg velikog motora prihvatljiva je i u ovom slučaju. U ruralnim područjima, opći problem predstavlja osiguranje dovoljnog iznosa struje kvara iz mreže koji je potreban za brzu proradu releja. Zaštita distribucijske mreže koja je u stanju kvara od struje kvara koja dolazi iz generatora često predstavlja znatno težu zadaću. Asinkroni generatori i mali sinkroni generatori ponekad ne mogu napajati mjesto trofaznog kratkog spoja održivom strujom kvara. Stoga je ponekad neophodno osloniti se na zaštitu pri otklanjanju kvara na elementima distribucijske mreže i izolirati elektranu. U elektrani tada dolazi do prorade nadnaponske ili

podnaponske zaštite, nadfrekvencijske ili podfrekvencijske zaštite ili zaštite od gubitka pojne točke. Ova tehnika sekvencijalne prorade nije uobičajena, ali je neophodna ako generatori nisu u mogućnosti osigurati odgovarajuću struju kvara za primjenu neke od konvencionalnih zaštita. Zaštita o gubitka pojne točke ili otočnog pogona često se primjenjuje u sustavima gdje se upotrebljava automatsko ponovno uključenje elemenata distribucijske mreže. Zbog niza tehničkih i administrativnih razloga, otočni pogon vjetroelektrane u dijelu distribucijskog sustava odvojenog od glavnog sustava općenito se smatra neprihvatljivim. Zato se po otkrivanju uvjeta otočnog pogona generatora i okolne mreže inicira isključenje generatora. Iako se koristi veći broj suvremenih tehnika poput ROCOF frekvencijskih releja i pomaka vektora napona, ova je zaštita podložna krivoj proradi. Do krive prorade dolazi ukoliko su početne vrijednosti podešene vrlo osjetljivo kako bi se što ranije otkrili uvjeti otočnog pogona. Uzemljenje zvjezdista generatora predstavlja aspekt koji je povezan s pogonom distribucijskog sustava. U nekim se zemljama smatra neprihvatljivim voditi pogon neuzemljenog sustava. Stoga je potrebna posebna pozornost u slučaju kada je zvjezdšte uzemljeno. Konačno, generator može utjecati na pogon postojeće distribucijske mreže uzrokujući tokove struja kvara koji nisu očekivani u vrijeme izvornog projektiranja zaštite. Doprinos generatora u periodu kvara može podržati napon u mreži i dovesti do izostanka prorade releja [10]

5. Stabilnost - Ukoliko se kvar pojavi negdje u distribucijskoj mreži i uzrokuje propad napona zbog kojeg dođe do isključenja generatora, tada sve što je izgubljeno jest kratki period proizvodnje. Generator se ubrzava i biva isključen proradom unutarnje zaštite. Sustav nadzora pogona generatora nakon toga čeka ponovo uspostavljanje normalnih uvjeta u mreži i automatski ponovo pokreće generator. Ukoliko je generator značajan u pružanju podrške sustavu tada stabilnost poprima znatno veće značenje. U slučaju velikih poremećaja u sustavu moguća je kriva prorada generatora te može doći do isključenja većeg broja lokalnih generatora. Nakon ponovnog uključanja elementa mreže, moguć je nastanak situacije u kojoj tereti zahtijevaju napajanje prije nego što su generatori ponovo uključeni. S tim se problemom najviše suočavaju operatori sustava proizvodnje i prijenosa, a u sustavu distribucije rijetko dolazi do takvih pojava. Tijekom prijelazne nestabilnosti dolazi do klizanja polova kod sinkronog generatora. Kod asinkronih generatora dolazi do ubrzavanja što uzrokuje povlačenje velikog iznosa jalove struje zbog koje se snižava napon u mreži i kreće prema

nestabilnosti napona. Granica stabilnosti asinkronog generatora u stacionarnom stanju također može postati ograničavajući faktor njegove primjene u vrlo slabim distribucijskim mrežama [10].

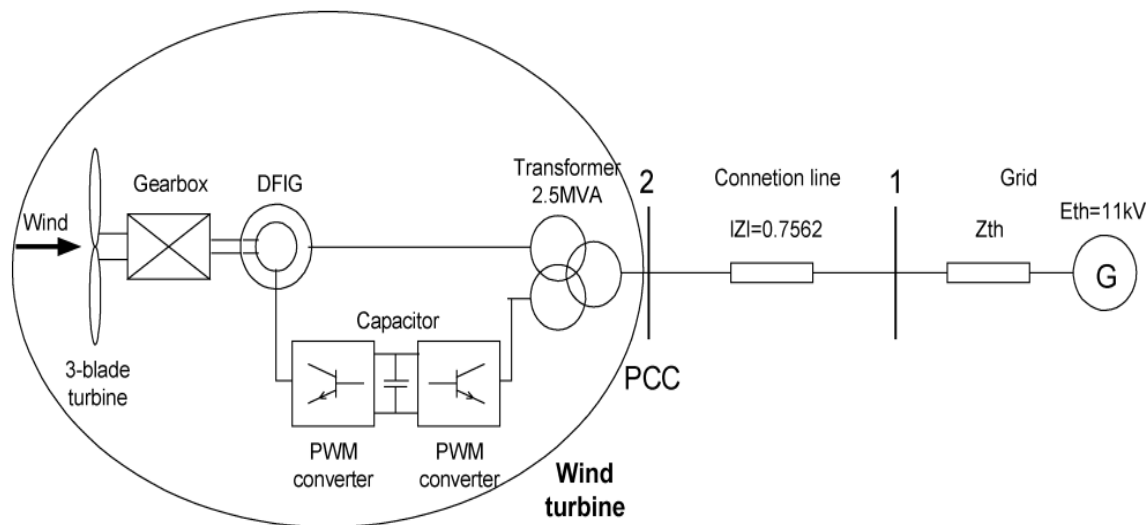
6. Pogon mreže - Značajna posljedica pogona generatora unutar distribucijske mreže jest da su elementi mreže sada napajani iz većeg broja točaka. Javlja se potreba za sigurnosnim izoliranjem i uzemljivanjem prije poduzimanja bilo kakvih djelatnosti na opremi. Također, moguća je pojava poteškoća prilikom pribavljanja odobrenja za isključenje elemenata mreže u svrhu redovitog održavanja. Time se smanjuje prilagodljivost pri izvođenju radova u distribucijskoj mreži na koju je priključen generator [10].
  
7. Ekonomičnost - Aspekti tehničkog utjecaja lokalnih generatora na distribucijski sustav dobro su poznati, a proračuni i tehnike projektiranja kvalitetno postavljeni. Jedini novi aspekt koji se pri tome javlja vezan je uz visok stupanj penetracije te priključenje velikih vjetroelektrana na slabu mrežu. Ekonomski utjecaj generatora na distribucijsku mrežu se tek odnedavno ozbiljnije razmatra. Generator stvara promjenu tokova snaga u distribucijskoj mreži te time uzrokuje promjenu gubitaka u mreži. Ako je mali generator smješten u blizini velikog tereta tada će gubici u mreži biti smanjeni obzirom da teret može biti napajan djelatnom i jalovom snagom iz obližnjeg generatora. Ako je veliki generator smješten daleko od tereta tada je vjerojatnija pojava povećanja gubitaka u distribucijskoj mreži. Daljnje komplikacije javljaju se zbog promjene iznosa električne energije s povećanjem opterećenja u mreži. Postoji povezanost između velikog opterećenja u distribucijskoj mreži i korištenja skupih proizvodnih izvora. Stoga bilo koji lokalni generator koji može biti u pogonu tijekom određenog perioda i koji može smanjiti gubitke u distribucijskoj mreži, značajno utječe na troškove pogona. U današnje vrijeme, distribuirana proizvodnja ne utječe na regulaciju napona u mreži [10]

## **5. PRAKTIČNI ZADATAK**

### **5.1. PROUČAVANJE FLIKERA NA PROMJENJIVOJ BRZINI VJETROTURBINE SA DVOSTRUKO NAPAJANIM INDUKCIJSKIM GENERATOROM**

U posljednjih nekoliko godina proizvodnja energije iz vjetroelektrana doživjela je vrlo brz razvoj u cijelom svijetu. Kako se integracija vjetroelektrana u mrežu brzo povećava, utjecaj vjetroagregata na kvalitetu električne energije postaje važno pitanje. Jedan od važnih aspekata kvalitete električne energije je treperenje (fliker). Fliker je definiran kao dojam neujednačenosti vizualnog osjeta uzrokovanog svjetlosnim stimulansom, gdje rasvjeta ili spektralna distribucija varira s vremenom, što može uzrokovati velike smetnje kod potrošača. Štoviše, treperenje može postati ograničavajući čimbenik za integraciju vjetroturbina u slabe mreže, pa čak i na relativno snažne mreže gdje su visoke razine vlage. Fliker je induciran fluktuacijama napona, koje su uzrokovane promjenama opterećenja u mreži. Vjetroturbine povezane na mrežu mogu imati znatne oscilacije u izlaznoj snazi, ovisno o tehnologiji proizvodnje energije vjetra. Postoje brojni čimbenici koji utječu na treperenje turbina spojenih na mrežu tijekom kontinuiranog rada, kao što su karakteristike vjetra (npr. prosječna brzina vjetra, intenzitet turbulencije) i mrežni uvjeti (npr. kapacitet kratkog spoja, kut impedancije mreže, tip opterećenja). Također i tip vjetragregata utječe na flikere [12]. Turbulencije vjetra se izravno prenose kao oscilacije predane snage u mrežu kod vjetroagregata sa stalnom brzinom vrtnje. Kod vjetroagregata koje koriste energetske pretvarače (vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje) turbulencije vjetra se ne prenose izravno u mrežu kao oscilacije proizvedene snage. Razlog leži u činjenici da se brzina vrtnje rotora polako mijenja pa se rotor ponaša kao svojevrsan zamašnjak u kojemu se privremeno pohranjuje energija vjetra. Osim toga energetski pretvarač omogućava i kontrolu jalove snage da bi se smanjile fluktuacije iznosa napona [13].

U ovom je radu predstavljen simulacijski model turbine s promjenjivom brzinom s dvostruko napajanim indukcijskim generatorom razvijenim u PSCAD/EMTDC. Analizirani su čimbenici koji utječu na treperenje, kao što su karakteristike vjetra (srednja brzina, intenzitet turbulencije) i uvjeti mreže (kapacitet kratkog spoja, kut nagiba mreže).



**Slika 5.1.** Načelni prikaz izvedbe vjetroagregata s dvostruko napajanim generatorom s povezivanjem na mrežu

Izvedba vjetroagregata s dvostrano napajanim asinkronim generatorom (DFIG) je jedna od najčešće korištenih izvedbi vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje. Kod ove izvedbe se koristi klizno-kolutni asinkroni generator koji je preko mjenjačke kutije mehanički povezan s elisama. Stator asinkronog generatora je priključen izravno na mrežu, dok se rotor izvodi s namotima i klizno-kolutnim prstenovima preko kojih je rotor posredno preko energetskog pretvarača priključen na mrežu. Energetski pretvarač direktno djeluje na struju rotora, pa je time omogućena kontrola izlazne radne i jalove snage vjetroagregata. Zato nije potrebna kompenzacija jalove snage (nema kondenzatorske baterije, a samim time ni problema sa sklapanjem kondenzatorske baterije). Ova izvedba vjetroagregata ima mogućnost rada u području podsinkrone i nadsinkrone brzine vrtnje u određenim granicama (tipično 0,7 do 1,2 p.u.). Zbog mogućnosti rada u širokom rasponu brzina oko sinkrone brzine naleti vjetra se ne prenose izravno u mrežu. Tada se rotor ponaša kao privremeni spremnik energije. Ova značajka smanjuje fluktuacije napona i snage koja se predaje u mrežu pa se samim time i smanjuju vrijednosti emisija flikera u mrežu. Snaga energetskog pretvarača iznosi 20-30% nazivne snage vjetroagregata pa je stoga jeftiniji i njegovi gubici su manji nego kod izvedbe kada se generator priključuje na mrežu preko energetskog pretvarača (sinkroni generator, kavezni asinkroni generator) [13].

Slučaj simuliran u ovoj studiji prikazan je na slici 5.1. Na slici možemo vidjeti tipičnu situaciju gdje je vjetroagregat s dvostruko napajanim indukcijskim generatorom predstavljen kao jedan stroj koji je integriran u vanjski elektroenergetski sustav, predstavljen kao stalni izvor napona koji je povezan u seriju sa Theveninovom ekvivalentnom impedancijom. Vanjski elektroenergetski sustav je povezan sa sabirnicom 2 preko linije 1-2, gdje je impedancija iznosa 0,7562  $\Omega$ . Iznos Theveninove ekvivalentne impedancije može se pronaći pomoću nazivnog napona i kapaciteta kratkog spoja. Vjetroturbina pogoni 2 MW dvostruko napajani indukcijski generator koji je povezan s pretvaračem PWM izvora napona u krugu rotora. Vjetroturbina generira aktivnu snagu od 2 MW tijekom rada nazivnog stanja, dok se izlazna jalova snaga vjetroagregata normalno kontrolira kao nula kako bi se zadržao konstantan faktor snage.

**Tabela 5.1.** Osnovni parametri za simulaciju

Parametar	Iznos
Srednja brzina vjetra ( $v$ )	9 m/s
Intenzitet turbulencije ( $I_n$ )	0,1
Omjer kratkog spoja (SCR)	20
Kut nagiba mreže ( $\Psi_k$ )	50 deg

Prvo se razmatra osnovni slučaj s parametrima navedenim u tablici 5.1., gdje su intenzitet turbulencije, omjer kratkog spoja te kut nagiba mreže definirani kao:

$$I_n = \frac{\Delta v}{v}$$

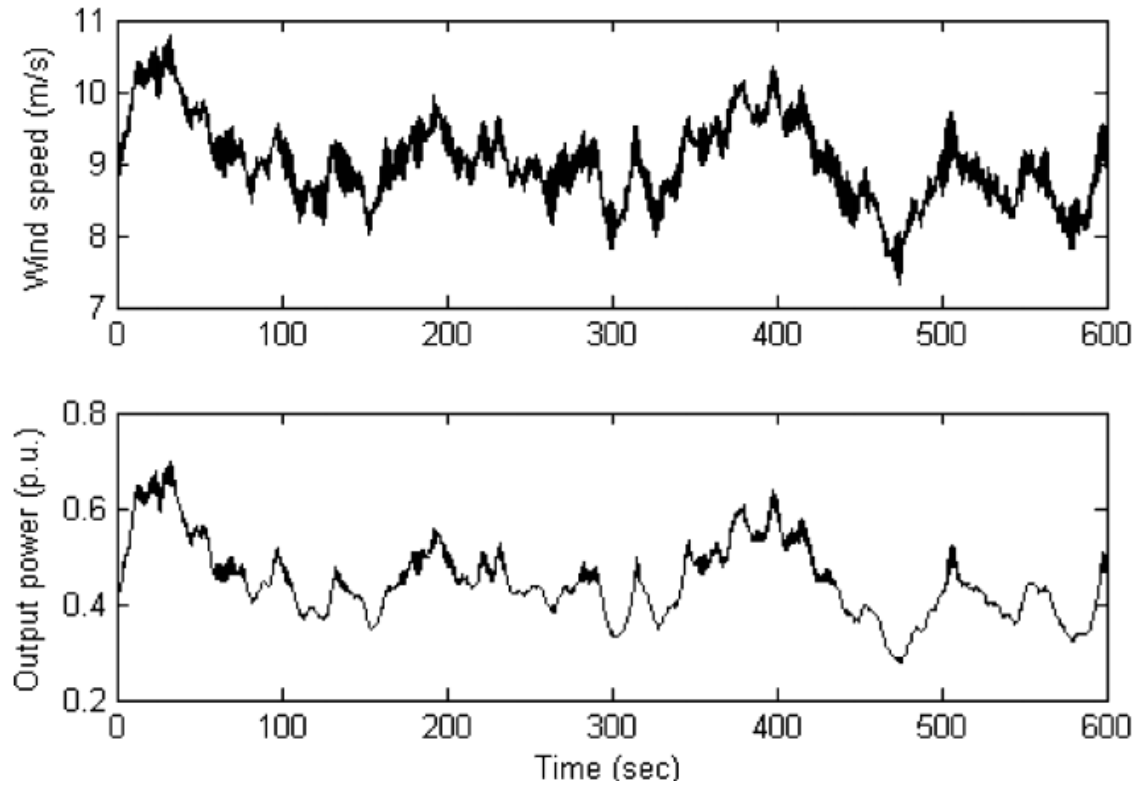
$$SCR = \frac{S_k}{S_n}$$

$$\psi_k = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (4)$$

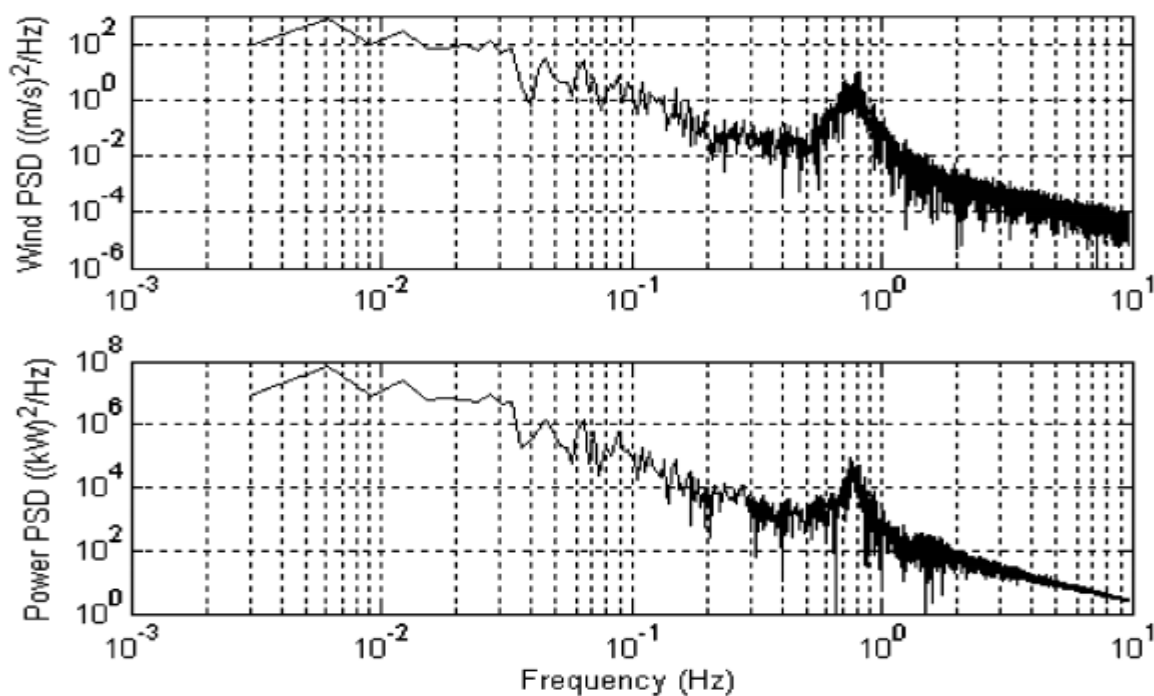


gdje je  $\Delta v$  standardna devijacija brzine vjetra,  $v$  prosječna brzina vjetra,  $S_k$  snaga kratkog spoja mreže,  $S_n$  nazivna snaga vjetroturbine,  $X$  i  $R$  otpor i reaktancija mreže.

Na slikama 5.2. i 5.3. prikazani su ovisnosti brzine vjetra i izlazne snage o vremenu i frekvenciji u osnovnom slučaju studije.



**Slika 5.2.** *Ekvivalentna brzina vjetra i izlazna snaga vjetroturbine u ovisnosti o vremenu (preuzeto iz [12])*



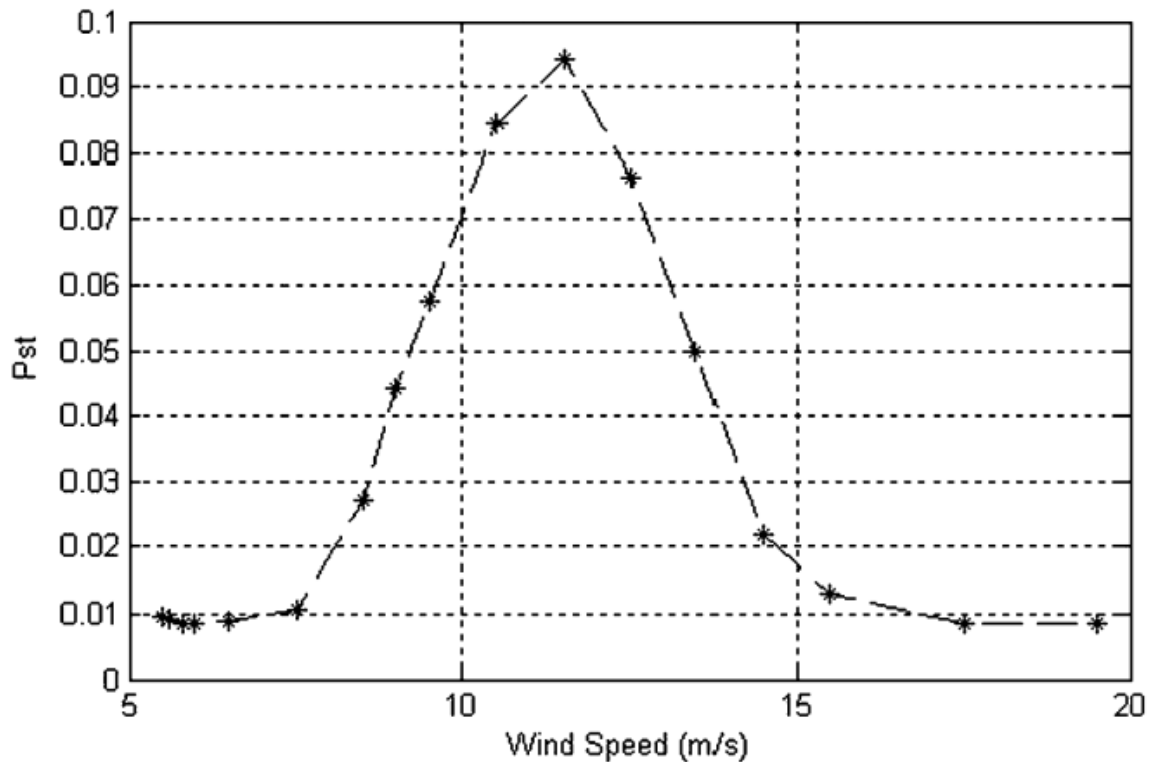
**Slika 5.3.** *Ekvivalentna brzina vjetra i izlazna snaga vjetroturbine u ovisnosti o frekvenciji (preuzeto iz [12])*

Vjetroturbina može raditi u širokom rasponu brzina. U osnovnom slučaju, brzina turbine varira oko 16 okretaja u minuti (rpm), što odgovara frekvenciji od 0,8 Hz. Frekvencijska komponenta se prenosi na izlaznu snagu vjetroturbine, što će izazvati fluktuaciju napona i treperenje u mreži. Iznos treperenja u osnovnom slučaju iznosi  $P_{st}=0,044$ , što predstavlja razinu treperenja u slučaju jedne vjetroturbine povezane s jakom mrežom. Preporuča se da se u distribucijskim mrežama emisija treperenja od  $P_{st}=0,35$  smatra prihvatljiva za instalacije vjetroturbina. Za vjetroturbine povezane s prijenosnim mrežama, doprinos treperenja vjetroatregata u priključnoj točki mora biti ograničen na ispod  $P_{st}=0,3$ . Vidljivo je da je razina treperenja u osnovnom slučaju daleko ispod zadanih granica. Međutim, za više vjetroturbina povezanih s relativno slabom mrežom razina treperenja može biti značajno različita [12].

Na temelju osnovnog slučaja proučava se ovisnost emisije treperenja na sljedeće čimbenike:

srednju brzinu vjetra, iznos turbulencija, omjer kratkog spoja te kut mreže.

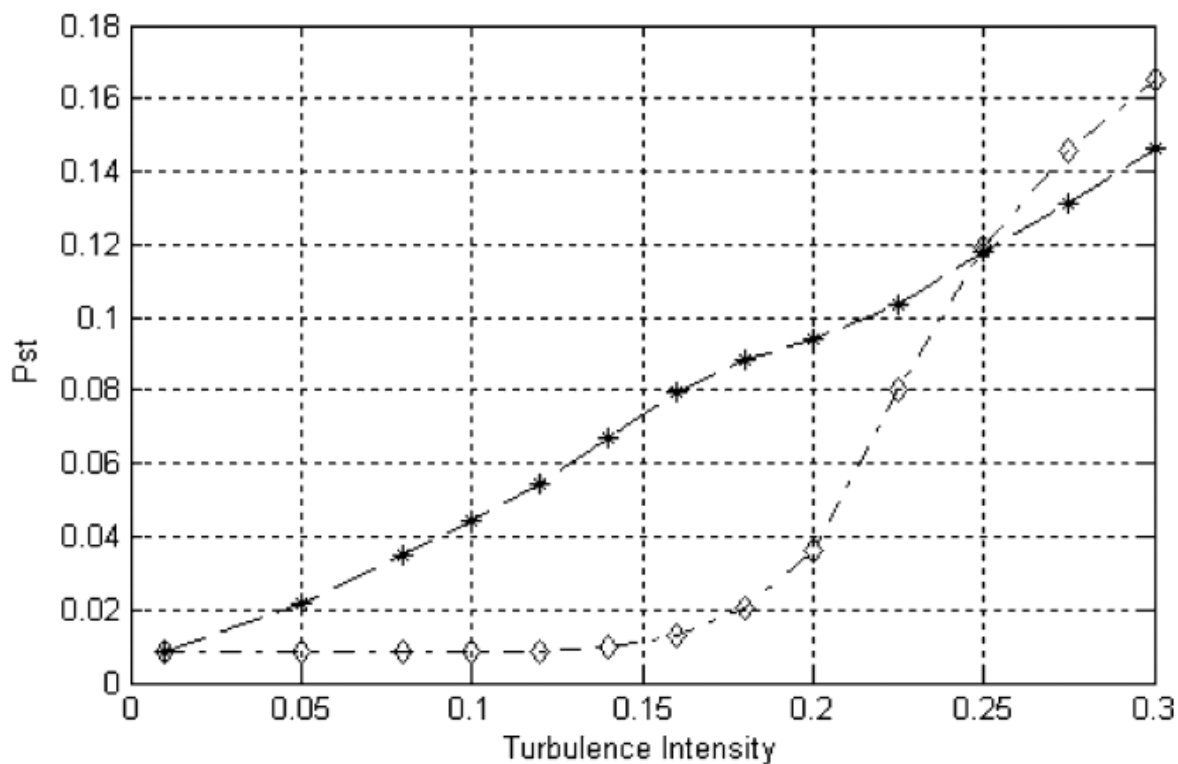
Za turbinu s promjenjivom brzinom rotora s dvostruko napajanim indukcijskim generatorom, varijacija kratkotrajnog treperenja  $P_{st}$  prikazana je u ovisnosti s prosječnom brzinom vjetra (slika 5.4.).



**Slika 5.4.** Varijacija kratkotrajnog treperenja u ovisnosti o prosječnoj brzini vrtnje pri osnovnim parametrima (preuzeto iz [12])

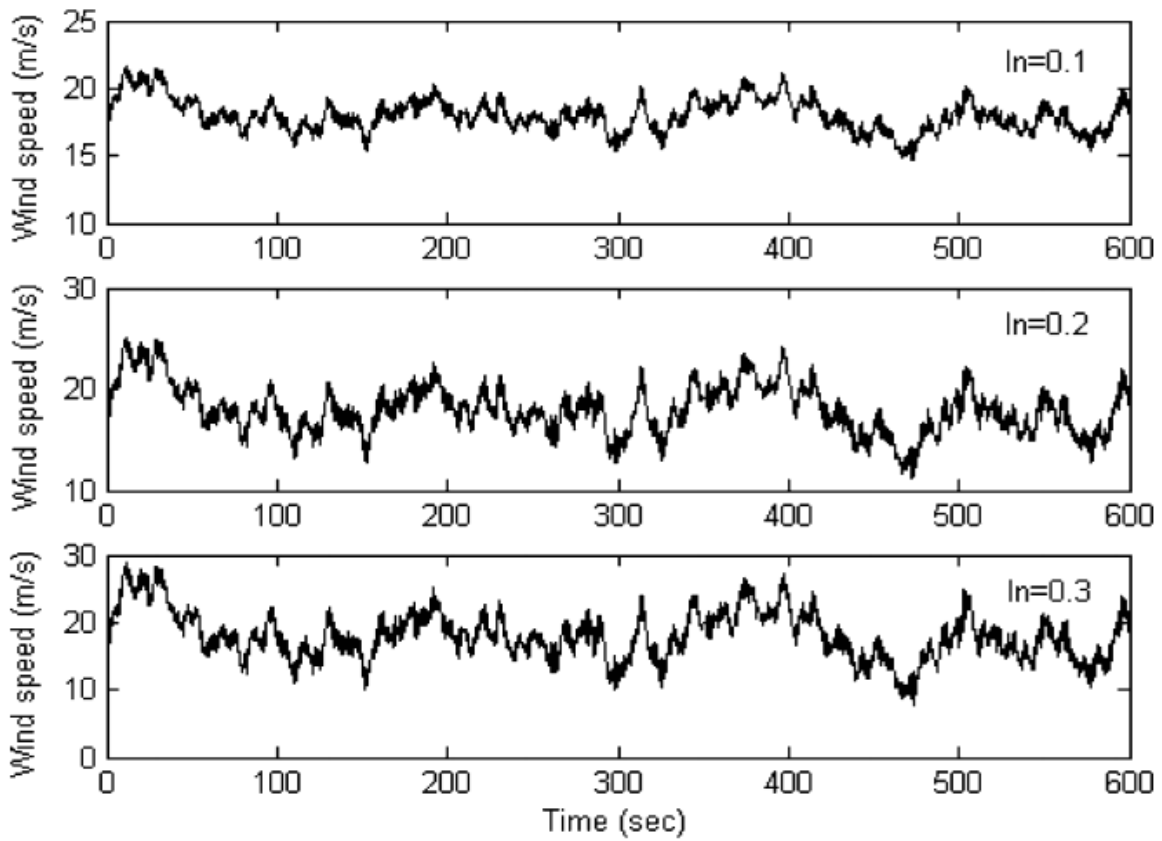
Kao što je prikazano na slici, kod malih brzina vjetra (manje od 7,5 m/s), treperenje je vrlo nisko zbog male izlazne snage. Zatim se vrijednost treperenja povećava (približno linearnom odnosu) prema srednjoj brzini vjetra zbog povećanja turbulencija u vjetru sve dok ne dosegne 11,5 m/s. Za veće brzine vjetra, gdje turbina doseže nazivnu snagu, razina treperenja se smanjuje. Razlog je taj što kombinacija modula kutnog nagiba i radnje s promjenom brzine može znatno neutralizirati fluktuacije inducirane turbulencijom koje se mogu reflektirati na izlaznu snagu vjetroturbine, Iz tog proizlazi da će rad s promjenjivom brzinom učinkovito uravnotežiti fluktuaciju snage i time ograničiti treperenje [12].

Za turbinu s promjenjivom brzinom rotora s dvostruko napajanim indukcijskim generatorom, odnos između intenziteta turbulencije i kratkotrajnog treperenja prikazan je na slici 5.5.

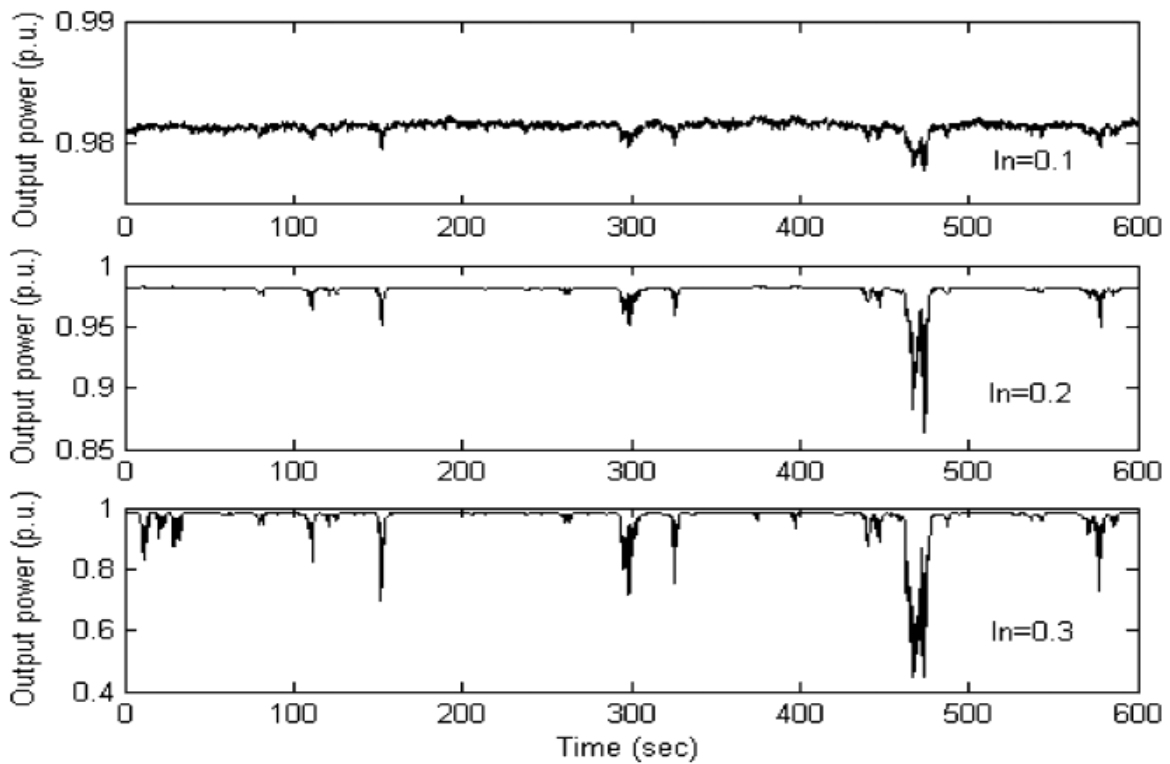


**Slika 5.5.** Ovisnost jačine treperenja  $P_{st}$  o intenzitetu turbulencije ( $v_1=9$  m/s,  $v_2=18$  m/s (isprekidano),  $SCR=20=50$ , preuzeto iz [12])

Kao što je prikazano na slici, kod niskih brzina vjetra (npr. pri brzini  $v_1$ ), karakteristika ima približno linearni odnos. Veće turbulencije u vjetru rezultiraju veće emisije treperenja. Međutim, kod velikih brzina vjetra (npr. pri brzini  $v_2$ ), gdje se vjetroturbina kontrolira kako bi se zadržala nazivna izlazna snaga, odnos između intenziteta i turbulencije je sasvim drugačiji. Kada je intenzitet turbulencije vjetra nizak, profil vjetra varira u malom rasponu koji odgovara nazivnoj izlaznoj snazi. Vrijednost treperenja je niska zbog malih oscilacija snage što je posljedica aerodinamičkog reguliranja. Kako se povećava intenzitet turbulencije, profil vjetra se značajno mijenja što rezultira velikom razlikom izlazne snage. Zbog toga emisija treperenja postaje ozbiljna. Ekvivalentne brzine vjetra i izlazne snage za različite turbulencije intenziteta prikazane su na slikama 5.6. i 5.7.

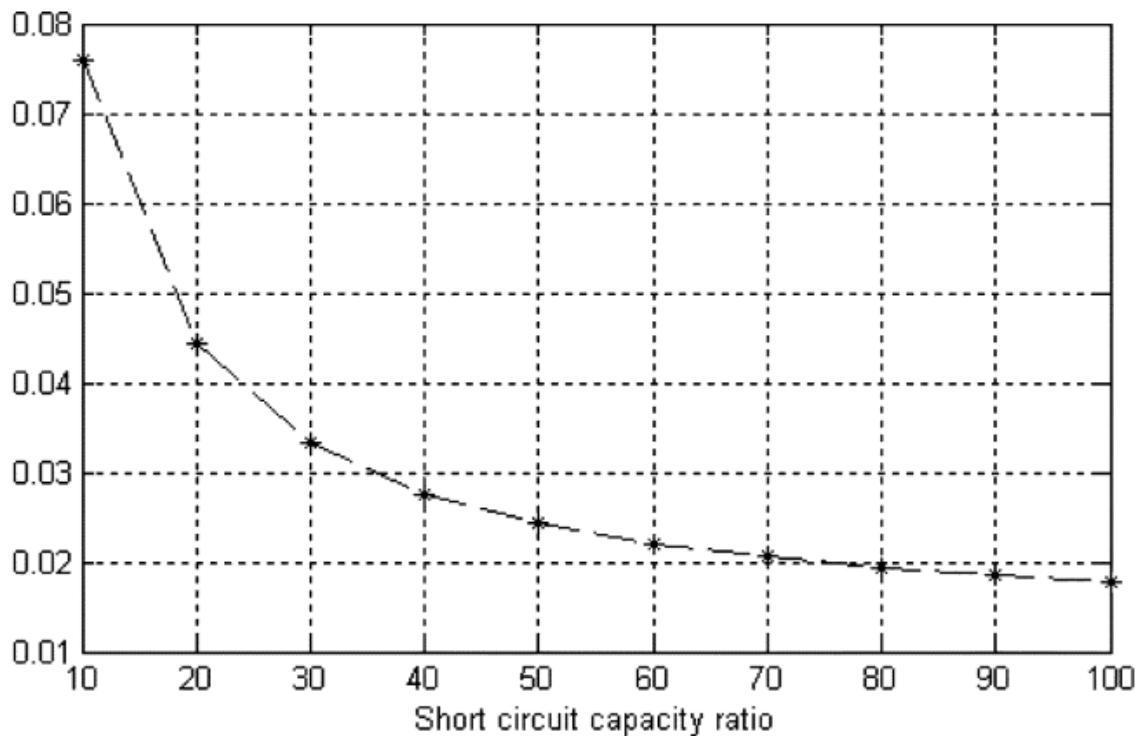


**Slika 5.6.** Brzina vjetra za različite vrijednosti intenziteta turbulencije (preuzeto iz [12])



**Slika 5.7.** Izlazna snaga za različite vrijednosti intenziteta turbulencije /preuzeto iz [12])

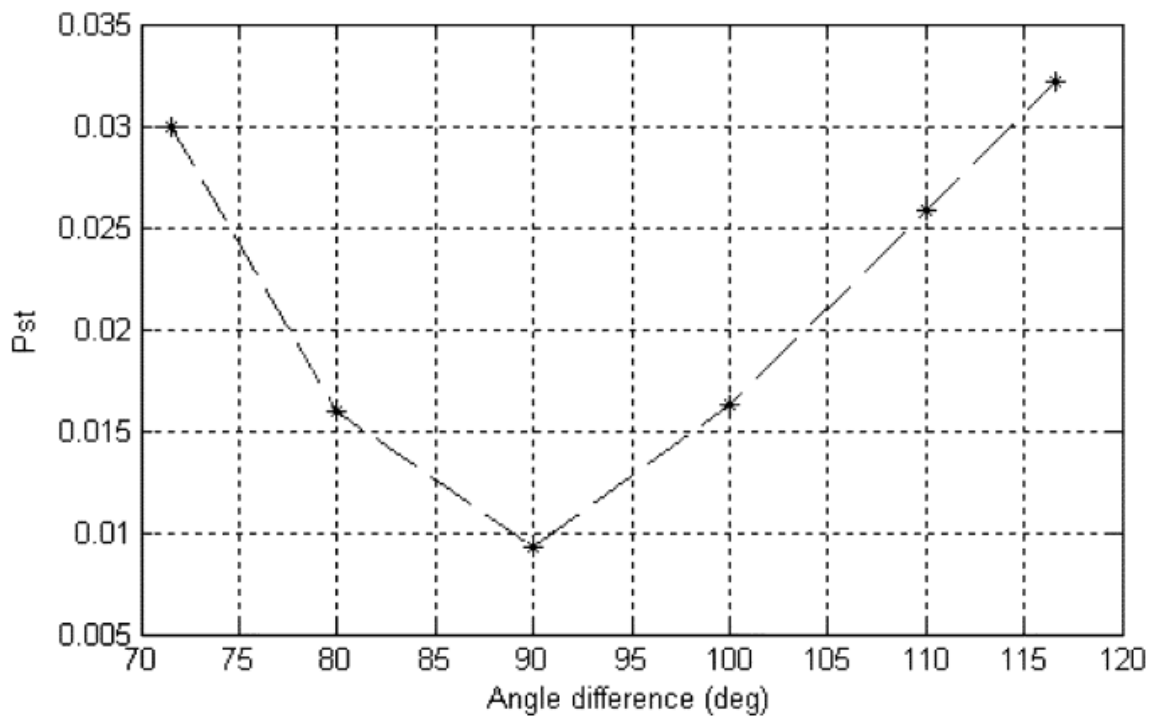
Slika 5.8. prikazuje obrnuto proporcionalni odnos između kratkotrajne jačine treperenja i omjera kratkog spoja. Što je veći omjer kapaciteta kratkog spoja, to je jača mreža u kojoj je povezana vjetroturbina. Kao što se i očekivalo, vjetroturbina bi proizvodila veće treperenje u slabim mrežama nego u jačim mrežama.



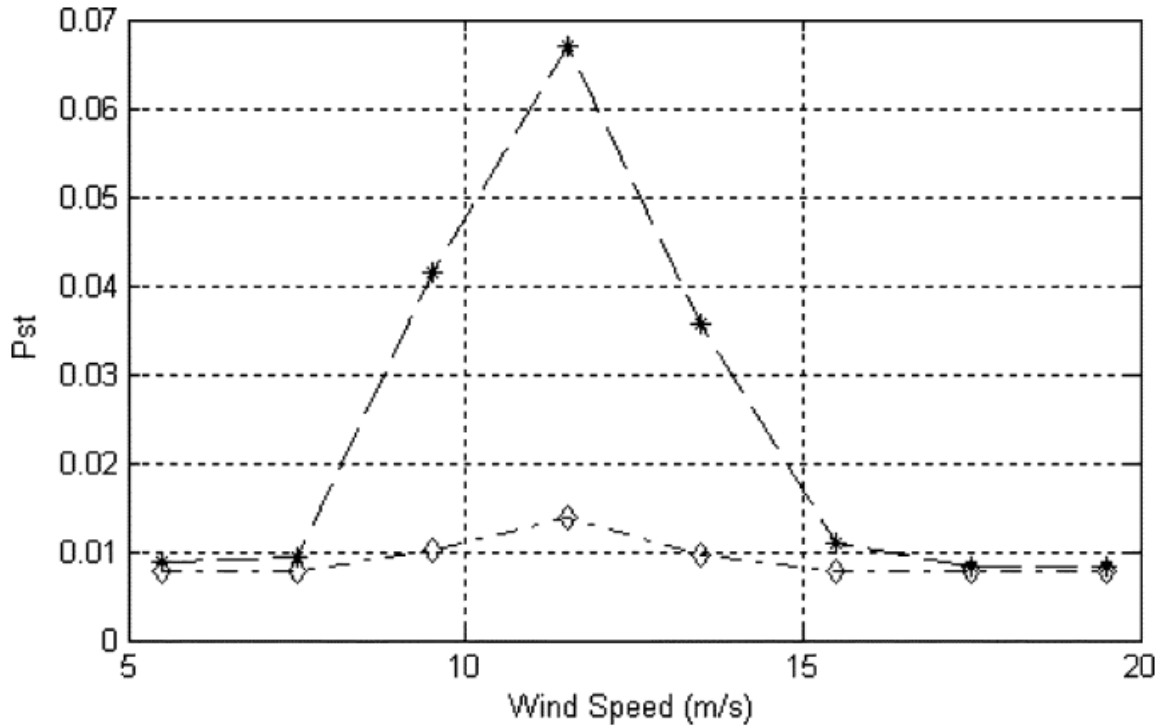
**Slika 5.8.** *Kratkotrajna jačina treperenja u ovisnosti o kapacitetu kratkog spoja (preuzeto iz [12])*

Također, flikere možemo ublažiti pomoću upravljanja reaktivnom snagom. Kao što je već spomenuto, promjenjiva brzina turbine s dvostruko napajanim indukcijskim generatorom sposobna je samostalno kontrolirati izlaznu aktivnu i jalovu snagu. Normalno, izlazna jalova snaga vjetroagregata kontrolira se kao nula kako bi zadržala jedinstveni faktor snage. Moguće je da se reaktivna snaga izlazne turbine regulira kako bi mogla varirati s izlaznom aktivnom snagom pomoću regulatora pretvarača izvora napona PWM (eng. pulse-width modulation) na mreži, čime se može mijenjati kut faktora snage. Na ovaj način, pretvarač izvora napona PWM na strani mreže se ponaša jednako kao i kod STATCOM-a (eng. static synchronous compensator) na terminalu vjetroagregata. Razlika je u tome što je pretvarač mreže već prisutan bez dodatnih troškova u slučaju dvostruko napajanih indukcijskih generatora. Za željeni kut faktora snage, referentna vrijednost izlazne reaktivne snage može se izračunati s

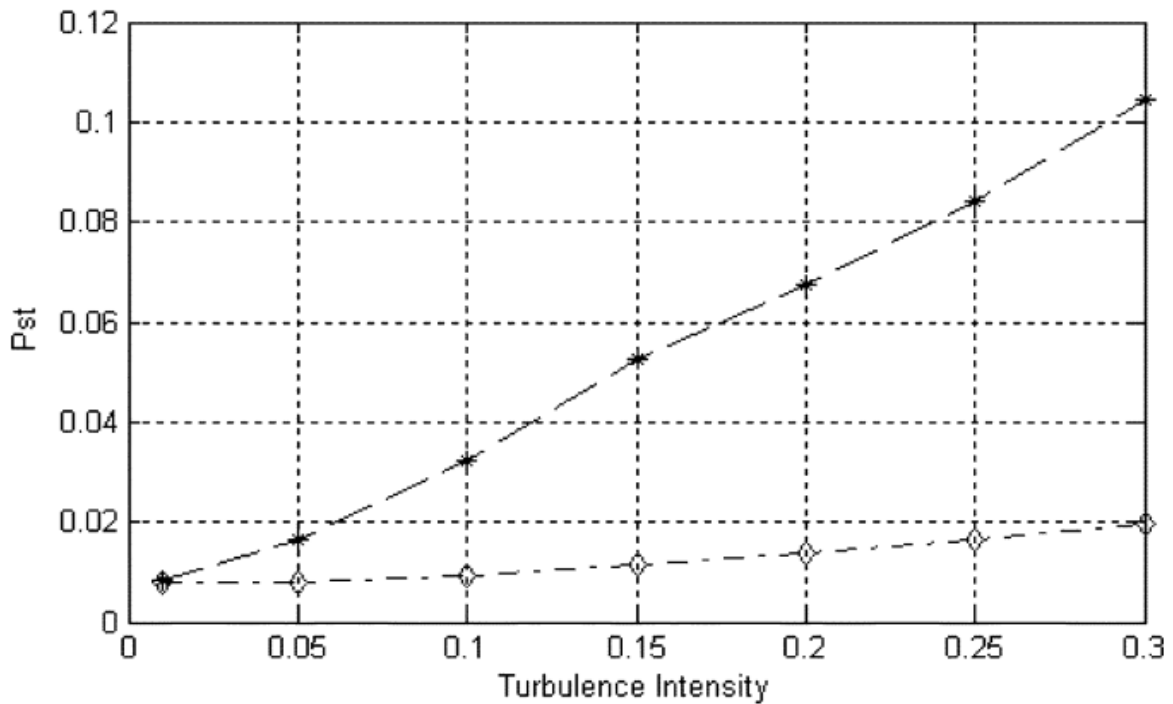
obzirom na izmjerenu izlaznu aktivnu snagu. Kada se ovaj kut faktora snage približi vrijednosti  $\psi_k - \psi$ , razina treperenja se smanjuje. Slučaj koji se ovdje proučava gotovo je isti kao i osnovni slučaj, osim što je kut mrežne impedancije  $63.4349$  stupnjeva, što odgovara  $X/R=2$ . Kada se razlika u kutovima približava  $90^\circ$ , razina emisije flikera se smanjuje što je i prikazano na slici 5.9.



**Slika 5.9.** *Kratkotrajna jačina treperenja Pst s razlikom u kutu ( $v = 9 \text{ m/s}$ ,  $I_n = 0:1$ ,  $SCR = 20$ ,  $\psi = 63:4349^\circ$  preuzeto iz [12])*

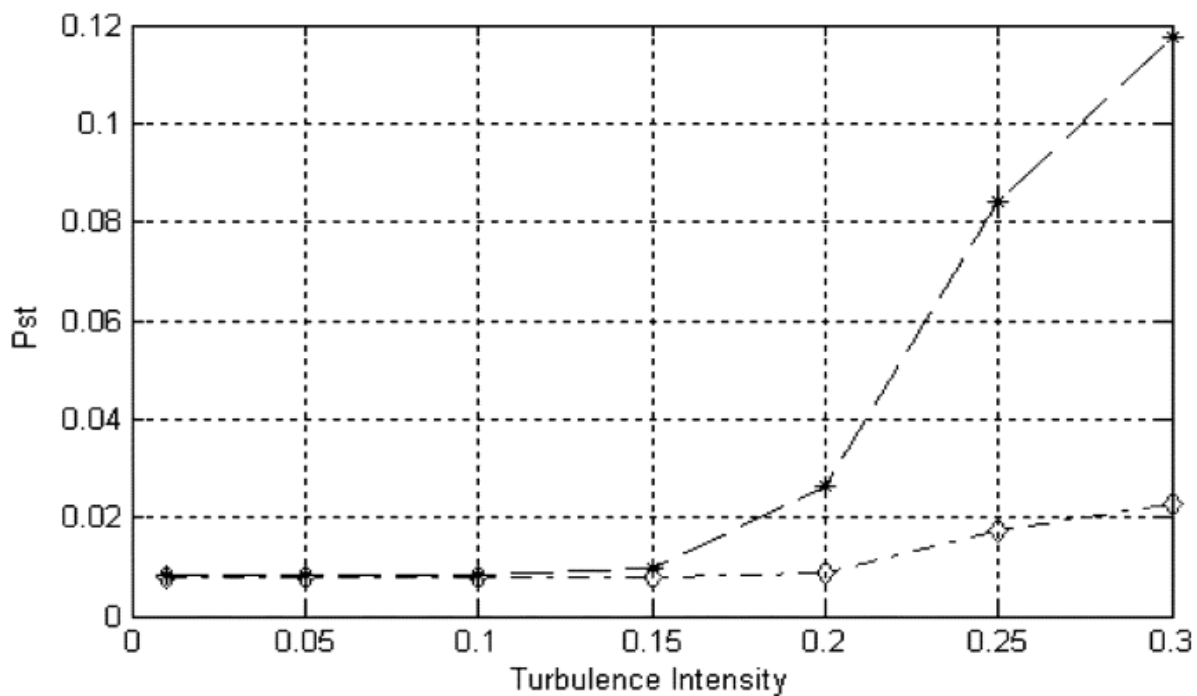


**Slika 5.10.** *Kratkoročna jačina treperenja  $P_{st}$  s prosječnom brzinom vjetra ( $I_n = 0,1$ ,  $SCR = 20$ ,  $\psi_k = 63: 4349^\circ$ , normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12])*

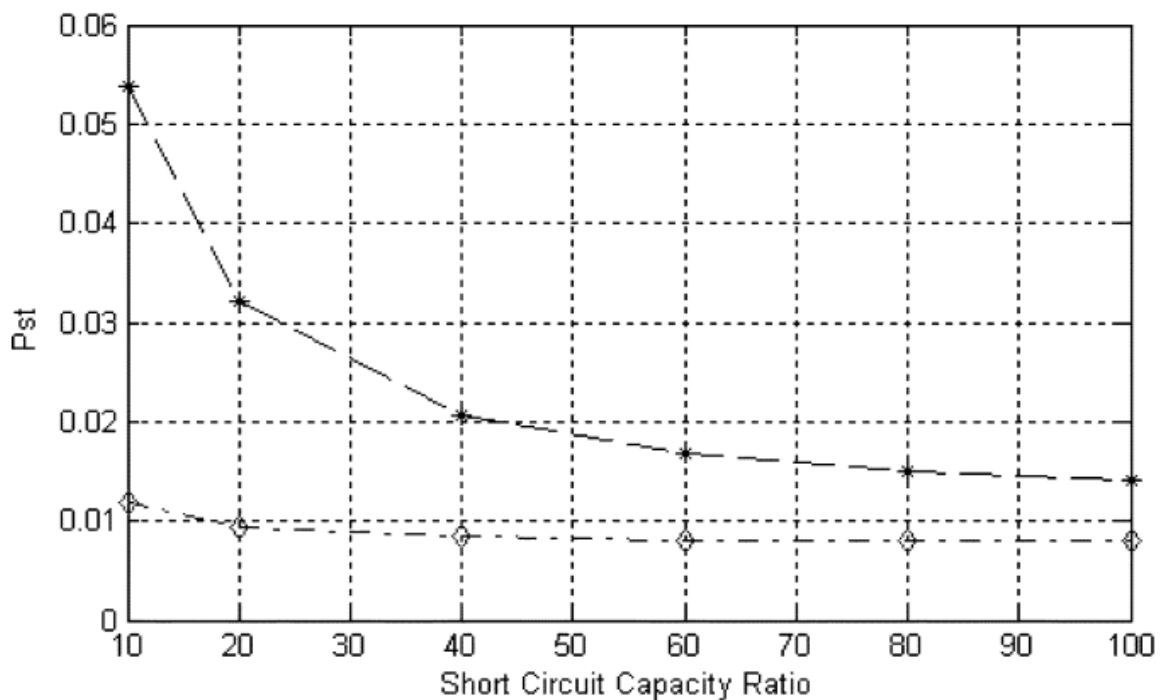


**Slika 5.11.** *Ovisnost jačine treperenja  $P_{st}$  o intenzitetu turbulencije ( $v=9$  m/s,  $I_n = 0,1$ ,  $SCR = 20$ ,  $\psi_k = 63: 4349^\circ$ , normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).*





**Slika 5.12.** Ovisnost jačine treperenja  $P_{st}$  o intenzitetu turbulencije ( $v=18$  m/s,  $In = 0,1$ ,  $SCR = 20$ ,  $\psi k= 63: 4349^\circ$ , normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).



**Slika 5.13.** Kratkotrajna jačina treperenja u ovisnosti o kapacitetu kratkog spoja u turbulencije ( $v=18$  m/s,  $In = 0,1$ ,  $SCR = 20$ ,  $\psi k= 63: 4349^\circ$ , normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).

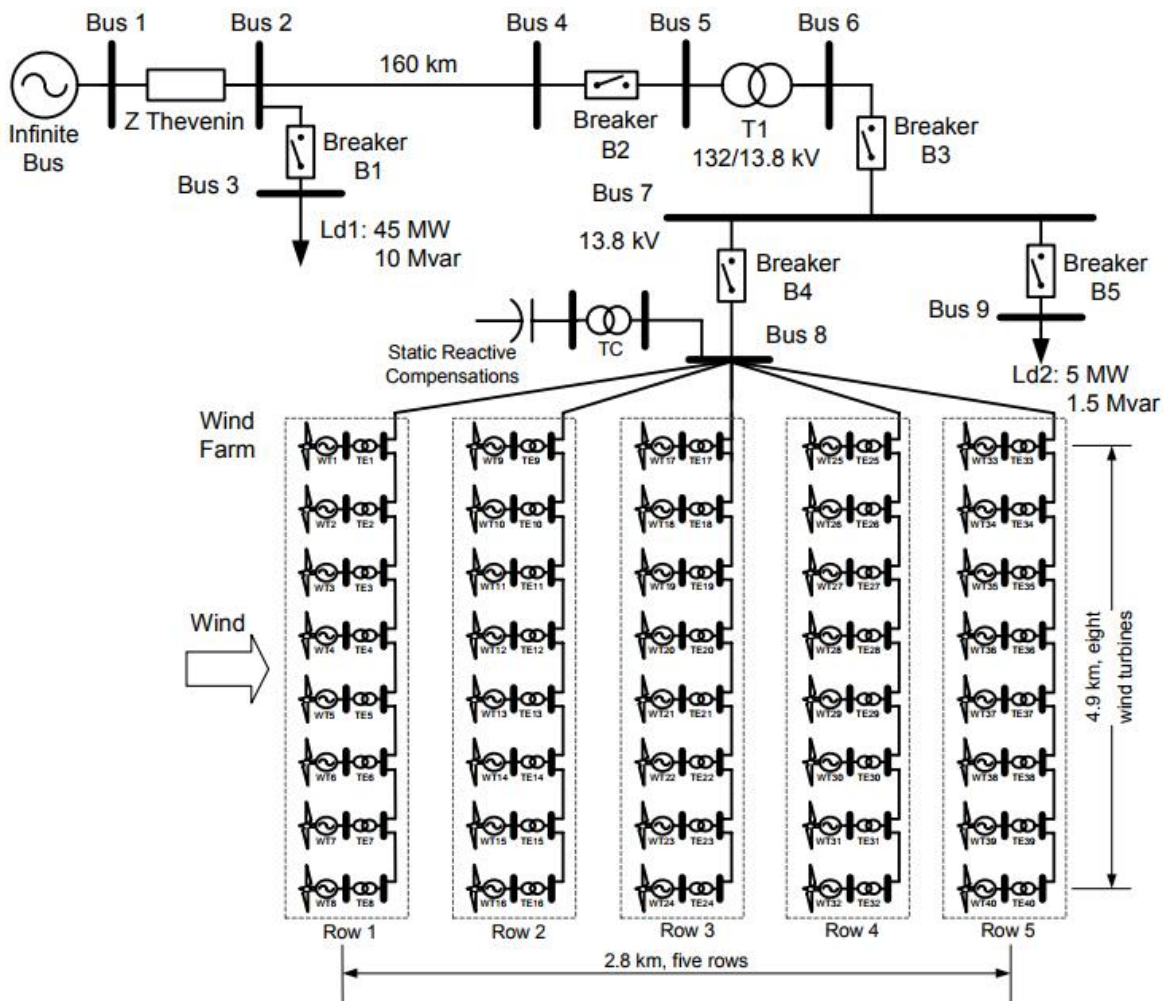
Sa slika 5.10-5.13. može se zaključiti da je reguliranje razlike u kutu  $\psi$ - $\psi_k$ , kontroliranjem reaktivne snage vjetroturbine učinkovito sredstvo za smanjenje treperenja bez obzira na srednju brzinu vjetra, intenzitet turbulencije i omjer kapaciteta kratkog spoja. Primjenom ove mjere za ublažavanje treperenja, količina jalove snage može se apsorbirati iz mreže [12].

Postoji alternativna mjera kontrole ublažavanja treperenja - izravno upravljanje naponom na PCC, što se također može postići regulacijom jalove snage pretvarača izvora napona PWM. Cilj regulatora napona je da napon ostane na konstantnoj vrijednosti tako da se smanjuju naponske fluktuacije kao i treperenje. Ova mjera ublažavanja treperenja može imati sličan učinak na kontrolu izlazne jalove snage. Međutim, ovaj se rad usredotočuje na izlaznu jalovu snagu [12].

## **5.2. UTJECAJ NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE UZROKOVANE RADOM VJETROELEKTRANA U SLABOM SUSTAVU NAPAJANJA**

Test sustav (slika 5.14.) za procjenu interakcije vjetroelektrana s elektroenergetskim sustavom prikazan je kao jednosmjerni dijagram. Takav sustav ima trafostanicu, predstavljenu kao Theveninov ekvivalent sa snagom kratkog spoja 100 MVA, koji napaja prijenosnu mrežu koja radi na 132kV/50Hz.

Setovi opterećenja su spojeni na sabirnicu 3 (Ld: 45 MW, 10 MVA<sub>r</sub>) i na sabirnicu 9 (Ld2: 5 MW, 1.5 MVA<sub>r</sub>). Prijenosni vod je dug 160 km te ide preko transformatora od 132/13,8kV, opterećenja Ld2 i vjetroelektrane do trafostanice. Udaljenost između dvije susjedne turbine i dva uzastopna reda je 700 m. Vjetroturbine koriste sustav fiksnih brzina. Nazivna snaga svake vjetroturbine je 1,5 MW. Stoga, vjetroelektrane sastavljene od 40 turbina imaju 60 MW nazivnu snagu. Svaka vjetroturbina je spojena na mrežu preko indukcijskog generatora s rotirajućim rešetkastim kavezom. Potrebe reaktivne snage iz vjetroelektrane opskrbljena je iz kondenzatora kako bi postigla faktor snage blizu 1. Kondenzatorske jedinice imaju 5 dijelova - jedna za svaki red turbina. Zbog jednostavnosti, na slici su odjeljci prikazani kao jedan kondenzator [14].



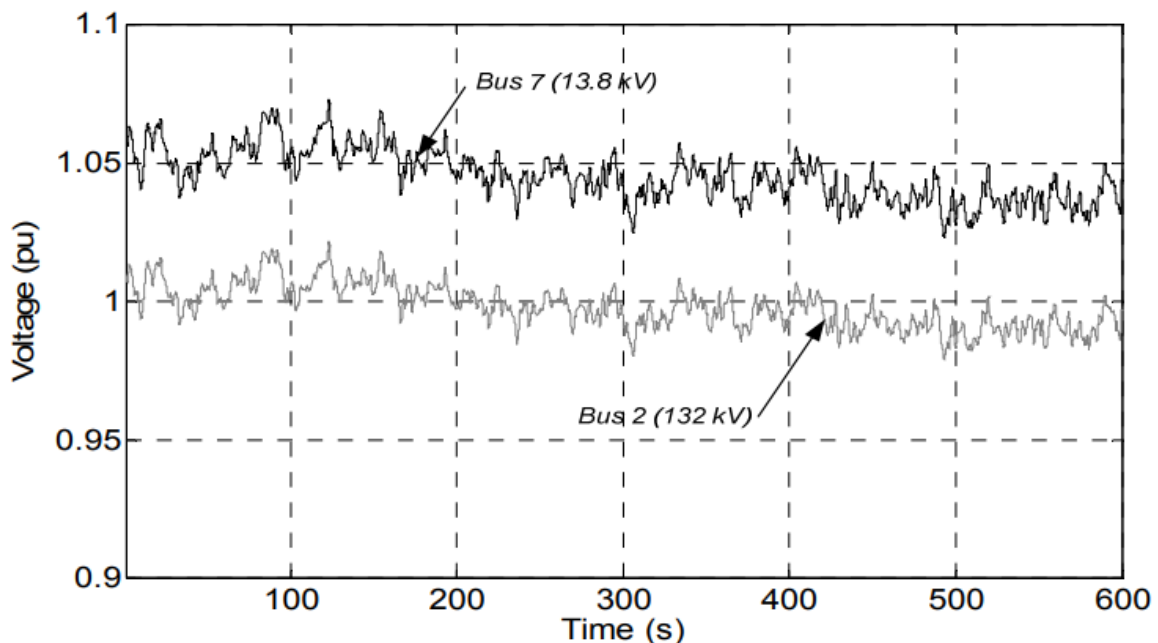
Slika 5.14. Test sustav (preuzeto iz [14])

Ponašanje napona je promatrano na sabirnicama vjetroelektrana i na opterećenjima. Prvo, analiza je provedena na vjetroelektranama koje rade s dvije srednje brzine vjetra. Naposljetku, učinci se proučavaju kada se na vjetroelektranama javljaju nepredviđene okolnosti.

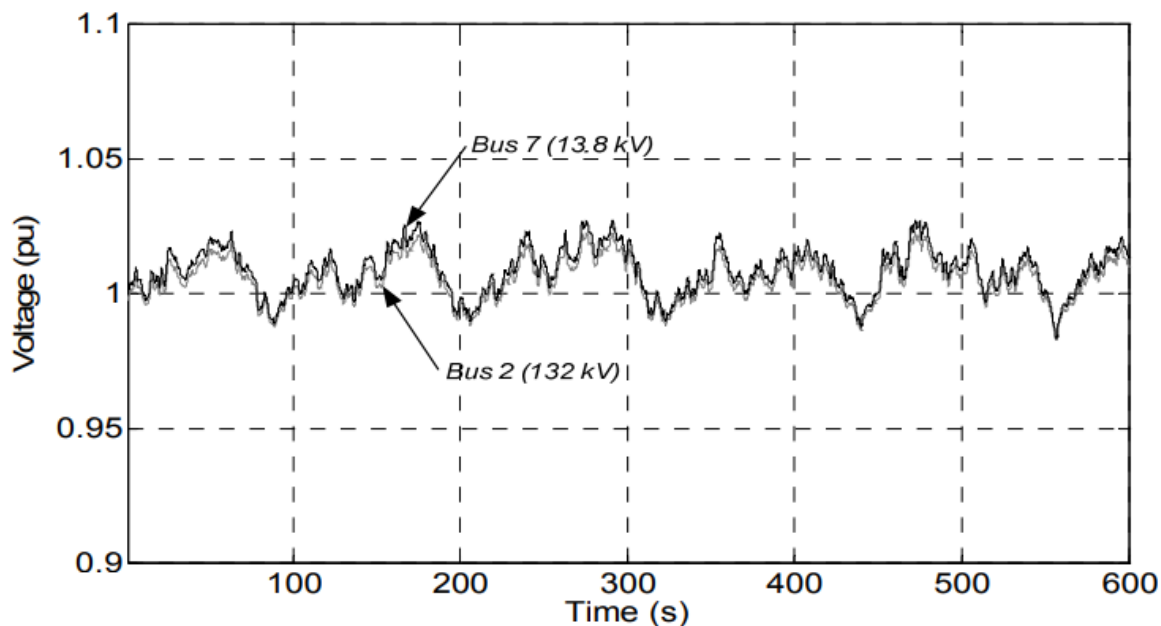
### 1) Sustav vjetroelektrana koje rade s prosječnom brzinom vjetra od 10 m/s i 6 m/s

Simulirana su dva slučaja s vjetroelektranom koja radi sa svim vjetroturbinama koje su povezane. Jedan od njih ima srednju brzinu vjetra od 10m/s, a drugi 6 m/s. U prvom slučaju, snaga kroz vod teče od vjetroelektrane do trafostanice. Budući da je opterećenje konstantno; jednaka oscilacija snage koju predaje vjetroelektrana prenosi se duž dalekovoda do ostatka sustava. U drugom slučaju, sa srednjom brzinom vjetra 6 m/s, snaga teče kroz vodove od trafostanice do sabirnice vjetroelektrane, zato što snaga koju predaje vjetroelektrana ne može opskrbiti cijelu potražnju na sabirnici 7. Snaga koju predaje vjetroelektrana može

prouzrokovati određene probleme na različitim mjestima u mreži. To se najčešće događa u slabom sustavu kao što je opisano u ovom radu. Slike 5.15. i 5.16, prikazuju napon na sabirnicama sustava: na sabirnici 7 (13,8kV), gdje je vjetroelektrana povezana i opterećenje prisutno; i na sabirnici 2 (132kV), na drugom kraju prijenosnog voda gdje je opterećenje također prisutno. Slike 5.15. i 5.16. prikazuju napon vjetroelektrane koja radi s srednjom brzinom vjetra od 10 m/s i 6 m/s. Slike prikazuju da oba simulirana slučaja imamo vidljive oscilacije napona, čak i kada vjetroelektrana radi sa srednjom brzinom vjetra od 6 m/s i predaje relativno malo snage u mrežu. Osim toga, kod oba slučaja, takve oscilacije napona se događaju ne samo naprijeključnoj točki vjetroelektrane nego i na sabirnici 2 na drugoj strani voda. Razlog tome je da se radi o relativno slabom sustavu i da ima malu snagu kratkog spoja na sabirnici 2. Naposljetku, kada vjetroelektrana radi sa srednjom brzinom vjetra od 10 m/s, može se dogoditi da je napon na sabirnici 7 iznad željene vrijednosti od 1 p.u. To se uglavnom događa zbog predaje velikog protoka snage na mjestu gdje je opterećenje relativno malo [14].



**Slika 5.15.** Naponi na sabirnici 2 i sabirnici 7 za vjetroelektranu pri brzini vrtinje od 10 m/s (slika preuzeta iz [14])

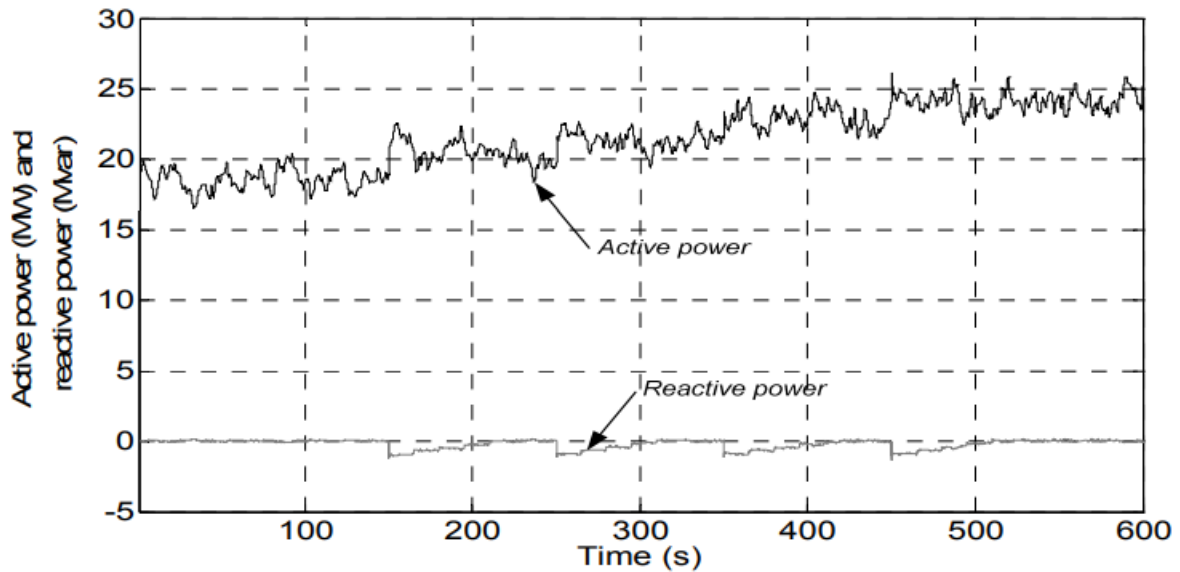


**Slika 5.16.** Naponi na sabirnici 2 i sabirnici 7 za vjetroelektranu pri brzini vrtnje od 6 m/s (slika preuzeta iz [14])

## 2) Nepredvidive situacije u vjetroelektranama

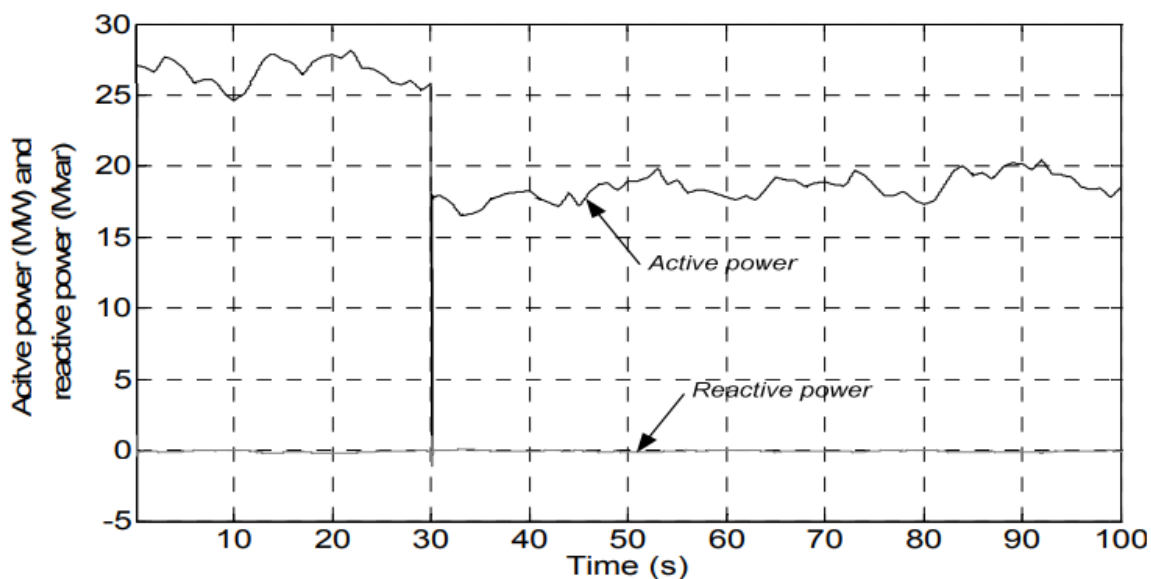
Ovaj dio rada raspravlja o dva slučaja sustava vjetroelektrana uvođenjem nepredviđenih okolnosti u mrežu. U oba slučaja korištena je srednja brzina vjetra od 10 m/s.

Prvi slučaj simulira postupno povezivanje 8 vjetroturbina s njihovim odgovarajućim kondenzatorima. Na početku, smatra se da vjetroelektrana radi sa 4 od 5 redova. Zatim se peti red dodaje postupno spajanjem parova s osam turbina na  $t=150s$ ,  $t=250s$ ,  $t=350s$  i  $t=450s$ . Kod spajanja svakog para, postupno se povezuju odgovarajući kondenzatori za kompenzaciju reaktivne snage u 15 koraka svakih 15 s. Slika 5.17. prikazuje aktivnu i reaktivnu snagu koja je predana u mrežu.



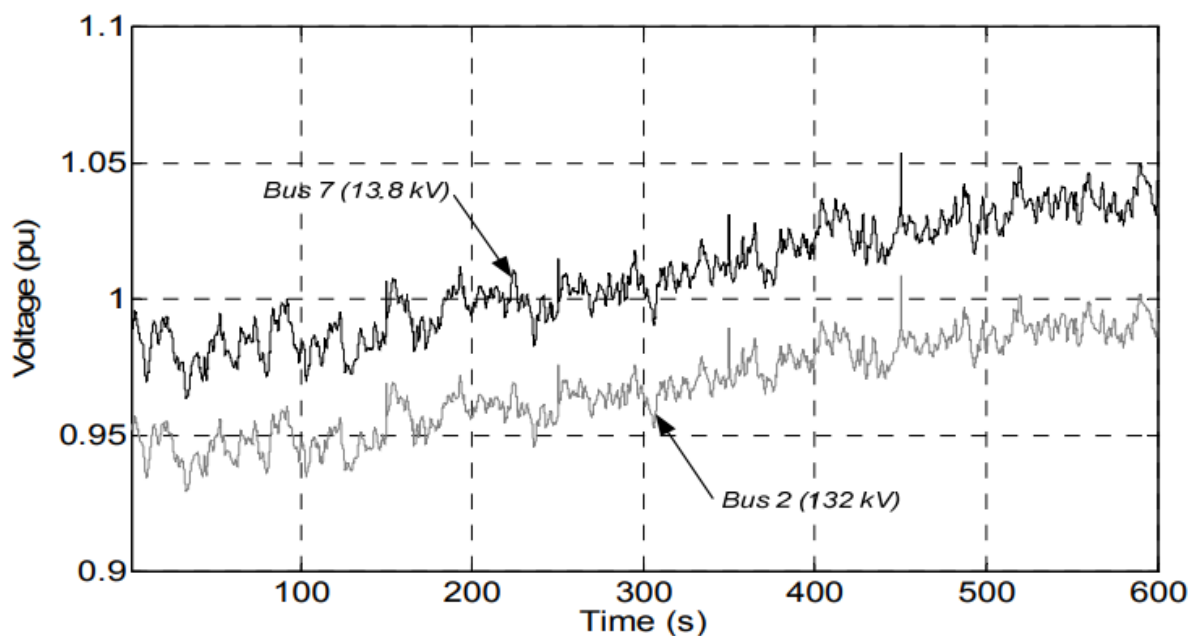
**Slika 5.17.** Prikaz aktivne i reaktivne snage koju injektira vjetroelektrana u mrežu (slika preuzeta iz [14])

U drugom slučaju, simulira se kvar za jedan red turbina što uzrokuje odspajanje osam vjetroturbina u nizu. Prvo, razmatra se normalna opcija, tj. vjetroelektrana sa 40 povezanih vjetroturbina. U  $t=30$  s postavljena je greška (kratki spoj između prve faze i tla) u vodu koji povezuje red 1 sa sabirnicom 8. Zatim, pri  $t=30,1$  s, greška se uklanja odspajanjem ovog reda sa 8 turbina iz sustava. Slika 5.18. prikazuje aktivnu i reaktivnu snagu koju u takvom slučaju predaje vjetroelektrana. Može se vidjeti da reaktivna snaga ima srednju vrijednost oko nule prije i poslije pojave greške. To se objašnjava činjenicom da kada se red 1 odvoji, kondenzatori koji nadoknađuju taj red se također odvoje. Ove oscilacije aktivne i reaktivne snage se prenose u sustav uzrokujući oscilacije napona na različitim sabirnicama

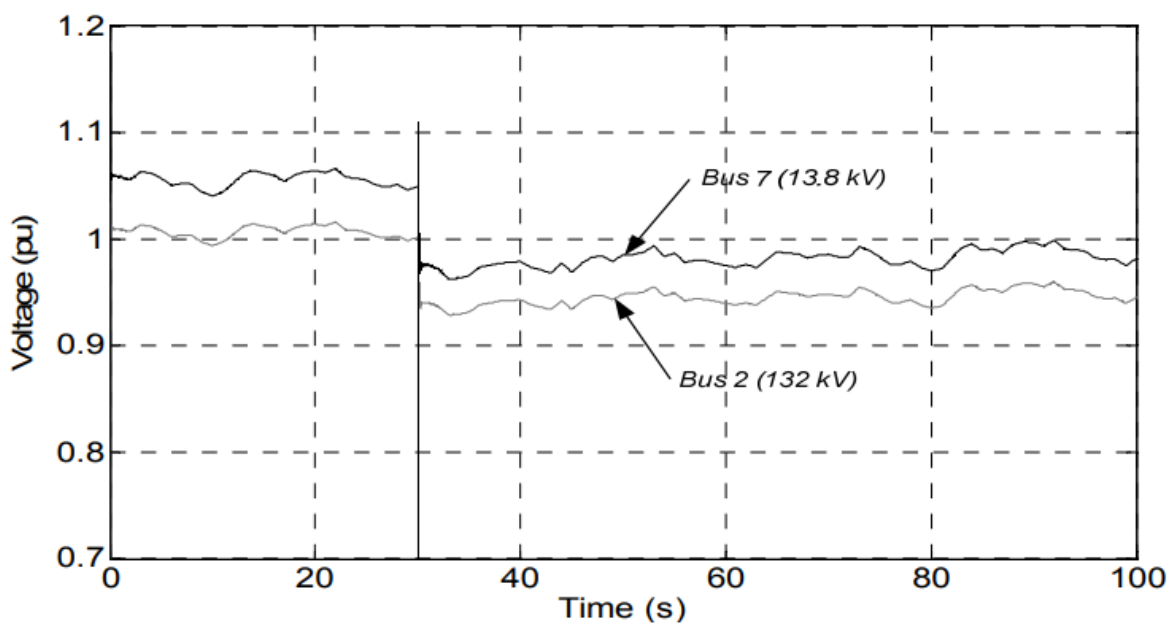


**Slika 5.18.** Prikaz aktivne i reaktivne snage koju injektira vjetroelektrana u mrežu u slučaju kvara (slika preuzeta iz [14])

Slike 5.19. i 5.20. prikazuju napon na sabirnici 7 i 2 za obje simulacije. U prvom slučaju (slika 5.19.), uočene su oscilacije napona prouzrokovane turbulencijom vjetra. Nadalje, također je uočeno povećanje napona spajanjem vjetroturbina. U drugom slučaju (slika 5.20.), može se primjetiti da pojavom greške, napon na sabirnicama 2 i 7 naglo pada na vrijednost blizu nule. Nakon uklanjanja greške i odspajanjem 8 vjetroturbina iz reda 1, napon obiju sabirnica ostaje u nižoj vrijednosti prije nego što se pojavila greška. Konačno, uzimajući u obzir oba analizirana slučaja, može se zaključiti da oscilacije snage koje ubacuje vjetroelektrana s fiksnom brzinom vjetroturbina uzrokuje oscilacije napona. Uočeno je, za slabi elektroenergetski sustav koji je opisan u ovom radu, da oscilacije napona postoje ne samo na točki spajanja vjetroelektrana nego i na drugim sabirnicama sustava. Oscilacije napona uglavnom su posljedica turbulencije vjetra i očito se povećavaju u slučaju kada se javi nepredviđena greška u sustavu, kao kod spajanja turbina ili pojave greške. Stoga, umetanje vjetroelektrana s vjetroturbinama fiksne brzine u slab elektroenergetski sustav predstavlja značajne probleme glede kvalitete napona koji dostavljamo korisnicima. Naponi tako slabe kvalitete mogu uzrokovati kvar opreme i značajne gubitke, ovisno o potrebi potrošača.



Slika 5.19. Naponi na sabirnicama 2 i 7 za spajanje vjetroturbina (slika preuzeta iz [14])



Slika 5.20. Naponi na sabirnicama 2 i 7 za vrijeme kvara u vjetroelektrani (slika preuzeta iz [14])



## 6. ZAKLJUČAK

Proizvodnja energije vjetra smatra se najučinkovitijom alternativom unutar obnovljivih izvora energije. Među prednostima vjetroelektrana je velik broj potencijalnih mjesta za gradnju i brz napredak tehnologije. S druge strane, projekti energetske učinkovitosti vjetra podrazumijevaju visok početni kapitalni trošak i, u pogonu, nedostatak kontrole na diskontinuiranom ili povremenom resursu. Unatoč ovim nedostacima, njihova gradnja stalno raste. Širom svijeta postoje velike, jedva naseljene površine s dobrim potencijalom za vjetroelektrane gdje su postojeće mreže male ili slabe zbog malog broja stanovnika. U takvim područjima kapacitet mreže vrlo često može biti ograničavajući faktor za iskorištavanje energije vjetra. Vjetroelektrane se mogu spajati i na distribucijsku mrežu. Priključenje vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu je značajan problem obzirom na to da vjetroelektrane bitno utječu na stabilnost sustava i kvalitetu električne energije. Time se mogu značajno promijeniti tokovi snaga, što ima za posljedicu i promjenu iznosa napona u čvorištima mreže. Osim toga zbog stohastičke prirode vjetra može doći i do značajnijih dinamičkih promjena iznosa napona, što može utjecati na značajno povećanje iznosa treperenja napona. Većina ovih problema se može izbjeći pravilnim izborom priključka vjetroelektrane i izvedbe vjetroagregata. Napretkom tehnologije omogućuje se smanjenje utjecaja vjetroelektrana na elektroenergetski sustav. Danas se koriste različiti uređaji kao što su STATCOM-i, prigušnice, kondenzatori, kompenzatori koji znatno pridonose kvaliteti električne energije.

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu su objašnjene vjetroelektrane te njihov utjecaj na elektroenergetski sustav i kvalitetu električne energije. Prema studiji o flikerima, detaljno je opisan utjecaj naponskog treperenja u ovisnosti o srednjoj brzini vjetra, iznosu turbulencija, omjeru kratkog spoja te kutu impedancije mreže.

Ključne riječi: vjetroelektrana, kvaliteta električne energije, treperenje, iznos turbulencija

## ABSTRACT

*This paper describes wind power plants and their impact on the power system and the quality of electricity. According to the study of flicker, the influence of the voltage flicker depends on the mean wind speed, the amount of turbulence, the short-circuit ratio and the grid impedance angle, which is described in detail.*

*Keywords: wind park, power quality, flicker, amount of turbulence*

## 7. LITERATURA

[1] Brošura: Biomasa kao obnovljivi izvor energije, Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodnog gospodarstva i Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, 2007.

URL: <http://www.fradragoljevar.com/Biomasa.pdf> (Datum pristupa: 13.06.2017.)

[2] Strategija energetskega razvitka Republike Hrvatske, 2009

URL: [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009\\_10\\_130\\_3192.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_10_130_3192.html) (Datum pristupa: 14.06.2017.)

[3] Šljivac D., Šimić Z., Obnovljivi izvori energije, Najvažnije vrste, potencijali i tehnologija, FER, 2009.

URL: <http://oie.mingorp.hr/UserDocsImages/OIE%20Tekst.pdf> (Datum pristupa: 14.06.2017.)

[4] <http://www.vjetroelektrane.com/povijest> (Datum pristupa: 15.06.2017.)

[5] VE Šestanovac

URL:

[https://www.google.ba/search?biw=1600&bih=804&tbm=isch&sa=1&q=vjetroelektrana+%C5%A1estanovac&oq=vjetroelektrana+%C5%A1estanovac&gs\\_l=img.3...36204.43152.0.43279.0.0.0.0.0.0.0.0...0...1.1.64.img..0.0.0.NGz5wfyu6iM#imgcr=nZn5fTdbdn8kwM:](https://www.google.ba/search?biw=1600&bih=804&tbm=isch&sa=1&q=vjetroelektrana+%C5%A1estanovac&oq=vjetroelektrana+%C5%A1estanovac&gs_l=img.3...36204.43152.0.43279.0.0.0.0.0.0.0.0...0...1.1.64.img..0.0.0.NGz5wfyu6iM#imgcr=nZn5fTdbdn8kwM:)

(Datum pristupa: 16.06.2017.)

[6] Linta, S. (2015). Vjetroelektrane u Hrvatskoj. Diplomski rad, Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, specijalistički studij strojarstva.

URL: <https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A103/datastream/PDF/view> (Datum pristupa 16.06.2017.)

[7] Šljivac D., Obnovljivi izvori energije, Energija vjetra, Osijek, 2008.

URL: [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Vjetar\\_DS.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Vjetar_DS.pdf) (Datum pristupa: 22.06.2017.)

[8] Jelavić, V.: Stručne podloge za izradu strategije niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje do 2030. s pogledom na 2050. godinu, Zagreb, 2015.

URL: [http://www.mzoip.hr/doc/zelena\\_knjiga.pdf](http://www.mzoip.hr/doc/zelena_knjiga.pdf) (Datum pristupa: 22.06.2107.)

[9] Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj - svibanj 2017.

URL: <http://www.hops.hr/wps/wcm/connect/e9fae239-abe1-4c53-ab86-faf6704fbedc/HOPS++Mjese%C4%8Dni+izvje%C5%A1taj+o+proizvodnji+VE+u+HR+za+ Svibanj++2017.pdf?MOD=AJPERES> (Datum pristupa: 22.06.2017.)

[10] Dizdarević N., Majstorović M., Žutobradić S. Distribuirana proizvodnja električne energije. [online]. str. 11-16.

URL: <https://www.eihp.hr/~ndizdar/ENERGIJA03a.pdf> (Datum pristupa: 14.06.2017.)

[11] Ivšinović, I. (2003). Kvaliteta električne energije. Diplomski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, fakultet elektrotehnike i računarstva.

URL: [file:///C:/Users/Dell/Desktop/504597.Diplomski\\_rad.pdf](file:///C:/Users/Dell/Desktop/504597.Diplomski_rad.pdf) (Datum pristupa: 12.09.2017.)

[12] Sun, T., Chen, Z., Blaabjerg, F.: Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generator. IEEE Trans. EC, vol. 20, no. 4, 2005, pp. 896–905

[13] Lasić, M., Nekić, S., Šimić, J., Tomasović, A., Veža, M., Škrlec, D.: Utjecaj vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje na kvalitetu napona. HO CIRED, Šibenik, 2008.

[14] Suvire G.O., Mercado P.E.: Voltage fluctuations caused by the operation of a wind farm in a weak power system, CONICET-UNSJ, San Juan-Argentina.

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Pirić rođen je 30.08.1993. u Posušju. U Posušju je 2008. godine, sa vrlo dobrim uspjehom, završio osnovnu školu „Ivane Brlić Mažuranić“, te u Imotskom upisuje srednju elektrotehničku školu „Tina Ujevića“ koju završava, sa odličnim uspjehom kroz sve četiri godine školovanja, 2012. godine. Nakon srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku gdje uspješno završava preddiplomski studij. Trenutno je student druge godine diplomskog studija elektrotehnike, smjer održiva elektroenergetika. Nakon završetka diplomskog studija cilj mu je da se zaposli i radi u području elektrotehnike.

Vrlo je ambiciozna i kreativna osoba željna novih znanja i iskustava. Tijekom svog školovanja i obrazovanja naučio je raditi u mnogim računalnim programima važnim za njegovu struku. Neki od njih su: EasyPower, Matlab, DigSilent, AutoCad, Ms Office i mnogi drugi. Od stranih jezika poznaje engleski i njemački u govoru i pismu.

Tomislav Pirić

Ul. dr. Petra Čule, 88240 Posušje, Bosna i Hercegovina

Mobitel: 092/ 186-0150

E-mail: [tomy.piric93@hotmail.com](mailto:tomy.piric93@hotmail.com)

## POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 2.1. Vjetreni rotor (slika preuzeta iz [4]) .....	3
Slika 2.2. Vjetroagregat Charlesa Brusha (slika preuzeta iz [4]).....	5
Slika 2.3. Smith-Putnam vjetroagregat (slika preuzeta iz [4]) .....	6
Slika 2.4. Moderni vjetroagregat (slika preuzeta iz [5]) .....	7
Slika 2.5. Vjetroelektrana Lillgrund (slika preuzeta iz [6]) .....	8
Slika 2.6. Plutajući vjetroagregat Hywind (slika preuzeta iz [6]).....	9
Slika 2.7. Osnovni dijelovi vjetroagregata (Slika preuzeta iz [7]).....	10
Slika 2.8. Općenita shema djelovanja vjetroelektrane (slika preuzeta iz [7]) .....	15
Slika 2.9. Lokacije VE u Hrvatskoj (slika preuzeta iz [9]).....	18
<b>Slika 3.1.</b> Kolebanje napona (preuzeto iz [11]).....	27
Slika 3.2. Treperenje (flicker) napona (preuzeto iz [11]).....	28
Slika 3.3. Naponi viših harmonika i međuharmonika (preuzeto iz [11]) .....	30
Slika 3.4. Frekvencija opskrbnog napona (preuzeto iz [11]) .....	31
Slika 3.5. Nesimetričnost opskrbnog napona (preuzeto iz [11]).....	32
Slika 3.6. Naponski propadi (preuzeto iz [11]) .....	33
Slika 5.1. Načelni prikaz izvedbe vjetroagregata s dvostruko napajanim generatorom s povezivanjem na mrežu .....	43
Slika 5.2. Ekvivalentna brzina vjetra i izlazna snaga vjetroturbine u ovisnosti o vremenu (preuzeto iz [12]) .....	45
Slika 5.3. Ekvivalentna brzina vjetra i izlazna snaga vjetroturbine u ovisnosti o frekvenciji (preuzeto iz [12]) .....	46
Slika 5.4. Varijacija kratkotrajnog treperenja u ovisnosti o prosječnoj brzini vrtnje pri osnovnim parametrima (preuzeto iz [12]) .....	47
Slika 5.5. Ovisnost jačine treperenja $P_{st}$ o intenzitetu turbulencije ( $v_1=9$ m/s, $v_2=18$ m/s (isprekidano), $SCR=20=50$ , preuzeto iz [12]) .....	48
Slika 5.6. Brzina vjetra za različite vrijednosti intenziteta turbulencije (preuzeto iz [12]) ...	49
Slika 5.7. Izlazna snaga za različite vrijednosti intenziteta turbulencije /preuzeto iz [12]) ...	49
Slika 5.8. Kratkotrajna jačina treperenja u ovisnosti o kapacitetu kratkog spoja (preuzeto iz [12]).....	50
Slika 5.9. Kratkotrajna jačina treperenja $P_{st}$ s razlikom u kutu ( $v = 9$ m/s, $I_n = 0:1$ , $SCR = 20$ , $\psi = 63:4349^\circ$ preuzeto iz [12]).....	51

Slika 5.10. <i>Kratkoročna jačina treperenja Pst s prosječnom brzinom vjetra (<math>I_n = 0,1</math>, <math>SCR = 20</math>, <math>\psi_k = 63: 4349^\circ</math>, normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).</i>	52
Slika 5.11. <i>Ovisnost jačine treperenja Pst o intenzitetu turbulencije (<math>v=9</math> m/s, <math>I_n = 0,1</math>, <math>SCR = 20</math>, <math>\psi_k = 63: 4349^\circ</math>, normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).</i>	52
Slika 5.12. <i>Ovisnost jačine treperenja Pst o intenzitetu turbulencije (<math>v=18</math> m/s, <math>I_n = 0,1</math>, <math>SCR = 20</math>, <math>\psi_k = 63: 4349^\circ</math>, normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).</i>	53
Slika 5.13. <i>Kratkotrajna jačina treperenja u ovisnosti o kapacitetu kratkog spoja turbulencije (<math>v=18</math> m/s, <math>I_n = 0,1</math>, <math>SCR = 20</math>, <math>\psi_k = 63: 4349^\circ</math>, normalan rad (zvjezdica), s kontrolom jalove snage (dijamant), preuzeto iz [12]).</i>	53
Slika 5.14. <i>Test sustav (preuzeto iz [14])</i>	55
Slika 5.15. <i>Naponi na sabirnici 2 i sabirnici 7 za vjetroelektranu pri brzini vrtnje od 10 m/s (slika preuzeta iz [14]).</i>	56
Slika 5.16. <i>Naponi na sabirnici 2 i sabirnici 7 za vjetroelektranu pri brzini vrtnje od 6 m/s (slika preuzeta iz [14]).</i>	57
Slika 5.17. <i>Prikaz aktivne i reaktivne snage koju injektira vjetroelektrana u mrežu (slika preuzeta iz [14])</i>	58
Slika 5.18. <i>Prikaz aktivne i reaktivne snage koju injektira vjetroelektrana u mrežu u slučaju kvara (slika preuzeta iz [14]).</i>	59
Slika 5.19. <i>Naponi na sabirnicama 2 i 7 za spajanje vjetroturbina (slika preuzeta iz [14])...</i>	60
Slika 5.20. <i>Naponi na sabirnicama 2 i 7 za vrijeme kvara u vjetroelektrani (slika preuzeta iz [14]).</i>	60
Tabela 2.1. <i>Osnovni parametri VE u pogonu (preuzeto iz [9]).</i>	19
Tabela 3.1. <i>Granične vrijednosti parametara napona po preporuci EN 50160 (preuzeto iz [11]).</i>	26
Tabela 3.2. <i>Prikaz pojedinačnih graničnih vrijednosti viših harmonika (preuzeto iz [11]).</i>	29
Tabela 5.1. <i>Osnovni parametri za simulaciju</i>	44