

# Utjecaj vjetroelektrane na naponske propade u elektroenergetskom sustavu

---

Orlović, Nikolina

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:200:800702>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studiji**

**UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA NAPONSKE  
PROPADE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

**Diplomski rad**

**Nikolina Orlović**

**Osijek, 2017.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
2. ENERGIJA VJETRA I VJETROELEKTRANE .....	2
2.1. Princip rada vjetroelektrane.....	4
2.2. Varijacije u proizvodnim kapacitetima .....	6
2.3. Tereni pogodni za izgradnju vjetroelektrana .....	10
2.4. Pregled trenutnog stanja instaliranih snaga vjetroelektrana .....	11
3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	13
3.1. Varijacije napona i struje.....	14
3.1.1. Varijacije amplitude napona i frekvencije.....	15
3.1.2. Varijacije amplitude i faza struje.....	16
3.1.3. Nesimetrija struje i napona.....	16
3.1.4. Kolebanje napona .....	17
3.1.5. Struje i naponi viših harmonika te međuharmonici.....	18
3.2. Naponski i strujni događaji.....	19
3.2.1. Prekid opskrbe i naponski propadi .....	20
3.2.2. Previsoki naponi i preniski naponi .....	21
3.3. Standard kvalitete električne energije .....	22
4. UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA NAPONSKE PROPADE.....	24
4.1. Naponski propadi .....	24
4.1.1. Izvori naponskih propada .....	25
4.1.2. Nadzor naponskih propada .....	26
4.1.3. Posljedice naponskih propada .....	29
4.2. Utjecaj vjetroelektrana na elektroenergetski sustav .....	30
5. VJETROELEKTRANE I NAPONSKI PROPADI- PRIMJERI ISTRAŽIVANJA.....	34
6. ZAKLJUČAK .....	41
7. LITERATURA.....	42

## 1. UVOD

U suvremenom svijetu javlja se sve veća potreba za električnom energijom. Kroz povijest, gotovo se sva proizvodnja električne energije temeljila na neobnovljivim izvorima odnosno fosilnim gorivima. Kako su zalihe ovih izvora ograničene te zbog ekoloških razloga, javila se potreba za novim tehnologijama koje će omogućiti proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije. U njih se ubrajaju energija vjetra, energija Sunca, geotermalna energija, energija valova, energija plime i oseke te energija biomase. Uz brojne prednosti kao što su trajna dostupnost, izostanak emisije plinova i drugih štetnih tvari i ovi izvori imaju svoje nedostatke. Jedan od najvažnijih problema vezanih uz obnovljive izvore je njihova integracija u mrežu te problemi vezani uz kvalitetu napona.

U drugom poglavlju ovog diplomskog rada detaljnije je objašnjen princip rada vjetroelektrana i važnije informacije vezane uz ovaj obnovljivi izvor električne energije.

Treće poglavlje detaljnije se bavi kvalitetom električne energije odnosno napona te parametrima vezanim uz pojam kvalitete napona.

Četvrto poglavlje detaljno govori naponskim propadima te utjecaju vjetroelektrana na kvalitetu energije.

U petom poglavlju dan je pregled aktualnih istraživanja ublažavanja utjecaja vjetroelektrana na kvalitetu električne energije.

### 1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada je detaljno analizirati problem koji nastaje prilikom priključenja vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu s naglaskom na naponske propade kao jednog od pokazatelja kvalitete električne energije.

## 2. ENERGIJA VJETRA I VJETROELEKTRANE

Proces dobivanja električne energije iz energije vjetra odvija se u nekoliko koraka. U prvom dijelu procesa kinetička energija horizontalnog strujanja zraka (vjetar) pretvara se u kinetičku energiju koja okreće lopatice turbina vjetroagregata. Zatim se kinetička energija turbine u generatoru pretvara u željenu električnu energiju. Teoretska snaga vjetra koja prolazi kroz vjetroturbinu ovisi o trećoj potenciji brzine vjetra, gustoći zraka te površini kruga koji čini rotor u vrtnji, a prikazana je izrazom (2-1).

$$P_v = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (2-1)$$

Gdje je:

$P_v$ - teoretska snaga vjetra

$A$ - površina kruga koju čini rotor u vrtnji

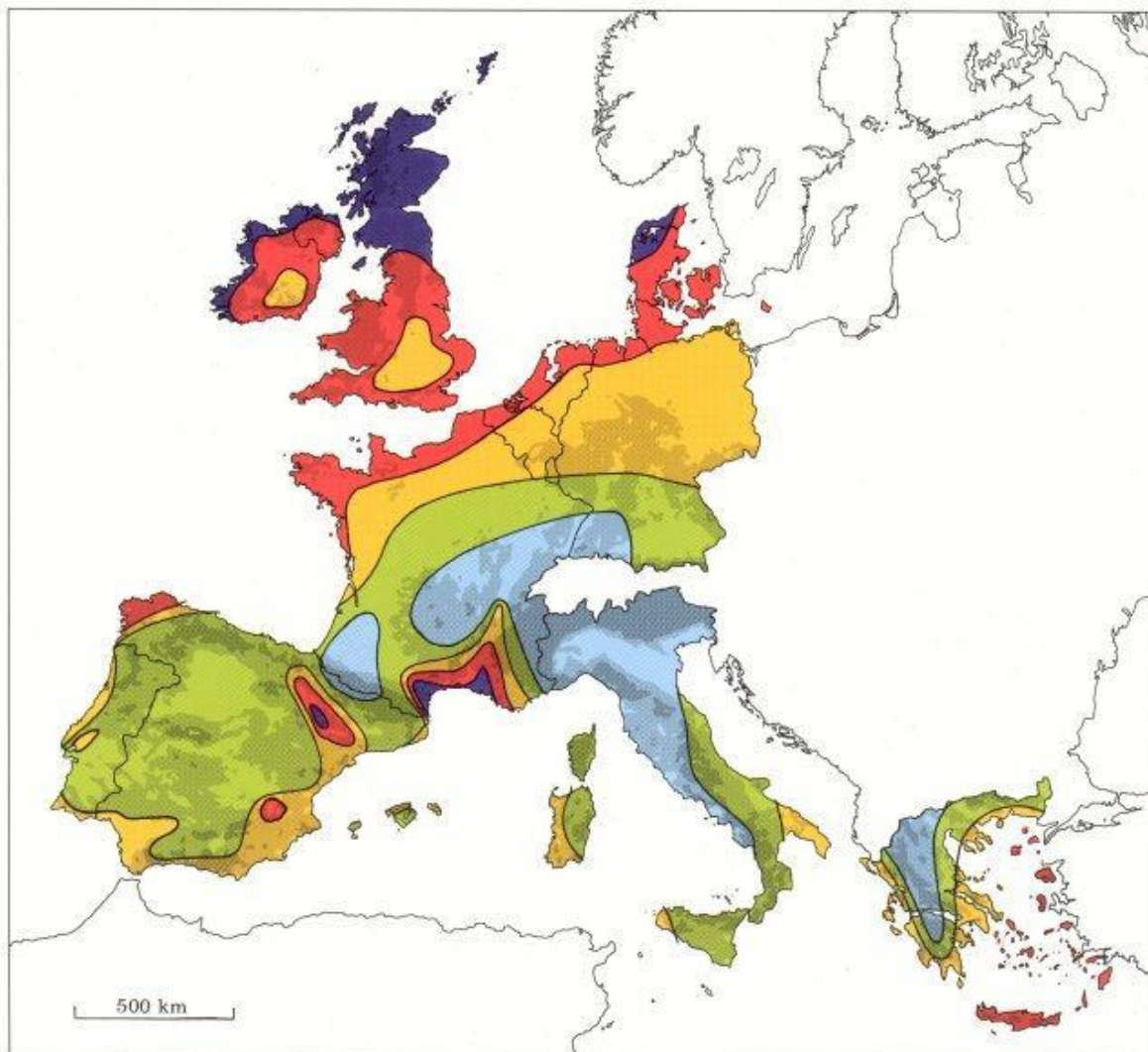
$\rho$ - gustoća zraka

$v$ - brzina vjetra

Primjena ovog izraza u praksi je komplicirana jer, uz činjenicu kako brzina vjetra nije konstantna na određenoj lokaciji u vremenu, također ona se mijenja i s promjenom nadmorske visine odnosno s porastom visine raste i brzina vjetra. Promjenjivost vjetra može se svrstati u nekoliko kategorija. Prvu kategoriju čine dugoročne odnosno višegodišnje promjene brzine vjetra. Ovo su spore promjene koje mogu biti uzrokovane klimatskim promjenama, promjenama u Sunčevom zračenju i sl. Druga su kategorija godišnje i sezonske promjene. Treću kategoriju čine dnevne i sinoptičke promjene. Dnevne promjene vezane su uz promjenu temperature, a sinoptičke uz meteorološke promjene. Posljednja kategorija su turbulencije koje predstavljaju trenutna, slučajna odstupanja od srednje brzine vjetra, a ovise o različitim geografskim, meteorološkim i drugim čimbenicima. Nadmorska visina te temperatura utječu i na gustoću zraka. Osim toga, i promjer rotora može varirati ovisno o izvedbi vjetroagregata te se teži što većem promjeru radi postizanja većih snaga. Zbog svih navedenih čimbenika koji utječu na snagu vjetra postoje i ograničenja vezana uz geografska područja na kojim je moguća izgradnja vjetroelektrana. Za određivanje lokacija vjetroelektrana koristi se atlas vjetrova te ruža vjetrova. Atlas daje podatke o očekivanim prosječnim brzinama vjetra na pojedinim lokacijama i

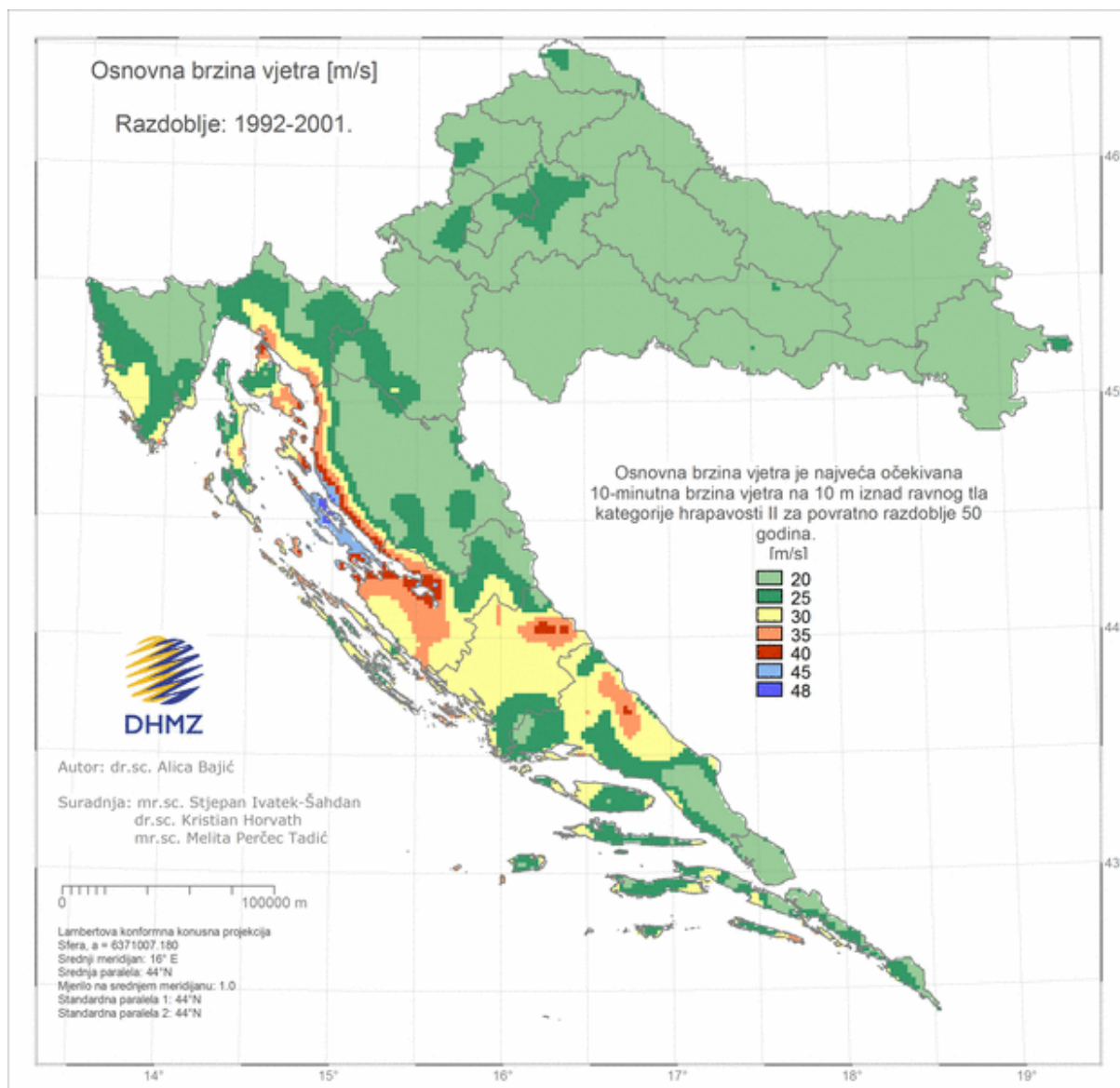
očekivanoj snazi energije po jedinici površine [ $\text{W/m}^2$ ] dok ruža vjetrova daje vjerojatnost pojave vjetra određene brzine u određenom smjeru. [1]

Slika 2.1. prikazuje atlas vjetra Europe na visini od 50 m izrađen 1989. godine dok je na slici 2.2. prikazana prosječna brzina vjetra u Hrvatskoj na visini od 10 m u razdoblju od 1992. do 2001. godine.



Wind resources <sup>1</sup> at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
	$\text{m s}^{-1}$	$\text{Wm}^{-2}$	$\text{m s}^{-1}$	$\text{Wm}^{-2}$	$\text{m s}^{-1}$	$\text{Wm}^{-2}$	$\text{m s}^{-1}$	$\text{Wm}^{-2}$	$\text{m s}^{-1}$	$\text{Wm}^{-2}$
Dark Blue	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Yellow	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Light Green	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

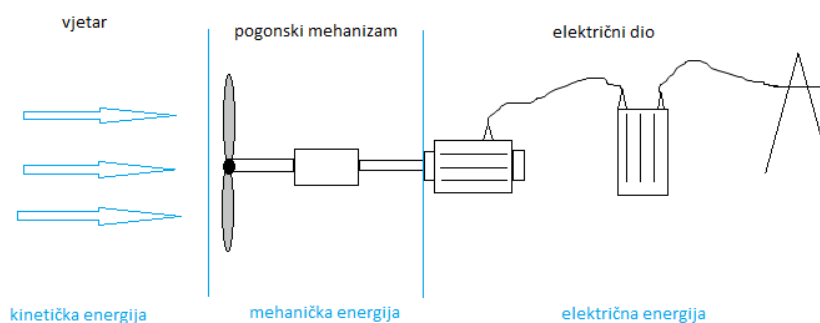
Slika 2.1. Atlas vjetra Europe [2]



Slika 2.2. Osnovne brzine vjetra na području Hrvatske [3]

## 2.1. Princip rada vjetroelektrane

Nekoliko je ključnih dijelova vjetroagregata koji sudjeluju u procesu pretvorbe kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Kinetička energija vjetra prenosi se na turbinu vjetroagregata čiji rotor pokreće sporookretnu osovinu. Sporookretna osovina preko prijenosnika pokreće brzookretnu osovinu koja prenosi mehaničku energiju na osovinu električnog generatora u kojem se generira električna energija. Postoje i izvedbe u kojima je osovina rotora izravno spojena s osovinom generatora. [1] Slika 2.3. prikazuje pojednostavljeni prikaz vjetroagregata i izrađena je prema [1].



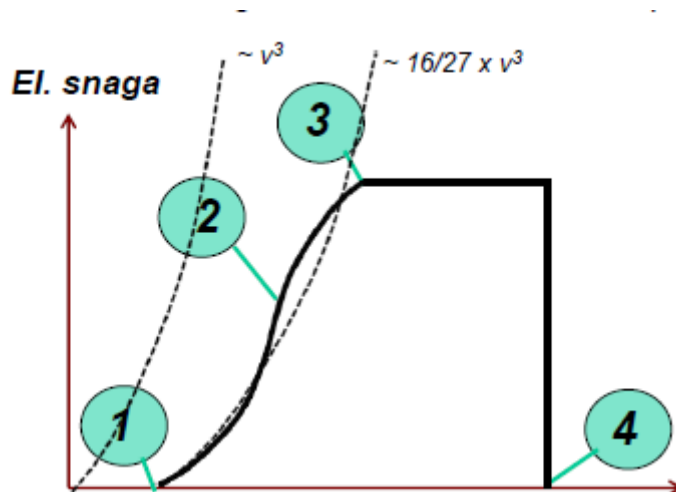
Slika 2.3. Pojednostavljeni prikaz vjetroagregata i pretvorbe energije [1]

Kroz povijest su se razvijale različite tehnologije koje su omogućavale veću učinkovitost pri pretvorbi. U novije vrijeme, pri konstrukciji vjetroagregata, koriste se tri različite tehnologije za proizvodnju električne energije. Prva je tehnologija izravno priključeni indukcijski generator. Druga tehnologija je dvostruko napajajući indukcijski (asinkroni) generator dok je generator u kombinaciji s energetsom elektronikom (energetskim pretvaračem) treća tehnologija prisutna u današnje vrijeme. Također postoje i različite izvedbe turbina, a najzastupljenije su turbine s dvije ili tri lopatice i horizontalnom osovinom.[4]

Opisana pretvorba i dijelovi govore o principu rada jednog vjetroagregata. Vjetroelektrane dobivaju se povezivanjem pojedinačnih vjetroagregata u cjelinu, a poznate su i pod nazivom vjetroparkovi. Pojedinačni vjetroagregati priključuju se na srednjenaponsku mrežu. Kada je riječ o vjetroelektranama mjesto priključka na mrežu ovisi o veličini elektrane odnosno broju agregata. Manje elektrane sastavljene od 3 do 10 agregata mogu se priključiti na srednji napon, dok veće elektrane zahtijevaju priključak na visokonaponsku odnosno prijenosnu mrežu.[4]

Koliku snagu te kako će ju razviti određeni vjetroagregat na određenoj lokaciji pri određenoj brzini vjetra pokazuje krivulja snage prikazana na slici 2.4. preuzetoj iz [1]





Slika 2.4. Krivulja snage vjetroagregata [1]

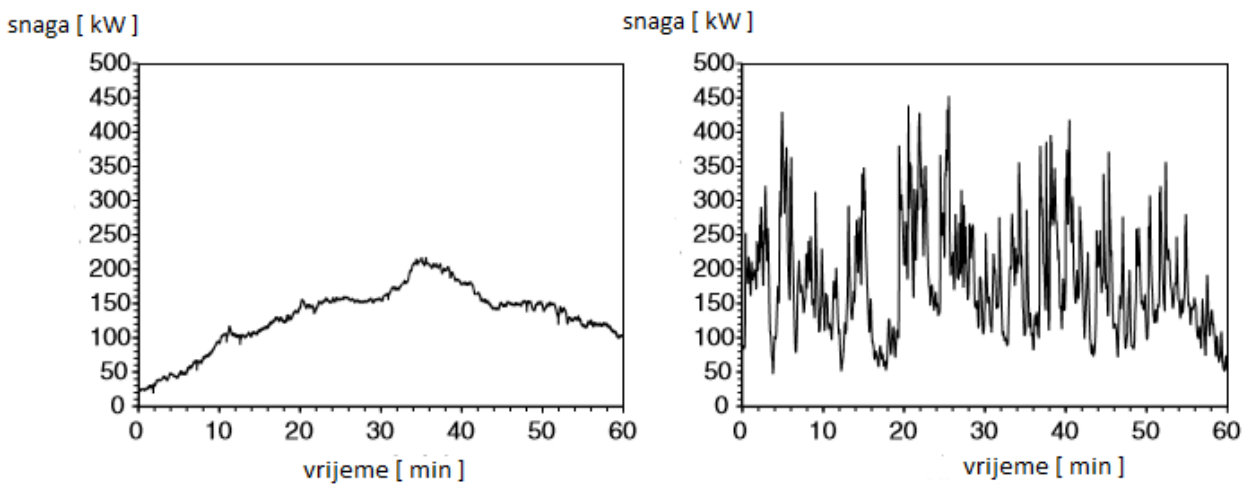
Na slici su označene četiri ključne točke ove krivulje. Prvom je točkom označena brzina uključenja određena svladavanjem tromosti, drugom je točkom označena promjena stupnja djelovanja tj. faktora snage. Instalirana snaga generatora označena je točkom 3 dok točka četiri predstavlja brzinu isključenja određenu granicama dinamičkih naprezanja. Kako proizvedena snaga uvelike ovisi o brzini vjetra logično je da se uz varijacije vjetra javljaju i varijacije proizvedene snage o čemu će detaljnije biti riječi u idućem potpoglavlju.

## 2.2. Varijacije u proizvodnim kapacitetima

Jedna od važnijih karakteristika povezanih uz proizvodnju električne energije iz energije vjetra jesu varijacije u proizvodnji. Kako proizvedena snaga ovisi uvelike o brzini vjetra, logično je da će zbog varijacija u brzini vjetra nastati i varijacije u proizvedenoj snazi. Tehnologija proizvodnje vjetroagregata utječe na to da su u većini slučajeva varijacije u kapacitetima jednake varijacijama u stvarnoj proizvodnji tj. da je proizvodnja uvijek jednaka proizvodnim kapacitetima. Moguće je smanjiti proizvodnju vjetroelektrana, ali tada je potrebno tu istu proizvodnju nadoknaditi iz nekog drugog izvora.[4]

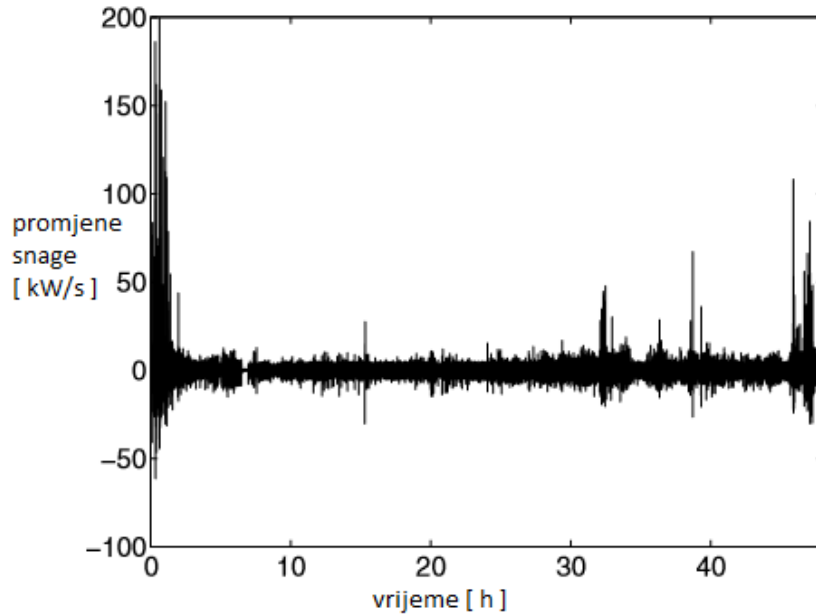
Promjene proizvodnje vjetroelektrana, kao i čimbenici koji utječu na proizvodnju, mogu se proučavati u kraćim i dužim vremenskim periodima. Promatra li se proizvodnja vjetroagregata u kratkim vremenskim periodima, trajanja nekoliko sekunda ili kraće, vidljivo je da do varijacija dolazi zbog utjecaja tornja na strujanje zraka koji se nalazi oko turbine. Ove varijacije mogu uzrokovati kolebanja snage koje uzrokuju varijacije u amplitudi napona što kod određene vrste rasvjete dovodi do promjena u intenzitetu svjetla. U ovim kratkim promatranim periodima mogu se javiti i kolebanja snage zbog položaja lopatica. Lopatice koje se nalaze u gornjem položaju

zahvaćaju više energije vjetra od lopatica koje se nalaze u donjem položaju, a ukupna energija lopatica ovisi o njihovim položajima. Također, brze promjene snage mogu uzrokovati i mehaničke oscilacije koje se javljaju u pojedinim dijelovima vjetroagregata. Ove su varijacije važne samo za pojedinačne vjetroagregate i uz korištenje energetske elektronike i pohrane električne energije ove varijacije se mogu smanjiti na minimalne vrijednosti. Kada je riječ o vjetroelektranama, spomenute promjene gube na važnosti i tada se varijacije promatraju u dužim vremenskim periodima (minutama). Glavni uzrok varijacija u dužim periodima su turbulencije. Iako je turbulencije teško predvidjeti, za svaki se vjetroagregat daje preporučeni broj turbulencija koji se mora uzeti u obzir prilikom izgradnje. Slika 2.5. preuzeta iz [4] prikazuje izmjereno kolebanje snage vjetroagregata snage 600 kW s energetske pretvaračem. Slike prikazuju dva mjerenja u trajanju od jednog sata, a razmak između mjerenja iznosi 20 sati.



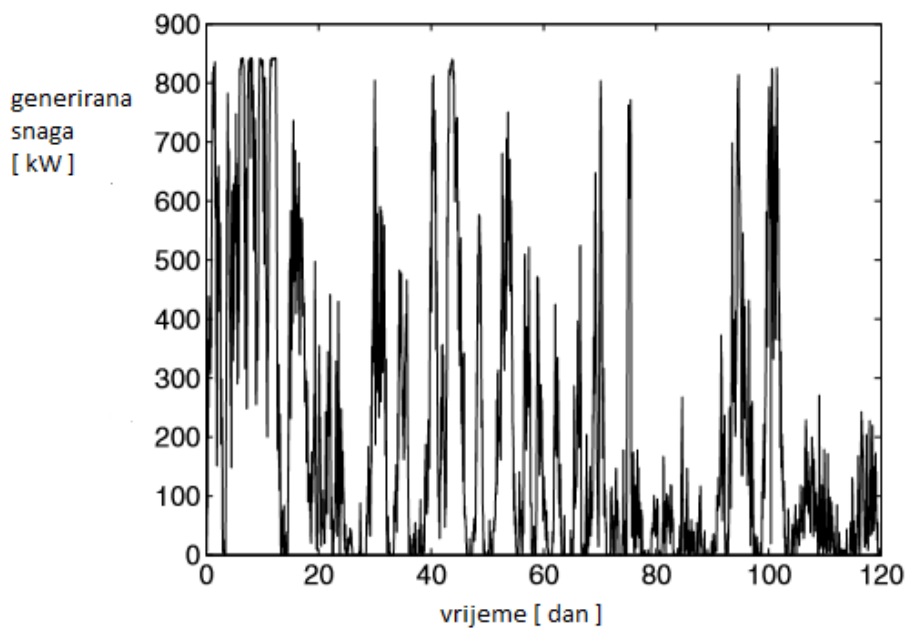
*Slika 2.5. Kolebanja snage istog vjetroagregata na istoj lokaciji tijekom dva različita perioda u trajanju od sat vremena[4]*

Iako slike prikazuju kako je moguće zabilježiti turbulencije, problem nastaje prilikom izračuna broja tih turbulencija jer još uvijek ne postoji adekvatan parametar koji bi omogućio proračune na skalama na kojima je izvršeno mjerenje. Jedna od mogućnosti je koristiti raspon između standardne devijacije i prosjeka u periodu od 10 min do 1 h, na način na koji se definira i intenzitet turbulencije. Izračune je moguće provesti na mjerenjima u kojima se promjena snage prati iz sekunde u sekundu i upravo je takvo mjerenje prikazano na slici 2.6. preuzetoj iz [4]. Treba naglasiti kako su mjerenja provedena na vjetroagregatu istom kao iz prethodnog primjera.



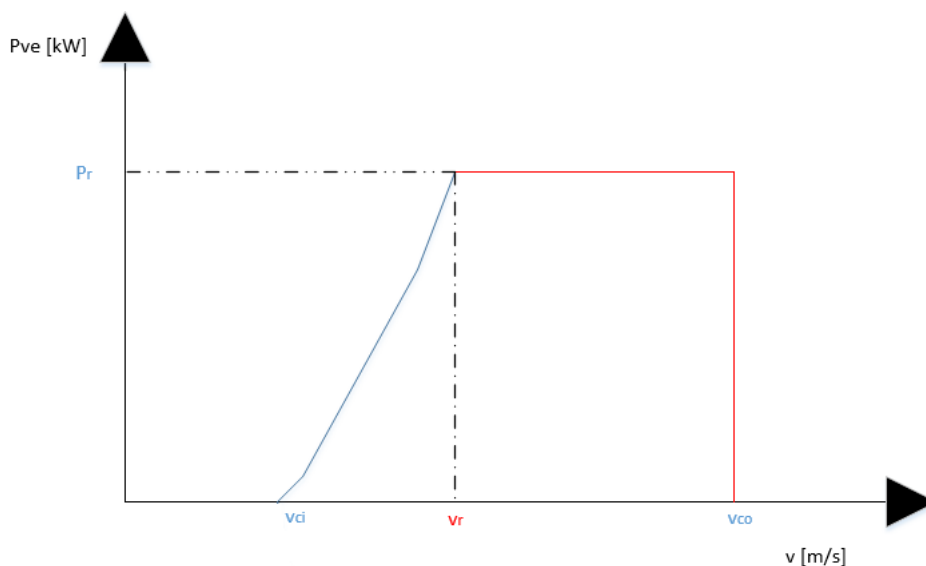
*Slika 2.6. Promjene snage iz sekundu u sekundu tijekom perioda od 48 h [4]*

Zakrivljenost sa slike 2.6. izračunata je kao razlika između dva uzastopna jednosekundna prosjeka. Dvije uzastopne vrijednosti pretežito se ne razlikuju za više od 20 kW, samo se u nekim trenucima pojavljuju vrijednosti koje premašuju 200 kW. Detaljnije o daljnjim proračunima temeljenim na izmjerenim vrijednostima iz ovog primjera može se pronaći u [4]. Kako mjerenje u intervalima izraženim u sekundama i minutama zahtijeva preciznu opremu te se na taj način nakuplja velika količina podataka, češće se provede mjerenja u kojima je vremenska jedinica sat. Također, postoje i zemlje u kojima su tipični intervali mjerenja 15 ili 30 minuta. Jedno takvo mjerenje prikazano je na slici 2.7. preuzetoj iz [4]. Riječ je o mjerenju izvršenom na agregatu snage 850 kW smještenom u Švedskoj. Mjerenje se vršilo u razdoblju od 4 mjeseca.



Slika 2.7. Generirana snaga vjetroagregata u razdoblju od 4 mjeseca [4]

Problemi koji nastaju priključenjem vjetroelektrana na prijenosni sustav nisu vezani samo za činjenicu da generirana snaga varira, nego i za činjenicu da se broj varijacija razlikuje od sata do sata te ga je teško predvidjeti. Varijacije proizvodnje mogu se prikazati krivuljom snage<sup>1</sup>. Tri su ključne brzine na ovoj krivulji koje će jednostavnije biti objasniti uz pojednostavljeni grafički prikaz dan na slici 2.8. izrađenoj prema [1].



Slika 2.8. Krivulja snage i specifične brzine [1]

<sup>1</sup> Pojam objašnjen u podpoglavlju 2.1.

Brzina na slici 2.8. označena sa  $v_{ci}$  označava brzinu uključena vjetroagregata odnosno brzinu pri kojoj on počinje proizvoditi električnu energiju te obično iznosi 3-5 m/s ovisno o proizvođaču. Druga ključna brzina je  $v_r$  koja označava nazivnu brzinu pri kojoj se generira nazivna snaga. Treća je brzina  $v_{co}$  koja označava brzinu isključenja iznad koje rad vjetroagregata nije moguć zbog prevelikih mehaničkih naprezanja. Brzina isključenja uobičajeno iznosi 20-25 m/s. Upravo se uz pomoć krivulje snage i razdiobe vjetra može inicijalno izračunati očekivana proizvodnja određenog agregata na nekoj lokaciji prema sljedećem izrazu:

$$E_{VE} = T \int P(v) f(v) dv. \quad (2-2)$$

Gdje je:

$E_{VE}$  – proizvedena energija vjetroagregata

$T$ - promatrani vremenski period

$P(v)$ - krivulja snage vjetroagregata

$f(v)$ - funkcija gustoće razdiobe brzine vjetra. [1]

### 2.3. Tereni pogodni za izgradnju vjetroelektrana

Kada se govori o pogodnim terenima za izgradnju ovih elektrana dvije su moguće opcije, kopno i pučina. Prilikom izgradnje treba voditi i računa o tome da se danju javljaju veće količine vjetra, ali i veće varijacije.

Prilikom izgradnje vjetroelektrane na kopnu treba voditi računa o izboru terena jer on uvelike utječe na količinu i brzinu dostupnog vjetra. Šume, veća naselja uvelike usporavaju vjetar, a visoka trava i raslinje također ima utjecaj. Ako se vjetroagregati pak postave na litice ili prepreke poput zgrade bit će izložene neželjenim turbulencijama. Slika 2.9. prikazuje vjetroelektranu izgrađenu na pogodnoj lokaciji, riječ je o vjetroelektrani Ravna 1 smještenoj na otoku Pagu.



Slika 2.9. Ravna 1 [5]

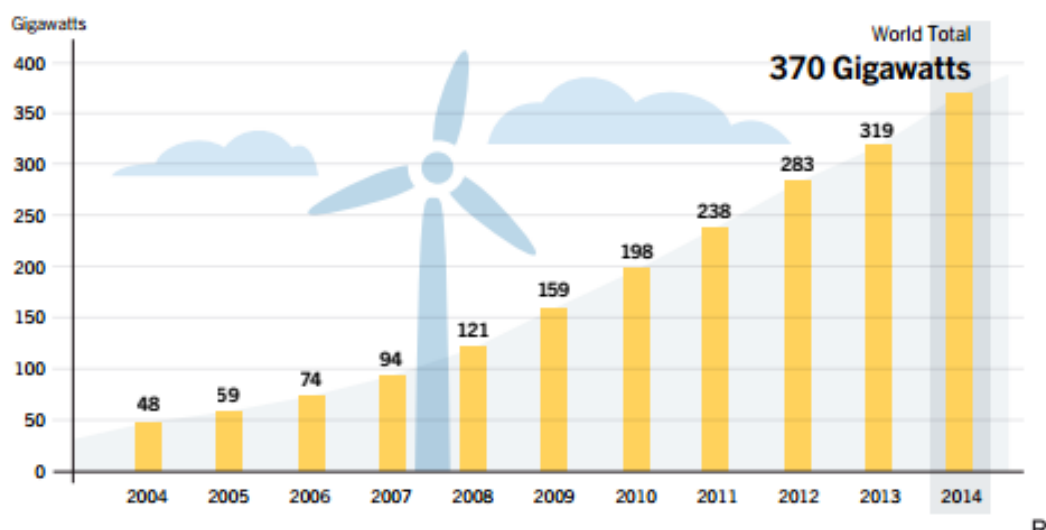


Slika 2.10. Vjetroelektrana u blizini Kopenhagena [6]

Kod izgradnje vjetroelektrana na pučini visina osovine turbine može biti manja od one na kopnu jer se brzina vjetra ne mijenja previše zbog puno manjih nepravilnosti površine. Zbog manjih turbulencija, osovine turbina imaju duži životni vijek prilikom postavljanja na pučinu, a najekonomičnija visina osovine iznosi 0,75 puta promjer rotora. Slika 2.10. prikazuje vjetroelektranu izgrađenu na pučini u blizini Kopenhagena.

## 2.4. Pregled trenutnog stanja instaliranih snaga vjetroelektrana

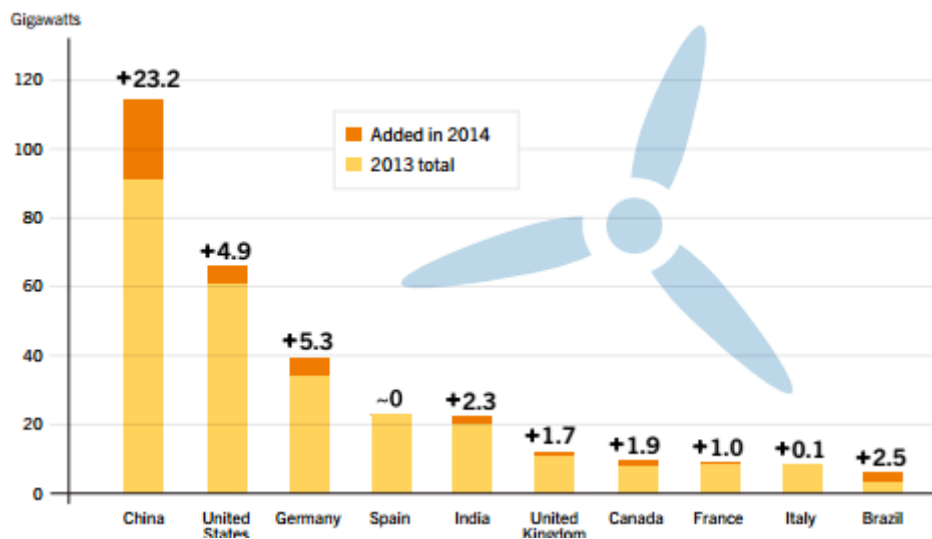
Iskorištavanje energije vjetra najbrže je rastuće područje povezano uz obnovljive izvore. U radu su obrađeni podaci za 2015. godinu jer podaci za 2016. godinu nisu bili dostupni. Podaci i slike dobiveni su iz Globalnog izvješća za obnovljive izvore iz 2015. godine [7]. Na slici 2.11. prikazana je promjena u instaliranoj snazi u razdoblju od 2004. do 2014. godine.



Slika 2.11. Instalirana snaga vjetroelektrana [7]

Iz slike 2.11. vidljivo kako je riječ o promjeni većoj od 300 GW instalirane snage u razdoblju od 10 godina.

Slika 2.12. prikazuje 10 vodećih zemalja u dodanoj instaliranoj snazi vjetroelektrana.



Slika 2.12. Vodeće zemlje u instaliranoj snazi [7]

Najveći porast u iskorištavanju energije vjetra u 2014. bilježi Kina. U 10 vodećih zemalja po proizvodnji električne energije putem vjetroelektrana u 2014. našla se i Španjolska koja u toj godini nije instalirala niti jedan novi GW snage.

### 3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pojam kvalitete električne energije važan je i za proizvođače, ali puno je važniji za potrošače. Iako je problem kvalitete poznat i od prije, tek se u novije vrijeme pokušava riješiti na razini cijelog elektroenergetskog sustava, a ne samo kao individualan problem. Različite su definicije kvalitete ovisno o aspektu gledišta. Proizvođači električne energije kvalitetu mogu definirati kao pouzdanost, proizvođači elektroenergetskih uređaja kvalitetu mogu opisati kao one karakteristike električne energije koje omogućuju ispravan rad uređaja. Najvažnija definicija kvalitete električne energije odnosi se na onu povezanu uz potrošače prema kojoj je kvaliteta definirana kao bilo koji problem povezan s naponskim, strujnim ili frekvencijskim odstupanjem koji uzrokuje kvar ili nepravilan rad na električnim uređajima potrošača. [8]

Danas se sve veća pažnja posvećuje ovom problemu iz nekoliko važnijih razloga. Uređaji koji danas sudjeluju u procesu prijenosa i distribucije električne energije sadrže različite mikroprocesorske dijelove te energetske elektronike koja pospješuje otkrivanje odstupanja u kvaliteti. Jedan od razloga je i porast broja viših harmonika u mreži zbog porasta broja visokoučinkovitih uređaja, motora s promjenjivom brzinom vrtnje i sl. Također, proizvođači električne energije više su informirani o problemima s kvalitetom koji se javljaju kod krajnjih korisnika. Posljednji razlog temelji se na činjenici kako se sve više različitih izvora električne energije te različitih uređaja integrira na mrežu što može uzrokovati brojne probleme vezane uz samu kvalitetu.[8]

Iako se najčešće upotrebljava izraz kvaliteta električne energije, u većini slučajeva radi se o kvaliteti napona. Energija se može definirati kao dostavljena snaga u vremenu, odnosno umnožak struje i napona u vremenu. Prijenosni i distribucijski sustav može utjecati i kontrolirati kvalitetu napona, ali nema kontrolu nad strujom. Stoga se standardi kvalitete odnose na kvalitetu isporučenog napona. Izmjenični sustav radi na sinusoidalnom naponu frekvencije 50 Hz u Europi odnosno 60 Hz u SAD-u stoga bilo kakva odstupanja u amplitudi, frekvenciji ili čistoći predstavljaju potencijalni problem s kvalitetom napona. Prilikom proučavanja kvalitete napona potrebno je razmatrati i smetnje<sup>2</sup> povezane uz struju jer su napon i struja usko povezani. Prolaskom struje kroz impedanciju mreže mogu se stvoriti odstupanja od sinusnog napona proizvedenog u generatoru.[8]

---

<sup>2</sup> U nekim literaturama za strujne i naponske smetnje koriste se izrazi strujni i naponski fenomeni

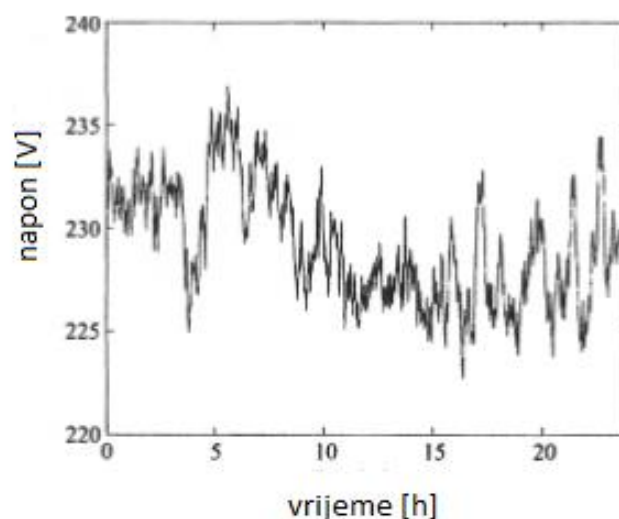


Svako odstupanje napona ili struje od idealnog valnog oblika smatra se smetnjom vezanom uz kvalitetu napona. Ove se smetnje mogu podijeliti u dvije kategorije:

1. Prvu kategoriju čine varijacije napona i struje. To su manja odstupanja od nazivne ili željene vrijednosti jer stvarne karakteristike napona i struje nikada ne mogu u potpunosti odgovarati idealnima. Nadziranje stvarnih vrijednosti treba vršiti kontinuirano kako ne bi došlo do prevelikih odstupanja.
2. Drugu kategoriju čine odstupanja koja se nazivaju događaji. Događaji su povremena značajna odstupanja od normalnog ili idealnog valnog oblika struje i napona. Primjeri takvih događaja su pad napona na nulu tijekom kratkog spoja ili previsoke struje koje se javljaju prilikom prebacivanje preklopke neopterećenog transformatora. [9]

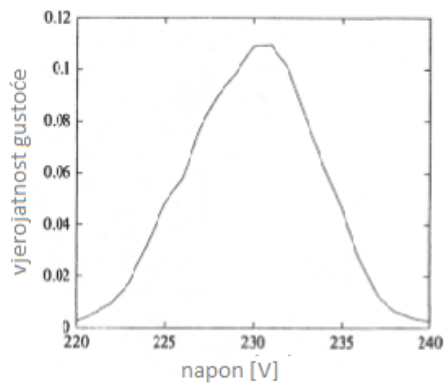
### 3.1. Promjene napona i struje

Ove su promjene relativno mala odstupanja karakteristika struje i napona od nazivnih ili idealnih vrijednosti. Osnovni primjeri su amplituda napona i frekvencija čije su vrijednosti približno jednake nazivnima, ali nikada u potpunosti jednake. Za statistički opis devijacije koriste se funkcija gustoće vjerojatnosti te razdioba vjerojatnosti. Primjer prikazan na slici 3.1. preuzet iz [9] prikazuje fiktivne promjene amplitude napona kroz vrijeme. Riječ je o distribucijskom naponu očekivane vrijednosti 230 V i standardne devijacije 11,9 V.

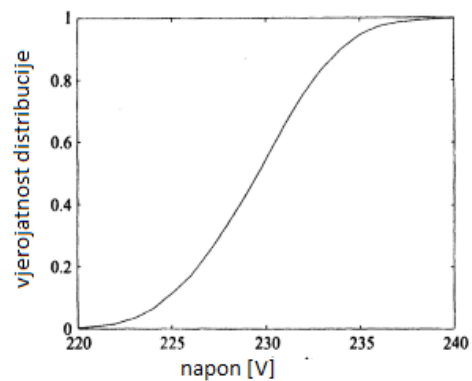


Slika 3.1. Amplituda napona kao funkcija vremena [9]

Funkcija gustoće vjerojatnosti daje vjerojatnost da će amplituda napona biti unutar određenog opsega. Najčešće se koristi za određivanje vjerojatnosti hoće li amplituda biti ispod ili iznad neke određene vrijednosti. Izravne informacije daje funkcija razdiobe vjerojatnosti koja predstavlja integral funkcije gustoće vjerojatnosti. Spomenute funkcije primjera sa slike 3.1. dane su slikama 3.2. i 3.3.



Slika 3.2. Funkcija gustoće vjerojatnosti [9]



Slika 3.3. Funkcija razdiobe vjerojatnosti [9]

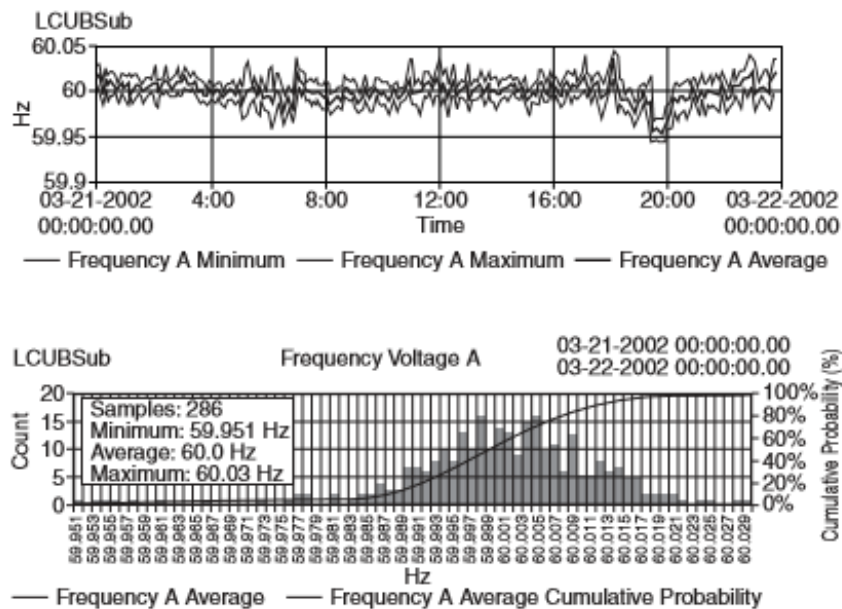
Postoji širok opseg različitih naponskih i strujnih promjena, a s pojavom novih uređaja javljaju se i nove promjene. U nastavku rada detaljnije će biti objašnjene neke uobičajene promjene. Treba napomenuti da svi nazivi koji će biti korišteni u daljnjem tekstu nisu nazivi koji se preporučuju po IEC (Međunarodna komisija za elektrotehniku) ili IEEE (Institut inženjera elektrotehnike i elektronike) standardu. [9]

### 3.1.1. Promjene amplitude napona i frekvencije

Porast i smanjenje amplitude napona može se dogoditi zbog tri razloga. Prvi je razlog promjena opterećenja u dijelu sustava ili cijelom sustavu. Drugi je razlog povezan uz promjenu položaja preklopke transformatora, a treći je povezan uz uključivanje i isključivanje kondenzatorskih baterija ili reaktancije. Uobičajeno, promjene amplitude napona prate promjene opterećenja. Brze promjene amplitude napona nazivaju se treperenja napona. Promjene u amplitudi napona prikazane su na slici 3.1. u potpoglavlju 3.1.[9]

Promjene frekvencije nastaju kao posljedica neravnoteže između opterećenja i proizvodnje. Promjene frekvencije nastale kao posljedica kvara na elektranama ili kao posljedica kratkog spoja, također se ubrajaju u ovu vrstu promjena iako bi točnije bilo smjestiti ih u događaje. Naziv devijacija frekvencije također se odnosi na ove varijacije.[9] Slika 3.4. prikazuje varijacije u frekvenciji zabilježene na 13 kV sabirnici. Vidljiva je statistička distribucija

frekvencije, a slika je preuzeta iz [8]. Srednji iznos frekvencije je 60 Hz što ukazuje da je mjerenje izvršeno na području SAD-a, gdje elektroenergetski sustav radi nazivnom frekvencijom tog iznosa.



Slika 3.4. Varijacije frekvencije i statistička distribucija 13 kV sabirnice [8]

### 3.1.2. Promjene amplitude i faza struje

Amplituda struje također nije konstantnog iznosa i upravo su promjene u amplitudi napona posljedica promjena u amplitudi struje. Prilikom izgradnje distribucijskog sustava, amplituda struje ima vrlo važnu ulogu. Distribucijski sustav mora biti izgrađen prema maksimalnom iznosu struje. Kako se prihod računa prema srednjim iznosima struje može se zaključiti da će što konstantnija struja dati jeftiniji energiju po isporučenoj jedinici. [9]

Promjene faza struja mogu se objasniti i prilikom objašnjavanja faktora snage ili reaktivne snage. One predstavljaju odstupanja od idealnog slučaja u kojem su valni oblici napona i struje u fazi, faktor snage opterećenja jednak je faktoru snage proizvodnje, a potrošnja reaktivne snage jednaka je nuli.[9]

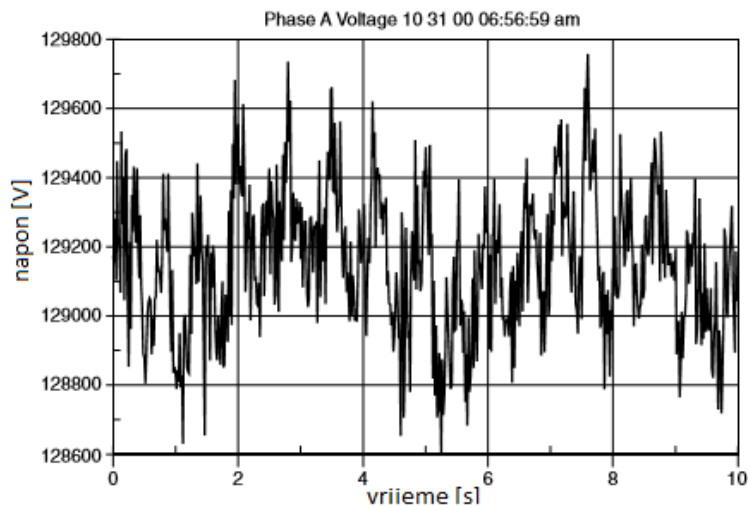
### 3.1.3. Nesimetrija struje i napona

Riječ je o nesimetriji u trofaznom sustavu u kojem kutevi između napona faza ili efektivne vrijednosti napona nisu jednake. Postoji više pokazatelja nesimetrije, a neki od važnijih su nesimetrija inverzne komponente, nesimetrija amplitude i fazna nesimetrija. Nesimetrija

inverzne komponente odnosi se na nejednakost opsega direktne i inverzne komponente napona. Različite vrijednosti najviših i najnižih iznosa amplitude napona te različita srednja vrijednost amplitude po fazama odnose se na nesimetriju amplitude. Najčešći izvor nesimetrije struje i napona je nesimetrija opterećenja i primarno predstavlja problem za trofazne potrošače. Nesimetrija dovodi do dodatne proizvodnje topline kod sinkronih i indukcijskih strojeva što smanjuje učinkovitost i dovodi do prigušenja. Dok kod trofaznih diodnih ispravljača mala nesimetrija napona dovodi do velike nesimetrije struje, a najveća struja javit će se u fazi s najvišim naponom. U literaturi se ova smetnja skraćeno naziva i nesimetrija napona. [9]

### 3.1.4. Kolebanje napona

Kolebanja napona su serije promjene napona ili periodične promjene envelope napona. Kod kontinuiranih opterećenja brze promjene u amplitudi napona mogu izazvati varijacije napona koje se nazivaju flikeri. Kolebanja napona i flikeri često se koriste za opisivanje ista pojave, ali tehnički gledano to su dvije različite smetnje. Kolebanje je elektromagnetska smetnja, a fliker je nepoželjna posljedica kolebanja napona pri nekim opterećenjima. Slika 3.5. prikazuje primjer kolebanja napona. Upravo je lučna peć najčešći izvor flikera u industriji.



*Slika 3.5. Naponska kolebanja uzrokovana radom lučne peći [9]*

Definiranje flikera odvija se na sljedeći način: ako u prostoriji boravi 100 ljudi pod istim uvjetima, a intenzitet svjetla se mijenja tako da to opazi 50 ljudi, fliker ima intenzitet 1. Intenzitet 1 je granična vrijednost koju fliker smije imati. Amplituda flikera mjeri se u efektivnim vrijednostima i izražava u postotku u odnosu na osnovnu vrijednost. Prilikom

mjerenja flikera razlikujemo kratkotrajne i dugotrajne flikere. Kratkotrajni se mjere u intervalima od 10 minuta i čine osnovu za proračun dugotrajnih flikera prema sljedećem izrazu [10]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3-1)$$

Gdje je:

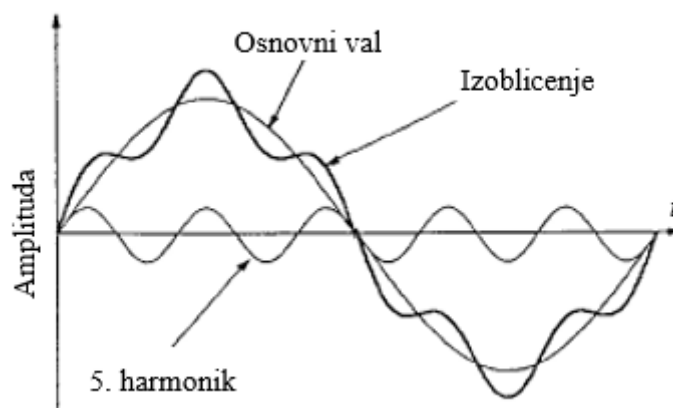
$P_{lt}$ - dugotrajni flikeri

$P_{st}$ - kratkotrajni flikeri

Dugotrajni flikeri računaju se na temelju 12 uzastopnih vrijednosti kratkotrajnih flikera. [8] i [10]

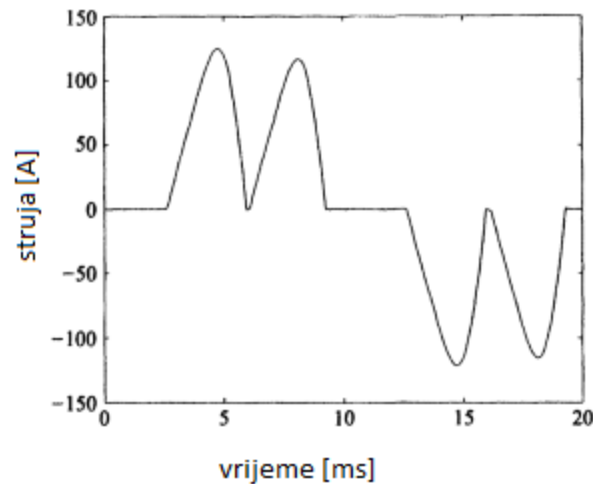
### 3.1.5. Struje i naponi viših harmonika te međuharmonici

Periodični valni oblik napona opisuje se kao suma sinusnih valova s odgovarajućim frekvencijama koje su nazivnici osnovne frekvencije. Frekvencije koje ne predstavljaju nazivnike osnovne frekvencije nazivaju se viši harmonici napona. Ovaj se fenomen može pojaviti iz brojnih razloga. Primjerice napon generiran iz sinkronih strojeva nije savršenog sinusnog oblika niti su sva opterećenja u potpunosti linearna. Dodatni gubici i zagrijavanje su glavne negativne posljedice koje fenomen uzrokuje. Kada je riječ o fenomenima koji se u malim postocima razlikuju od normalne vrijednosti, uređaji i strojevi mogu raditi bez oštećenja. Povremeno se može javiti velika količina viših harmonika koja predstavljaju veliki problem u industrijskim postrojenjima. Primjer višeg harmonika napona dan je slikom 3.6.



Slika 3.6. Izobličeni sinusni val [10]

Viši harmonici napona i struje usko su povezani jer su viši harmonici napona uglavnom posljedica nesinusoidalnih strujnih opterećenja. Viši harmonici struje javljaju se kod preopterećenja serije različitih komponenti kao što su transformatori, kabeli i sl. Ovako deformirana struja uzrokuje veće gubitke od sinusoidalne struje iste efektivne vrijednosti. Primjer višeg harmonika struje dan je slikom 3.7. te je tipičan za izmjenične uređaje s promjenjivom brzinom vrtnje.



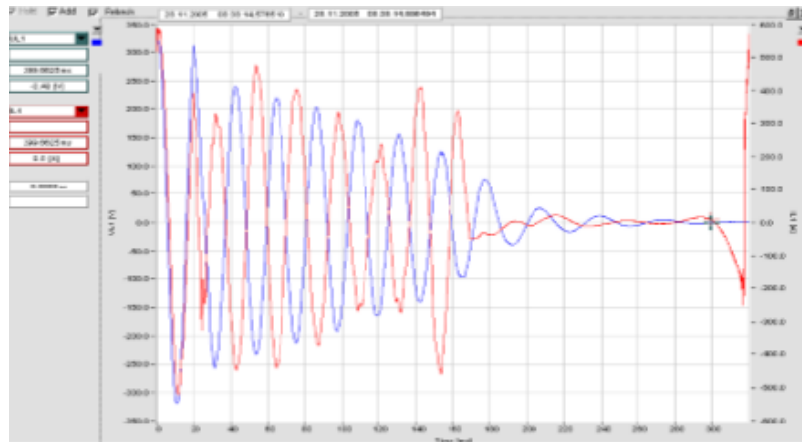
Slika 3.7. Deformirani valni oblik struje [9]

Neki uređaji, poput kontrolera topline, proizvode strujne komponente frekvencije koja nije cjelobrojni višekratnik osnovne frekvencije. Takve komponente nazivaju se međuharmonici i najčešće ne uzrokuju probleme. Potencijalan problem predstavljaju struje frekvencije koja je niža od osnovne jer mogu dovesti do zasićenja transformatora te oštetiti generator i turbine. Čest izvor međuharmonika su lučne peći, uređaji za zavarivanje te frekvencijski pretvarači. [9]

### 3.2. Naponski i strujni događaji

Događaji su smetnje koje se javljaju <sup>samo</sup> povremeno, a najpoznatiji primjer događaja je prekid opskrbe prikazan na slici 3.8. Događaji se opisuju pomoću vremena između dva događaja i karakteristika događaja. Tako se primjerice previsoki naponi opisuju kroz sljedeće karakteristike: amplitudu koja predstavlja maksimalni iznos napona ili maksimalno odstupanje od normalnog valnog oblika, trajanje previsokog napona koje se može definirati kao vrijeme

potrebno naponu da se oporavi unutar 10% iznosa amplitude previsokog napona i sl. Detaljnije o naponskim i strujnim događajima u potpoglavljima koja slijede. [9]

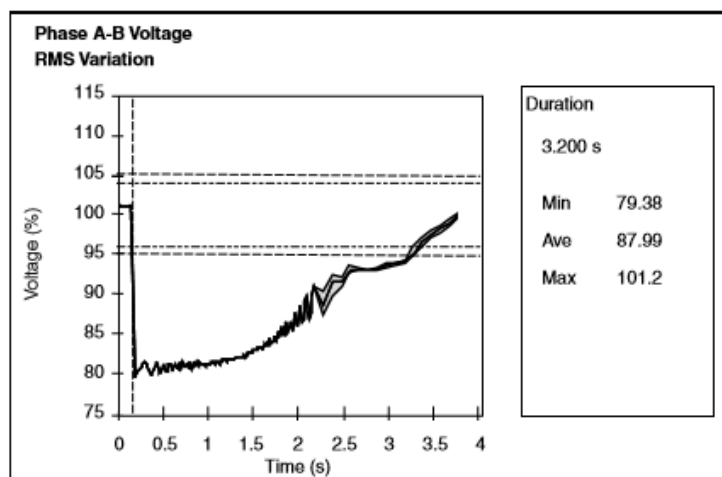


*Slika 3.8. Valni oblici prilikom prekida opskrbe [10]*

### **3.2.1. Prekid opskrbe i naponski propadi**

Prekid napona na mjestu opskrbe je takvo stanje u kojem je napon iznosa blizu nule. Prema IEC standardu niži od 1% nazivnog napona, a prema IEEE standardu niži od 10%. Prekidi mogu biti planirani i neplanirani, a prema trajanju se dijele na kratkotrajne koji traju do uključivo 3 minute te dugotrajne koji traju dulje od 3 minute. Dugotrajni prekidi nastaju prilikom izoliranja mjesta kvara u mreži tj. posljedica djelovanja zaštitnih uređaja te zbog svjesnog otvaranja prekidača zbog djelomičnog kvara. Brojne su nepoželjne posljedice koje mogu nastati uslijed prekida koje se javljaju kod sinkronih i asinkronih motora, računalne opreme, pogona s promjenjivom brzinom itd. [9], [10]

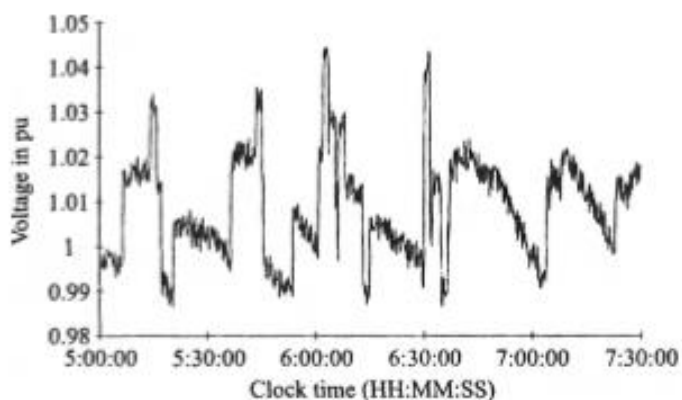
Naponski propadi definiraju se kao kratkotrajno sniženje efektivne vrijednosti opskrbnog napona, a najčešće su posljedica kratkog spoja u mreži. Osim prilikom kratkog spoja, naponski propadi mogu nastati prilikom pokretanja velikih motora ili prilikom pojave velikih opterećenja. Slika 3.9. prikazuje naponski propad uzrokovan pokretanjem motora. Više o ovom poremećaju bit će rečeno u poglavlju 3. [8]



Slika 3.9. Naponski propad prilikom pokretanja motora [8]

### 3.2.2. Previsoki naponi i preniski naponi

Previsoki naponi se mogu naći pod različitim imenom ovisno o vremenu trajanja. Kratkotrajni previsoki naponi visoke amplitude nazivaju se tranzijenti prenaponi, ali mogu se naći i pod nazivom „naponski šiljci“ ili „naponski udari“. Oni su posljedica prijelaznih pojava, kratkih spojeva te uklapanja i isklapanja. Dugotrajni prenaponi nazivaju se previsoki naponi i označavaju stanje kada napon prekorači gornju granicu propisanu prema normi ( U Europi  $U_n + 10\%$ ). Brojne su posljedice previsokih napona. Oštećenje i kvarovi opreme, smanjeni životni vijek opreme, toplinski udari i požari samo su neke od njih. [10]. Slika 3.10. prikazuje kratkotrajne prenapone snimljene u Švedskoj prilikom uklapanja i isklapanja transformatora.



Slika 3.10. Kratkotrajni previsoki napon[9]



Kratkotrajni preniski naponi poznati su pod nazivom naponski propadi i detaljnije su objašnjeni u potpoglavlju 3.2.1. Naziv preniski naponi najčešće se odnosi na dugotrajne preniske napone. Dugotrajni preniski naponi su oni koji traju dulje od 1 minute. Upravo se oni povezuju s problemima u sustavu koje uzrokuju preniski naponi, a uobičajeno se mogu kontrolirati naponskom regulacijskom opremom.

### 3.3. Standard kvalitete električne energije

U Europi norma EN 50160 opisuje obilježja opskrbnog napona povezana uz valni oblik, frekvenciju, simetriju i veličinu. Odnosi se na obilježja napona u niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnom pogonu. Ovaj standard razvila je organizacija CENELEC<sup>3</sup> čija je misija pripremanje dobrovoljnih elektrotehničkih standarda koji pomažu razvoju jedinstvenog europskog tržišta za električna i elektronička dobra i usluge, uklanjajući na taj način barijere za trgovanje, stvaranje novih tržišta i smanjivanje troškova. [10] Republika Hrvatska preuzela je ovaj standard 2012. godine pod nazivom HRN EN 50160:2012 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“. Organizacija koja priprema i izdaje međunarodne standarde na ovom području je IEC. Tablica 3.1. daje pregled pokazatelja kvalitete prema normi EN 50160.

Tablica 3.1. Pokazatelji kvalitete prema IEC [10]

Pokazatelj	Mjerna jedinica	Obilježja NN	Obilježja SN
Promjene napona	V	$\pm 10\% U_n$ za 95% tjedna	$\pm 10\% U_n$ za 95% tjedna
		+10/-15% 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 tisuća godišnje	
THD napona	$\% U_n$	< 8% $U_n$	
Treperenje	$P_{It}$	$P_{It} \leq$ , za 95% tjedna	
Nesimetrija	$\% U_n$	< 2% $U_n$	
Frekvencija	Hz	$\pm 1\% U_n$ za 95% godine	
		+4/ -6% $U_n$ za 100% vremena	

<sup>3</sup> engl. European Committee for Electrotechnical Standardization

Standarde u kvaliteti električne energije daje i organizacija IEEE, neprofitno udruženje koje je izraslo u najveću organizaciju na svijetu. Ovi su standardi prihvaćeni na području Sjedinjenih Američkih Država. Tablica 3.2. daje pregled ograničenja prema ovim standardima.

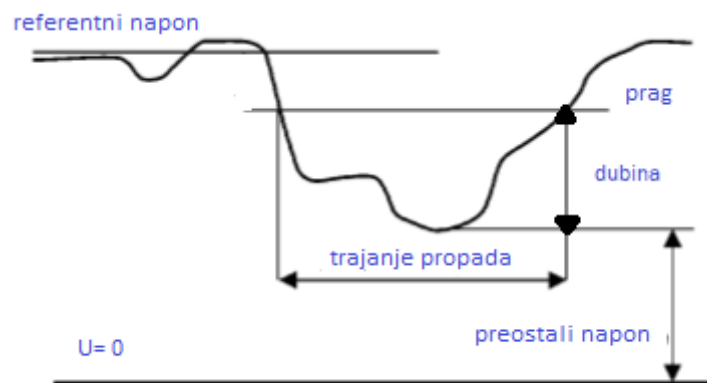
*Tablica 3.2. Pregled ograničenja prema IEEE [10]*

Pokazatelj	Ograničenje	Komentar
Naponski propad	< 108 V rms	-10% $U_n$
Prenapon	> 126 V rms	+5 % $U_n$
Tranzijent	200 V	Približno 2 puta fazni napon
THD napona	< 5%	
Frekvencija	-	
Naponska nesimetrija	2 %	

## 4. UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA NAPONSKE PROPADAE

### 4.1. Naponski propadi

Naponski propadi su dvodimenzionalni poremećaji. Određeni su iznosom napona i vremenom trajanja. Definiiraju se kao kratkotrajno sniženje efektivne vrijednosti opskrbnog napona, a najčešće su posljedica kratkog spoja u mreži. Slikom 4.1. dane su karakteristike pomoću koji se može opisati naponski propad.



Slika 4.1. Karakteristike naponskog propada [11]

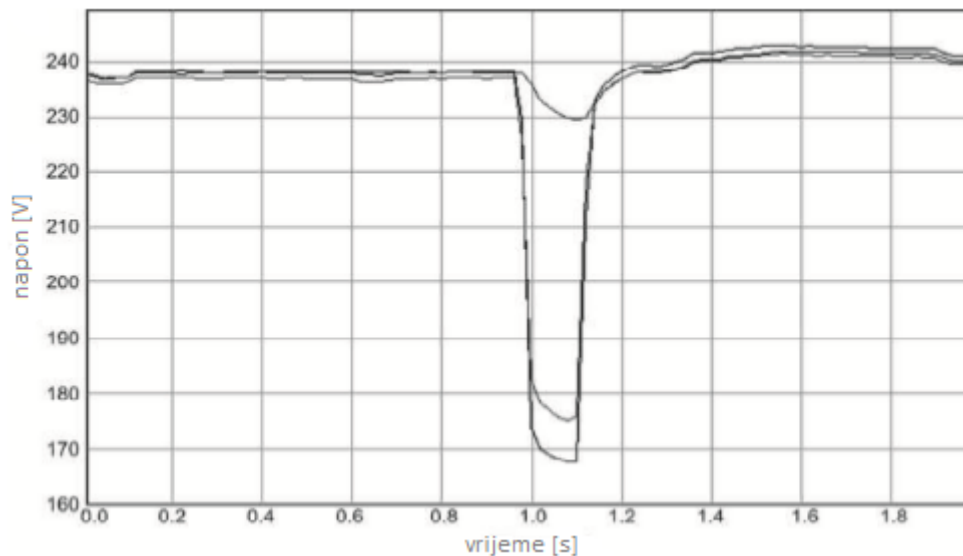
Referentni napon je osnovni napon<sup>4</sup> na temelju kojeg se dubina propada te prag izražavaju u jediničnim vrijednostima. On ovisi o karakteristikama distribucijske i prijenosne mreže.

Za dubinu naponskog propada koriste se i izrazi amplituda te iznos, a definira se kao razlika između referentnog i preostalog napona tijekom trajanja propada. Osim u voltima, može se izraziti u postocima ili jediničnim vrijednostima referentnog napona. Iznos amplitude je nasumična vrijednost koja ovisi o položaju u mreži u odnosu na kratki spoj. Promatra li se dio mreže od izvora do kratkog spoja, dubina propada može biti od 0% do 99% ovisno o iznosu impedancija na tom dijelu mreže. Što je promatrana lokacija bliže kratkom spoju niži je preostali napon. Postoje razlike i u naponskim propadima uzrokovanim kratkim spojevima u prijenosnoj mreži te onima uzrokovanim kratkim spojevima u distribucijskoj mreži. Naponski propadi u prijenosnoj mreži mogu se rasprostirati na širokom području do nekoliko stotina kilometara dok su u distribucijskoj mreži propadi značajnije manjeg područja rasprostiranja. Kratki spoj u instalacijama potrošača može uzrokovati propade amplituda sličnih kao i kratki spojevi u

<sup>4</sup> Najčešće nazivni napon

prijenosnoj i distribucijskoj mreži, ako je promatrana lokacija u blizini potrošača. Osim o vrsti kratkog spoja, amplituda propada ovisi i o načinu spajanja namota transformatora između kratkog spoja i promatrane lokacije.

Trajanje propada je period između trenutka kada iznos napona padne ispod praga i trenutka kada iznos ponovo dosegne vrijednost iznad praga. Vrijeme trajanja propada najčešće je određeno vremenom prorade sustava zaštite koji isključuje kratki spoj iz mreže. Slika 4.2. prikazuje naponski propad u trajanju od nekoliko milisekundi. [11]

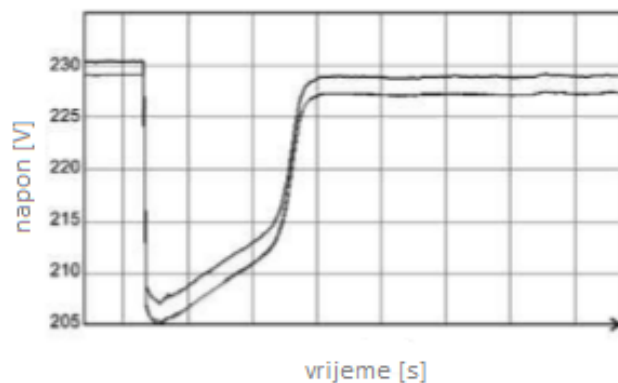


*Slika 4.2. Naponski propad uzrokovan nesimetrični daljinskim napajanjem [11]*

#### **4.1.1. Izvori naponskih propada**

Već je rečeno da je glavni uzrok naponskih propada pojava kratkog spoja u mreži. Kratki spoj izaziva pojavu visokih struja koje će pak uzrokovati velike padove napona na impedancijama u mreži. Kako je većina mreža trofazna razlikuju se različite vrste kratkih spojeva. Postoje trofazni, dvofazni, dvofazni kratki spoj sa zemljom te jednofazni. Nakon prorade zaštitnih uređaja dolazi do oporavka napona te propad nestaje.

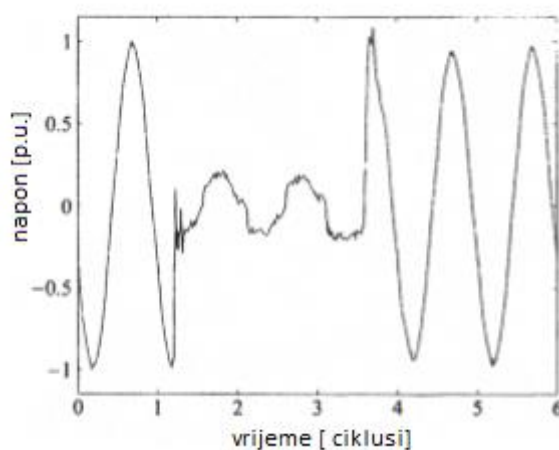
Osim kratkog spoja propadi mogu nastati prilikom pokretanja velikih motora ili prilikom velikih opterećenja. Jedan je takav propad prikazan na slici 4.3. Ova velika kolebanja amplitude uzrokuju i velika kolebanja struje što dovodi do posljedica sličnih onima prilikom kratkog spoja.[11]



Slika 4.3. Naponski propad prilikom pokretanja velikog motora [11]

#### 4.1.2. Nadzor naponskih propada

Postoje različiti načini za nadzor iznosa amplitude naponskog propada, a najčešći je onaj koji prati efektivnu vrijednost napona. Postoje i načini za određivanje vrijednosti napona iz osnovnog napona i vršnog napona koje se mogu primijeniti sve dok je napon sinusnog valnog oblika. Slika 4.4. prikazuje primjer naponskog propada na kojem će biti objašnjene metode nadzora. Vrijeme je slici 4.4. izraženo u „ciklusima“ osnovne frekvencije koji su tipičnog trajanja od nekoliko sekundi do nekoliko desetaka sekundi.



Slika 4.4. Naponski propad uzrokovan kratkim spojem [9]

Efektivna vrijednost napona računa se na temelju slučajnih uzoraka napona u vremenu prema sljedećem izrazu:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (4-1)$$

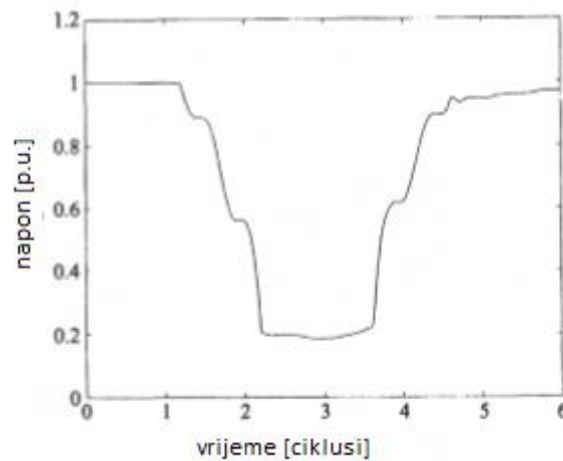
Gdje je:

$V_{rms}$ - efektivna vrijednost napona

$N$ - broj uzoraka po ciklusu

$v_i$ - uzorci napona [9]

Slika 4.5. prikazuje rezultate primjene izraza (4-1) na naponski propad. Primjena je izvršena u jednom ciklusu s 256 uzoraka napona.



Slika 4.5. Efektivna vrijednost napona prikazanog na slici 4.4.[9]

Vidljivo je kako efektivna vrijednost napona ne pada odmah na najnižu vrijednost te kako za vrijeme propada ona nije konstantnog iznosa. Također, napon se ne oporavlja trenutno nego je za to potrebno neko određeno vrijeme.[9]

Kada se nadzor vrši preko osnovnog napona, on se kao funkcija vremena računa prema sljedećem izrazu:

$$V_{fund}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t v(\tau) e^{j\omega_0 \tau} d\tau \quad (4-2)$$

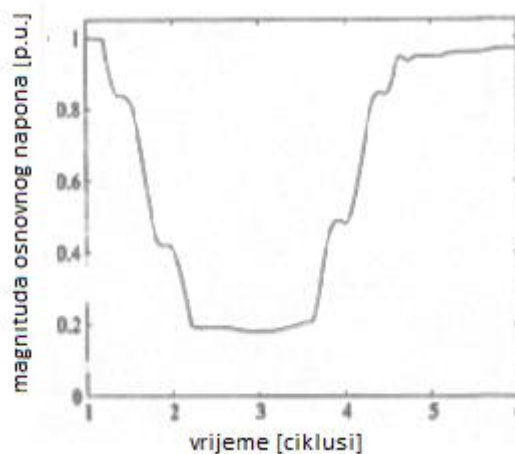
Gdje je:

$V_{fund}$ - osnovni napon

$T$ - jedan ciklus osnovne frekvencije te

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (4-3)$$

Apsolutna vrijednost ovoga napona odgovara iznosu amplitude napona u vremenu. Ova frekvencijsko-vremenska analiza ima široku primjenu kod digitalnih signala, ali se u budućnosti očekuje i šira primjena u energetici. Slika 4.6. prikazuje amplitudu komponente osnovnog napona. Vidljive su sličnosti sa rezultatom koji se dobio uporabom efektivne vrijednosti napona. Prednost uporabe efektivne vrijednosti je mogućnost proračuna i u poluciklusima dok je kod osnovnog napona taj proračun puno složeniji.[9]



Slika 4.6. Magnituda komponente osnovnog napona naponskog propada [9]

Vršni napon kao funkcija vremena računa se prema sljedećem izrazu:

$$V_{peak} = 0 < \tau > T^{\max |v(t-\tau)|} \quad (4-4)$$

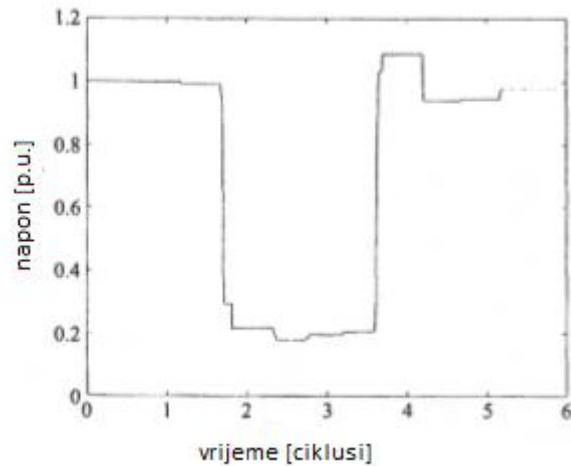
Gdje je:

$V_{peak}$ - vršni napon

$v(t)$ - uzorak valnog oblika napona

$T$ - cjelobrojni višekratnik jednog poluciklusa.

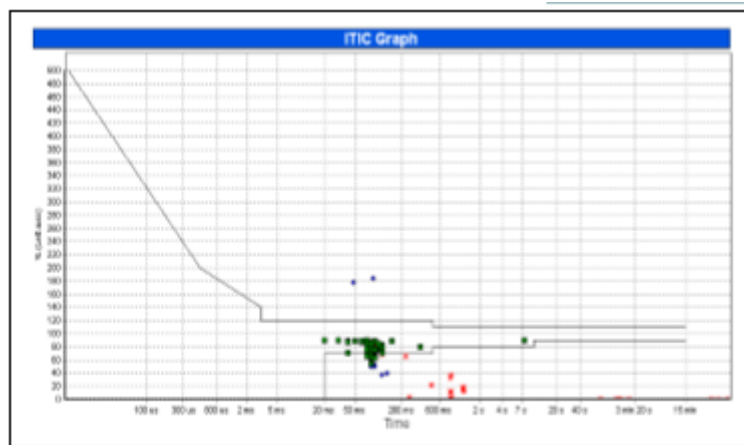
Slika 4.7. prikazuje vršni napon poluciklusa naponskog propada. Vršni napon pokazuje oštar pad i oštar rast. Za razliku od efektivne vrijednosti napona, vršna vrijednost pokazuje da napon nakon oporavka prekoračuje iznos napona prije naponskog propada.[9]



*Slika 4.7. Vršni napon poluciklusa naponskog propada [9]*

#### 4.1.3. Posljedice naponskih propada

Izvori električne energije tijekom smetnji ne mogu raditi u normalnom pogonu. Stoga, ovisno o vrsti smetnje, prestaju s proizvodnjom ili rade u ograničenom režimu. Ove promjene u proizvodnji imaju utjecaj i na električnu i elektroničku opremu. Prilikom pojave propada, sinkroni i asinkroni motori usporavaju zbog pada momenta. Moment pada zbog njegove ovisnosti o naponu. Kod asinkronih motora moment je proporcionalan kvadratu napona, a kod sinkronih proporcionalan je naponu. Koliki će biti pad momenta ovisi o trajanju i dubini propada, o inerciji rotirajuće mase te karakteristici moment-brzina pogonjenog tereta. Računalna oprema osjetljiva je na propade koji su dublji od 10% nazivnog napona. Toleranciju računalne opreme prema naponskim propadima daje ITIC krivulja prikazana na slici 4.8.



*Slika 4.8. ITIC krivulja [10]*



Radi li računalna oprema izvan granica tolerancije može doći do netočnih naredba, gubitka podataka ili pak kvara ili isključenja opreme. Pogoni s promjenjivom brzinom vrtnje obično mogu tolerirati propade do 15% nazivnog napona. Veći naponski propadi mogu uzrokovati nedovoljan opskrbni napon za motor, strujnu nesimetriju na jednoj fazi i sl.

## 4.2. Utjecaj vjetroelektrana na elektroenergetski sustav

Promjenjivost proizvedene snage vjetroelektrane utječe na kvalitetu električne energije. Pod utjecajem vjetroelektrana mogu se dogoditi dinamičke promjene napona te promjene napona u stacionarnom stanju. Detaljni prikaz utjecaja vjetroelektrana na kvalitetu prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9. Problemi uzrokovani proizvodnjom iz vjetroelektrane [12]

Promjena napona u stacionarnom stanju nastaje zbog injektirane struje u mrežu, a napon na mjestu priključka može se približno računati prema sljedećem izrazu:

$$U \approx R \cdot \frac{P}{U_n} - X \cdot \frac{Q}{U_n} + U_n \quad (4-5)$$

Gdje su:

$U$ - napon na mjestu priključka vjetroelektrane

$R$ - radni otpor mreže

$p$ - proizvedena radna snaga

$U_n$ - nazivni napon mreže

$X$ - induktivni otpor mreže

$q$ - proizvedena jalova snaga.

Dinamičke promjene napona koje se mogu pojaviti su flikeri, viši harmonici te tranzijenti uzrokovani sklapanjem. Flikeri nastaju zbog turbulencija koje uzrokuju variranje napona u rasponu od 0,01 do 10 Hz. Viši harmonici nastaju kao posljedica rada energetskih pretvarača koji su sastavni dio vjetroelektrana. Tablica 4.1. prikazuje popis problema povezanih uz kvalitetu i uzroke koji ih stvaraju. [10]

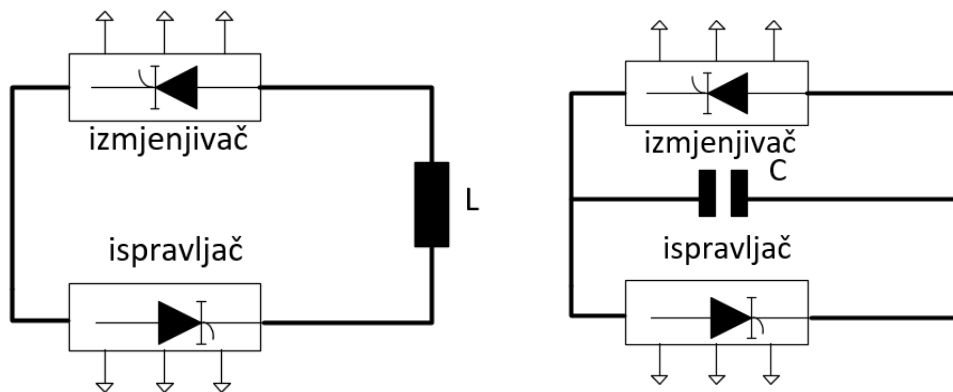
Tablica 4.1. Uzroci problema u kvaliteti [10]

PROBLEM	UZROK
Promjena napona	Promjena brzine vjetra
Udarci struje	Udar vjetra
Emisija flikera	Promjena brzine vjetra
Emisija flikera	Uključenje/isključenje vjetroagregata
Pad napona	Struja uklopa generatora
Harmonici	Energetski pretvarači

Utjecaj vjetroelektrana na mrežu je širokog raspona, a njen se priključak vrši putem sinkronih i asinkronih generatora te energetske elektronike. Kada se sinkroni generatori koriste u paralelnom radu s obnovljivim izvorom poput vjetroelektrane glavni je problem mogućnost pojave otočnog pogona. Otočni pogon može se javiti prilikom otvaranja prekidača napajanja ili prorade nadstrujne zaštite. Ako se u mreži s priključenom vjetroelektranom nalazi više povezanih generatora, oni moraju raditi s jednakim faktorom snage ili imati istu kontrolu jalove snage. Ove je uvjete potrebno ispuniti jer međusobno povezani sinkroni generatori nemaju dovoljno kapaciteta za regulaciju napona te se izbjegava mogućnost pojave otočnog rada. Također, sinkroni generatori ne proizvode idealan sinusni napon te se prilikom rada s vjetroelektranama mora voditi računa o trećem harmoniku koji generator unosi u mrežu.

Glavni problem koji se javlja prilikom uporabe asinkronih odnosno indukcijskih generatora je potreba za reaktivnom snagom koju vuku iz mreže. Ovaj se problem javlja neovisno o priključenom ili nepriključenom obnovljivom izvoru. Problem se rješava lokalnim dodavanjem kondenzatora što može uzrokovati nove probleme vezane uz kvalitetu energije. Primjer takvog problema je da kondenzatori mogu uzrokovati rezonanciju koja se može podudarati s harmonicima proizvedenim u istom postrojenju.[8]

Energetska elektronika koristi se prilikom spajanja na mrežu nekih od obnovljivih izvora pa tako i vjetroelektrana. Kako su s vremenom rasli kapaciteti instaliranih snaga obnovljivih izvora, tako je došlo i do napretka energetske elektronike. Slike 4.10. i 4.11. prikazuju samokomutirajuće pretvarače iz vjetroelektrana.



Slika 4.10. Pretvarač sa strujnim izvorom[1]

Slika 4.11. Pretvarač s naponskim izvorom [1]

Glavni nedostaci korištenja energetske elektronike su dodatni gubici, pojava viših harmonika i naravno visoka cijena. Neke od prednosti su mogućnost kontrole djelatne i jalove snage, smanjenje razine treperenja tj. flikera, ograničena snaga kratkog spoja itd.[1]

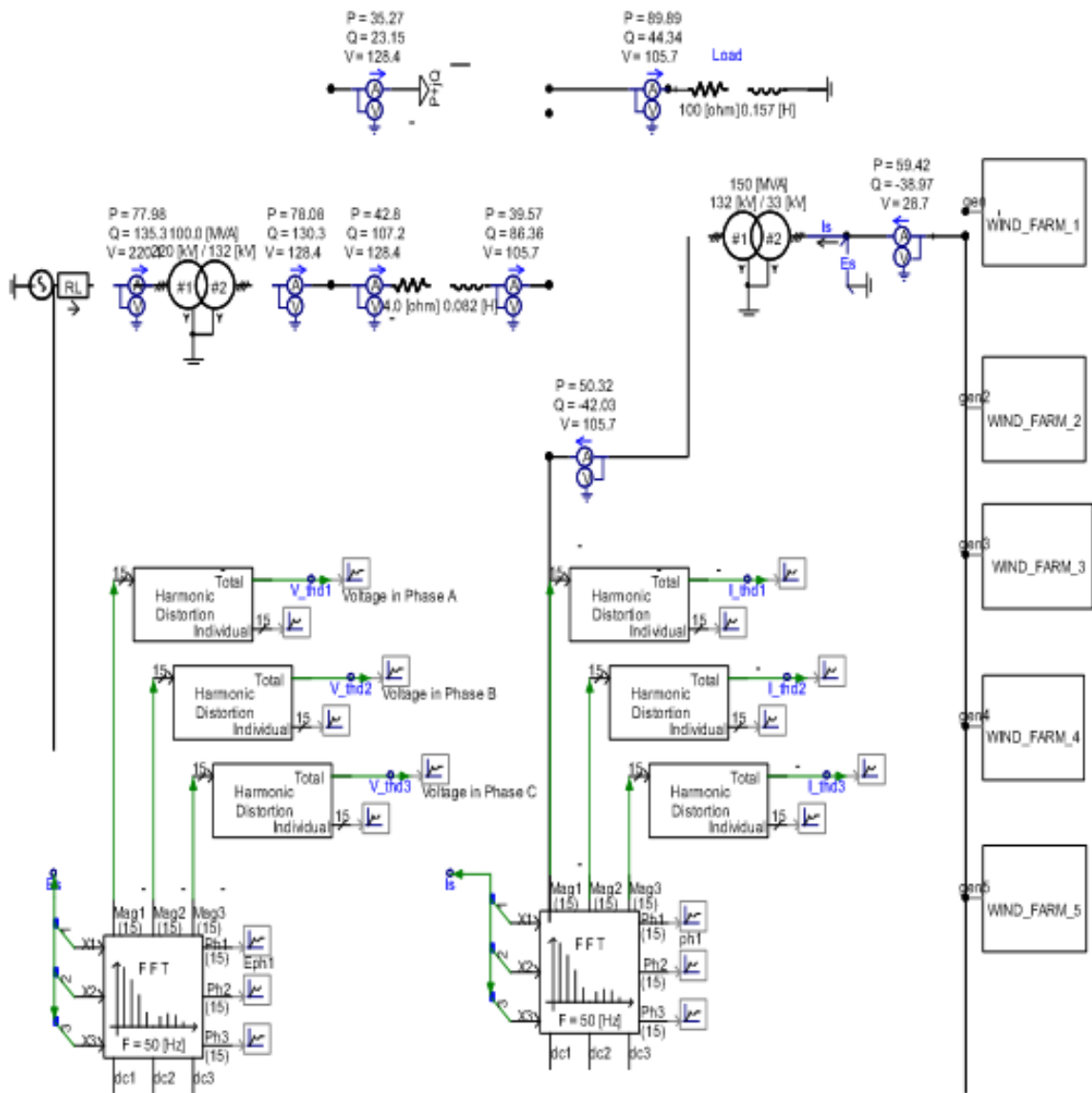
Značajan problem prilikom integracije vjetroelektrana i ostalih obnovljivih izvora je regulacija napona. Iako se na prvu čini kako bi regulacija uz pomoć generatora kakvu imaju vjetroelektrane trebala biti jednostavnije od regulacije napona promjenom prijenosnog omjera transformatora, u praksi to nije slučaj. Kada je obnovljivi izvor na relativno većoj udaljenosti od mjesta priključka na mrežu većina se napora ulaže u to da se prilikom priključenja održi nepromijenjeni napon u ostatku mreže. Nadalje, neki od uređaja koji zahtijevaju jalovu snagu, poput indukcijskog motora, ne mogu sudjelovati u regulaciji napona. Regulacija napona izbjegava se vršiti preko obnovljivih izvora jer postoji mogućnost pojave otočnog pogona. Također, mali vjetroagregati nisu dovoljno snažni da bi regulirali napon te često prilikom priključenja zahtijevaju fiksnu regulaciju jalove snage i fiksni faktor snage. Kada se radi o većim

vjetroelektranama, ako se koriste za regulaciju, često su potrebni posebni uređaji za kontrolu i komunikaciju s uređajima za regulaciju napona. Ako obnovljivi izvor preuzme regulaciju napona problem nastaje kada dođe do iznenadnog isključenja izvora s mreže. U tom je trenutku napon prenizak i ne može izdržati opterećenje te mu je potrebno nekoliko minuta za oporavak. Vjetroelektrane manjih snaga s konstantnim faktorom snage mogu prouzrokovati velike promjene napona prilikom iznenadnih uključenja i isključenja. Promjene mogu trajati nekoliko minuta, sve dok ih sustav za regulaciju napona ne detektira.[8]

## 5. VJETROELEKTRANE I NAPONSKI PROPADI - PRIMJERI ISTRAŽIVANJA

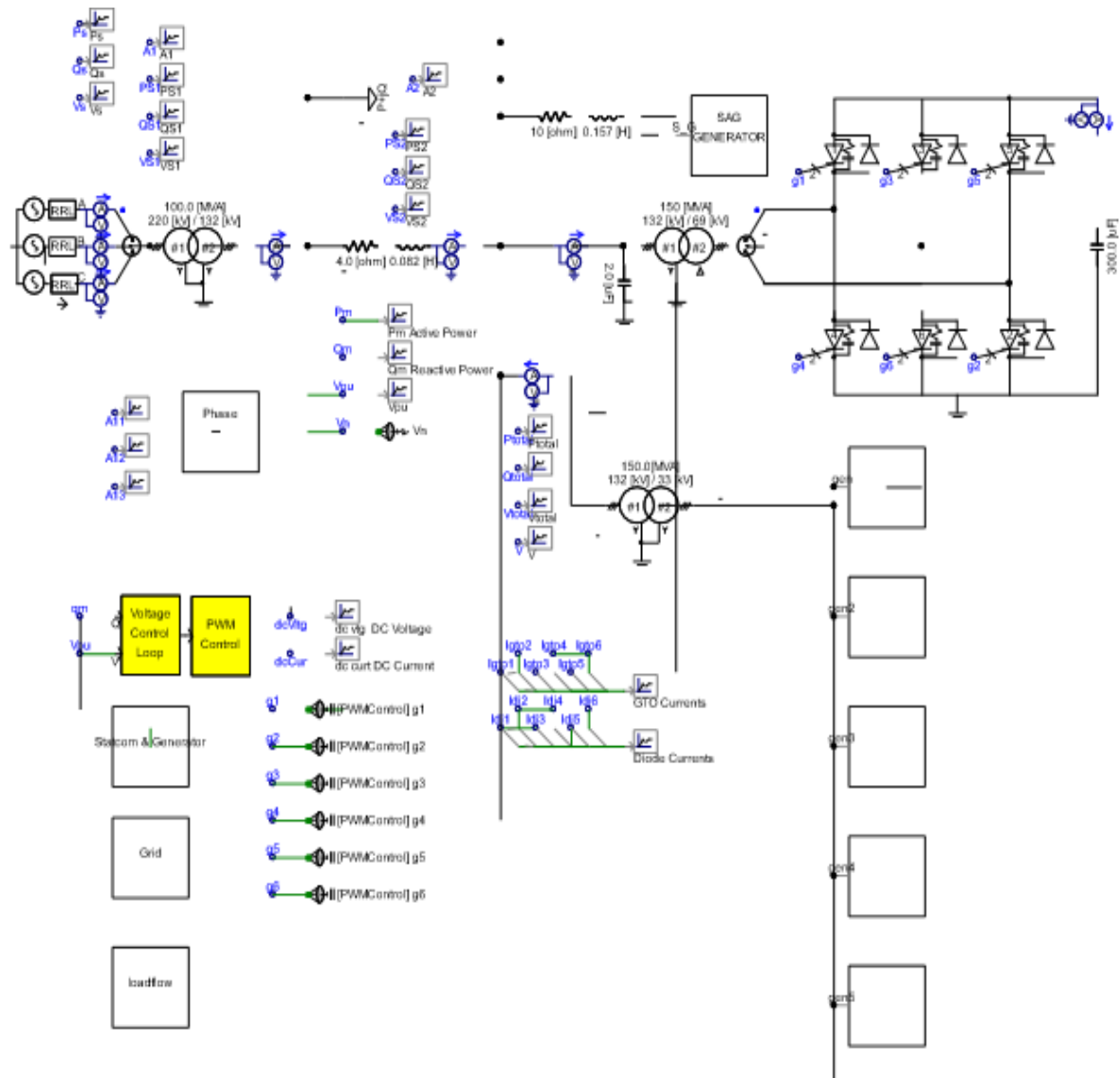
Povećanjem broja integriranih vjetroelektrana u sustavu povećava se i njihov utjecaj na stabilnost sustava. Kako bi se ispitao utjecaj vjetroelektrana na stabilnost i dinamiku sustava izrađuju se modeli u različitim programskim paketima koji omogućuju provođenje simulacija. Vjetroelektrane koje se nalaze na većim udaljenostima od glavnih opterećenja i središnje proizvodnje najčešće se povezuju na takozvane slabe dijelove mreže u kojima određene situacije mogu uzrokovati kolaps napona. Jalova snaga važna je u održavanju stabilnost sustava, a potrošnja jalove snage u vjetroelektranama vezana je uz induktivne generatore koji za svoj rad povlače ovu snagu iz mreže. Kada su generatori vjetroelektrana s fiksnom brzinom vrtnje povezani na slabu mrežu tijekom kvara u mreži može doći do isključenja vjetroelektrane s mreže. Kvar može uzrokovati preveliku brzinu vrtnje što dovodi do naponske nestabilnosti te isključenja. Povećani broj vjetroelektrana u mreži tijekom kvara može dovesti do nestabilnosti mreže upravo iz opisanih razloga. Stabilnost sustava na koji su priključene vjetroelektrane može se povećati uporabom STATCOM-a (eng. static synchronous compensator). Dinamičku kontrolu sustava poboljšavaju FACTS (eng. flexible alternating current transmission system) uređaji.[13]

Kako bi se mogao simulirati i analizirati utjecaj vjetroelektrana na mrežu važno je imati odgovarajući model koji će obuhvatiti utjecaje pojedinačnih vjetroagregata od kojih je sastavljena vjetroelektrana. Slika 5.1. prikazuje model preuzet iz [13]. Model je izrađen u PSCAD-u i predstavlja vjetroelektranu kapaciteta 75 MW priključenu na 220 kV mrežu. Vjetroelektrana sadrži kavezne indukcijske generatore.



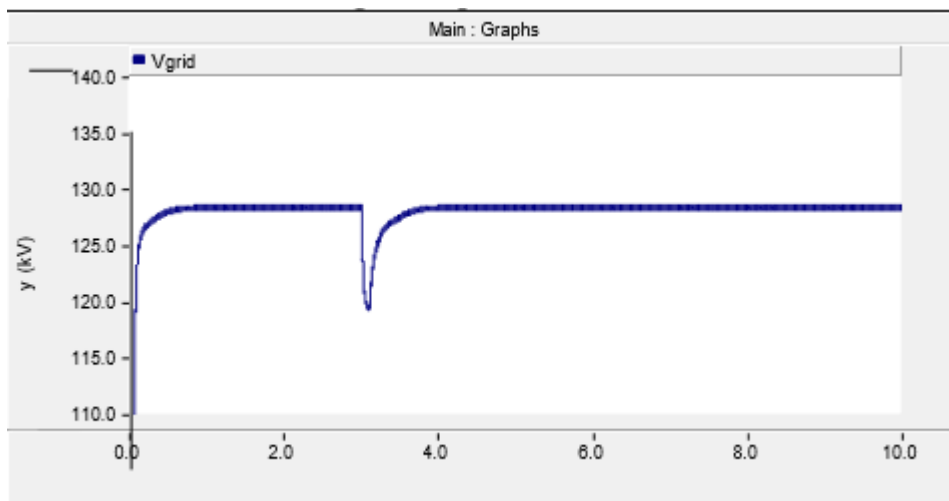
Slika 5.1. Model vjetroelektrane izrađen u PSCAD-u [13]

Kada je riječ o naponskim propadima posebno su osjetljive vjetroelektrane s generatorima s fiksnom brzinom vrtnje jer su one izravno priključene na mrežu. Pojava naponskog propada u mreži može uzrokovati nestabilnost rotora vjetroelektrane. Naponski propad uzrokuje značajno smanjenje elektromagnetskog momenta dok je mehanički moment još uvijek isti. Moment postaje neuravnotežen i rotor ubrzava te zbog toga može nastati nestabilnost. Za smanjenje utjecaja naponskih propada često se koristi STATCOM. Ovaj šant sposoban je generirati ili apsorbirati jalovu snagu te zbog raznolikosti svoga izlaza može služiti za kontrolu specifičnih parametara elektroenergetskog sustava. Način na koji će STATCOM kontrolirati napon je sljedeći: ako je proizvedeni napon veći od napona mreže on će generirati jalovu snagu. Ako je pak napon manji od napona mreže STATCOM će apsorbirati jalovu snagu.

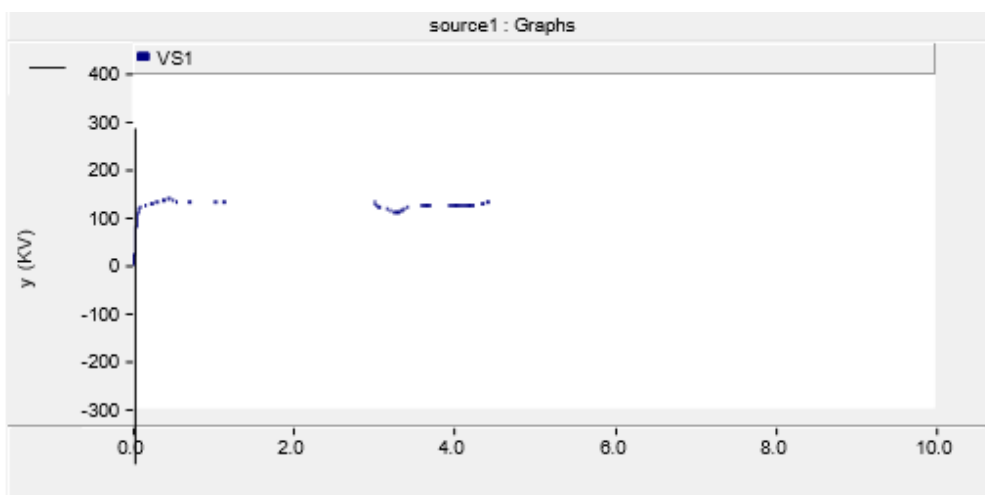


Slika 5.2. Model vjetroelektrane s ugrađenim STATCOM-om [13]

Simulacijama na modelu prikaznom slikom 5.2. pokazano je da STACOM dobro reagira i prilikom simetričnih i prilikom nesimetričnih smetnji. Razlika u rezultatima u mreži bez i sa STATCOM-om vidljiva je na slikama 5.3. i 5.4. Vidljivo je značajno smanjenje naponskog propada. [13]



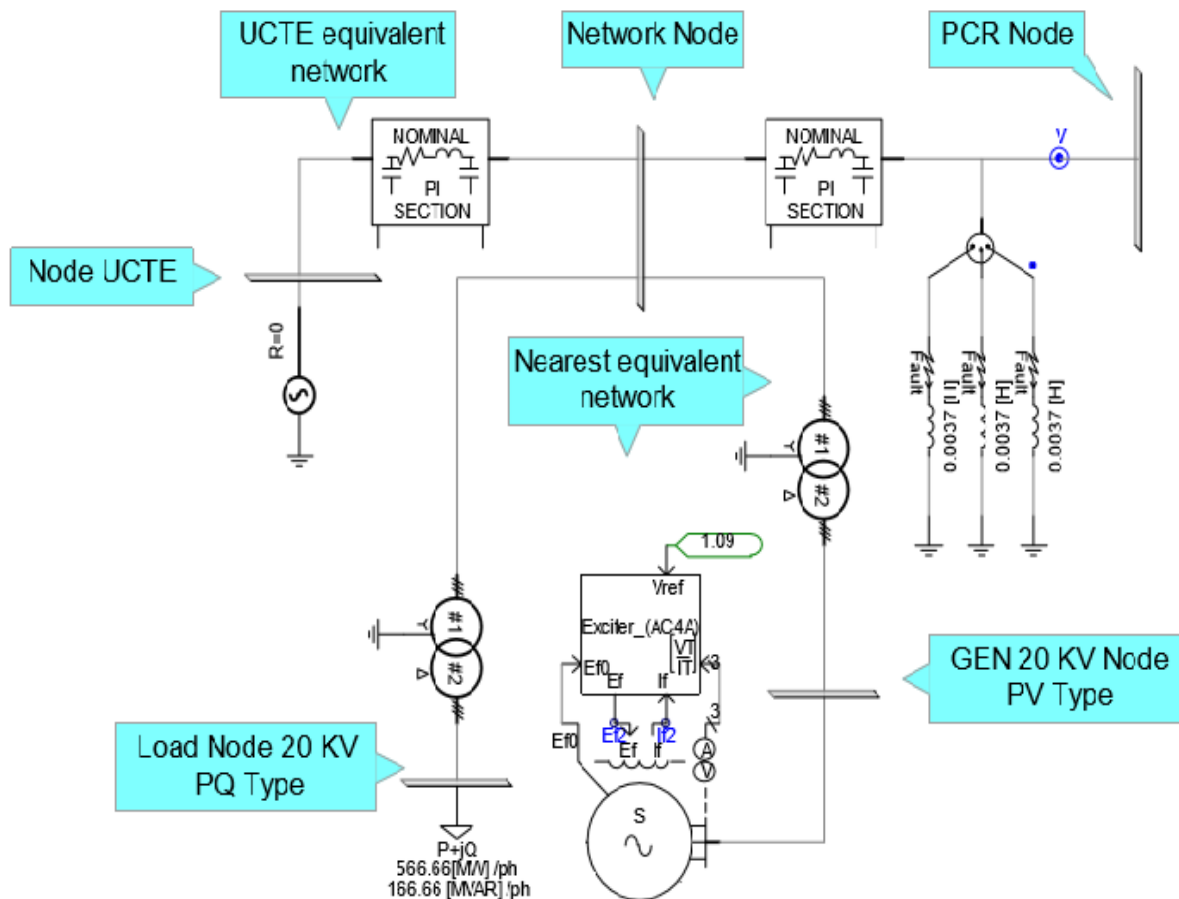
*Slika 5.3. Naponski propad u mreži bez STATCOM-a [13]*



*Slika 5.4. Naponski propad u mreži s priključenim STATCOM-om [13]*

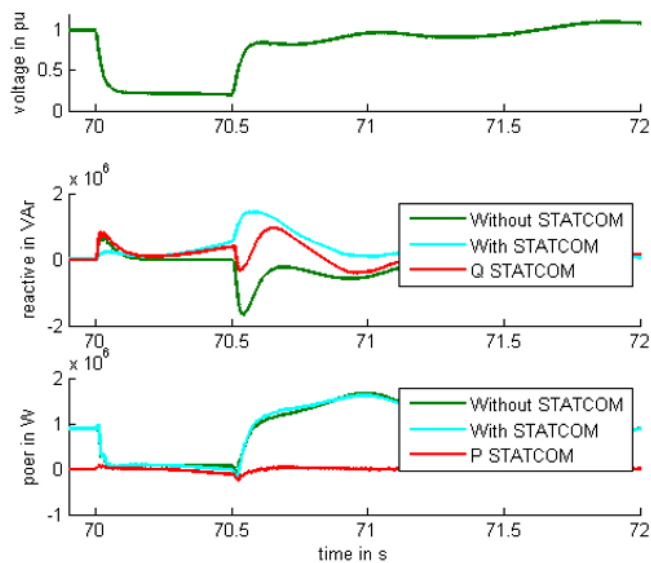
Male vjetroelektrane mogu se priključiti i na niski napon, a za smanjenje propada nastalih zbog njihovih priključaka također se može koristiti STATCOM. Korištenjem STATCOM-a kod vjetroelektana priključenim na niski napon bavi se istraživanje provedeno na području Španjolske. Simulacijski model vjetroelektrane i STATCOM-a izrađen je u programskom paketu PSCAD/EMTDC, a prikazan ja na slici 5.5. [14]





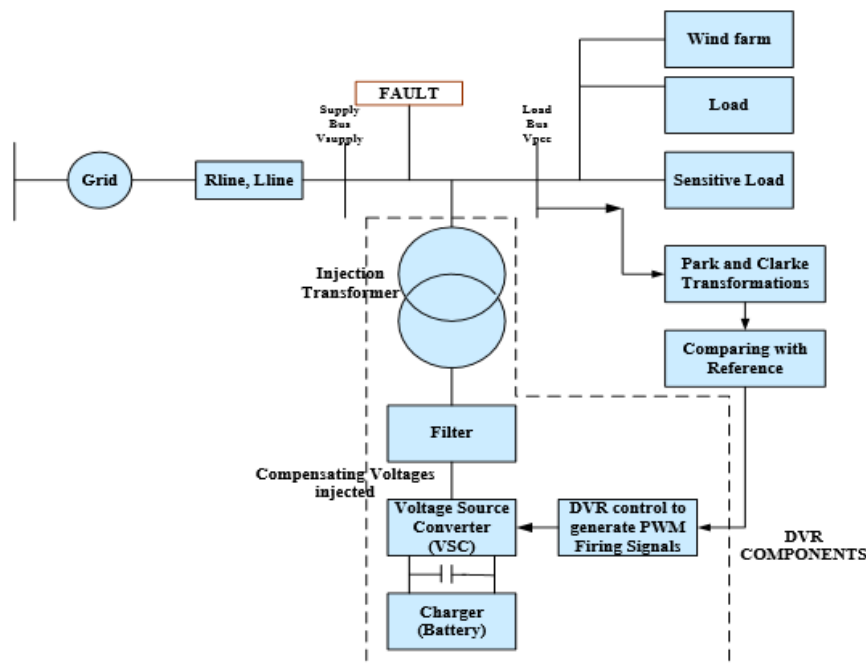
Slika 5.5. Model mreže za simulaciju naponskih propada [14]

Modelirana je vjetroelektrana nazive snage 1,32 MW, a promatran je utjecaj STATCOM-a na naponske propade koji se javljaju pri niskom naponu. Prilikom simulacije bez STATCOM-a nakon propada javlja se veliki pad jalove snage koja je utrošena za ponovno magnetiziranje ili sinkrone generatora. Spajanjem STATCOM-a dolazi do kompenzacije te jalove snage. Kod radne snage dolazi do malih, neznčajnih promjena prilikom spajanja STATCOM-a. Promjene jalove i radne snage kao i napon prilikom naponskog propada prikazani su na slici 5.6. Kompenzirana jalova i radna snaga označene su s Q STATCOM i P STATCOM. [14]



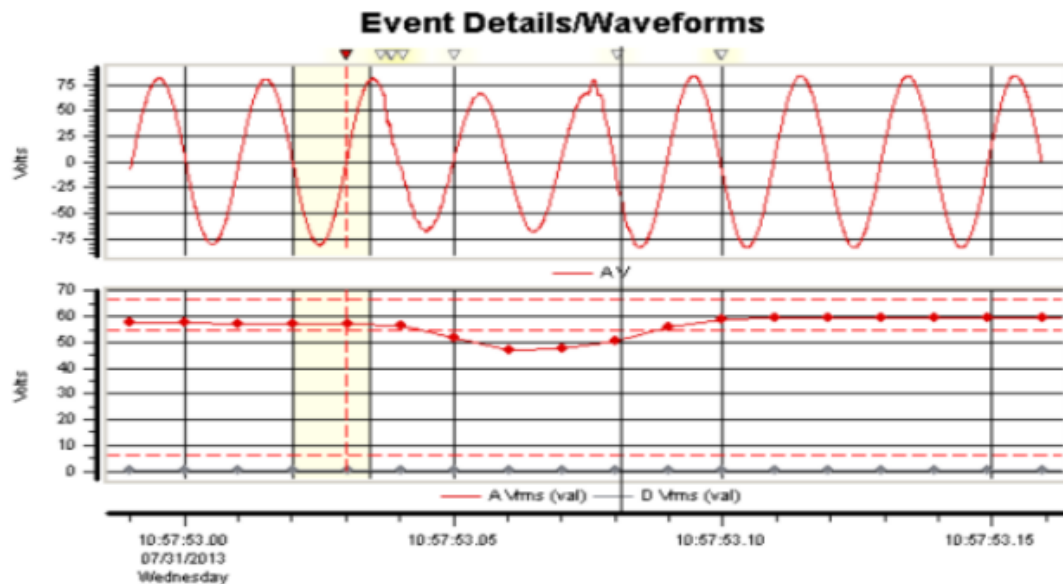
Slika 5.6. Jalova snaga, radna snaga i napon za vrijeme naponskog propada [14]

Za poboljšanje kvalitete el. energije generirane u vjetroelektranama koristi se i DVR (eng. dynamic voltage restorer). DVR se sastoji od pretvarača napona izvora, linijskog RC filtera te spojnog transformatora u seriji s mrežom za ispravljanje naponskih smetnji tijekom kvarova u mreži. On štiti oprećenja tijekom naponskog propada injektiranjem dinamički kontroliranog napona preko transformatora. Napon je kontroliran tako da se izbjegnu bilo kakve smetnje povezane uz kvalitetu. Princip rada DVR uređaja prikazan je na slici 5.7. [12]

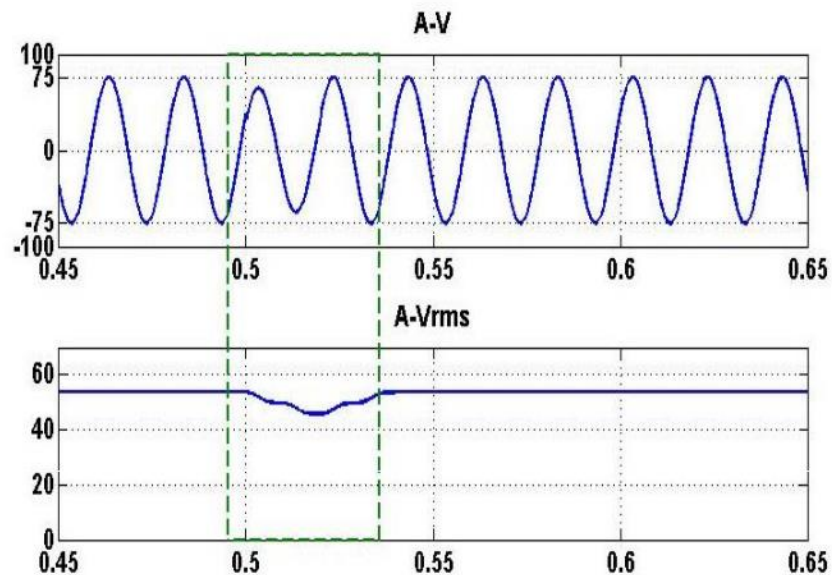


Slika 5.7. Princip rada DVR uređaja [12]

Model s DVR-om izrađen je u MATLAB Simulinku, a dobiveni rezultati uspoređeni su sa stvarnim mjerenjima zabilježenim u Chinnaputhur. U njemu se nalazi 14 vjetroelektrana sa 148 vjetroagregata ukupne snage 123 MW te je on poslužio kao osnova za izradu modela. Korištenjem DVR-a dubina propada smanjena je za 30%, a rezultati simulacije te stvarnih mjerenja vidljivi su na slikama 5.8. i 5.9. [12]



Slika 5.8. Zabilježeni rezultati u Chinnaputhur [12]



Slika 5.9. Rezultati simulacije modela s ugrađenim DVR-om [12]

## 6. ZAKLJUČAK

Povećanjem potreba za električnom energijom povećava se i integracija obnovljivih izvora u mrežu. Instalirana snaga vjetroelektrana konstantno je u porastu. Iako je princip rada vjetroelektrane i pretvorba energije vjetra u električnu energiju dobro poznat proces, javljaju se brojni problemi prilikom priključka na mrežu. Ovaj obnovljivi izvor ima značajan utjecaj na kvalitetu proizvedene električne energije. Neki od problema koje uzrokuju vjetroelektrane su emisija flikera, harmonici te naponski propadi. Promjenjivost proizvodnje i kvalitete električne energije dobivene iz vjetroelektrane može utjecati i na stabilnost elektroenergetskog sustava. Ako su vjetroelektrane povezane na slabije dijelove mreže određeni kvarovi mogu uzrokovati kolaps napona i narušiti cjelokupnu stabilnost.

Napredak tehnologije omogućuje smanjenje utjecaja vjetroelektrana na elektroenergetski sustav. U današnje vrijeme postoje brojna istraživanja koja se bave problemima koje uzrokuje ovaj obnovljivi izvor energije. Također, postoje i istraživanja koja se detaljno bave naponskim propadima uzrokovanim vjetroelektranama. Primjeri takvih istraživanja obrađeni u ovom radu pokazali su da je uz odgovarajuću tehnologiju moguće značajnije utjecati na naponske propade, a time i kvalitetu električne energije proizvedenu vjetroelektranama. Proizvodnja električne energije iz energije vjetra je u razvoju i još uvijek postoje problemi na kojima se radi kako bi se ostvarila što učinkovitija i kvalitetnija proizvodnja.

## 7. LITERATURA

- [1] Prof.dr.sc. Damir Šljivac, Obnovljivi izvori energije, ppt, ETF 2015./2016.
- [2] <http://www.eko.zagreb.hr/default.aspx?id=84>, EKO.ZAGREB.HR., Gradski ured za energetiku, zaštitu okoliša i održivi razvoj, pristup ostvaren 10.6.2017.
- [3] [http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=k1\\_4&elpar=obvY9201p50](http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=k1_4&elpar=obvY9201p50), Državni hidrometeorološki zavod, pristup ostvaren 10.6.2017.
- [4] Math Bollen, Fainan Hassan, Integration of distributed generation in the power system, IEEE press, 2011.
- [5] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=64999>, Leksikografski zavod Miroslava Krlež, pristup ostvaren 11.6.2017.
- [6] <https://www.evwind.es/2015/03/03/first-u-s-offshore-wind-power-project-soon-to-reach-the-coast-of-rhode-island/50767>, rev Wind Energy and Electric Vehicle Review, pristup ostvaren 11.6.2017.
- [7] Renewables 2015 Global Status Report
- [8] Roger C. Dugan, Mark F.McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality, Second Edition
- [9] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden
- [10] Doc.dr.sc. Zvonimir Klaić, Integracija OEI i napredne mreže, 3. Kvaliteta električne energije, ppt, 2016.
- [11] Edited by Angelo Baghini, Handbook of Power Quality, University of Bergamo, Italy, 2008.
- [12] Rini Ann Jerin. A, Palanisamy. K, Umashankar. S, Thirumoorthy.A.D, Power Quality Improvement of Grid Connected Wind Farms through Voltage Restoration Using Dynamic Voltage Restorer, International Journal of Renewable Energy Research, 2015.

- [13] D. P. Kadam, Dr. B. E. Kushare, Mitigation of Voltage Sag in Grid Connected Large Scale Wind Farm, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 2013.
- [14] C. Carrillo F. Pérez-Sabín E. Díaz-Dorado J. Cidrás, Flicker mitigation and voltage sag ride through of a wind turbine using an STATCOM

## **SAŽETAK**

Diplomski rad bavi se proizvodnjom električne energije putem vjetroelektrana te utjecajem vjetroelektrana na kvalitetu proizvedene energije. Detaljno je obrađen utjecaj vjetroelektrana na naponske propade te je dan pregled istraživanja, na svjetskoj razini, koja se bave vjetroelektranama i naponskim propadima.

Ključne riječi: vjetroelektrana, kvaliteta električne energije, naponski propad, istraživanje

## ***ABSTRACT***

*This thesis describes the production of electricity by using wind parks and how this production has an impact on power quality. The impact on voltage sags is analyzed in detail. The paper also contains an overview of the research they are dealing with wind parks and voltage sags.*

*Keywords: wind park, power quality, voltage sag, research*

## **ŽIVOTOPIS**

Nikolina Orlović rođena je 4.prosinca 1993. godine u Osijeku. Osnovnu školu je pohađala u Nijemcima gdje ju je i završila. Nakon osnovne škole, upisuje I gimnaziju Osijek koju završava 2012. godine. Iste godine upisuje Sveučilišni preddiplomski studiji elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek kojeg završava 2015. godine. 2015. godine upisuje Diplomski sveučilišni studiji elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, blok Održiva elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.