Decentralizirano upravljanje naponom u naprednoj mreži

Mrkonić, Zoran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:893083

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Diplomski studij

DECENTRALIZIRANO UPRAVLJANJE NAPONOM U NAPREDNOJ MREŽI

Diplomski rad

Zoran Mrkonić

Osijek,2019

Sadržaj:

1.UVOD 1
2. UTJECAJ OBNOVLJIVIH IZVORA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE 3
2.1. Energija vjetra 3
2.1.1 Princip rada i podjela vjetroelektrana 5
2.1.2. Varijacije brzine vjetra 8
2.1.3. Varijacije u proizvodnom kapacitetu 9
2.2 Solarna energija 13
2.2.1 Fotonaponski sustav 14
2.2.2 Podjela solarnih fotonaponskih sustava 14
2.3. Hidroenergija 15
2.3.1. Svojstva malih hidroelektrana 16
2.4. Geotermalna energija 16
2.5. Energija valova, plime i oseke 19
2.6. Vrste priključka elektrana na OIE i utjecaj na mrežu 21
2.6.1. Izravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu 22
2.6.2. Potpuno neizravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu pomoću elektroničkih energetskih pretvarača 23
2.6.3. Djelomično neizravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu pomoću elektroničkih energetskih pretvarača 25
2.6.4 Modularni (distribuirani) neizravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu pomoću elektroničkih energetskih pretvarača 27
2.6.5. Utjecaj vrste priključka elektrane na mrežu 29
3. KOLEBANJE NAPONA 31
3.1.Kvaliteta električne energije- tehnički parametri napona 31
3.2. Održavanje napona u distributivnim mrežama 32
3.2.1. Porast napona zbog utjecaja distribuirane proizvodnje 34
3.2.2. Razina integracije 35
3.3. Brzo kolebanje napona 36
3.3.1. Treperenje napona kod Fotonaponskih elektrana 38
3.4. Kolebanje napona kod vjetroelektrana 38
4. SIMULACIJSKO ODREĐIVAJE DECENTRALIZIRANOG UPRAVLJANJA NAPONOM U NAPREDNOJ MREŽI 41
4.1. Opis mreže fotonaponskog postrojenja 41
4.1.1 Ulazni podatci proizvodnje fotonaponskog postrojenja i potrošnje stambenih sustava. 43

4.2. Simulacija utjecaja fotonaponskog sustava na naponski profil 44
4.2.1. Proizvodnja fotonaponskog sustava za različite naponske vrijednosti dok je potrošnja stambenog sustava minimalna 45
4.2.2. Proizvodnja fotonaponskog sustava za različite naponske vrijednosti dok je potrošnja stambenog sustava maksimalna 46
5.2.3. Decentralizirano upravljanje pomoću transformatorske preklopke 47
4.2.4. Decentralizirano upravljanje pomoću invertera fotonapona 49
4.2.5. Decentralizirano upravljanje pomoću faktora snage 50
4.2.6. Analiza rezultata 50
ZAKLJUČAK 53
LITERATURA 54
POPIS OZNAKA I KRATICA 56
SAŽETAK 57
ABSTRACT 57
ŽIVOTOPIS 58

1.UVOD

Elektroenergetski sustav nalazi se na prekretnici u načinu vođenja. Proizašao je iz centralnog načina upravljanja i proizvodnjom, gdje su velike proizvodne jedinice pokrivale potrebe za energijom. Takvim načinom vođenja operator je imao mogućnost procijene koliko će energije biti potrebno proizvesti u nekome budućem trenutku. Temeljem toga mogao je raditi koordinaciju proizvodnje i raspoloživih rezervi u sustavu. Budući da se javlja sve veća potreba za energijom razvojem tehnologije omogućila se proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije. U njih se ubrajaju energija vjetra, energija Sunca, geotermalna energija, energija valova, energija plime i oseke. Postalo je moguće da i mali proizvođači električne energije sudjeluju na tržištu električne energije.

Europska tehnologijska platforma bavi se električnim mrežama koje mogu inteligentno integrirati sve aktivnosti korisnika priključenih na mrežu, a 2006. godine pokrenula je i razvitak pametnih mreža (ili Smart Grid), ključnih komponenti u polju obnovljivih izvora energije. Poboljšana kvaliteta, kontrola, veća pouzdanost, sigurnost neki su od motiva za pametnu mrežu.

Kako distribuirana proizvodnja zbog male količine energije koje proizvode obično spaja na distributivnu mrežu koja se smatra pasivnom, doći će prividno do smanjenja potrošnje na tome izvodu. U pojedinim slučajevima kad je proizvodnja veća od potrošnje, tokovi snage će promijeniti smjer, te će krenuti s niže naponske razine ka višoj. Tako pasivna niskonaponska mreža postaje aktivna. Samim time mijenjaju se naponski profili u niskonaponskoj mreži. Spajanjem nove proizvodne jedinice na mrežu, potrebno je osigurati da nema negativan utjecaj.

U drugom poglavlju obrađeni su različiti obnovljivi izvori energije koji se koriste za proizvodnju električne energije. Objašnjen je utjecaj obnovljivih izvora na kvalitetu električne energije.

U trećem poglavlju dani su parametri koji utječu na kvalitetu električne energije te načini održavanja napona u mrežama. Iz toga će slijediti kako distribuirana proizvodnja utječe na naponske prilike u mreže, te će se definirati razina integracije. Dalje su opisane brze promjene koje se događaju u amplitudi napona.

U praktičnom dijelu rada analizirat će se utjecaj fotonaponskog sustava na naponski profil. Proučeno je 10 kW fotonaponsko postrojenje priključeno na distribucijsku mrežu kao dio radijalnog izvoda priključenog na transformatorsku stanicu 10/0,4 kV. Za izradu računalnog modela distribucijske mreže koristio se programski paket DigSILENT Power Factory.

2. UTJECAJ OBNOVLJIVIH IZVORA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju razmatrat će se različiti izvori energije koji se koriste za proizvodnju električne energije. Glavni izvori energije koji se koriste za distribuciju su snaga vjetra, sunca, vode te toplinska energija.

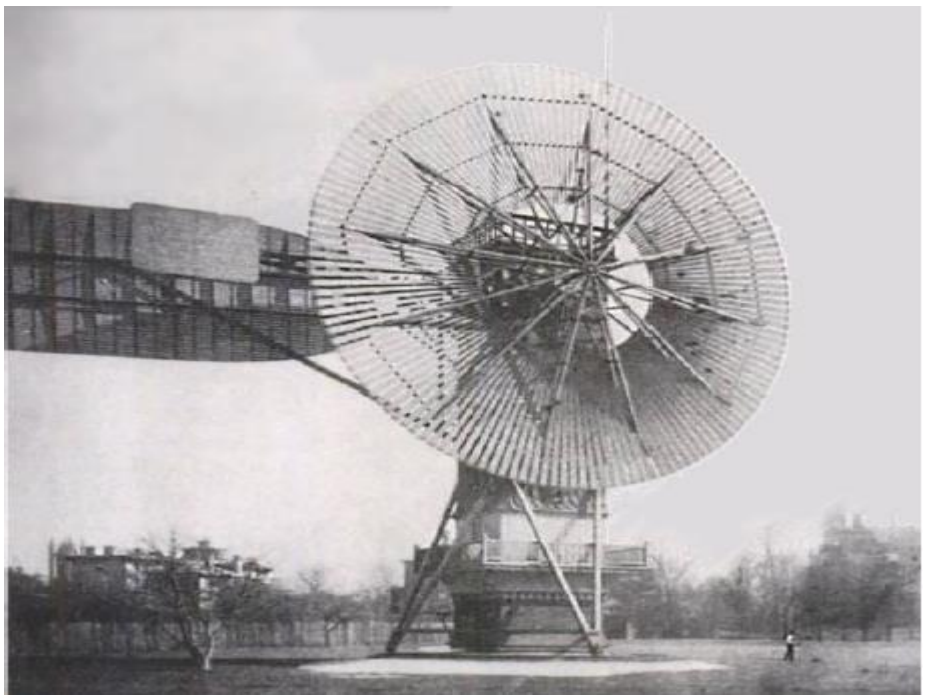
2.1. Energija vjetra

Vjetar možemo opisati kao strujanje zračnih masa koji nastaje zbog razlike temperature odnosno tlakova. Opisujemo ga dvjema jednostavnim komponentama: smjerom i jačinom. Jačinu vjetra određujemo anemometrom ili pomoću Beaufortove ljestvice. Vjetroelektrane poželjan su obnovljiv izvor energije, ne troše gorivo i ne proizvode štetne stakleničke plinove. Velika prednost je to što se mogu postaviti na neobradivim površinama, na poljoprivrednim jer je zemlja između stupova iskoristiva. [1]

Korištenje energije vjetra bilo je u upotrebi još iz antičkog doba. Povijest seže u doba kada su ljudi postavili jedra na brodove i time si omogućili daleka putovanja. Dugo vremena nakon prvih jedara uslijedilo je korištenje energije vjetra za pokretanje vodenih pumpi i obavljanje mehaničkog rada u mlinovima. [1]

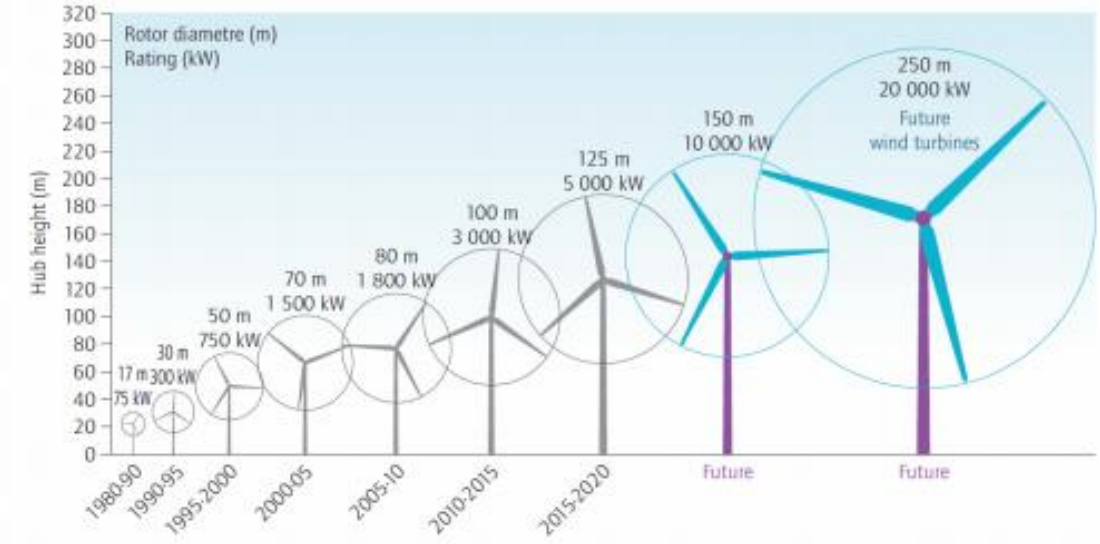
U to doba vjetar je bio jedan od glavnih izvora energije. Prve vjetrenjače su bile s vertikalnom osi vrtnje i pravokutnim lopaticama s jedrima a upotrebljavale su se za pumpanje vode i mljevenje. Značajan doprinos razvoja vjetrenjača dogodio se u 18. Stoljeću. Kada govorimo o vjetroagregatima prvu vjetrenjaču izradio je Škotski profesor James Blyth. Iste godine Charles Brush konstruirao je veći, bolji vjetroagregat. Promjer rotora iznosio je 17 m ali je razvijao malu snagu, pa se koristio za punjenje akumulatorskih baterija i pokretanje strojeva.1991. godine izgrađen je prvi vjetroparku blizini Vindebya u Danskoj. 2002. u blizini zapadne Danske obale je izgrađen vjetropark snage 160 MW. [2]

Direktiva Europske unije 2009/28/EC koja se naziva "20-20-20" imala je velik utjecaj u razvoju vjetroelektrana. Ta direktiva ima cilj da do 2020. godine smanji 20% emisije stakleničkih plinova i poveća za 20% udio obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji energije.



Sl. 2.1. *Vjetroagregat Charlsa Brusha iz 1888.g* [2]

Glavni negativni aspekt energije vjetra je intermitencija i vizualni utjecaj na okoliš. Tijekom normalnog pogona, sva proizvedena energija se mora odmah iskoristiti. Ako se sva proizvedena energija ne iskoristi, moguće ju je iskoristiti za punjenje baterijskih spremnika povezanih s vjetroelektranom. Snaga vjetra veća je pri većim brzinama vjetra, ali kako se brzina stalno mijenja, snaga dolazi i odlazi u sustav u kratkim intervalima.



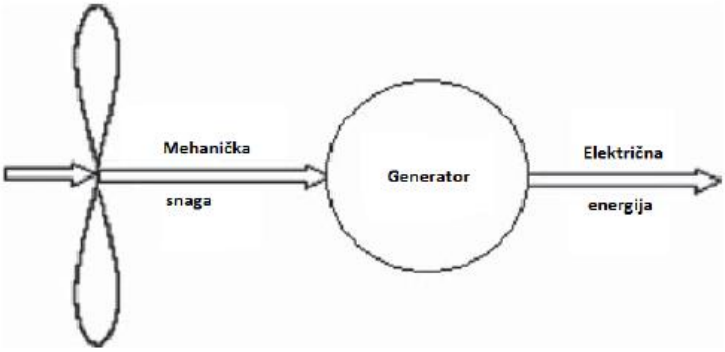
Sl.2.2. *Porast vjetroagregata od 1980. I prognoze za budućnost* [3]

Sl.2.3. *Gansu Wind Farm* [2]

Najveća vjetroelektrana na svijetu „Gansu Wind Farm“ u Kini ima kapacitet od preko 6,000 MW (2012. god) sa ciljem dostizanja 20,000 MW do 2020.

2.1.1 Princip rada i podjela vjetroelektrana

Kinetička energija iz vodoravnog pomaka zraka vjetra se transformira u kinetičku energiju rotacije turbine pomoću brojnih spojenih lopatica na os. Ta se rotacijska energija pretvara u električnu energiju pomoću električnog generatora. Predložene su i korištene različite tehnologije tijekom godina. Trenutno glavna tehnologija na mehaničkoj strani je turbina s dvije ili tri lopatice s vodoravnom osi. Energija se dobiva pretvorbom energije vjetra u vjetroturbinama. [3]



Sl.2.4. *Pretvorba energije u vjetroturbini* [3]

Maksimalna 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)

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

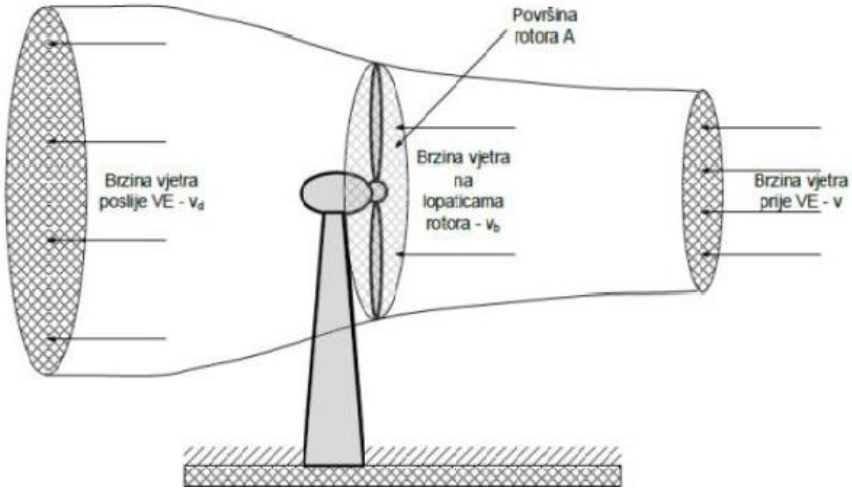
Gdje je:

P_v- teorijska snaga vjetra

ρ- gustoća

A-površina rotora

v- brzina vjetra



Sl. 2.5.*Maksimalna teorijska snaga i energija vjetroturbine* [3]

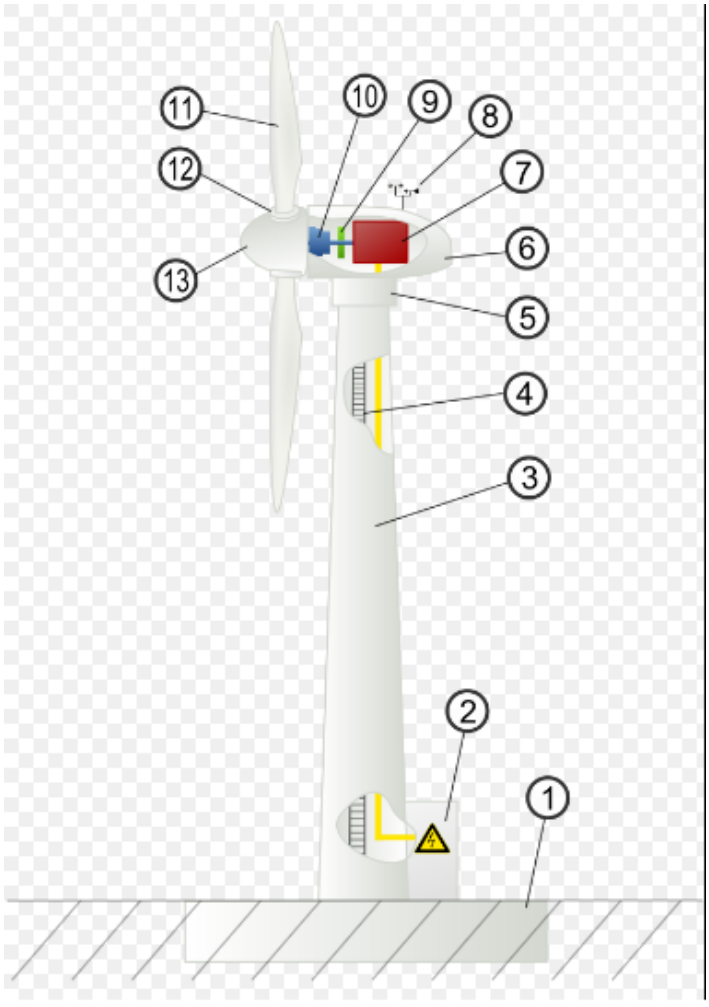
Maksimalna teorijska enegija vjetra:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} V \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 = 0{,}625 A v^3 \qquad (2\text{-}2)$$

Vjetroelektrane mogu se podijeliti na nekoliko načina, prema sljedećim kriterijima:

- Prema osi vrtnje mogu se podijeliti na vjetroelektrane s okomitom i vodoravnom osi vrtnje.
- Prema snazi mogu se podijeliti na vjetroelektrane malih, srednjih i velikih snaga.
- Prema vrsti generatora mogu se podijeliti na vjetroelektrane s istosmjernim, sinkronim i asinkronim generatorom.
- Prema brzini vrtnje mogu se podijeliti na vjetroelektrane sa stalnom i s promjenjivom brzinom vrtnje.
- Prema lokaciji mogu biti na kopnu i na pučini.

Glavni dijelovi VE s vodoravnom osi: 1. temelj, 2. priključak na elektroenergetski sustav, 3. stup, 4. ljestve za pristup, 5. zakretnik, 6. kućište stroja ili gondola, 7. električni generator, 8. anemometar, 9. kočioni sustav (elektromagnetska ili mehanička kočnica), 10. prijenosnik snage , 11. lopatice rotora, 12. sustav zakretanja lopatica , 13. glavčina rotora. [2]



Sl.2.6.*Glavni dijelovi VE s vodoravnom osi* [2]

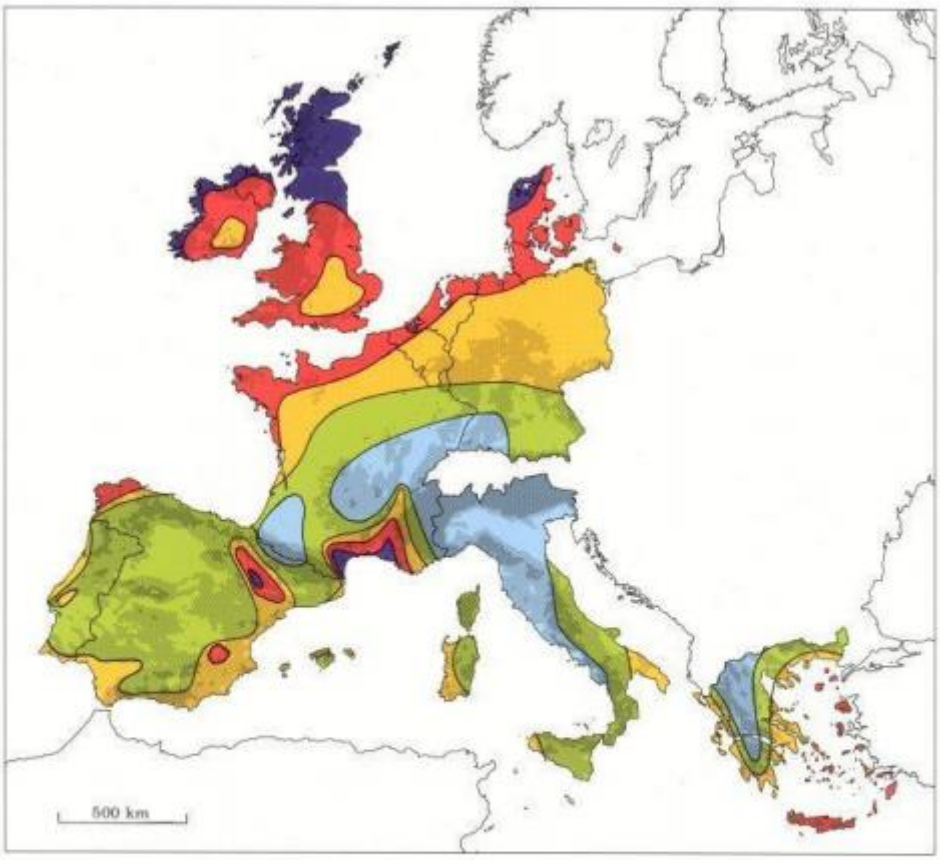
2.1.2. Varijacije brzine vjetra

Brzina vjetra s time i proizvodnja variraju s vremenom preko određenog vremenskog raspona. Ukratko po vremenskim intervalima možemo ih podijeliti na:

- Dugoročne
- Godišnje i sezonske promjene
- Dnevne i sinoptičke varijacije brzine vjetra
- Turbulencije

Dugoročne varijacije promjene brzine vjetra povezane su s promjenom temperature, uzroci su globalno zatopljenje, sunčeva aktivnost. Godišnje i sezonske promjene daju slabiju procjenu za manje srednje brzine vjetra a zadovoljavaju pri većim. Opisujemo ih Weibullovom i Rayleihgovom razdiobom. Dnevne sinoptičke varijacije povezane su s promjenom temperature tijekom dana što uzrokuje strujanje zraka.Uzrokovane su područjima visokog i niskog tlaka.
Turbulencije predstavljaju trenutna, slučajna odstupanja od srednje brzine vjetra a opseg i karakteristike turbulencije ovise o meteorološkim i geografskim čimbenicima.

Zbog navedenih čimbenika koji utječu na snagu vjetra postoje ograničenja koja su vezana uz geografska područja na kojima je moguća izgradnja vjetroelektrana. Kod vjetroelektrana za određivanje lokacije koristi se ruža vjetrova i Atlas vjetrova. Atlas vjetrova daje nam podatke o očekivanim prosječnim brzinama vjetra na pojedinim lokacijama i očekivanoj snazi energije po jedinici površine, dok ruža vjetrova daje vjerojatnost pojave vjetra određene brzine u određenom smjeru. [3]



Wind resources[1] at 50 metres above ground level for five different topographic conditions

	Sheltered terrain[2]		Open plain[3]		At a sea coast[4]		Open sea[5]		Hills and ridges[6]	
	ms^{-1}	Wm^{-2}	ms^{-1}	Wm^{-2}	ms^{-1}	Wm^{-2}	ms^{-1}	Wm^{-2}	ms^{-1}	Wm^{-2}
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	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
	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
	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
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

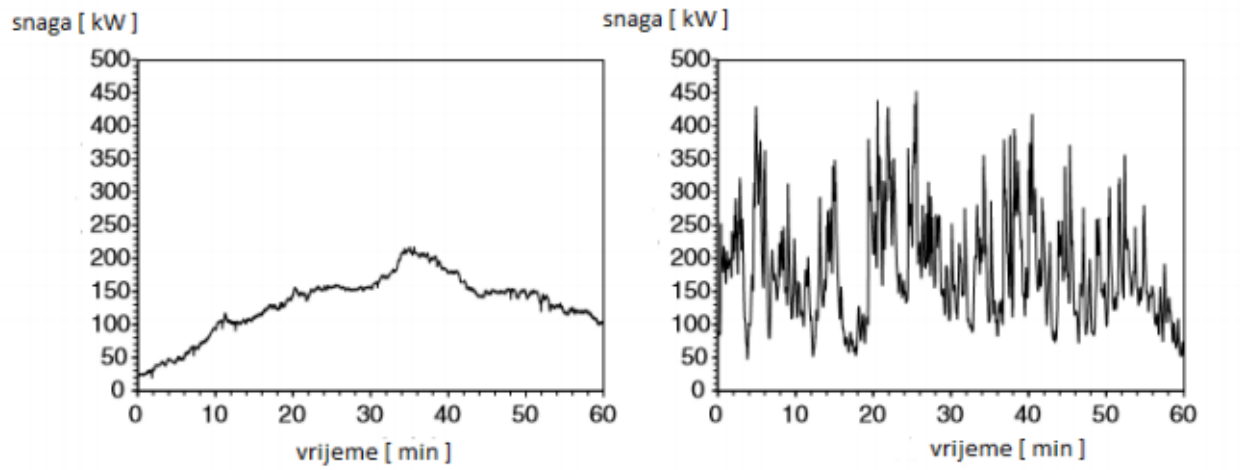
Sl. 2.7. *Atlas vjetra Europe* [4]

2.1.3. Varijacije u proizvodnom kapacitetu

Jedna od važnijih karakteristika koja se veže uz proizvodnju električne energije dobivene iz energije vjetra jeste varijacija u proizvodnji. Kako snaga ovisi o brzini vjetra, shodno tome je da će zbog varijacija u brzini vjetra nastati i varijacije u proizvedenoj snazi. Tehnologija proizvodnje vjetroagregata ima velik utjecaj na varijacije. U većini slučajeva varijacije u kapacitetima jednake su varijacijama u stvarnoj proizvodnji, što znači da je proizvodnja gotovo uvijek jednaka proizvodnim kapacitetima. Proizvodnju vjetroelektrana moguće je smanjiti, ali je zbog toga tu istu proizvodnju potrebno pokriti nekim drugim izvorom energije.

Promjene i drugi čimbenici u proizvodnji vjetroelektrana koji utječu na proizvodnju mogu se promatrati u različitim vremenskim intervalima. Ako se promatra proizvodnja vjetroagregata u kratkim vremenskim intervalima nekoliko sekundi ili kraće vidljivo je da će doći do varijacija

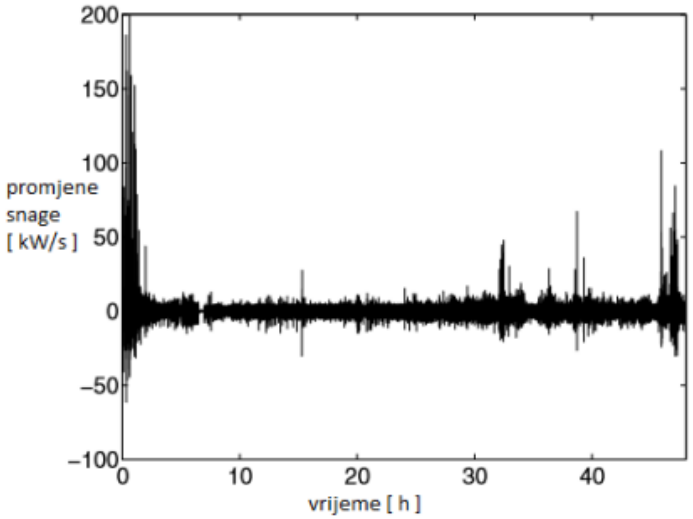
zbog djelovanja tornja na strujanje zraka koji se nalazi oko turbine. Navedene varijacije mogu prouzročiti kolebanje snage koje uzrokuju varijacije u amplitudi napona. Kod određene vrste rasvjete taj uzrok dovodi do promjena u intenzitetu svjetlosti. Isto tako u kratkim promatranim intervalima mogu se pojaviti kolebanja snage zbog položaja lopatica. Lopatice koje se nalaze u donjem položaju zahvaćaju manje energije od lopatica koje se nalaze u gornjem položaju. Ukupna energija ovisi o njihovim položajima. Brze promjene snage mogu uzrokovati mehaničke oscilacije koje se javljaju u pojedinim djelovima vjetroagregata. Navedene varijacije važne su samo za pojedinačne vjetroagregate. Uz korištenje energetske elektronike i pohranu električne energije ove varijacije mogu se smanjiti na minimum. Kada se govori o vjetroelektranama, promatranje varijacija u kratkim vremenskim intervalima gubi na važnosti te se tada varijacije promatraju u dugim vremenskim periodima. Glavni uzrok varijacija pri promatranju u dužim vremenskim periodima su turbulencije. Turbulencije nije moguće predvidjeti, prema tome se za svaki vjetroagregat daje preporučeni broj turbulencija koji se uzima u obzir prilikom izgradnje. Slika 2.8. [5] prikazuje izmjereno kolebanje snage vjetroagregata snage 600 kW s energetskim pretvaračem. Navedene slike prikazuju dva mjerenja u trajanju od jednog sata, te razmak između mjerenja iznosi 20 sati.



Sl. 2.8.*Kolebanje snage jednog vjetroagregata na istoj lokaciji prilikom dva različita perioda u trajanju od sat vremena* [5]

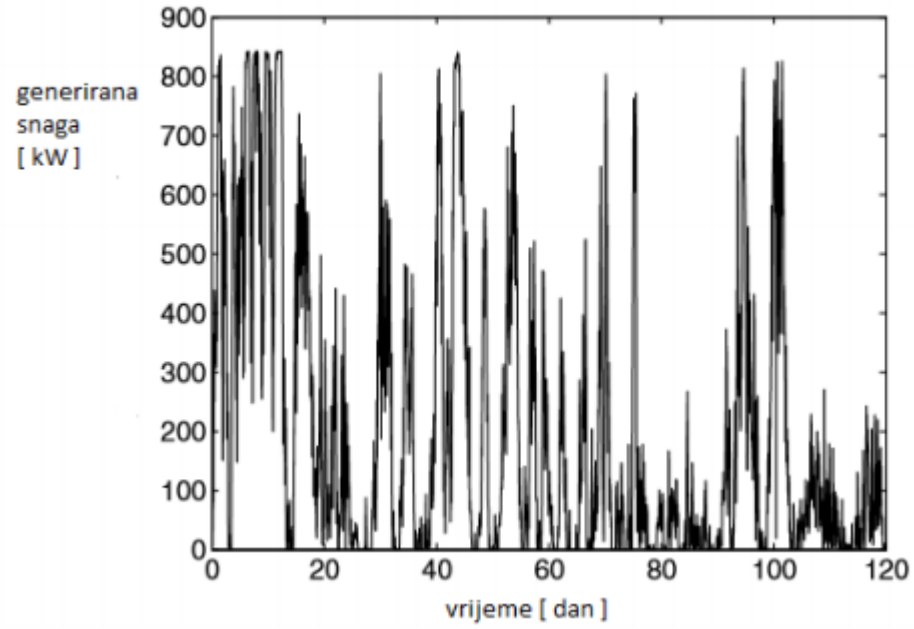
Iz slike je vidljivo da je moguće zabilježiti turbulencije, ali postoji problem prilikom izračuna broja turbulencija jer ne postoji pouzdan parametar koji bi omogućio proračune na skalama na kojima je izvršeno mjerenje. Jedan od načina je korištenje raspona između standardne devijacije i prosjeka od 10 min do 1h, na način na koji se definira i intenzitet turbulencija. Pomoću mjerenja moguće je

provesti izračune. Pri mjerenju promjena snage se prati iz sekunde u sekundu. Na slici 2.9. prikazano je mjerenje promjene snage iz sekunde u sekundu.[5]
Navedeno mjerenje provedeno je na istom vjetroagregatu kao iz prethodnog primjera.



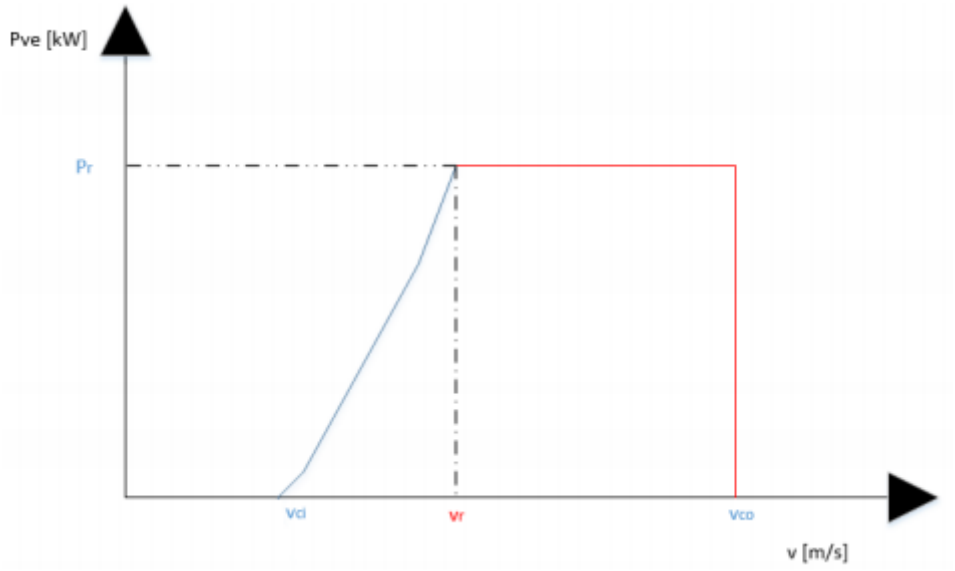
Sl. 2.9. *Promjena snage iz sekunde u sekundu pri periodu od 48h* [5]

Vidljiva je zakrivljenost koja je izračunata kao razlika između dva uzastopna jednosekundna prosjeka. Navedene uzastopne vrijednosti najčešće se ne razlikuju za više od 20 kW, ali se u nekom vremenu pojavljuju vrijednosti koje prelaze 200 kW. Mjerenje u intervalima koje je izraženo u sekundama i minutama zahtjeva visoku preciznost opreme te se zbog toga nakuplja velika količina podataka, prema tome češće se provode mjerenja u kojima je vremenska jedinica sat. U nekim zemljama postoje tipični intervali mjerenja koji iznose 15 i 30 min. Mjerenje u takvim intervalima prikazano je na slici 2.10. [5]. Mjerenje je izvršeno u Švedskoj na agregatu snage 850 kW, te je vršeno u razdoblju od 4 mjeseca.



Sl. 2.10. *Generirana snaga vjetroagregata praćena u razdoblju od 4 mjeseca*

Iz slike je vidljivo da priključenjem vjetroelektrana na prijenosni sustav generirana snaga varira, ali to nije jedini problem. Činjenica da se broj varijacija razlikuje od sata do sata, te ih je teško predvidjeti stvara velike poteškoće. Varijacije proizvodnje mogu se prikazati pomoću krivulje snage. Na slici 2.11. [3] prikazan je pojednostavljeni grafički prikaz varijacije proizvodnje. Tri ključne brzine objašnjene su pomoću krivulja.



Sl. 2.11. *Krivulja snage i tri ključne brzine* [3]

Na slici 2.11. brzina označena sa v_{ci} predstavlja brzinu uključenog vjetroagregata odnosno brzinu pri kojoj se počinje proizvoditi električna energija. Navedena brzina obično iznosi 3-5 m/s ovisno o proizvođaču. Brzina v_r predstavlja nazivnu brzinu pri kojoj se generira nazivna snaga. Brzina v_{co} predstavlja brzinu isključenja vjetroagregata koja obično iznosi 20-25 m/s. Pri toj brzini rad vise nije moguć zbog velikih mehaničkih naprezanja. Pomoću krivulje snage i razdiobe vjetra može se izračunati očekivana proizvodnja određenog vjetroagregata na pojedinoj lokaciji prema izrazu:

$$E_{VE} = T\int P(v)F(v)\,dv. \qquad (2\text{-}3)$$

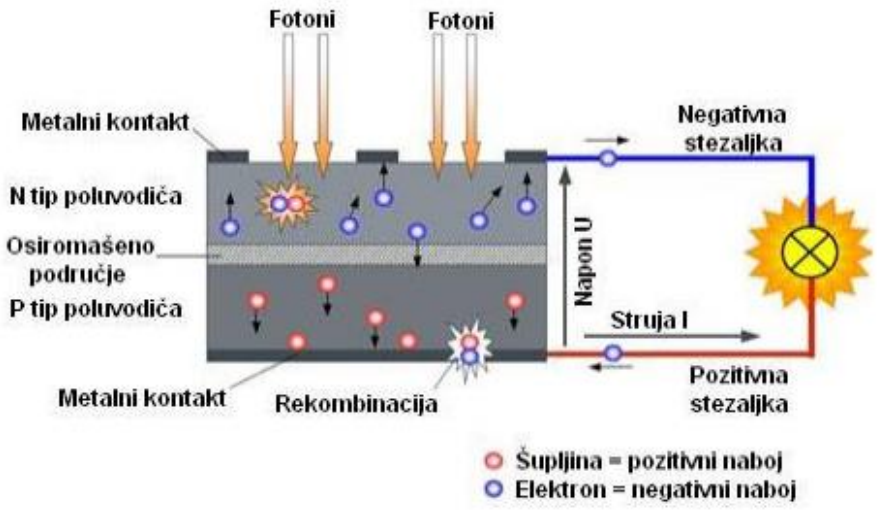
Gdje je:
E_{VE} - proizvedena energija vjetra
T – promatrani vremenski period
P(v) – krivulja snage vjetroagregata
F(v) – funkcija gustoće razdiobe brzine vjetra [3]

2.2 Solarna energija

Količina energije koju zemlja prima od sunca iznosi 1 m^2. Bez oblaka, najviša je u blizini ekvatora i najniža u blizini polova. Energija iz sunca može se koristiti na više načina. Najvidljivije korištenje danas je u obliku fotonaponskih modula, često instaliranih na krovu zgrade.Velika prednost ove vrste solarne energije je da se proizvodi gdje je to potrebno, kao potrošnja električne energije također se odvija uglavnom u zgradama. U nekim zemljama (poput Njemačke i Nizozemske), ova vrsta instalacije postaje vrlo česta. Za trenutnu generaciju serijski proizvedenih solarnih ćelija, učinkovitost je između 6% i 15%, no pojedinačne stanice mogu imati veću učinkovitost do 20%. Količina energije proizvedena od strane solarne elektrane ovisi o mjestu sunca i količini oblaka. Mjesto sunca na nebu pokazuje predvidljivu dnevnu i sezonsku varijaciju uzrokovanu rotacijom Zemlje na svojoj osi i oko sunca. To će vjerojatno učiniti solarnu energiju predvidljivijom od energije vjetra, ali ima ograničeno iskustvo s predviđanjem za sunčevu energiju. [5]

2.2.1 Fotonaponski sustav

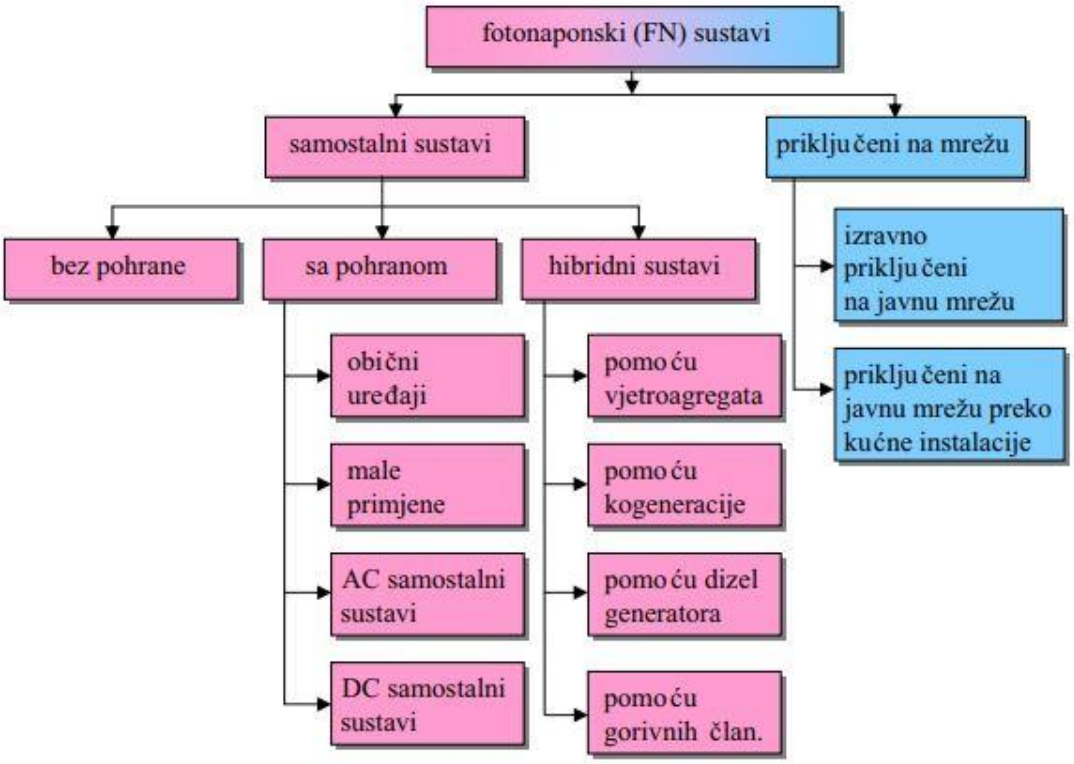
Fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Sunčevo svjetlo se sastoji od fotona, kada fotoni pogode FN ćeliju oni se mogu reflektirati od nje, proći kroz nju ili biti upijeni (apsorbirani). Samo apsorbirani fotoni daju energiju za oslobađanje elektrona i proizvodnju električne energije (fotonaponski efekt). Fotonaponska ćelija je izrađena od poluvodičkog materijala, tipično od silicija ili drugih poluvodičkih materijala koji pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju. Kada je solarna ćelija izložena sunčevoj svjetlosti ona prenosi elektrone između različitih granica unutar materijala. Ovo rezultira potencijalnom razlikom između dvije elektrode, pri čemu poteče istosmjerna struja. Dobivena energija može se akumulirati u baterijama i koristiti za napajanje istosmjernih potrošača. U slučaju potrebe za napajanjem izmjeničnih (AC) potrošača tada se u solarni sistem implementira pretvarač, tj. inverter. Inverter vrši pretvorbu istosmjernog DC napona u izmjenični AC, te na taj način direktno omogućava napajanje kućnih potrošača koji rade na mrežnom naponu 230V/50Hz.



Sl. 2.12. *Solarna Ćelija* [6]

2.2.2 Podjela solarnih fotonaponskih sustava

Solarni fotonaponski sustavi (FN) mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine: fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (engl. off-grid), a često se nazivaju i samostalnim sustavima (engl. stand-alone systems), i fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (engl. on-grid), (slika 2.13.).



Sl.2.13. *Osnovna podjela fotonaponskih sustava*

Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu, mogu biti sa ili bez pohrane energije, što će ovisiti o vrsti primjene i načinu potrošnje energije, i hibridni sustavi koji mogu biti s vjetroagregatom, kogeneracijom, dizelskim generatorom ili gorivnim člancima. Fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu mogu biti izravno priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu ili priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije.

2.3. Hidroenergija

Hidroelektrana koristi protok vode prema moru za generiranje struje. Najviše vidljivi oblik je pomoću velikih brana za stvaranje rezervoara. Razlika u razinama vode uzvodno i nizvodno od brana dopušta korištenje potencijalne energije u vodi da se učinkovito koristi. Takva postrojenja kreću se u veličini od nekoliko desetakamegavata do nekoliko stotina megavata, s nekim vrlo velikim instalacijama. Elektrana u Kini je najveća u svijetu s ukupnim kapacitetom od 22500 MW. Druga vrlo velika je u Itaipu, postrojenje na granici Brazila i Paragvaja (12600 MW), pogon La Grande Quebecu, Kanadi (15000 MW) i postrojenju Cahora Bassa u sjevernom Mozambiku (2060 MW). Neke zemlje se u velikoj mjeri oslanjaju na hidroelektrane za njihovu proizvodnju električne energije: na primjer, Brazil (83%), Argentina (25%), Kanada (60%), Čile (50%), Norveška (99%) i Švedska (50%). U apsolutnom broju, Kanada i Kina su najveći proizvođači hidroelektrana, s oko 330 TWh proizvodnje godišnje. [5]

2.3.1. Svojstva malih hidroelektrana

Tijek rijeke i male hidroelektrane mogao bi se nalaziti bliže klijentu nego velika hidroelektrana, ali ostaje ograničena samo na planinska područja. Mala hidroenergija odnosi se na jedinice koje variraju od 10 kW do oko 30 MW. Ponekad su klasificirani kao mikrohidro (10-100 kW), minihidro (100-500 kW) i mala hidro (500 kW-30 MW). Narodna Republika Kina ima gotovo 100.000 malih hidroelektrana izgrađenih u posljednjih 20 godina. Značajne značajke malih hidroelektrana su obično tip rijeke, izgradnja u relativno kratkom vremenu, koristeći dobro razvijenu tehnologiju s ukupnom učinkovitošću od preko 80%, te s automatskim operativnim sustavima s niskim radom i održavanjem bez značajnih kapaciteta za pohranu, mogu doći do velikih promjena u dostupnom toku vode. U Ujedinjenom Kraljevstvu faktor kapaciteta za vodu, tj. omjer stvarne godišnje energije proizvedene na energiju proizvedenu na nazivnom izlazu tijekom 12 mjeseci, iznosi oko 30 %, što je gotovo jednako kao i za energiju vjetra. [5]

2.4. Geotermalna energija

Sunčevo zračenje glavni je uzrok koji pokreće većinu obnovljivih izvora energije. Postoji nekoliko izvora energije koje ovaj uzrok ne pokreće. U tu skupinu spadaju geotermalna energija i energija plime i oseke. Geotermalna energija potpuno opravdano spada u skupinu obnovljivih izvora energije jer ima ogroman kapacitet. Povezanost geotermalne energije s plinovima zahtjeva zatvoren pristup pri korištenju kako bi se osiguralo sto manje štetnosti na okoliš.

Riječ *„geotermalno“* nastala je od dvije grčke riječi, „*geo*” (zemlja) i „*Therme*” (toplina) i znači „*toplina zemlje*“, pa se zbog toga Zemljina toplina još naziva i geotermalna energija. Toplina koja se nalazi u unutrašnjosti Zemlje posljedica je formiranja planeta iz prašine i plinova prije više od 4 milijarde godina. Raspadanje elementa u stijenama djelovanjem radijacije kontinuirano regenerira navedenu toplinu, pa prema tome geotermalnu energiju svrstavamo u skupinu obnovljivih izvora energije. Medij koji prenosi toplinu iz unutrašnjosti Zemlje na površinu je voda ili para. Kiša koja pada prodire kroz pukotine Zemlje i tako se zagrijava, te se ponovno vraća na površinu, gdje se pojavljuje u obliku gejzira ili vrućih izvora. [7]

Kako bi se geotermalna energija mogla iskoristiti na što bolji način razvijene su brojne tehnologije. Pojednostavljeno mogu se izdvojiti dvije tehnologije.

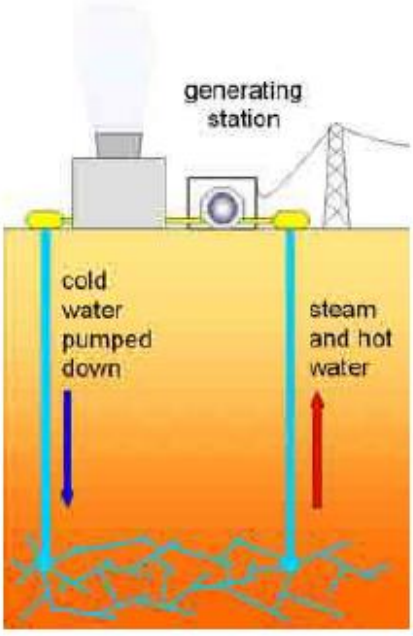
- direktno korištenje
- indirektno korištenje

Direktno korištenje znači eksploatacija vode koja izbija iz podzemlja na površinu. Takvo korištenje može se primijeniti u razne svrhe:

- korištenje u toplicama
- grijanje kuća i staklenika
- pojedini postupci u industriji (npr. pasterizacija mlijeka)

Najveći geotermalni izvor koji se koristi za grijanje nalazi se na Islandu u glavnom gradu Reykjaviku, gdje se gotovo sve zgrade griju na ovu vrstu energije.

Indirektno korištenje geotermalne energije znači proizvodnja električne energije. Ovaj princip dobivanja električne energije ne razlikuje se puno od klasičnih termoelektrana na ugljen i mazut. Razlika je samo u načinu dobivanja pare. Ovisno o temperaturi pare ili vode razvijene su mnoge tehnologije. Vruća voda ili para koriste se za pokretanje generatora, te zbog toga nema izgaranja fosilnih goriva koja stvaraju štetan utjecaj na okoliš. Na slici 2.3 prikazan je princip dobivanja električne energije pomoću geotermalnog izvora. Vruća voda i para koriste se za pokretanje turbine generatora, te se nakon korištenja vraćaju natrag izvoru.



Sl. 2.14. *dobivanje električne energije iz geotermalnog izvora* [8]

Tri osnovna tipa geotermalnih elektrana:

1. Princip suhe pare *(Dry steam*- ovaj princip koristi isključivo vruću paru obično iznad 235°C (445°F). navedena para koristi se direktno za pokretanje turbine generatora. Ovo je najjednostavniji i najstariji princip dobivanja električne energije iz geotermalnih izvora energije koji se još i danas koristi zbog svojih brojnih prednosti u odnosu na druge principe.
2. Flash princip *(Flash steam)*- ovaj princip koristi vruću voda koja se nalazi u prirodnim rezervoarima pod visokim tlakom i temperaturi najčešće iznad 182°C (360°F). Prilikom pumpanja vruće vode iz rezervoara tlak se smanjuje te se voda pretvara u paru i na taj način pokreće turbinu. Višak vode koji se nije pretvorio u paru vraća se u rezervoar zbog ponovne uporabe. Većina suvremenih geotermalnih elektrana koriti ovaj način rada.
3. Binarni princip *(Binary cycle)*- ovaj princip koristi vruću vodu za grijanje tekućine koja ima nižu točku ključanja od vode, na taj način prije se stvara para koja se koristi za pokretanje turbine. Prednosti ovog postupka su veća efikasnost od ostalih postupaka te veća dostupnost geotermalnih rezervoara. Jos jedna prednost ovog postupka je to da je sustav zatvoren i na taj način smanjen je gubitak topline, a iskorištena voda ponovno se vraća u rezervoar, te gotovo da nema gubitaka. Veliki broj planirah geotermalnih elektrana koristi ovaj princip proizvodnje. [7]

Geotermalna energija ima brojne prednosti u odnosu na druge konvencionalne izvore energije koji su temeljeni na fosilnim gorivima. Glavna karakteristika geotermalne energije je to što je čista i sigurna za okoliš. Ovaj princip na koji se dobiva električna energija nema štetnih emisija na okolinu kao npr. hidroelektrana, geotermalni izvori zauzimaju malo površine. Geotermalni izvori izuzetno su pouzdani te ne ovise o meteorološkim promjenama, smanjuju efekt staklenika odnosno ispuštanje ugljikova (IV) oksida u okolinu.

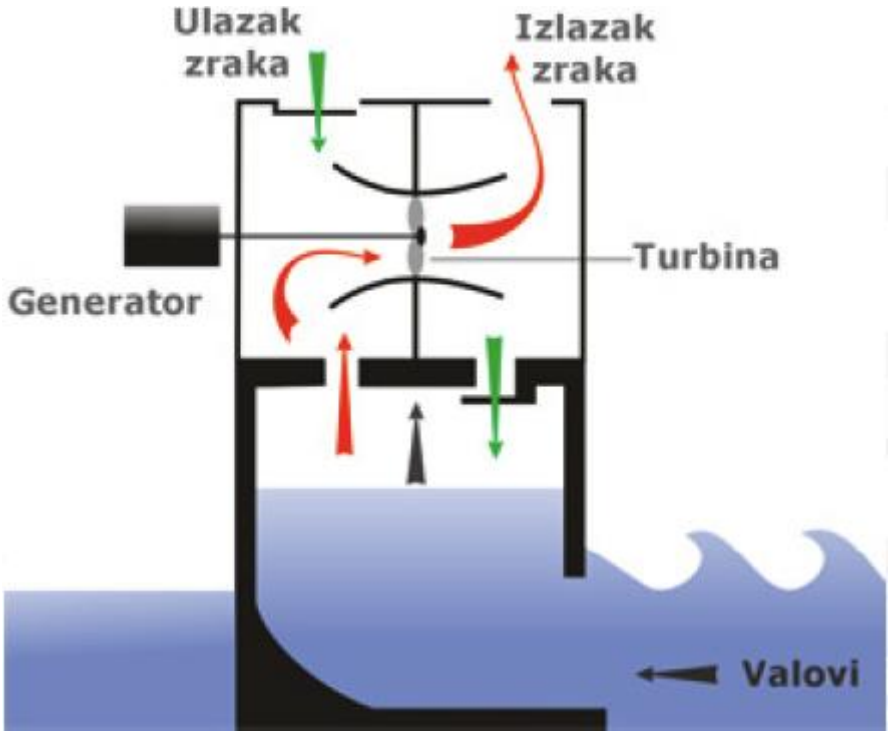
Geotermalna elektrana gradi se direktno na području gdje je geotermalni izvor, te omogućuje učinkovitu i kontinuiranu dobavu električne i toplinske energije. Nedostatak geotermalne energije je vrlo mal broj lokacija koje se mogu koristiti, te gradnja geotermalne elektrane. Još jedan nedostatak je nemogućnost transportiranja geotermalne energije, stoga se može koristiti samo za opskrbu električne i toplinske energije obližnjim mjestima. Jedan od glavnih nedostataka je ispuštanje velikih količina plinova iz Zemlje kao što je ugljikovodik koji je vrlo korozivan, te ga

je vrlo teško odložiti. Nedostaci geotermalnih izvora najviše se rezultiraju visokim ulaganjima te skupoj tehnologiji i visokim troškovima održavanja.

2.5. Energija valova, plime i oseke

Dvije snage vežu se uz oceane: snaga valova te snaga plime i oseke. Proizvodnja snage pomoću valova povezana je s površinskim oceanskim valovima i pretvaranjem energije u električnu struju. Ovaj tip obnovljivih izvora energije nije ostvario značajan proboj jer je nepouzdan.

Energija plime koristi razliku hidrostatskog potencijala između bazena i mora, dok energija oseke koristi kinetičku energiju vode koja se giba. Ovaj tip energije koristi gibanje mora za vrijeme mjesečevih mijena odnosno rast ili pad morske razine za proizvodnju električne energije. Najčešće tehnologije su plimne barijere i generatori plimnih struja. Generatori plimnih struja rotiraju se podvodno i proizvode električnu energiju korištenjem kinetičke energije plimnih struja. Plimne barijere koriste branu koja se nalazi nasuprot plimnog ušća za proizvodnju struje korištenjem potencijalne energije vode. Voda utječe u barijeru tijekom visoke plime i onda se ispušta tijekom oseke, pri tome pokretajući set turbina. Amplitude plime i oseke u Jadranskom moru su 1 m, a na Atlantskom, Tihom i Indijskom oceanu prosječno 6-8 m. Na pojedinim mjestima obale u zapadnoj Francuskoj i u jugozapadnom dijelu Velike Britanije amplituda dostiže i više od 12m. Za ekonomičnu proizvodnju je potrebna minimalna visina od 7 m. Na svijetu postoji više od četrdeset lokacija za korištenje ove tehnologije. [7]



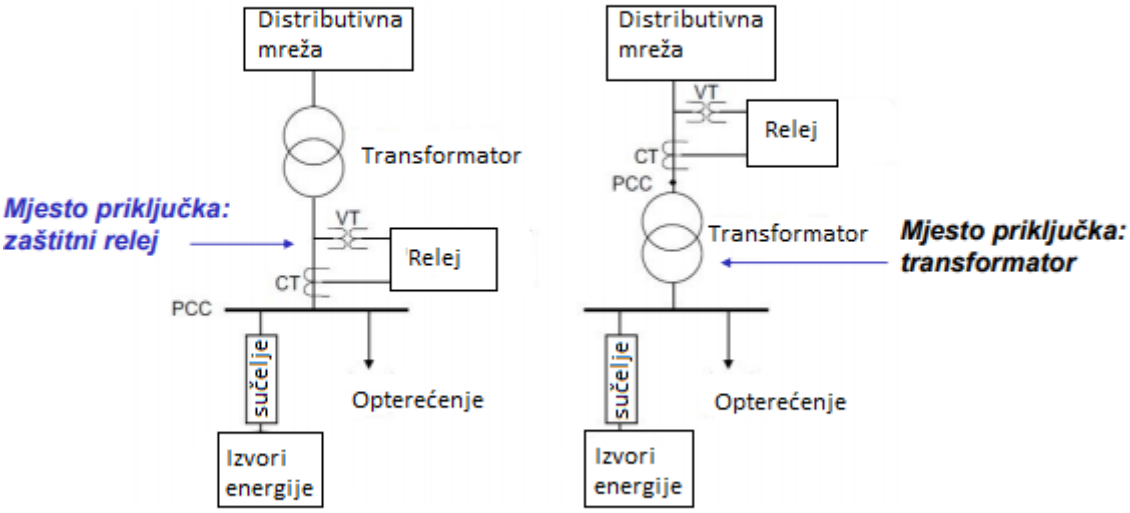
Sl.2.15. *Pretvorba energije valova u električnu energiju* [7]

Na slici vidimo pretvorbu 2.15. vidi se princip pretvorbe energije valova u električnu energiju. Energija valova prvo se pretvara u strujanje zraka i taj vjetar pokreće turbinu. Amplituda valova mora biti velika da pretvorba bude učinkovita.

2.6. Vrste priključka elektrana na OIE i utjecaj na mrežu

Mjesto priključka na mrežu (PCC) ovisi o vlasničkom statusu i pravilima priključenja koje definira ODS ili OPS

Dva slučaja priključka:



Sl.2.16. *Mjesto priključka zaštitni relej (lijeva shema) i transformator (desna shema)* [5]

Postoje različite tehnologije kojima se priključuje izvor energije na mjestu priključka no uobičajeno se koristi generator (sinkroni, asinkroni) ili elektronički energetski pretvarači s ciljem osiguranja tehničkih zahtjeva mreže propisano mrežnim pravilima.

Osnovne kategorije priključka:

- Izravan priključak sinkronog ili asinkronog generatora
- Potpuno neizravan priključak pomoću elektroničkih energetskih pretvarača
- Djelomično neizravan priključak pomoću elektroničkih energetskih pretvarača

- Modularni/distribuirani neizravan priključak pomoću elektroničkih energetskih pretvarača [5]

2.6.1. Izravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu

Izvori poput vjetroelektrana ili malih hidroelektrana koji proizvode mehaničku energiju mogu se izravno spojiti na mrežu putem generatora. Osiguravamo veću energetsku učinkovitost izbjegavajući dodatne (gubitke) pretvorbe.

Izbor tipa generatora ovisi o prirodi mehaničke energije (brzini vrtnje):

- Stalna brzina vrtnje
- Promjenjiva brzina

Za stalnu brzinu vrtnje primjereni su sinkroni generatori. Oni mogu biti izvori djelatne i jalove snage a obično zahtijevaju opremu za sinkronizaciju paralelnog pogona s mrežom.

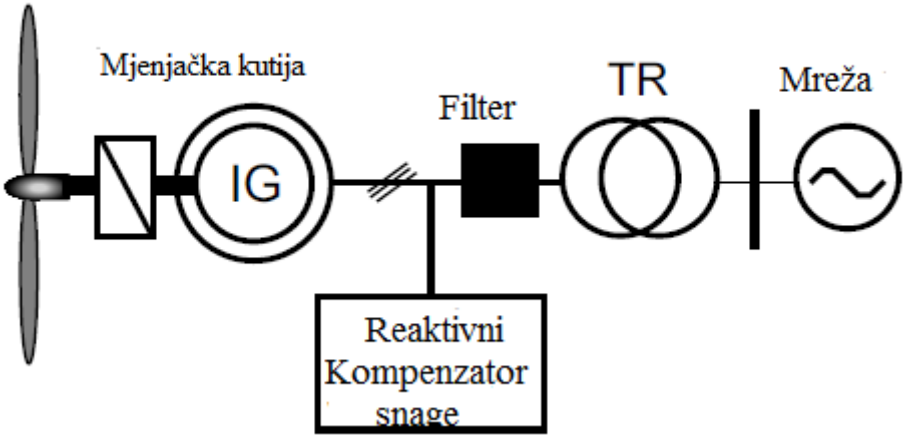
Primjena je kod termoelektrana na OIE:

- Biomasa
- Geotermalne
- Sunčane

Za promjenjivu brzinu vrtnje primjereniji su asinkroni generatori. Oni omogućuju prigušenje oscilacija kroz kliznu razliku brzina između statora i rotora. Dodatne prednosti su im što ne zahtijevaju sinkronizaciju s mrežom, jeftiniji su i zahtijevaju samo nadnaponsku/podnaponsku zaštitu i frekvencijsku zaštitu. Osnovni nedostatci su što su ograničeni u nazivnoj snazi jer zahtijevaju prilikom uzbude jalovu snagu iz mreže. Izvlačenjem jalove snage iz mreže prilikom pokretanja može izazvati flikere na mjestu priključka, zbog toga zahtjevaju i dodatnu kompenzaciju jalove snage. [5]

Primjenjuju se kod:

- Vjetroelektrana (tip A, B)
- Malih hidroelektrana spojenih na krutu mrežu



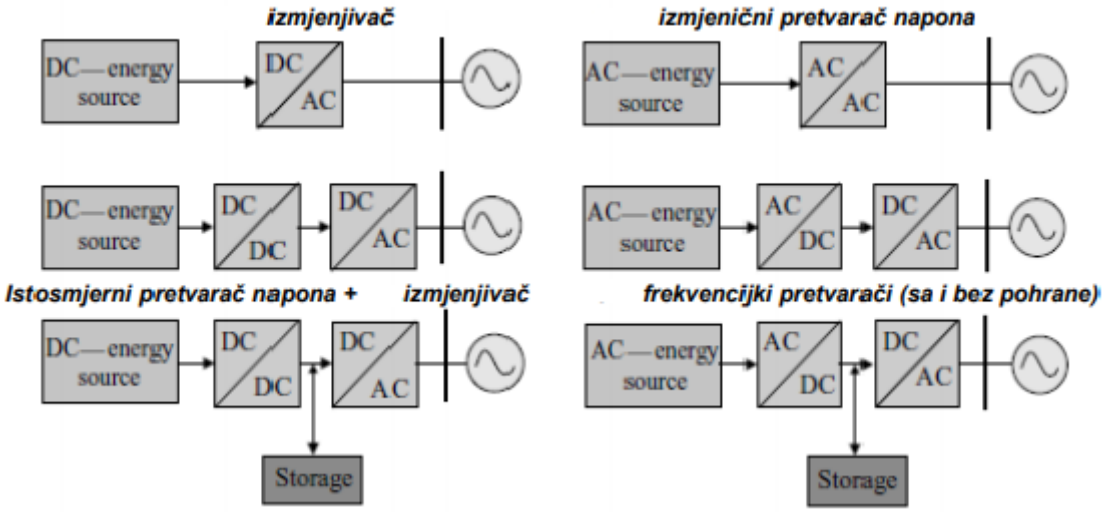
Sl.2.17. *Izravan priključak generatora na vjetroturbinu* [5]

2.6.2. Potpuno neizravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu pomoću elektroničkih energetskih pretvarača

Osnovni zadatak priključka elektroničkih energetskih pretvarača je u kondicioniranju energije koji proizvodi distribuirana proizvodnja kako bi dostigli zahtjeve mreže (prema mrežnim pravilima i normama) te kako bi se povećala učinkovitost proizvodnje električne energije.

Uređaji energetske elektronike (pretvarači) imaju sposobnost pretvorbe električne energije iz jednog oblika u drugi, poput:

- **Pretvorbe istosmjerne struje izvora u izmjeničnu** - izmjenjivači (DC/AC) za priključak na mrežu prema mrežnim pravilima (tipično kod FN sustava)
- **Pretvorbe istosmjerne struje izvora u istosmjernu** - istosmjerni pretvarači napona (DC/DC) radi prethodne regulacije izlaznog napona s ciljem postizanja maksimalne snage sa i bez pohrane energije (obično baterije, na DC strani)
- **izmjenični pretvarači napona** (AC/AC) priključak na mrežu prema mrežnim pravilima pretvorbe izmjenične struje izvora u izmjeničnu putem istosmjerne veze
- **frekvencijski pretvarači** (AC/DC-DC/AC) putem istosmjerne veze (DC link) za priključak na mrežu prema mrežnim pravilima (s mogućnošću povezivanja dva sustava različitih frekvencija), s i bez pohrane energije (npr. vjetroelektrane tip D na kopnu ili vjetroelektrane na pučini). [5]

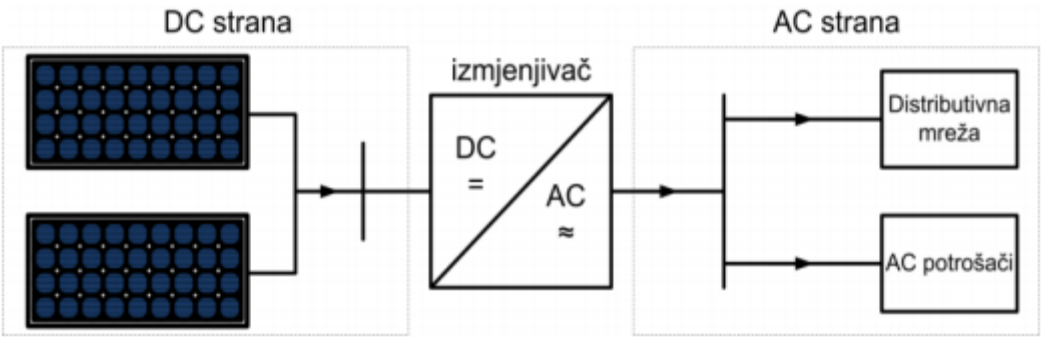


Sl.2.17. *Različite konfiguracije priključka pomoću elektroničkih energetskih pretvarača* [5]

Primjer potpuno neizravnog priključka: Mrežni (on-grid) FN sustavi.

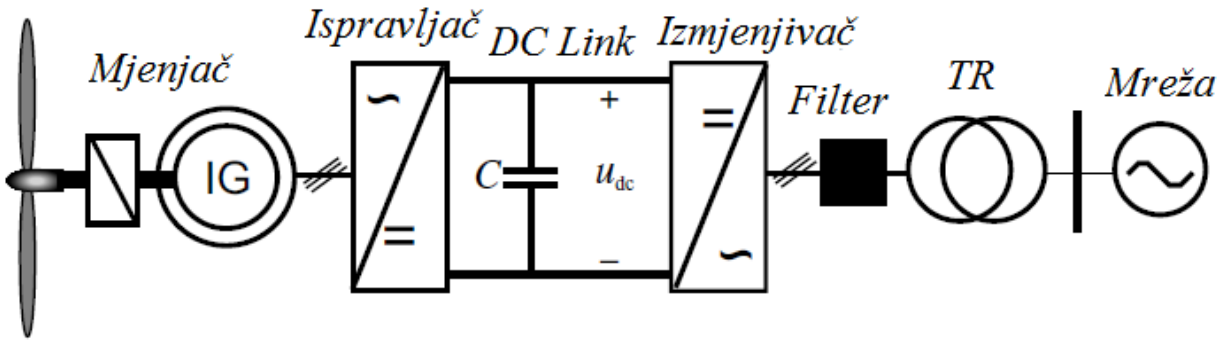
Mrežne fotonaponske elektrane (sustavi) su elektrane koje su spojene na elektroenergetsku mrežu. Istosmjerna struja se prvo pretvara u izmjeničnu putem izmjenjivača (DC/AC).

U pravilu se u izmjenjivaču nalazi i istosmjerni pretvarač napona (DC/DC) čiji je zadatak izvući maksimalnu snagu fotonaponskog niza i predati u mrežu – tragač maksimalne snage (MPPT) čiji je zadatak prilagodba pogonskog napona pri različitim temperaturama ćelija i ozračenjima. [9]



Sl.2.18. *Potpuno neizravni priključak FNE putem istosmjernog pretvarača napona (MPPT, Chopper) i izmjenjivača [9]*

Primjer potpuno neizravnog priključka: VE na kopnu.



Sl.2.19. *Potpuno neizravni priključak VE na kopnu putem frekvencijskog pretvarača s izravnom istosmjernom vezom dva pretvarača* [5]

2.6.3. Djelomično neizravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu pomoću elektroničkih energetskih pretvarača

Zbog visokih troškova potpuno neizravnog priključka pomoću elektroničkih energetskih pretvarača elektrane (distribuiranog izvora), vrši se kompromisno rješenje u kojem se izvodi djelomični priključak s pretvaračima s određenim postotkom nazivne snage elektrane, poznato kao dvostrano napajanje ili dvostrani priključak na mrežu.

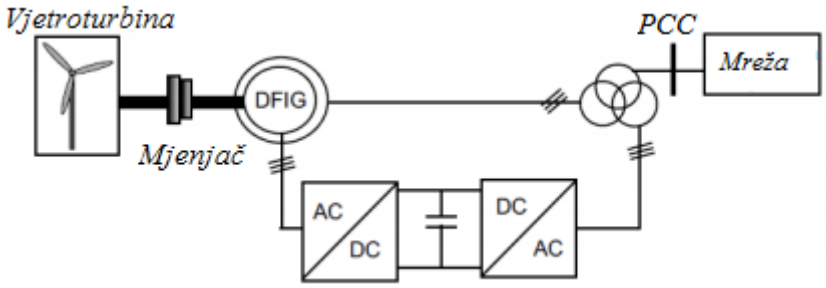
Dva takva tipična primjera su:

- Vjetroelektrana u izvedbi s dvostrano napajajućim asinkronim (induktivnim) generatorom (eng. Double-Fed Induction Generator, DFIG)
- Priključak vjetroelektrana ili drugog skupa distribuiranih izvora sa statičkim kompenzatorima jalove snage

Vjetroelektrana u izvedbi s dvostrano napajajućim asinkronim generatorom - uz izravni priključak na mrežu preko statora tu je i djelomični priključak frekvencijskim pretvaračem djelomične snage generatora, preko rotora.

Razdvajanjem mehaničke i električne frekvencije omogućuje se pogon s promjenjivom brzinom vrtnje odnosno promjenjivom frekvencijom rotora, pri čemu je omjer nazivne snage pretvarača i turbine načelno jednak pola omjera raspona brzina. Ovakva (vjetro)turbina ima ograničen ali

dovoljan raspon pogonskih brzina, jeftinija je i manjih gubitaka a istovremeno je mogućnost upravljanja slična onoj s potpunim priključkom.

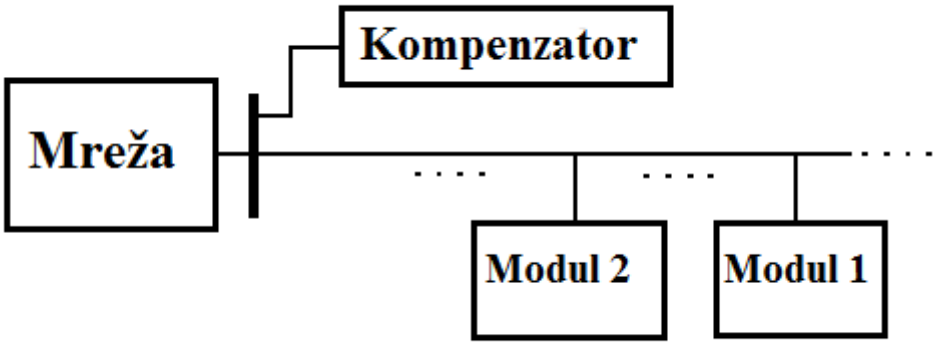


Sl.2.20. *Vjetroelektrana u izvedbi s dvostrano napajajućim asinkronim (induktivnim) generatorom* [9]

Priključak vjetroelektrana distribuiranih izvora sa statičkim kompenzatorima jalove snage

Vjetroparkovi (ili bilo koji drugi skup distribuiranih izvora) trebaju središnji djelomični priključak zbog mogućnosti prolaska kroz kvar u mreži (naponske propade) prema mrežnim pravilima i zbog potpore u regulaciji napona putem proizvodnje jalove snage.

U ovom se slučaju obično se koriste statički kompenzatori jalove snage (engl. STATic Var COMpenastor, STATCOM), uobičajeno naponski pretvarači (eng. Voltage Source Converter, VSC)



Sl.2.21. *Primjer priključka sa statičkim kompenzatorom jalove snage* [9]

2.6.4 Modularni (distribuirani) neizravan priključak generatora elektrana na OIE na mrežu pomoću elektroničkih energetskih pretvarača

Modularni priključak elektrana na OIE odnosi se na slučaj više distribuiranih izvora koji se priključuju na istom mjestu priključka, što u slučaju istog vlasništva omogućuje određene prednosti poput mogućnosti regulacije napona u okolnoj mreži.

Tipična primjena: fotonaponski sustavi većih snaga s ciljem povećanja učinkovitosti (do 96%), kvalitete električne energije i pouzdanosti napajanja (različite FN ćelije/moduli izložene su različitoj sunčevoj ozračenosti što kod modularnog priključka omogućuje bolju prilagodbu više manjih istosmjernih naponskih pretvarača kao tragača maksimalne snage (MPPT).

Kod elektrana malih snaga - svi Fn- nizovi spojeni su na jedan izmjenjivač.

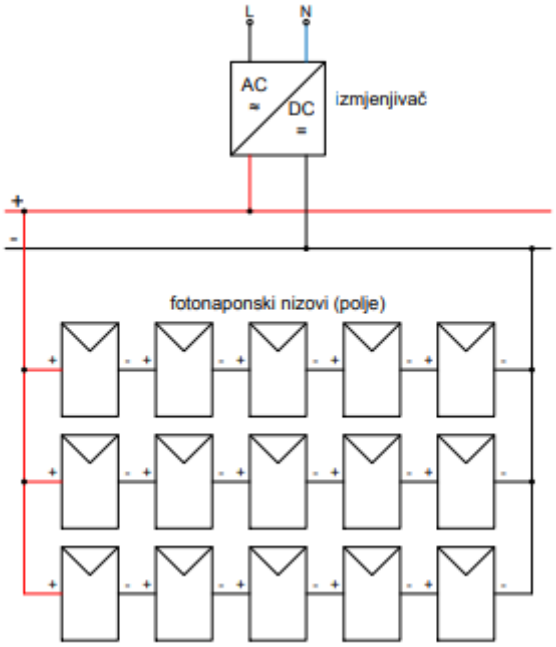
Nizovi moraju biti jednaki (jednak broj modula istih karakteristika te jednake izloženosti sunčevom zračenju).

Prednosti ekonomske prirode:

- manji troškovi izgradnje i održavanja.

Nedostaci tehničke prirode:

- u slučaju kvara izmjenjivača isključuje se cijela elektrana.
- nisu pogodne za povećanje vršne snage elektrane (problemi s nadstrujnom zaštitom, potrebom za većim inverterom)
- u slučaju zasjenjenja - puno veće smanjenje snage nego u slučaju drugih izvedbi. [9]

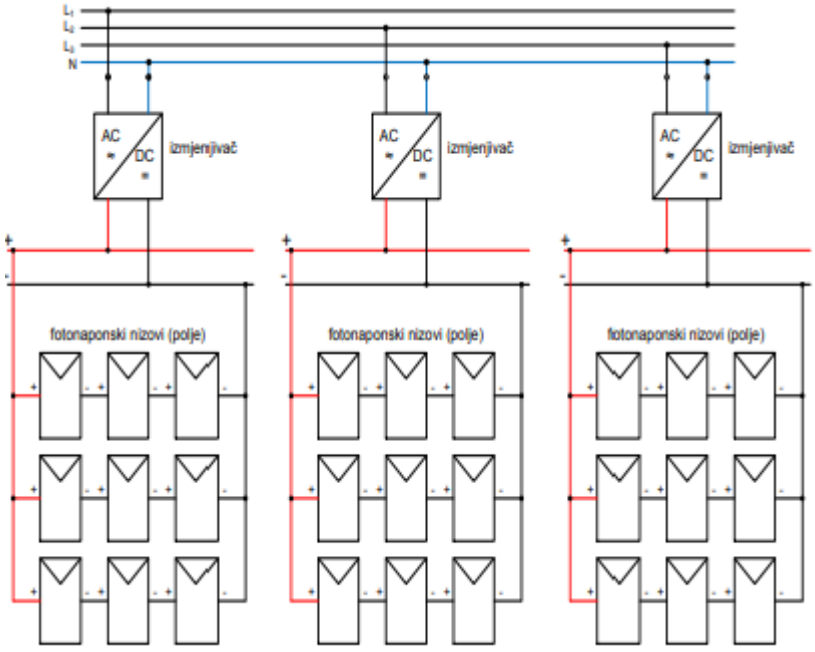


Sl. 2.22. *Izvedba s jednim (centralnim) izmjenjivačem* [5]

Kod elektrana većih snaga-FN polje podijeljeno je u više potpolja s tim da svako potpolje ima svoj izmjenjivač na koji je paralelno spojeno više fotonaponskih nizova.

Prednosti :

- u slučaju kvara jednog izmjenjivača neće doći do isključivanja cjelokupne elektrane.
- Manji troškovi u slučaju izvedbe s izmjenjivačem za svaki FN niz.



Sl.2.23. *Izvedba s više izmjenjivača* [5]

2.6.5. Utjecaj vrste priključka elektrane na mrežu

Vrsta (tehnologija) priključka distribuirane proizvodnje na mrežu određuje njezin utjecaj na:

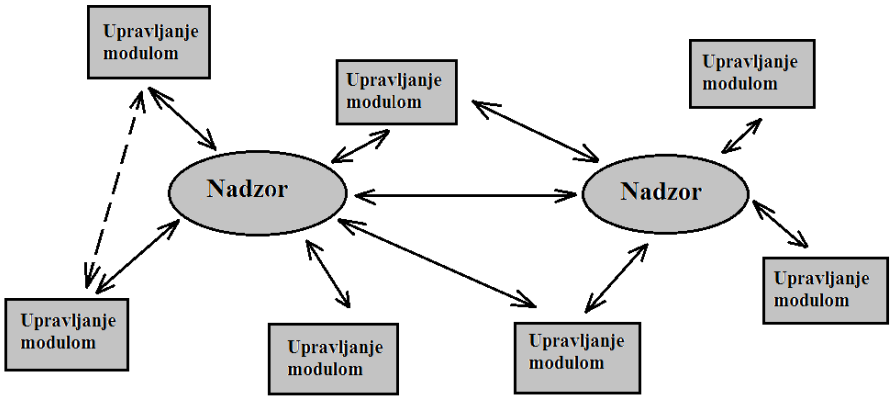
- **Strujno-naponske prilike u mreži**: tokove snaga – strujna opterećenja, gubitke, naponske prilike, regulaciju, struje kratkog spoja, stabilnost sustava (vjetroelektrane)
- **Kvalitetu električne energije** proizvedene (injektirane u mrežu) iz elektrane pri čemu operator distribucijskog ili prijenosnog sustava zahtjeva od elektrane određeni standard kvalitete - u Hrvatskoj i EU definiran normom **HRN EN 50160**
- **Povratni utjecaj kvalitete električne energije** iz mreže na elektranu kao i pouzdanost proizvodnje električne energije, pri čemu različite tehnologije imaju različitu osjetljivost na događaje uzrokovane narušenom kvalitetom električne energije iz mreže (varijacije napona, naponske propade, harmoničku distorziju, flikere i dr.)
- **Složenost i mogućnost upravljanja** (regulacije) elektranom (distribuiranom izvorom električne energije).

  Npr. potpuni priključak s elektroničkim energetskim pretvaračem nazivne snage omogućuje najbolje i neovisno upravljanje djelatnom i jalovom snagom injektiranom u mrežu. [9]

Prema naprednim mrežama

S ciljem boljeg iskorištenja mogućnosti distribuirane proizvodnje i povećanja razine integracije u mrežu nužno je uvođenje novih pogonskih scenarija.

Npr. različite jedinice/moduli s različitim kriterijima regulacije mogu se povezati u jedan značajan izvor s nadređenim upravljanjem. Interno upravljanje jedinicama (modulima) koristi se za optimalno upravljanje ukupnim izvorom na temelju pogonskih i ekonomskih karakteristika.



Sl.2.24.*Upravljanje jedinicama (modulima)* [5]

Prema naprednim mrežama (engl. Smart grid) dodavanjem novih jedinica mijenja se način pogona te dodaje dodatna mogućnost nadređenog upravljanja a time i povećanje razine integracije. S ciljem automatizacije ovog nadređenog sustava upravljanja nužno se javlja potreba komunikacijske i informacijske tehnologije (ICT) između distribuiranih izvora i U tom smislu radi se na standardizaciji procesa postavljanja informacijskih modela za različite distribuirane izvore, poput standarda (2011.):

- **IEEE 1451** za 'plug-and-play' senzore, u kojima se razmatraju komunikacijski protokoli, informacijski modeli i scenariji.
- **IEC 61850-7-420** informacijski modeli za četiri tipa distribuiranih izvora: FN sustavi, gorivne ćelije, sustavi i kogeneracije
- **IEC 61400-25** informacijski modeli za nadzor i upravljanje vjetroelektrana.
- **IEC 61970** informacijski modeli za upravljanje energijom. [5]

3. KOLEBANJE NAPONA

Da bi se postigla odgovarajuća kvaliteta napona kod potrošača, potrebno je održavati napon u određenim granicama. Napon je potrebno održavati u granicama od 90 % do 110 % nazivne vrijednosti, odnosno +/- 10% jer su to naponi za koje su projektirani električni uređaji i zato što tako zahtijeva EN 50160. Većom ili nižom promjenom izvan ovih granica može značajno utjecati na rad uređaja ili im smanjiti vijek trajanja.[10]

Da bi znali koliko povećati napon, koristimo pojam naponska margina. Ona nam govori razliku između gornjeg naponskog limita i napona na promatranome mjestu. Potrebno ju je poznavati da bi znali koliku proizvodnju možemo spojiti na tome mjestu. Isto tako kada radimo kompenzaciju pada napona, ona nam govori koliko smijemo povećati napon, a da on ne premaši dozvoljene granice.

3.1.Kvaliteta električne energije- tehnički parametri napona

Tehnički parametri električne energije, tj. napona su:

- mrežna frekvencija
- veličina napona
- promjene napona
- treperenje napona
- propadi napona
- privremeni mrežni prenaponi između faznih vodiča i zemlje
- impulsni prenaponi između faznih vodiča i zemlje
- naponi viših harmonika
- naponi međuharmonika
- signalni naponi [10]

Mrežna frekvencija je broj titraja naponskog vala u sekundi. U europskim elektroenergetskim mrežama iznosi 50 Hz (u SAD je 60 Hz).

Veličina napona je efektivna vrijednost napona na mjestu predaje električne energije u određenom trenutku, mjerena u određenom vremenskom periodu. Referentna vrijednost određena je nazivnim naponom mreže.

Promjene napona su odstupanja napona od nazivne vrijednosti. Uzrokovane su promjenama opterećenja, tj. uključivanjem i isključivanjem velikog broja trošila ili kvarovima u elektroenergetskom sustavu.

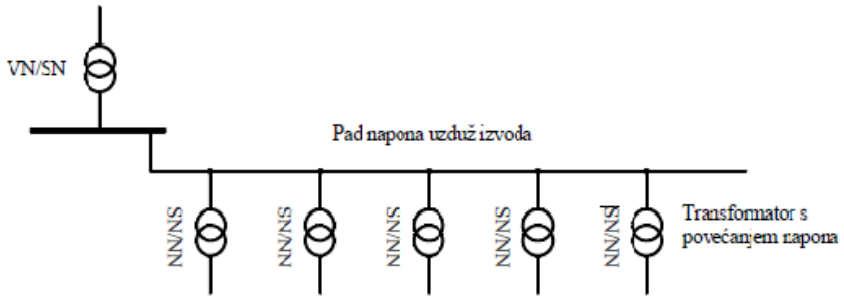
Propad napona definira se kao privremeno smanjenje vrijednosti napona ispod unaprijed određene granice. Te su granice najčešće u opsegu od 90% do 1% nazivne vrijednosti. Propadi su najčešće uzrokovani kvarom u sustavu ili naglim povećanjem opterećenja. Uobičajeno se razvrstavaju po dubini i trajanju.

Prekid napona je stanje pri kojem napona jednostavno nestane. U većini preporuka smatra se da je nastupio prekid kada napon padne ispod 1% svoje nazivne vrijednosti. Prekidi se dijele na duge i kratke, pri čemu se u većini preporuka kao dugi prekid definira onaj trajanja dužeg od 3 minute. Bitno je naglasiti da se u ove prekide napona, dakle one vezane uz kvalitetu električne energije, ne ubrajaju i ona isključenja napajanja unaprijed najavljena i planirana. [10]

3.2. Održavanje napona u distributivnim mrežama

Najčešće korištena metoda kontrole napona prikazana je na slici 3.1. Napon na sekundarnoj strani srednjenaponskog transformatora drži se na nekoj razini pomoću automatske preklopke regulacijskog transformatora.

Radna i jalova snaga utjecati će na padove napona duž voda. Manji pad napona pojavljuje se kod minimalne potrošnje djelatne i jalove snage, a veći kod velike potrošnje. Zbog toga imamo problem da su transformatori na kraju srednjenaponskog voda na manjem naponu od onih na početku. Da bi se to kompenziralo, transformatori se postavljaju sa srednjeg na niski napon duž izvoda s različitim prijenosnim omjerima. Obično se koriste transformatori s odvojcima

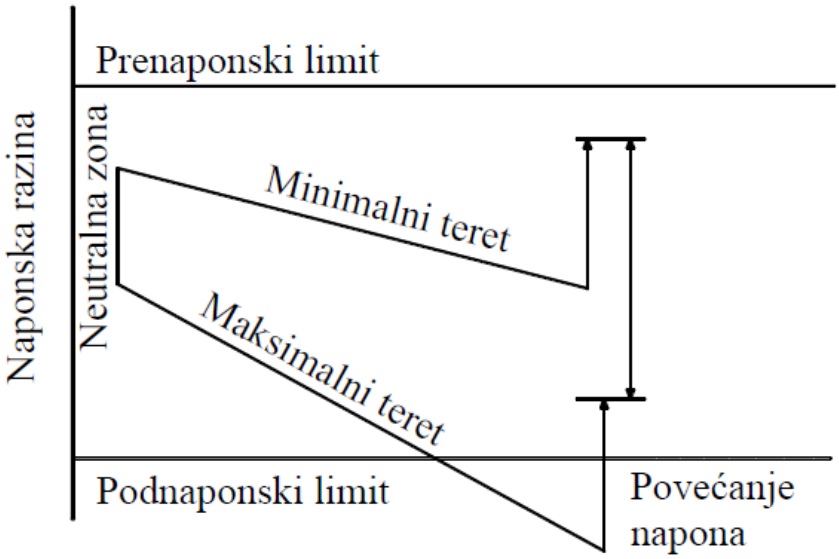


Sl.3.1. *Osnovni način regulacije napona* [5]

Prijenosni omjer transformatora se smanjuje, kako se približavamo kraju srednjenaponskog izvoda. Na početak izvoda može se staviti transformator prijenosnog omjera 10.5 kV/0.4 kV, dok na kraj voda možemo 9.5 kV/0.4 kV. Ovom metodom napon se može povećati do 5%.

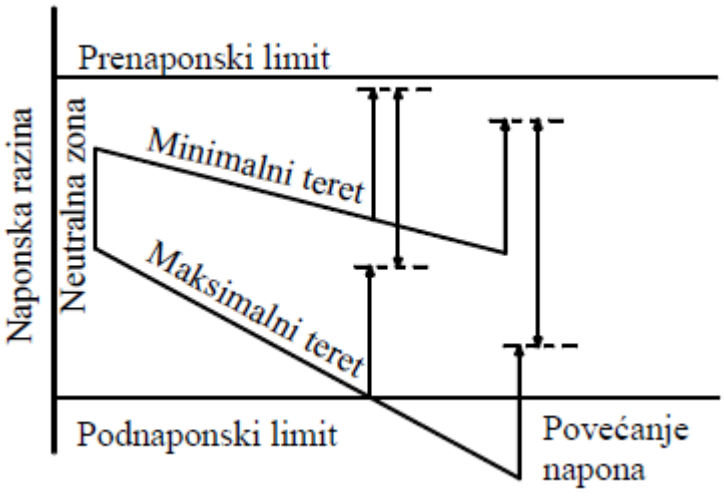
Regulacijom moramo postići da napon bude unutar podnaponskih i prenaponskih granica. Europska mreža definira prema normi EN 50160 naponske granice u rasponu +/- 10% od nazivnoga napona.

Na slici 3.2. prikazan je princip regulacije. Neutralna zona *(eng.deadband)* odabire se iznad nazivnoga napona, tako da pad napona održi napon u nazivnom području. Napon kod zadnjeg potrošača mora biti iznad podnaponskog limita. Kriterij za prenaponsko ograničenje, nije zadnji potrošač, nego potrošač najbliže početku izvoda. Podrazumijeva se da je najveći napon na početku izvoda. [5]



Sl.3.2. *Koordinacija napona distributivnoga voda* [5]

Na slici 3.2. Vertikalna linija pokazuje napon na vodu u odnosu na udaljenost od transformatora dok horizontalna prikazuje udaljenost od srednjenaponskog transformatora.



Sl.3.3. *Naponska koordinacija duž voda.* [5]

Razlika najvećeg napona za nekog potrošača i naponskog limita naziva se prenaponska margina *(eng.ovevoltage margin)*

Distributivni generator kada utiskuje djelatnu snagu u mrežu, distributivna proizvodnja smanjit će padove napona. Rezultat toga je da se prenaponska margina smanjuje, te može doći do prekoračenja maksimalnog napona. U takvome slučaju sustav nije više u dozvoljenim naponskim granicama, što podrazumijeva da je prekoračen maksimalni kapacitet. [5]

3.2.1. Porast napona zbog utjecaja distribuirane proizvodnje

Spajanjem generatora na distributivnu mrežu dolazi do povećanja napona na mjestu spajanja.

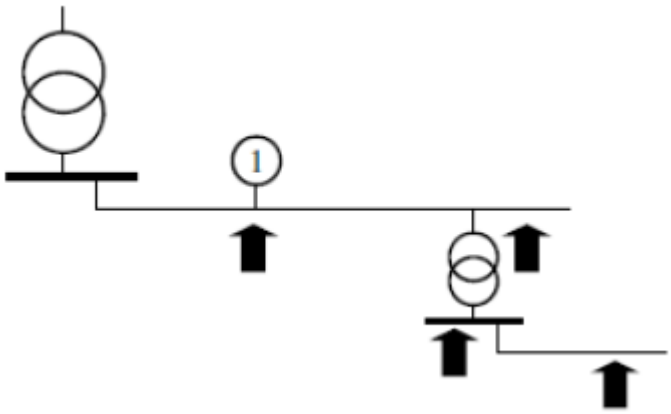
Relativno povećanje napona može se aproksimirati izrazom:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R * P_{gen}}{U^2} \tag{3-1}$$

Gdje je:

- R-otpor izvora na mjestu spajanja
- P_{gen}- utisnuta radna snaga u mrežu
- $U-$ nazivni napon

Aproksimiramo da generator samo djelatnu snagu utiskuje u mrežu, odnosno da radi s faktorom snage vrijednosti 1. Relativni porast primijetiti će svi potrošači spojeni niz izvod.



Sl.3.4. *Relativni porast napona* [5]

Na slici 3.4. broj (1) prikazuje mjesto spajanja generatora. Porast napona osjetit će se na svim mjestima, kako je prikazano strelicama. Porast na zadnjem mjestu, bit će postotno jednak porastu napona na mjestu spajanja generatora. [5]

3.2.2. Razina integracije

Razina integracije *(engl. hosting capacity)* najveći je dopušteni porast napona, kojeg dobijemo spajanjem distributivne proizvodnje. On dovodi napon gotovo do naponskog limita, uz ispunjenje svih kriterija uz koje će mreža raditi prema projektiranim zahtjevima.

Razina integracije nam govori koliku količinu proizvodnje možemo spojiti na mrežu, a da ne rezultira s pogoršanjem naponskih prilika za ostale potrošače u mreži, odnosno to je količina proizvodnje koja će podići napon do njegove granice. Svaki potrošač ima različitu naponsku granicu.

Razinu integracije možemo odrediti prema izrazu:

$$P_{max=\frac{U^2}{R}*\delta_{max}} \tag{3-2}$$

Gdje je:

- $\delta_{max=}\Delta_{max}/U$ - relativna naponska margina u postotcima
- Δ_{max} - apsolutna naponska margina

Dalje koristimo izraz za relaciju utjecaja otpora vodiča R i poprečnog presjeka A, ukupne duljine l.

$$R = \rho * \frac{l}{A} \tag{3-3}$$

Iz jednadžbi dobijemo sljedeće odnose:

- Razina integracije proporcionalna je s kvadratom napona.
- Razina integracije je linearna u odnosu s presjekom kabela.
- Razina integracije je linearna s prenaponskom granicom.
- Razina integracije je obrnuto proporcionalna s udaljenošću između generatora i transformatora. Što je generator udaljeniji, manji je kapacitet.

Da se primijetiti da promjenom jednog parametra utječemo direktno i na ostale. Upotreba kabela s većim presjekom smanjit će otpor vodiča i povećat će prijenosni kapacitet. Također postoji razlika u upotrebi nadzemnih kabela i vodova. Nadzemni vodovi obično se koriste za napajanje udaljenih potrošača te je njihova duljina ograničena s padovima napona. Kabelima se najčešće napajaju potrošači blizu trafostanice te je duljina obično određena spojenim teretom. Zbog toga se češće javljaju prenaponski problemi u nadzemnim vodovima. [5]

3.3. Brzo kolebanje napona

Brze promjene koje se događaju u amplitudi napona nazivaju se naponsko treperenje. Poznato je još pod nazivom „flikeri“. Veliki problem naponskog treperenja je taj da izaziva pojavu poznatu pod nazivom „svjetlosni fliker“ frekvencijskog spektra od 1 do 10 Hz. Fliker je pojava neustaljenosti intenziteta svijetla, gdje se može primijetiti da svjetlost nije stalnog intenziteta tijekom dužeg vremena promatranja, te se ne mogu primijetiti pojedine promjene. Mnogim ljudima ova pojava smeta čak i kad je ne mogu primijetiti. Brojna ispitivanja su pokazala da čak i neprimjetni flikeri uzrokuju pojačanu aktivnost u nekim dijelovima mozga. Dugotrajno izlaganje flikerima uzrokuje umor i glavobolju. Kolebanje napona uzrokuje količinu flikera, za standardnu žarulju sa žarnom niti, kvantificirana je „jačinom flikera“, *Pst*, gdje *Pst* = 1 odgovara razini koja izaziva nelagodu 50 osoba od 100 prisutnih. [11]

Svjetlosne flikere ne treba miješati s povremenim promjenama u svjetlosnom intenzitetu koje nastaju zbog kolebanja napona. Za nekoliko postotaka nazivnog napona flikere je moguće primijetiti i za naponsko kolebanja, ali nemaju isti utjecaj kao kontinuirani flikeri. [11]

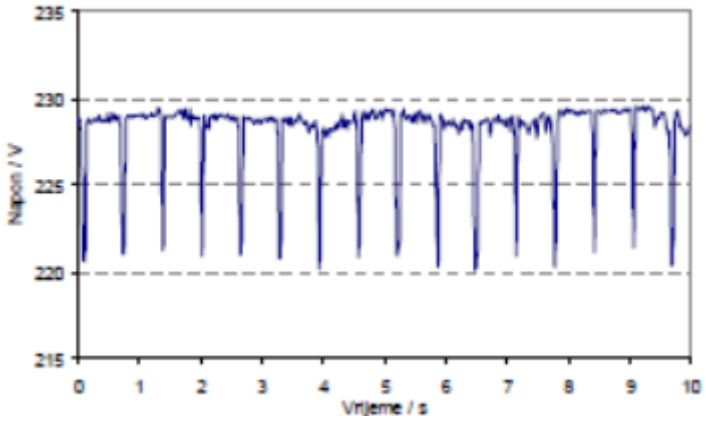
Pojmovi kao što su „kolebanje napona“ i „brze promjene napona“ često se koriste u sljedećim značenjima:

- Kolebanje napona je neprekidna promjena u amplitudi napona koja može trajati do nekoliko minuta.
- Brze promjene napona su brze i stupnjevite promjene u amplitudi napona

U ovome kontekstu Gönnen razlikuje „nagli fliker“ i „sinusoidalni fliker“.

Za navedene pojave ne postoje jasne definicije ili ograničenja. Jedina ograničenja su ona koja se vežu uz kolebanje napona pri trajanju od nekoliko sekundi i brza izmjena napona između dvije razine u amplitudi napona. Navedena ograničenja temelje se na uočljivim svjetlosnim flikerima kod žarulja sa žarnom niti uzrokovana kolebanjima napona. Žarulje sa žarnom niti polako odlaze u povijest, te dolazi do zamjene nekim drugim izvorom rasvjete. Ova izmjena uzrok je potrebe za novim razmatranjima ograničenja u promjenama naponske amplitude. Ova tema još nije potpuno krenula u raspravu, ali postoje jasne naznake da su žarulje bez žarne niti puno manje osjetljive na flikere od dosadašnjih konvencionalnih žarulja.

Treperenje napona (eng Flicker) su oscilacije vrijednosti napona koje se ponavljaju. Flikeri su definirani kao vidom zamjetljivo treperenje, izazvano svjetlosnim podražajem uz vremensko kolebanje svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe. Jednostavnije rečeno, to je titranje npr. svjetla žarulje ili zaslona računala. Uzroci treperenja su nagle učestale promjene opterećenja uzrokovane radom npr. elektrolučnih peći, fotokopirnih strojeva, aparata za zavarivanje i sličnih strojeva u susjedstvu. Uočavanje treperenja ovisi od osobe do osobe, tj. o senzibilnosti oka. Jakost treperenja definira se putem uočavanja sljedećeg: svjetlosno treperenje pojačava se do trenutka kada od 100 osoba njih 50 uoči treperenje (promjenu svjetla), tada se kaže da treperenje ima vrijednost 1. Ljudskom oku najviše smetaju flickeri frekvencije od 7 do 10 Hz.



Sl.3.1. *Primjer treperenja napona* [10]

3.3.1. Treperenje napona kod Fotonaponskih elektrana

Promjene u proizvodnji fotonaponskih elektrana događaju se u raznim vremenskim okvirima. Promjene godišnjih doba ili nekoliko sekundi koliko je potrebno oblaku da prođe. Potonji je uzrok brzih kolebanja u naponskoj amplitudi, moguće da uzrokuje svjetlosni fliker. Mjerenja određenih simulacija nagovješćuju da se za jedan fotonaponski modul, proizvodnja može promijeniti do 50% nazivne snage u vremenu od 5-10 s. Za određeni broj panela raširenih preko nekoliko stotina metara (npr. niskonaponski vod), promjene traju 30-60 s.

3.4. Kolebanje napona kod vjetroelektrana

Kolebanje napona uzrokuju brze promjene snage. Ovaj problem se odnosi na izvore čija snaga varira tijekom vremena. To su uglavnom vjetroelektrane i fotonaponske elektrane. Proizvodnja vjetroelektrana stalno varira. Poznajemo tri vremenska okvira:

- varijacije frekvencije vrijednosti nekoliko herca koje su uzrokovane rezonancijom tornja, dinamikom turbine i prijenosnim mehanizmom
- periodički impulsi snage pri frekvenciji na kojoj lopatice prolaze toranj. Najčešće se kreće oko 1 Hz za veće turbine, a nazivaju se 3p oscilacije za turbine s tri lopatice.
- Sporije varijacije izazvane promjenom brzine vjetra [11]

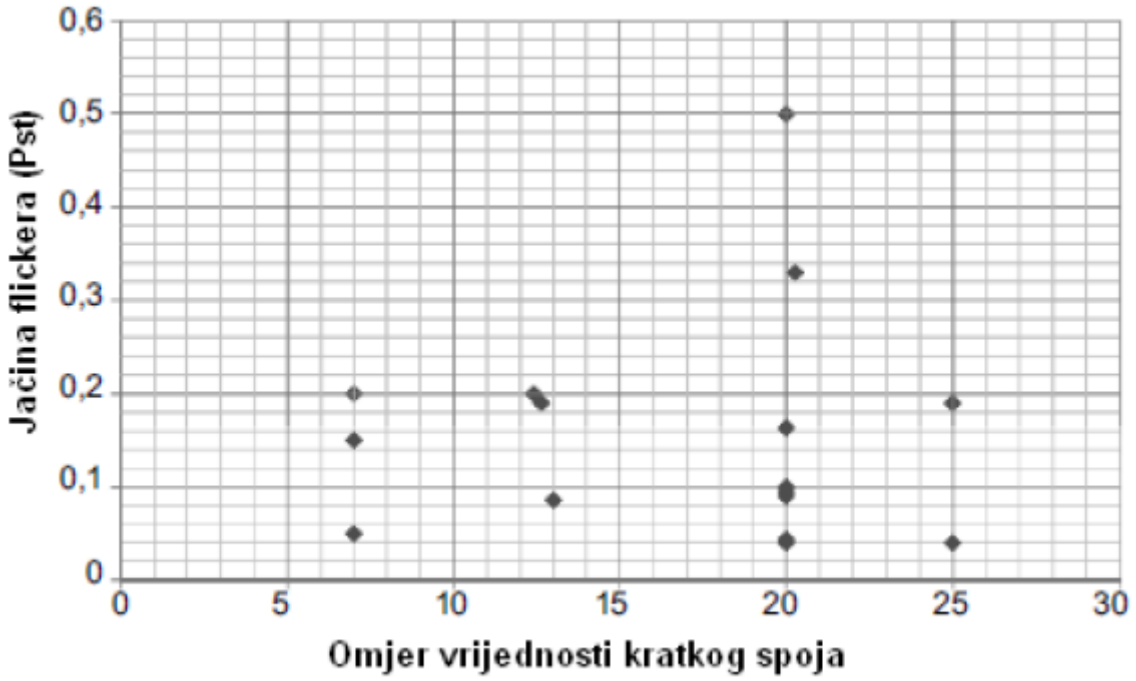
Postoje uvjerenja da turbine u vjetroparkovima mogu postići sinkroniziran rad i na taj način pojačati impulsni rad. Uzrok sinkroniziranog rada još uvijek nije poznat, ali postoji pretpostavka da nastaje zbog interakcije turbine preko mreže. Sinkronizirani rad može nastati samo na lokacijama gdje je kontinuirana brzina vjetra, te gdje nema utjecaja terena na turbulencije. Do nedavno ovo je bio često spominjan problem.

Sljedeće komponente navedene su pored neprekinutog spektra:

- 1,1 Hz kolebanje uzrokovano rezonancijom tornja.
- 2,5 Hz kolebanje uzrokovano brzinom vrtnje prijenosa.
- Četiri različita kolebanja vezana uz rotaciju lopatica: 1p, 2p, 3p, i 6p. 1p kolebanja uzrokovana su neuravnoteženošću rotora te malim razlikama među lopaticama. 3p kolebanje uzrokovano je prolaskom lopatice pored tornja dok su 2p i 6p vjerojatno harmonici 1p i 3p kolebanja.

Za manje turbulencije vjetra (u ovom primjeru vjetra na moru), navedene komponente dominiraju spektrom. Za veće turbulencije vjetra kolebanja prave neprekidan spektar.

Flikeri dobiveni raznim mjerenjima i simulacijama uzrokovani su vjetroelektranama, te su prikazani u mnogim publikacijama. Rezultati navedenih studija prikazani su na slici 3.2. Iznos flikera prikazan je kao funkcija omjera vrijednosti kratkog spoja (SCR, engl., 23 *short circuit ratio*), što je omjer snage kratkog spoja i snage na turbini. Većina vrijednosti iznosi ispod 0,2. Najčešće korištena vrijednost omjera kratkog spoja u simulacijama je 20. Iz slike se može iščitati da vjetroelektrana doprinosi razini flikera oko 0,2, neovisno o razni kvara i veličini instalacije. [11]



Slika 3.2 *Jačina flikera uzrokovana vjetroelektranama* [11]

Ako bi povezali više turbina međusobno, razina flikera bi bila znatno veća u odnosu na samo jednu turbinu. Prema IEC 61400-21, jačina kratkotrajnog flikera zbraja se prema sljedećem izrazu:

$$P_{st}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N} P_{st,i}^{2}} \tag{3-4}$$

$P_{st,i}$ označava doprinos pojedine turbine. Za identične turbine, doprinos N jedinica je $\sqrt{N}$ puta doprinos jedne jedinice. Ako je emisija uzrokovana jednom jedinicom jakosti kratkotrajnog flikera jednaka 0,2, razina jednaka 1,0 dobiva se od 25 jedinica. Veliki vjetropark često sadrži više jedinica od navedenog. Za posljedicu, emisija flikera uzrokovana jednom jedinicom, za velike vjetroparkove trebala bi iznositi ispod 0,2. Više informacija o utjecaju vjetroparkova na razinu flikera teško je pronaći i vrlo su rijetke, te se smatra u većini slučajeva da je porast razine flikera vrlo mali. [11]

4. SIMULACIJSKO ODREĐIVAJE DECENTRALIZIRANOG UPRAVLJANJA NAPONOM U NAPREDNOJ MREŽI

Distribuirana proizvodnja ima značajan utjecaj na profil napona i kvalitetu električne energije koja se može očitovati pozitivno ili negativno, ovisno o funkcioniranju distribucijskog sustava i karakteristikama distribuiranog generatora. [12]

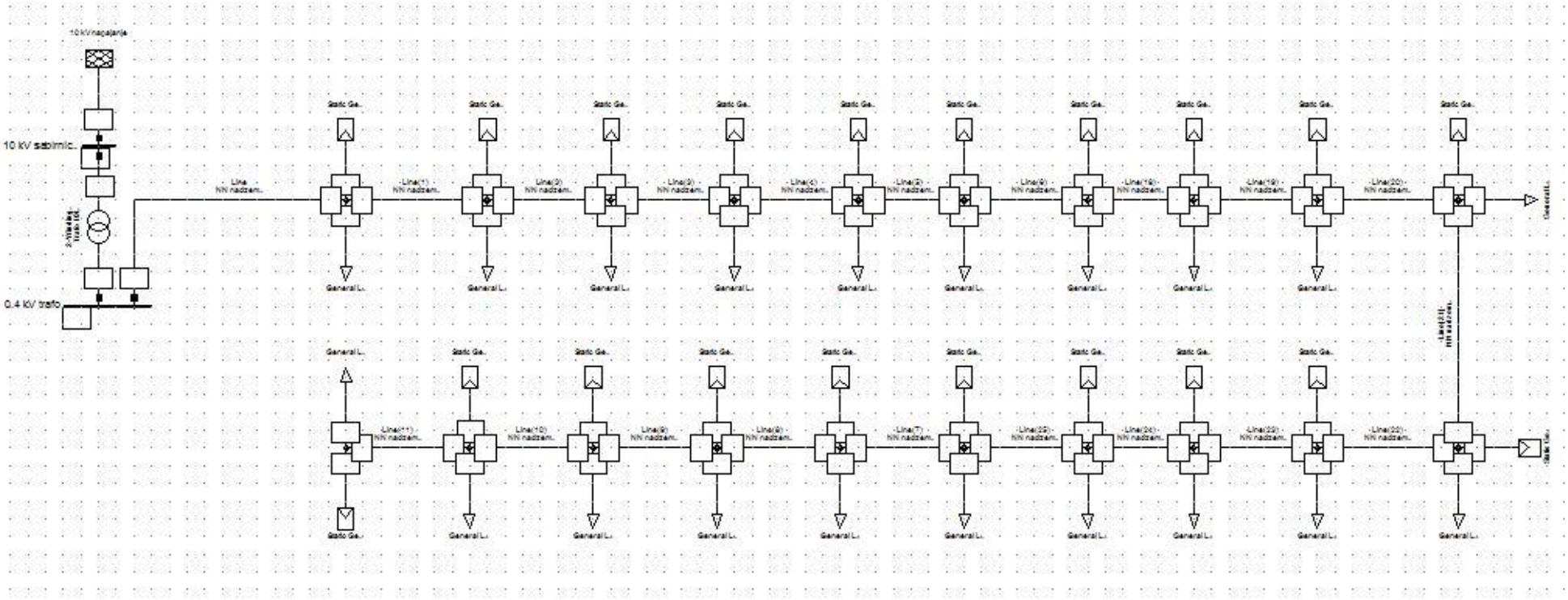
U ovom poglavlju proučeno je 10 kW fotonaponsko postrojenje. Veća proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava može utjecati na naponske prilike u mreži. Cilj nam je održati napon za svaki scenarij. Vrijednosti napona uspoređuju se s naponskim ograničenjima koja su određena hrvatskim mrežnim pravilima. Prihvatljivo odstupanje napona u Hrvatskim distribucijskim niskonaponskim mrežama iznosi ± 10%.[10]

Prvo smo analizirali podatke stvarnog mjerenja proizvodnje fotonaponskog sustava gdje ćemo vidjeti kako se proizvodnja ponaša tijekom dana. Dalje smo analizirali opterećenje potrošnje stambenog prostora za dva različita dana. U daljnjem dijelu izveli smo simulaciju u programskom paketu DigSilent Power Factory za različite razine proizvodnje i potrošnje u distribuciji.

4.1. Opis mreže fotonaponskog postrojenja

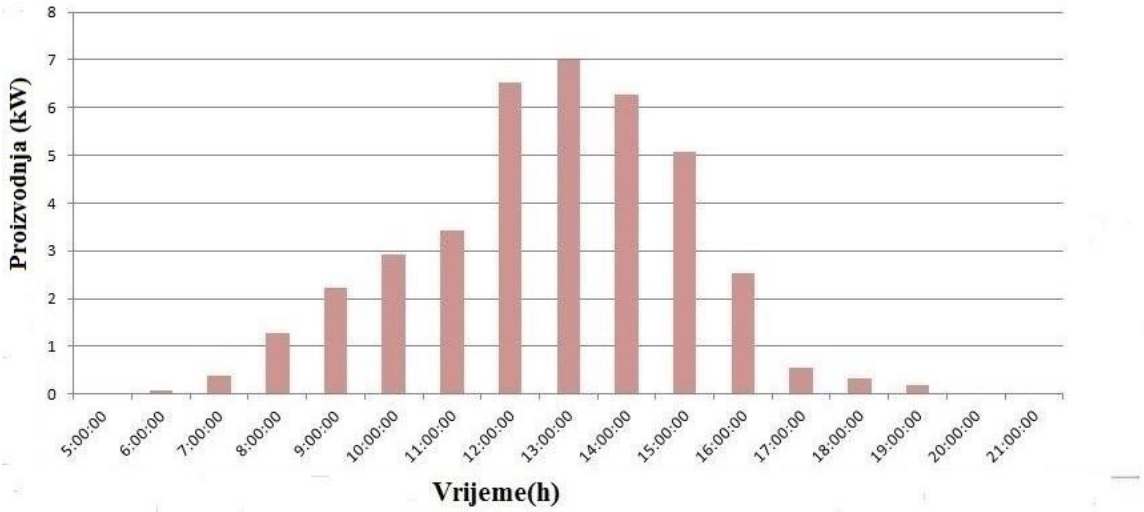
Model mreže preuzet je iz rada [12]. Stambeni sustav smješten je u Zagrebu (Hrvatska). Razmatrano fotonaponsko postrojenje vidimo na slici 4.1. Sustav se sastoji od 20 PV modula. Pretvarač se preko električne razvodne ploče priključuje na trofaznu NN distribucijsku mrežu 230/400 V. Fotonaponsko postrojenje nalazi se u rezidencijalnom dijelu grada gdje prevladavaju slične obiteljske kuće. Podaci su dobiveni mjerenjem iz stvarnog fotonaponskog postrojenja. Koriste se za izradu računalnog modela distribucijske mreže s ugrađenim fotonaponskim postrojenjima. DigSilent Power Factory softver koristi se za izradu računalnog modela.

Fotonaponsko postrojenje priključeno je na distribucijsku mrežu kao dio radijalnog izvoda priključenog na transformatorsku stanicu 10/0,4 kV. U simulacijskom modelu, radijalan izvod spojen je na 0,4 kV stranu transformatorske stanice, kao što je prikazano na slici 4.1. Podaci transformatora su: 10/0,4 kV, nazivna snaga Sn = 630 kVA, napon kratkog spoja uk% = 4%. NN mreža na koju je priključen fotonaponski sustav je nadzemni vod ACSR 35 mm2 sa sljedećim karakteristikama: R = 0,835 Ohm / km i X = 0,3 Ohm / km.



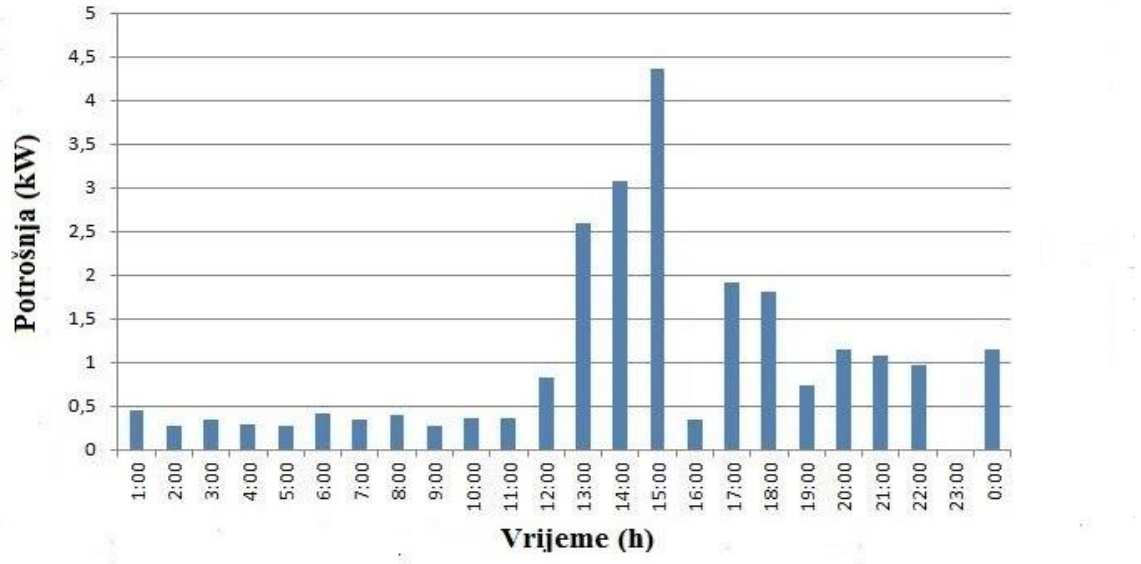
Sl.4.1 Računalni model koji predstavlja tipičan dio rezidencijalne distribucijske mreže, a pretpostavka je da svaka kuća ima instaliranu FN elektranu.

4.1.1 Ulazni podatci proizvodnje fotonaponskog postrojenja i potrošnje stambenih sustava.



Sl.4.1. *Proizvodnja fotonaponskog postrojenja tijekom dana*

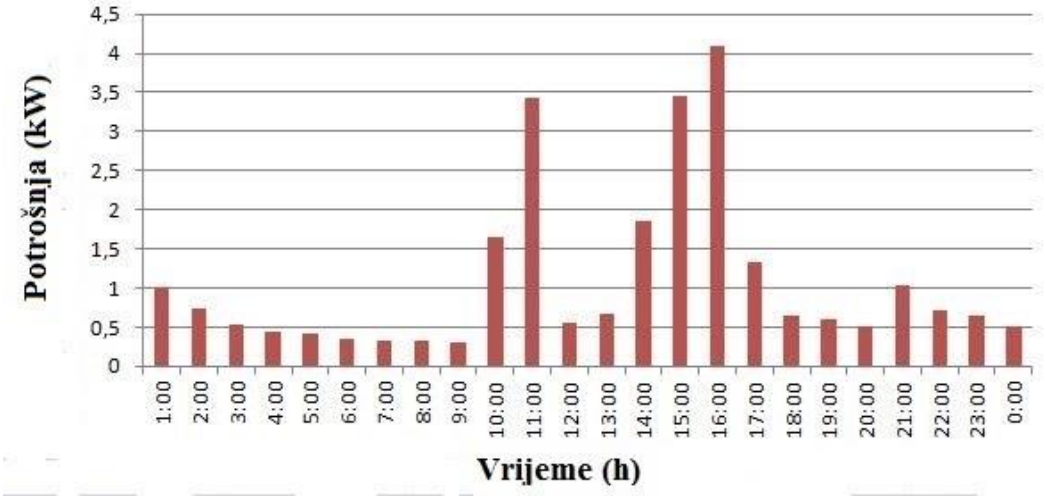
Prema rezultatima dobivenim mjerenjem na slici 4.1. prikazan je graf proizvodnje energije fotonaponskog postrojenja tijekom jednog dana.. Mjerenja su se izvodila tjedan dana (ljetno razdoblje) i izabran je najsunčaniji dan tijekom mjerenja. Iako snaga postojenja iznosi 10 kW, prema mjerenju proizvodnja ni u jednom trenutku nije bila veća od 7 kW koju ćemo dalje koristiti za simulaciju. Fotonaponsko postrojenje smješteno je u Zagrebu. Sunce najviše energije šalje u 13:00 h i snaga iznosi 7 kW. Dalje vidimo snaga raste od jutarnjih do popodnevnih sati, a od podne do uvečer opada i pada na 0 kW.



Sl.4.2. *Profil potrošnje stambenog sustava u satnim intervalima*

Na slici 4.2. vidimo potrošnju stambenog sustava u satnim intervalima. Iz grafa vidimo da je potrošnja najveća u 15h i iznosi 4,3 kW što je i naša maksimalna potrošnja tijekom mjerenja. Radi

se o radnom danu. Navike ljudi su drugačije pa tako i potrošnja, ovdje vidimo da je najveća od 13 do 15h.



Sl.4.3. *Profil potrošnje stambenog sustava u satnim intervalima tijekom neradnog dana*

Slika 4.3. pokazuje nam profil potrošnje tijekom neradnog dana. Najveća potrošnja je u 16 h i iznosi 4,186 kW. Vidimo da je potrošnja povećana od 10 do 11h i od 14 do 16h.

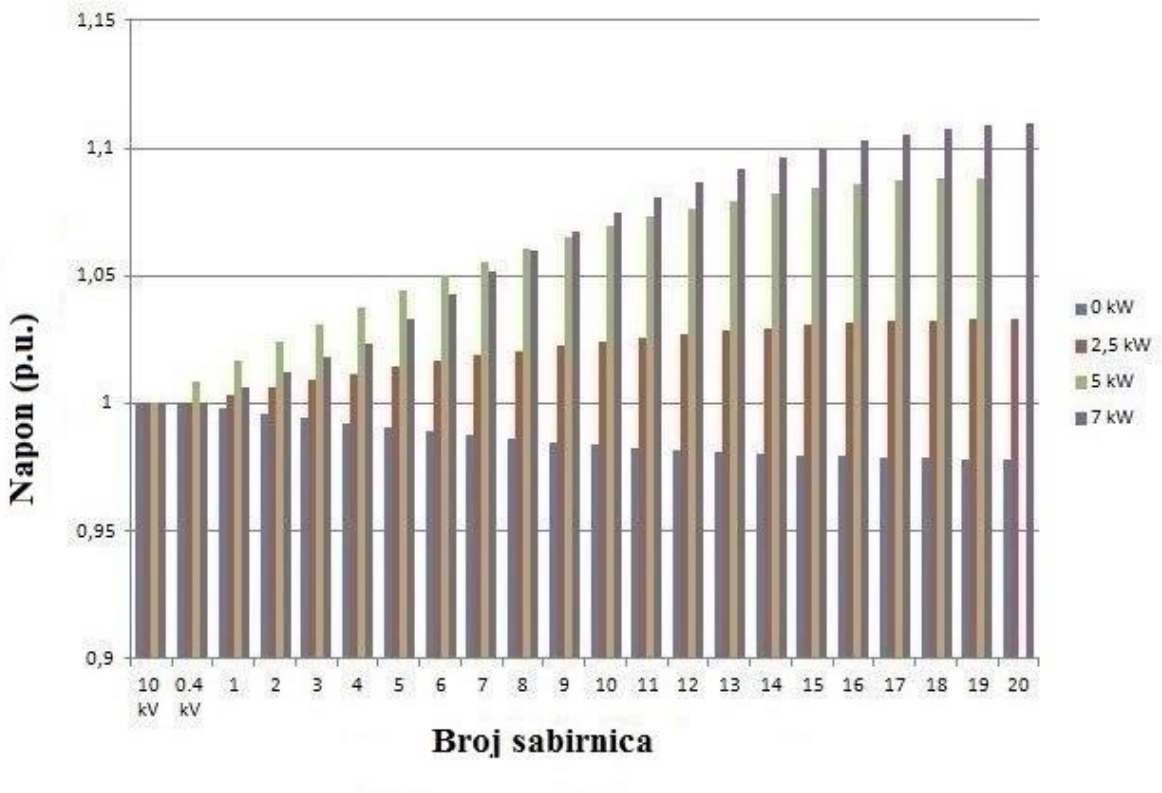
4.2. Simulacija utjecaja fotonaponskog sustava na naponski profil

Simulacije se izvodi u programskom paketu DigSilent Power Factory softveru, verzija 15.1. Program je u vlasništvu Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Predviđena je simulacija za različite razine proizvodnje i potrošnje u distribuciji. Razmatrano fotonaponsko postrojenje vidimo na slici 4.1. Proizvodnja individualnog fotonaponskog sustava mijenja se od 0 do 7 kW u četiri koraka. Potrošnja u stambenim jedinicama mijenja se također u četiri koraka za dva slučaja. Prvi slučaj je kad imamo minimalnu potrošnju od 1 kw, a drugi kada je potrošnja maksimalnog iznosa 4,3 kW.

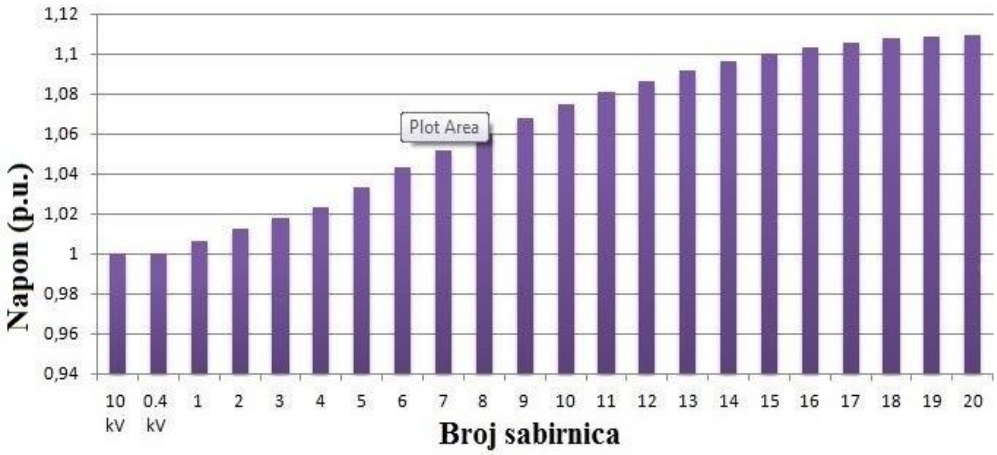
Za svaki scenarij vrijednosti napona uspoređuju se s naponskim ograničenjima koja su određena hrvatskim mrežnim pravilima. Prihvatljivo odstupanje napona u Hrvatskim distribucijskim niskonaponskim mrežama iznosi ± 10%. [10]

4.2.1. Proizvodnja fotonaponskog sustava za različite naponske vrijednosti dok je potrošnja stambenog sustava minimalna

Naponske vrijednosti za različite vrijednosti proizvodnje fotonaponskih sustava prikazana je na slici 4.4. dok je potrošnja svake kuće jednaka 1 kW, prikazano na grafu 4.2. i 4.3. Najveći zabilježeni napon (1,109357 p.u) se pojavljuje u slučaju kada je proizvodnja svakog pojedinog fotonaponskog sustava jednaka 7 kW prikazano na slici 4.5, dok je potrošnja svake kuće 1 kW. Napon prelazi prihvatljivo odstupanje koje iznosi ± 10%. U ostalim slučajevima napon je u dozvoljenim granicama.



Sl.4.4. *Profili napona za različite razine proizvodnje fotonaponskih sustava, dok je potrošnja u stambenim jedinicama jednaka 1 kW*

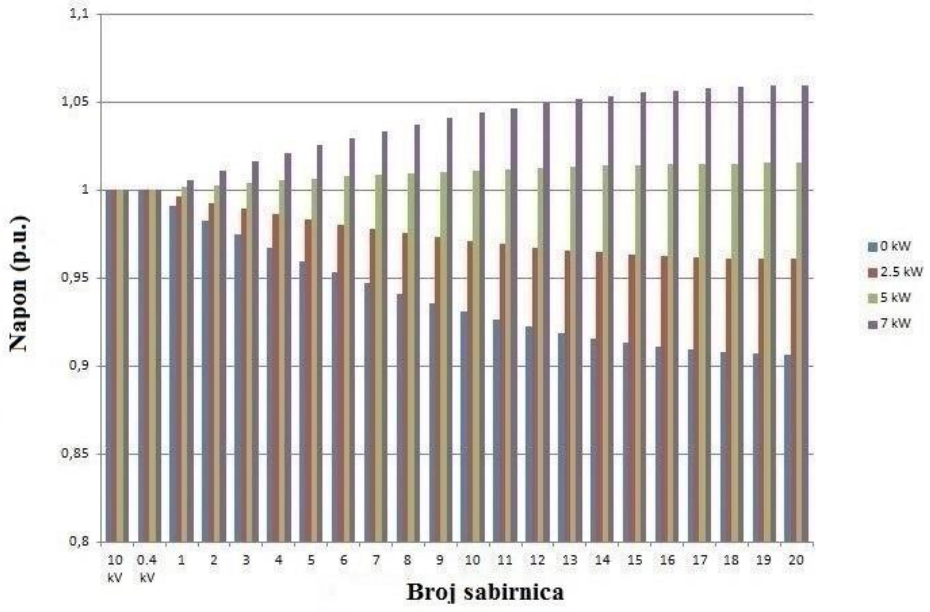


Sl.4.5. *Profili napona za 7 kW razinu proizvodnje fotonaponskih sustava, dok je potrošnja stambenih prostorima jednaka 1 kW*

Slika 4.5. prikazuje detaljan prikaz za scenarij s maksimalnom proizvodnjom fotonaponskih sustava (7 kW) i s minimalnom potrošnjom (1 kW). U grafu vidimo da je gornja granica fotonapona na zadnje četiri sabirnice prekoračena.

4.2.2. Proizvodnja fotonaponskog sustava za različite naponske vrijednosti dok je potrošnja stambenog sustava maksimalna

Naponske vrijednosti za različite proizvodnje fotonaponskih sustava prikazana je na slici 5.6. dok je potrošnja jednaka 4,3 kW koju možemo vidjeti iz grafa na slici 4,2. Najmanji zabilježeni napon (0,92293 p.u.) pojavljuje se u slučaju kada je proizvodnja svakog pojedinog fotonapona minimalna, tj. 0 kW, dok je potrošnja svake kuće maksimalna tj. 4,3 kW što možemo vidjeti na slici 4.7. Naponsko odstupanje je u granicama ± 10%.



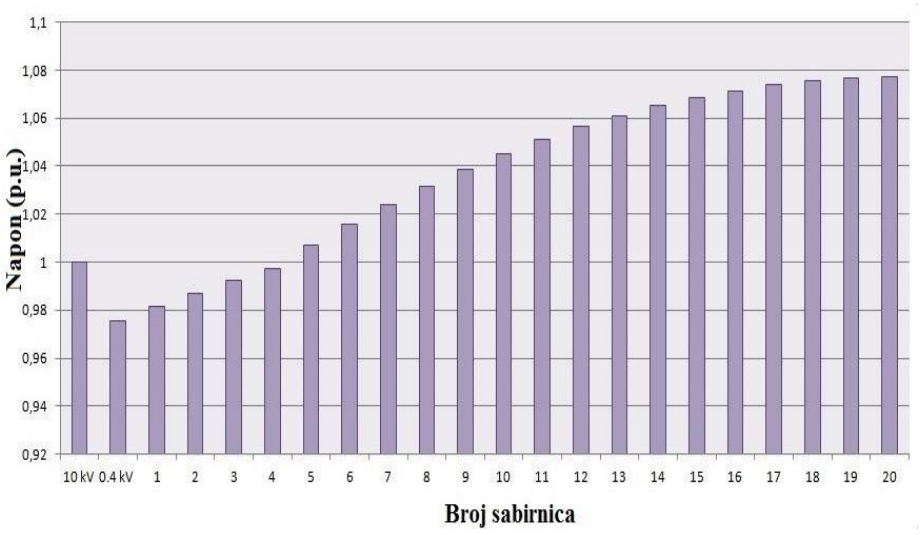
Sl.4.6. *Profili napona za različitu razinu proizvodnje fotonaponskih sustava, dok je potrošnja svakog stambenog prostora jednaka4,3 kW*

Sl.4.7. Profil bez proizvodnje fotonaponskih sustava, dok je potrošnja svakog stambenog prostora jednaka 4,3 kW

Slika 4.7. prikazuje detaljan prikaz za scenarij bez fotonapona s maksimalnom potrošnjom obiteljskih kuća. U grafu vidimo da donja granica napona nije prekoračena(0,92293 p.u.).

5.2.3. Decentralizirano upravljanje pomoću transformatorske preklopke

Namjena preklopke je regulacija izlaznog napona transformatora. S obzirom na to da nam napon prelazi odstupanje u slučaju kada imamo proizvodnju fotonaponskih sustava (7 kW) i potrošnju svake kuće (1 kW) što vidimo na slici 4.5. napon smo regulirali pomoću transformatorske preklopke.



Sl.4.8. *Naponski profil za scenarij s 7 kW fotonaponskih sustava proizvodnje i 1 kW potrošnje u kućanstvu pomoću regulacijske preklopke transformatora*

Na slici 4.8. prikazani su naponi nakon što je regulacijska preklopka transformatora postavljena na položaj +1 u slučaju kada imamo najveću moguću proizvodnju (7 kW) što možemo vidjeti iz grafa 4.1. i potrošnju (1 kW) prikazano u grafu 4.2. i 4.3. Tada smo napone doveli u granice dozvoljenih vrijednosti, te najveći napon iznosi 1.076 p.u.

Položaj preklopke na +1 odgovara i za ostale scenarije osim za slučaj kada nemamo proizvodnju fotonaponskog sustava a proizvodnja je 4,3 kW. Napon za taj scenarij na zadnjoj sabirnici iznosi 0,88 p.u. i nije u granicama dozvoljenih vrijednosti. Da bi napon bio u granicama, transformatorsku preklopku podesili smo na -1. Tada se napon povećao na 0,944 što vidimo na slici 4.9.

Sl.4.9. *Naponski profil za scenarij bez proizvodnje fotonaponskih sustava i 4,3 kW potrošnje u kućanstvu pomoću regulacijske preklopke transformatora*

Rezultati simulacija pokazuju da se pri korištenju regulacijske preklopke transformatora granice napona ne prekoračuju. U simulaciji je korišten transformator s ručnom preklopkom koja u praksi nije moguća u ovom slučaju zato što bi operater svaki dan trebao mijenjati transformatorsku preklopku, tako što bi stavljao preklopku na položaj 1 i u noći mijenjao na -1. Morao bi isključiti transformator, isključiti napajanje električnom energijom zatim promijeniti preklopku na određeni položaj i sve ponovno uključiti. Transformator s ručnom preklopkom odgovarao bi kada bi bilo dovoljno prebaciti preklopku na jedan položaj koja bi odgovarala za sve scenarije, što nije u našem slučaju. Postoji mogućnost zamjene transformatora s OLTC transformatorom što bi odgovaralo za

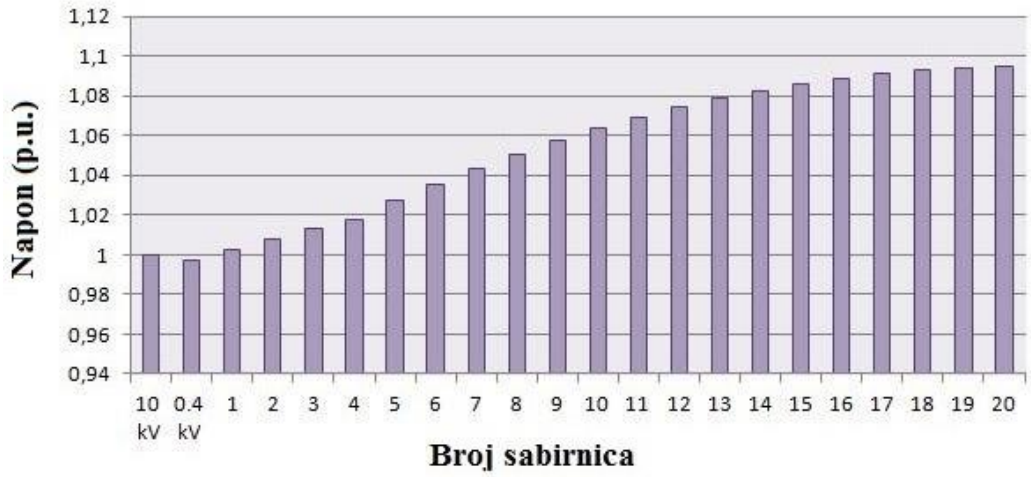
ovaj slučaj kako bi se vrijednosti napona zadržale unutar granica koje su definirane hrvatskim mrežnim pravilima, ali je investicija veća u tom slučaju.

4.2.4. Decentralizirano upravljanje pomoću invertera fotonapona

Sl.4.9. *Naponski profil za scenarij s 7 kW fotonaponskih sustava proizvodnje i 1 kW potrošnje u kućanstvima, regulirano pomoću invertera fotonapona*

Na slici 4.9. prikazani su naponi nakon što se uključilo upravljanje naponom na inverteru zadnje u nizu fotonaponske elektrane. Napon je ograničen na 1.0958 p.u. u slučaju kada imamo najveću moguću proizvodnju (7 kW). Tada smo napone doveli u granice dozvoljenih vrijednosti, te najveći napon iznosi 1.095862 p.u. To je najniža moguća granica napona u kojoj je mreža bila u granicama dozvoljenih vrijednosti. Kada napon ograničimo od 1.0958 do 1.1 p.u. napon je u granicama.U ovom slučaju odabrali smo napon 1.0958 p.u. kako bi se što više udaljili od granice dozvoljenih vrijednosti. Napon je ograničen na zadnjem, dvadesetom inverteru fotonapona koji se pokazao kao najpovoljniji. Za scenarij bez fotonapona inverter ne može izregulirati napon. Ova metoda odgovara isključivo za scenarij kada nam je napon iznad dozvoljenih granica.

4.2.5. Decentralizirano upravljanje pomoću faktora snage



Sl.4.10. *Naponski profil za scenarij s 7 kW fotonaponskih sustava proizvodnje i 1 kW potrošnje u kućanstvima, regulirano pomoću faktora snage*

Na slici 4.10. prikazan je napon reguliran pomoću faktora snage. Na svaki fotonaponski sustav postavili smo cosφ na 0.95 kapacitivno. Graf prikazuje slučaj kada imamo najveću moguću proizvodnju (7 kW) što možemo vidjeti iz grafa 4.1. i potrošnju stambenih prostora (1 kW) prikazano u grafu 4.2. i 4.3. Napon smo doveli u granice dozvoljenih vrijednosti, te najveći napon iznosi 1,094 p.u.

Za slučaj kada nemamo fotonapona, inverter ne proizvodi djelatnu snagu te takav način rada ne utječe negativno na mrežu. Ovaj režim rada invertera s podešenim faktorom snage odgovara za sve scenarije.

4.2.6. Analiza rezultata

Analizirani ulazni podatci proizvodnje fotonaponskog postrojenja dobiveni stvarnim mjerenjem prikazani su na slici 4.1. Podatci su mjereni u ljetnim dana. Mjerenja su se izvodila tjedan dana i izabran je najsunčaniji dan tijekom mjerenja. Na grafu vidimo da proizvodnja ni u jednom trenutku nije bila veća od 7 kW iako je postrojenje 10 kW. To nas ne treba začuditi zato što proizvodnja fotonapona može ovisi o mnogo različitih faktora, kao što je maksimalna snaga panela, osunčanost kut izlaganja suncu i mnogi drugi faktori. Sunce najviše energije šalje u 13:00 h pa je u tome

slučaju snaga maksimalna s iznosom 7 kW, koja je dalje korištena u simulaciji. Na grafu se da primijetiti kako snaga raste od jutarnjih do popodnevnih sati, a od podne do uvečer opada i pada na 0 kW.

Analizirana potrošnja stambenih sustava mjerena je tijekom radnog i neradnog dana u satnim intervalima što se vidi iz grafa 4.2 i 4.3. Iz grafa 4.2. vidimo da je potrošnja najveća u 15 h i iznosi 4.3 kW što je i naša maksimalna potrošnja tijekom mjerenja. Radi se o radnom danu pa je i normalno da je potrošnja veća od 15 h. Navike ljudi su drugačije pa tako i potrošnja. Na Slici 5.3. prikazan je profil potrošnje tijekom neradnog dana. Najveća potrošnja je u 16 h i iznosi 4.186 kW. Potrošnja je povećana od 10 do 11 h i od 14 do 16 h što je normalno za neradni dan.

Simulacijski dio izvodio se u programskom paketu DigSilent Power Factory softveru, verzija 15.1. Za svaki scenarij vrijednosti napona uspoređuju se s naponskim ograničenjima koja su određena hrvatskim mrežnim pravilima u niskonaponskim mrežama koji iznosi ± 10%. Proizvodnja fotonaponskog sustava za različite naponske vrijednosti uspoređene su dok je potrošnja stambenog sustava minimalna i maksimalna. U slučaju kada je proizvodnja svakog pojedinog fotonaponskog sustava maksimalna iznosa 7 kW što se detaljno vidi na slici 4.5, dok je potrošnja svake kuće 1 kW, napon prelazi graničnu vrijednost s iznosom 1,109357 p.u. U ostalim slučajevima napon je u granicama što je prikazano na grafovima 4.4. i 4.6. Za slučaj kada je napon iznad dozvoljenih granica prvo je reguliran pomoću transformatorske preklopke. Namjena preklopke je regulacija izlaznog napona transformatora. Nakon što je regulacijska preklopka transformatora postavljena na položaj +1 tada smo napone doveli u granice dozvoljenih vrijednosti, te najveći napon iznosi 1.076 p.u. što vidimo na slici 4.8. Položaj preklopke na +1 odgovara i za ostale scenarije osim za slučaj kada nemamo proizvodnju fotonaponskog sustava a proizvodnja je 4.3 kW. Napon za taj scenarij na zadnjoj sabirnici iznosi 0,88 p.u. i nije u granicama dozvoljenih vrijednosti. Da bi napon bio u granicama transformatorsku preklopku podesili smo na -1. Tada se napon povećao na 0,944 prikazano na slici 4.9. Zaključujemo da se pri korištenju regulacijske preklopke transformatora granice napona ne narušavaju. Problem se javlja u transformatoru koji ima ručne preklopke koja u praksi nije moguća u ovom slučaju zato što bi operater svaki dan trebao mijenjati transformatorsku preklopku, tako što bi stavljao preklopku na položaj 1 i u noći mijenjao na -1. Morao bi isključiti transformator, isključiti električnu energiju zatim prebaciti preklopku na određeni položaj i sve ponovno uključiti. Transformator bi trebalo zamijeniti s OLTC transformatorom što bi odgovaralo za ovaj slučaj, ali je investicija veća u tom slučaju. Postoje i druga rješenja s manjom investicijom pa je odrađena simulacija pomoću invertera fotonapona. Pomoću invertera napon je ograničen od 1.0958 do 1,1 p.u. U tim slučajevima napon je u dozvoljenim vrijednostima što vidimo na slici 5.9. Odabran iznos 1.0958 je zato da bi se što više

udaljili od granice dozvoljenih vrijednosti. Napon je ograničen na zadnjem, dvadesetom inverteru fotonapona koji se pokazao kao najpovoljniji. Problem je u tome što ovaj način rada odgovara isključivo za scenarij kada nam je napon iznad dozvoljenih granica. Kada se napon u noći snizi inverter ne može izregulirati napon. Da bi se dobilo generalno rješenje koje bi odgovaralo za sve scenarije napravljen je drugi režim rada u kojem smo cosφ na svaki fotonaponski sustav postavili na 0.95 kapacitivno. Uobičajeno je da je cosφ 1. S obzirom da je promijenjen na 0.95 u mreži inverter proizvodi jalovu snagu koju troše vodovi i utječu na napone u mreži. Napon smo doveli u granice dozvoljenih vrijednosti, te najveći napon iznosi 1,094 p.u što vidimo na slici 5.10. Ovaj režim rada invertera s podešenim faktorom snage odgovara za sve scenarije. Kada imamo slučaj bez fotonapona nema djelatne snage pa tako ni jalove i ovaj režim rada ne utječe negativno na njega. Režim rada invertera s faktorom snage odgovara za sve slučajeve u mreži te se preporučuje kao generalno rješenje.

ZAKLJUČAK

Distribuirana proizvodnja električne energije povećava pouzdanost opskrbe, uz smanjenje energetskih gubitaka i emisija štetnih tvari.

U ovome radu opisani su različiti obnovljivi izvori energije koji se koriste za proizvodnju električne energije. Dan je detaljan princip rada i podjela te kako utječu na mrežu. Prikazani su parametri koji utječu na kvalitetu električne energije te načini održavanja napona u mrežama. Kako proizvodnja utječe na naponske prilike, te su se definirali pojmovi za određivanje razina integracije

U praktičnom dijelu rada analizirao se utjecaj fotonaponskog sustava na naponski profil, simulacijom za različite razine proizvodnje i potrošnje u distribuciji. Proizvodnja individualnog fotonaponskog sustava mijenja se od 0 do 7 kW u četiri koraka. Potrošnja u stambenim jedinicama mijenja se također u četiri koraka za dva slučaja. Prvi slučaj je kad imamo minimalnu potrošnju od 1 kW, a drugi kada je potrošnja maksimalnog iznosa 4.3 kW.

Za svaki scenarij vrijednosti napona uspoređuju se s naponskim ograničenjima koja su određena hrvatskim mrežnim pravilima. Prihvatljivo odstupanje napona u hrvatskim distribucijskim niskonaponskim mrežama iznosi ± 10%. [10]

Za svaki scenarij vrijednosti napona uspoređivale su se s naponskim ograničenjima koja su određena hrvatskim mrežnim pravilima.

Rezultati simulacija pokazali su da se pri korištenju regulacijske preklopke transformatora granice napona ne narušavaju, transformator korišten u simulaciji ima ručne preklopke. Operater bi svaki dan trebao mijenjati položaj preklopke. Zamjena s OLTC transformatorom je moguća što bi odgovaralo za ovaj slučaj, ali je investicija veća u tom slučaju. Dalje smo simulirali režim rada s inverterom fotonapona tako što je napon ograničen. Naponske vrijednosti su u granicama, ali takav režim ne odgovara u ostalim slučajevima. Inverter ne može regulirati zadani napon kada nemamo fotonaponsku proizvodnju. Promjenom režima rada invertera pomoću faktora snage napon je u dozvoljenim granicama te ne utječe negativno za ostale scenarije. Režim rada s promjenom faktora snage odgovara za sve scenarije te se preporučuje kao generalno rješenje.

LITERATURA

[1] Moderni vjetroagregati i pretvorba energije http://www.vjetroelektrane.com/moderni-vjetroagregati-i-pretvorba-energije ,pristup ostvaren siječanj 2019.

[2] Vjetroelektrana, https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrana pristup ostvaren siječanj 2019.

[3] Prof.dr.sc Damir Šljivac, Obnovljivi izvori energije, https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/284661/mod_resource/content/4/OIelen_2016_2017_4poglavlje.pdf pristup ostvaren veljača 2019.

[4] EKO.ZAGREB.HR., Gradski ured za energetiku, zaštitu okoliša i održivi razvoj, https://eko.zagreb.hr/energija-vjetra/84 pristup ostvaren veljača 2019.

[5] Math H. Bollen, Fainan Hassan: **Integration of Distributed Generation in the Power System**; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

[6] Solarna fotonaponska energija,

https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija pristup ostvaren travanj 2019.

[7] Lana Šikić Energija Sunca i solarne inovacije za budućnost, završni rad, Šibenik 2016. https://repozitorij.vus.hr/islandora/object/vus%3A313/datastream/PDF/view

[8] Izvori energije.com http://www.izvorienergije.com/geotermalna_energija.html pristup ostvaren travanj 2019.

[9] Kolegij Integracija OIE i napredne mreže https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/665753/mod_resource/content/10/Integracija%20OIE%20i%20napredne%20mre%C5%BEe%202017_2018_1poglavlje.pdf

[10] Zvonimir Klaić, Srete Nikolovski, **Kvaliteta električne energije – Mjerenja prema normi EN 50160**; Hrvatski komitet međunarodnog vijeća za velike električne sisteme, Zagreb, 2003.

[11] Marijana Tivić Đurović – Vitomir Komen – Renato Čućić; **Istraţivanje i utvrđivanje stanja kvalitete električne energije;** Engineering Review : Međunarodni časopis namijenjen prezentaciji i razmjeni originalnih istraţivanja s aspekta dizajna, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva; Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci; prosinac 2008.

[12] Knežević Goran; Fekete Kresimir i Nikolovski Srete. Simulation of the residental photovoltaic system expansion impact on the voltage profile; Objavljeno DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2011

POPIS OZNAKA I KRATICA

A	površina rotora
DER	Distribuirani energetski resursi
E_{VE}	proizvedena energija vjetra
F(v)	funkcija gustoće razdiobe brzine vjetra
P_v	teorijska snaga vjetra
P(v)	krivulja snage vjetroagregata
P_{gen}	utisnuta radna snaga u mrežu
Pi	glavna referenca energije
p.u.	jedinična vrijednost (engl. per unit)
PCC	Mjesto priključka na mrežu
R	otpor izvora na mjestu spajanja
T	promatrani vremenski period
U	nazivni napon
v	brzina vjetra
ρ	gustoća zraka
$\Delta_{\max}$	apsolutna naponska margina

SAŽETAK

Novi oblici tržišta s različitim potrošačima, integracija i velika prodornost obnovljivih izvora energije i distribuirana proizvodnja pozivaju na razvoj konvencionalne električne mreže. Mreža sljedeće generacije zvana napredna mreža odnosno mreža namijenjena prevladavanju postojećih izazova i poboljšanja kvalitete električne energije, usluge i proizvodnje. U prošlosti je bila pasivna, a danas sve više postaje aktivna. Distribuirana proizvodnja počinje mijenjati smjer energije. To donosi nove izazove u vođenje mreže. Tržište električnom energijom postaje interesantno investitorima, te žele ulagati u ovo područje. Zbog specifičnosti potrebno je analizirati kako će investicije utjecati na rad i pouzdanost mreže.

Ključne riječi: razina integracije, distribuirana proizvodnja, naponski limiti, kvaliteta električne energije.

ABSTRACT

The new forms of markets with diverse consumers, integration and high penetration of renewable energy resources and the distributed generation call for evolutions of the conventional power grid. The next generation power grid, namely smart grid, it meant to overcome the existing challenges and to improve the quality of the energy service and generation. In the past was passive, but today it become more active. Distributed generation starts to change direction of power. This brings new challenges in managing of electric grid.

Market of electric energy become interested to private investors, so that they want to invest. But due to the specifics of electric system it is necessary to analyze how the investments will impact to performance and reliability of grid.

Key words: hosting capacity, distributed generation, voltage limits, power quality.

ŽIVOTOPIS

Zoran Mrkonić rođen je 1991 godine u Somboru. Završio je srednju Strojarsko tehničku školu u Osijeku, smjer strojarski tehničar. Nakon završene srednje škole 2010. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, stručni smjer Elektroenergetike. Tijekom zadnje godine stručnog studija zapošljava se u Hrvatskom telekomu, kao agent na tehničkoj podršci. Studij uspješno završava 2014. godine. Iste godine upisuje razlikovne obveze kako bi nastavio studiranje na diplomskom studiju. Nakon položenih razlikovnih obveza upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, izborni blok DEB (Održiva elektroenergetika). Tijekom studija radi preko studentskog servisa u Novocommerce Internacionalu kao Product Specialist.

Trenutno završava diplomski studij elektrotehnike s temom ,,Decentralizirano upravljanje naponom u naprednoj mreži“.