

Osnovne komponente vjetroelektrana

Slabinjac, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:724778>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

OSNOVNE KOMPONENTE VJETROELEKTRANA

Rijeka, rujan 2024.

Domagoj Slabinjac
0069084712

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

OSNOVNE KOMPONENTE VJETROELEKTRANA

Mentor: izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, rujan 2024.

Domagoj Slabinjac
0069084712

Rijeka, 10. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Električni strojevi**
Grana: **2.03.02 elektrostrojarstvo**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD


Pristupnik: **Domagoj Slabinjac (0069084712)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Zadatak: **Osnovne komponente vjetroelektrana / Basic components of wind power plants**

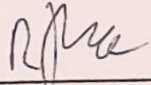
Opis zadatka:

Najprije će se pojasniti osnovni princip rada vjetroelektrana, na temelju iskorištavanja energije vjetra. Bit će prikazana općenita fizikalna slika rada vjetroelektrane. Potom će se opisati tipovi vjetroelektrana, u ovisnosti o generatorskom sklopu, odnosno o tipu generatorske jedinice i eventualno pretvaračke jedinice. Konačno, dati će se uvid u osnovne primjere vjetroelektrana u Hrvatskoj, pri čemu će poseban osvrt biti na buduće iskorištenje vjetropotencijala.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

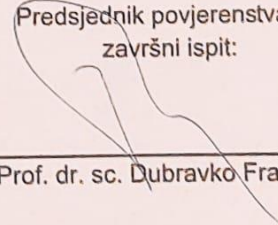

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Doc. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

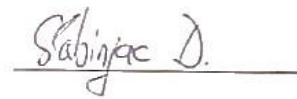


Prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Izjavljujem da ja, Domagoj Slabinjac, sukladno članku 8. Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija, sam ovaj radi pod nazivom „Osnovne komponente vjetroelektrana“ izradio samostalno uz mentorstvo doc. dr. sc. Renea Prenca.

Rijeka, rujan 2024.

Handwritten signature of Domagoj Slabinjac in black ink, written over a horizontal line.

Domagoj Slabinjac

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Reneu Prencu na vođenju, pomoći, dostupnosti i smjernicama tijekom pisanja završnog rada. Prije svega se zahvaljujem svojoj obitelji, a posebno roditeljima koji su bili tu tijekom cijelog razdoblja uspona i padova tijekom ovog studija. Zatim svim mojim kolegama i poznanicima koji su svojim prisustvom i pomoći obilježili ovo putovanje. Uz sve to zahvaljujem se i svim ostalim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta na prenesenom znanju i trudu.

Sadržaj

1.	UVOD.....	1
2.	PRINCIP RADA VJETROELEKTRANE	2
2.1.	Fizikalna slika rada vjetroelektrana.....	2
2.2.	Energija vjetra	3
2.3.	Karakteristike vjetra	3
2.3.1.	Brzina vjetra.....	3
2.3.2.	Turbulencija	3
2.3.3.	Naleti vjetra.....	4
2.3.4.	Smjer vjetra.....	4
2.3.5.	Općenito o vjetru.....	5
2.3.6.	Mjerenje jačine vjetra.....	5
3.	RAZVOJ VJETROTURBINA.....	7
3.1.	Početak razvoja vjetroturbina za proizvodnju električne energije	7
3.2.	Primjeri suvremenih vjetroturbina za proizvodnju električne energije	9
3.2.1.	Siemens Gamesa SG 14-222 DD.....	9
3.2.2.	General Electric Haliade-X.....	10
3.2.3.	Vestas V164-10.0	11
3.2.4.	Enercon E-126	12
3.2.5.	Nordex N149/4.0-4.5.....	12
3.3.	Defekt vjetroturbina Siemens Gamesa	13
4.	DIJELOVI VJETROELEKTRANE.....	15
4.1.	Lopatice vjetroturbine.....	15
4.2.	Multiplikator i izravni pogon	17
4.3.	Dijelovi unutar kućišta i konstrukcije.....	18
5.	PODJELA PO VRSTAMA GENERATORA.....	20
5.1.	Asinkroni generatori	20
5.1.1.	Kavezni asinkroni generator	21
5.1.2.	Asinkroni kliznokolutni generator	23
5.1.3.	Optislip kliznokolutni asinkroni generator	24
5.1.4.	Dvostruko napajani asinkroni generator.....	25
5.2.	Sinkroni generator	27

5.2.1.	Sinkroni generator sa permanentnim magnetom	28
5.2.2.	Sinkroni generator sa klasično namotanim rotorom	30
6.	PRIKLJUČIVANJE VJETROELEKTRANE NA ELEKTROENERGETSKI SUSTAV	33
6.1.	Analiza elektroenergetskog sustava.....	33
6.2.	Mrežna pravila i uvjeti priključenja	35
6.3.	Integracija vjetroelektrane u elektroenergetski sustav.....	38
7.	VJETROELEKTRANE U REPUBLICI HRVATSKOJ	40
7.1.	Razvoj i položaj vjetroelektrana u Hrvatskoj.....	40
7.2.	Vjetroelektrane u pogonu.....	42
7.3.	Proizvodnja električne energije vjetroelektrana	44
8.	ZAKLJUČAK	46
	LITERATURA	47
	SAŽETAK	50
	SUMMARY	51

1. UVOD

Električna energija je jedan od neizostavnih oblika energije današnjice. Utjecaj proizvodnje iste energije, iz prijašnjih oblika dobivanja pomoću elektrana na fosilna goriva, ima loš utjecaj na okoliš. Osim toga postoje prirodna ograničenja tih resursa i tako ovisi cijena i njihova raspoloživost.

Kao rješenje dovelo se do obnovljivih izvora energije što su sunce, voda, biomase i vjetar. Obnovljivi oblici energije također imaju utjecaj na iskoristivost ovisno o geografskom položaju, te nisu jednake u svim podnebljima. Iskoristivost sunčeve energije je najrasprostranjenija jer je najjednostavnija za izvedbu, nije ograničena na veće površine postavljanja i energija je pokrivena u svim dijelovima.

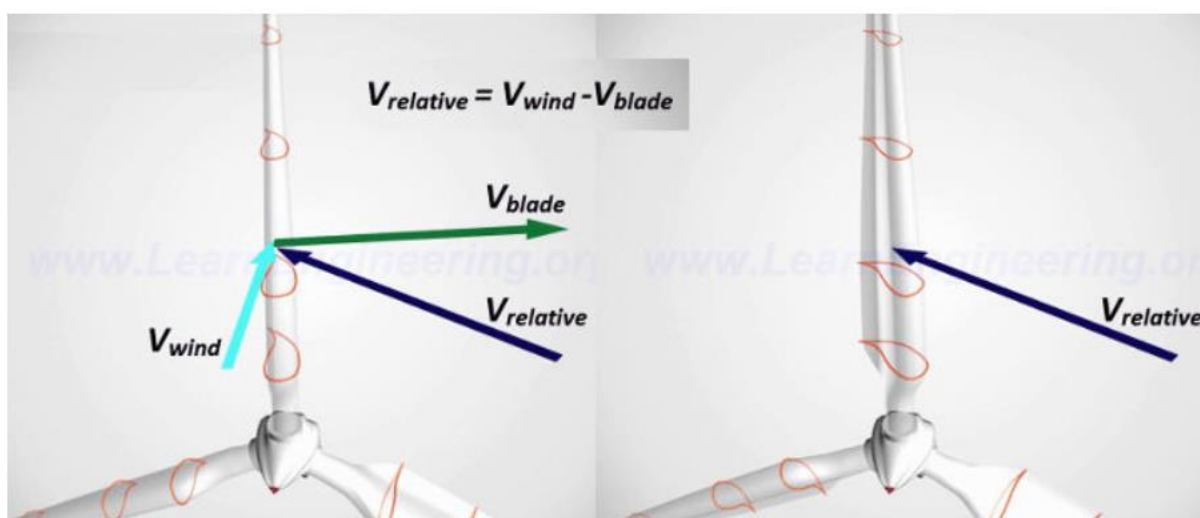
Ovaj rad je baziran na iskorištavanju energije vjetra kroz vjetroelektrane. Opisan je fizikalni rad i osnovni princip kako se energija vjetra iskorištava u svrhu proizvodnje električne energije. Zatim se analiziraju tipovi vjetroelektrana ovisno o izvedbi generatorskog sklopa i pretvaračima. Približno će se objasniti spajanje akumulirane i proizvedene energije u elektroenergetsku mrežu.

2. PRINCIP RADA VJETROELEKTRANE

Vjetar je jedan od oblika obnovljive energije, te se u današnje vrijeme vjetroeletktrane više uzimaju u opticaj nego li je to bilo u prošlosti. Glavni zadatak vjetroeletktrana je da mehaničku energiju vjetra pretvaraju u električnu.

2.1. Fizikalna slika rada vjetroeletktrana

Princip rada je zasnovan tako da strujanje djeluje na lopatice rotora i da ono izaziva rotiranje cijelog rotora. Lopatice su izrađene različitog presjeka i oblika duljem lopatice, te takvom vrstom izrade vjetar stvara silu „uzgona“ na jednom dijelu lopatice i na drugom djeluje kao otpor. Sama izvedba debljine lopatica od početka prema kraju nije više zbog aerodinamičkog smisla već zbog čvrstoće iste. Sama izrada lopatica je kompleksan proces te je jedan od važnog dijela konstrukcija zakrivljenosti cijelim duljem tako da sila djeluje jednako.



Slika 2.1. Koncept zakrivljenosti lopatice i brzine vjetra

Rotiranje lopatica i djeluje tako da okreće osovinu rotora. Na rotoru se nalazi reduktor kojim se mijenja brzina vrtnje osovine, odnosno povećava. Zatim se nakon toga nalazi kočnica koja služi kao zaštita uslijed jakog vjetra ili nekih drugih pojava koje svojim djelovanjem mogu prouzročiti rotaciju koja može prouzročiti kvar ili katastrofu pogona. U nizu se nalazi generator koji je srž cijelog sklopa, odnosno pretvara kinetičku energiju koja se razvija na osovini u električnu energiju.

Električna energija koja je proizvedena u generatoru se dovodi na uzlazni transformator koji podiže razinu napona i šalje dalje u prijenosnu mrežu. Visoke razine napona su bitne zato što su manji gubici u prijenosu

2.2. Energija vjetra

Energija vjetra je posebna vrsta kinetičke energije koja nastaje strujanjem zraka. Pomoću nje je moguće proizvoditi električnu energiju, ali se može koristiti i izravno za pumpanje vode, jedrenje ili mljevenje žita. Vjetar varira ovisno o geografskom položaju, dobu dana, godišnjem dobu, nadmorskoj visini i vremenskim uvjetima. Razumijevanje navedenih karakteristika pomaže u razvoju tehnika mjerenja vjetra, poboljšanju postojećih i razvoju novih modela vjetroturbina i odabiru područja za izgradnju vjetroelektrana [1].

2.3. Karakteristike vjetra

2.3.1. Brzina vjetra

Brzina vjetra je ključna za proizvodnju energije vjetra i varira ovisno o vremenu i prostoru, na što utječu geografski i vremenski uvjeti. Budući da je brzina vjetra nasumičan parametar, podaci se obično obrađuju statističkim metodama. Dnevne varijacije prosječnih brzina vjetra često se opisuju sinusnim valovima. Mjesečne prosječne brzine vjetra obrnuto su proporcionalne prosječnoj mjesečnoj temperaturi, što znači da su veće zimi, a niže ljeti. Godišnje varijacije srednjih brzina vjetra ovise o lokaciji i ne mogu se predvidjeti zajedničkom korelacijom [1].

2.3.2. Turbulencija

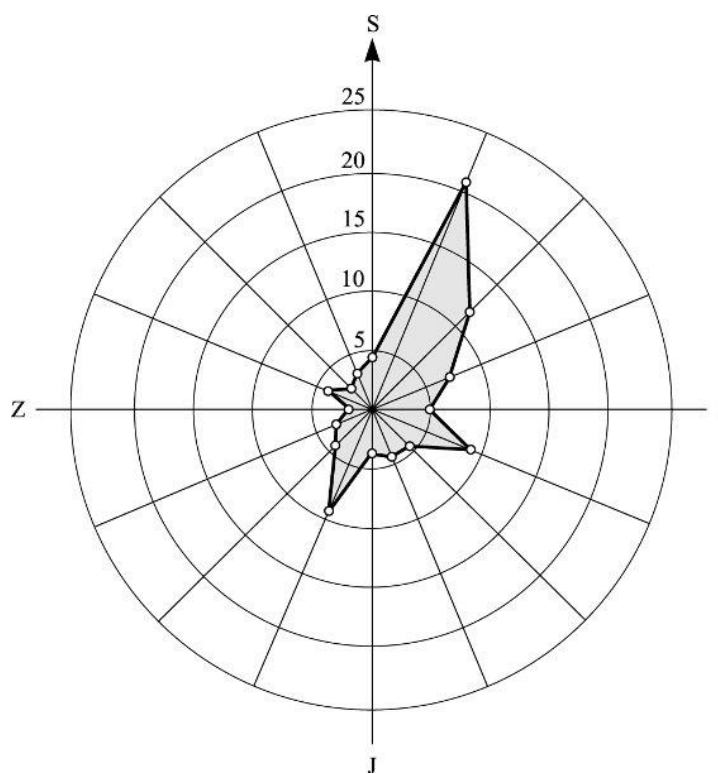
Turbulencija vjetra odnosi se na kratkoročne promjene brzine vjetra i značajno utječe na promjene u proizvodnji energije pomoću vjetroturbine. Intenzivna turbulencija može stvoriti velike dinamičke opterećenja koja skraćuju životni vijek turbine ili uzrokuju kvarove. Stoga je prilikom odabira lokacija za vjetroelektrane važno poznavati intenzitet turbulencije vjetra kako bi se osigurala stabilna proizvodnja energije [1].

2.3.3. Naleti vjetra

Naleti vjetra opisuju fenomen u kojem vjetar naglo pojačava brzinu u relativno kratkom vremenskom intervalu. Takvi udari vjetra mogu izazvati velike promjene u brzini vjetra i turbulenciji [1].

2.3.4. Smjer vjetra

Smjer vjetra je jedna od karakteristika vjetra koja je važna za odabir lokacije vjetroelektrane i raspored vjetroturbina unutar nje. Ruže vjetrova su grafički prikazi za analizu podataka o smjeru vjetra na određenom području tijekom određenog vremenskog razdoblja. Najčešći je zvjezdani dijagram koji može pokazivati od 8 do 12 smjerova. Dužina svake linije na dijagramu proporcionalna je učestalosti smjera vjetra, a informacije o brzinama vjetra također se mogu prikazati. Primjer ruže vjetrova prikazan je na slici 2.1. [1].



Slika 2.2. Ruža vjetrova [2]

2.3.5. Općenito o vjetru

Vjetar je strujanje zraka, odnosno energija kojom se kreću atmosferske mase koje nastaju uslijed razlika tlakova. Označen je kao kretanje s točke većeg tlaka prema nižim vrijednostima. Uzrok nastanka razlike tlaka je nejednoliko zagrijavanje preko zračenja sunca na atmosferu koje utječu na gustoću zraka, odnosno što je gustoća manja zrak je topliji. Osim zagrijavanja, na utjecaj oblika strujanja zraka djeluje i rotacija Zemlje koja uzrokuje Coriolisov efekt, te ostale prirodne pojave.

Pretvorba sunčeve u kinetičku energiju odvija se u viši atmosferskim slojevima, no od te energije je oko 1% dostupno korištenju u nižim atmosferskim slojevima.

Vjetrovi se mogu klasificirati prema njihovoj lokaciji kao globalni ili lokalni, te prema njihovoj brzini i smjeru kao promjenjivi ili stalni. Kao globalni vjetrovi ubrajaju se pasati, zapadni vjetrovi te polarni, a oni se klasificiraju kao stalni te formiraju klimatske zone. Za stvaranje lokalnih vjetrova utjecaj čine lokalne topografska obilježja, a za hrvatsku možemo karakterizirati povjetarac, buru, jugo, maestral i slično.

Brzine vjetrova su prema prosjeku veće na površinama oceana nego na kopnenim dijelovima zbog toga što je na kopnu veće trenje. Zato lokacije na kojima je najoptimalnija iskoristivost energije vjetra jesu rubni dijelovi kontinenata te priobalna područja. Najbolje lokacija na kojima se iskorištava potencijal vjetra su pacifička i atlantska obala [11].

2.3.6. Mjerenje jačine vjetra

Mjerenje jačine vjetra i strujanja zraka je bitno zbog procjene ponašanja vjetra te se tako određuju pogodne lokacije za postavljanje vjetroelektrana. Poznato je da vjetar ima visoke trenutačne varijacije, a to znači da u nekoliko sekundi može značajno odstupati od neke srednje vrijednosti. Uređaji koji bilježe takve varijacije nazivaju se anemometri, njihova očitavanja izlaznih vrijednosti prikazuju se u obliku analognih ili digitalnih signala.

Anemometri se dijele u ovisnosti svrsi, odnosno očitavaju li trenutnu ili srednju brzinu vjetra, te o izvedbi, a dijele se na neke od njih : Čašasti anemometar, anemometar s ugrijanom žicom, ultrazvučni anemometar i Pitotova cijev.

Čašasti anemometar se može podijeliti na dvije vrste s obzirom na njihovu izvedbu. Izvedba uređaja vertikalne osi koji je napravljen tako da se oko osi nalaze lopatice koje se rotiraju pod utjecajem strujanja zraka, odnosno brzina rotacije odgovara brzini vjetra. Na osovinu je postavljen

tahometar generator koji proizvodi napon proporcionalan brzini vrtnje, odnosno brzini vjetra. Druga izvedba je kao mala horizontalna osovina s rotorima, jednakog procesa očitavanja brzine, no prednost horizontale izvedbe je u tome što omogućuje zakretanje u smjeru strujanja zraka i ima složeniju izvedbu.

Anemometar s ugrijanom žicom koristi vruću žicu, vrijednost očitava preko električnog otpora. Princip rada je takav da se protjecanjem zraka žica rashlađuje i tako mijenja električni otpor, ovisno o temperaturi. Koristeći odgovarajuću kalibraciju električni otpor je korišten kao mjera brzine vjetra. Takva vrsta mjerenja reagira na brze promjene te se mogu koristiti visokofrekventne radijuse.

Ultrazvučni anemometar uređaj radi na principu prikupljanja ultrazvučnih valova koji putuju između detektora samog uređaja koji su postavljeni na pravilnoj udaljenosti. Brzina tih valova kreće se brzinom zvuka, no u proračunu brzina vjetra je neovisna o brzini zvuka jer on varira zbog vlage i gustoće zraka. Ovi uređaji mogu raditi u teškim uvjetima te jer nisu osjetljivi na vanjske utjecaje. Osim mjerenja brzine vjetra također daje informaciju o smjeru strujanja zraka. Ovi uređaji daju izuzetno precizne signale no znatno su skuplji na učestale anemometre sa čašama. Ovi uređaji su više rasprostranjeni u izradi novih vjetroturbina zbog nesmetanog očitavanja signala.

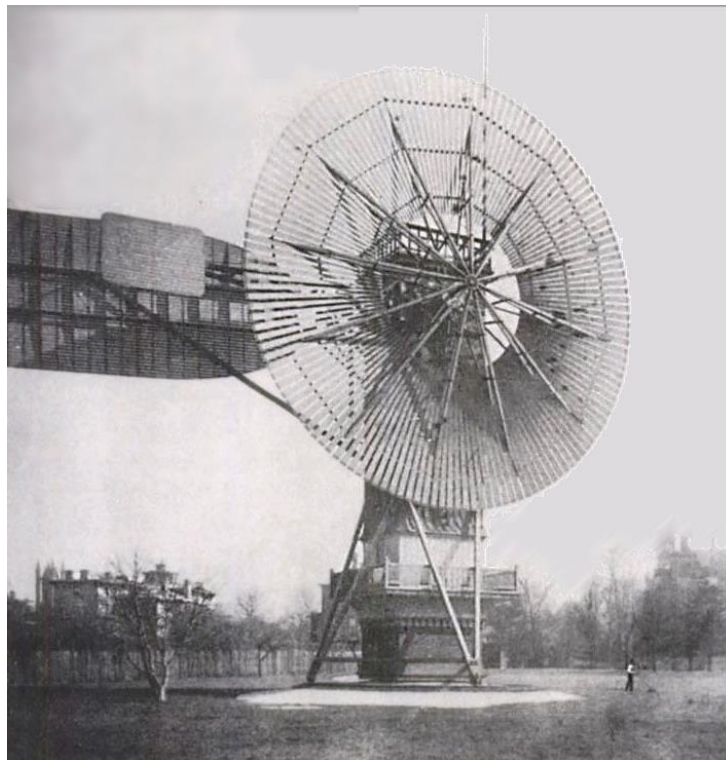
Pitotova cijev je jednostavan proizvod koji koristi razliku između statičkog i dinamičkog pritiska zraka kako bi izračunala brzinu strujanja. Pitot cijev se sastoji od dva kanala - jedan usmjeren u strujanje vjetra (dinamički kanal), dok je drugi postavljen pod pravim kutom u odnosu na strujanje (statički kanal). Kada zrak prolazi kroz Pitot cijev, pritisak u dinamičkom kanalu povećava se zbog kinetičke energije zraka u kretanju. Istovremeno, pritisak u statičkom kanalu ostaje konstantan i odražava statički pritisak zraka u okolini. Razlika između ovih pritisaka proporcionalna je brzini vjetra.

3. RAZVOJ VJETROTURBINA

Povećana svijest o negativnom ekološkom utjecaju proizvodnje električne energije pomoću tradicionalnih elektrana potaknula je elektroenergetski sektor na promjenu. Energetska poduzeća sve više se okreću proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora, jer na taj način znatno doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova. Pritom se energija vjetra ističe kao jedna od ekološki najprihvatljivijih industrija energije [1, 3].

3.1. Početak razvoja vjetroturbina za proizvodnju električne energije

Prvobitna primjena vjetra za proizvodnju električne energije uključivala je razvoj malih vjetrogeneratora i istraživanje velikih vjetroturbina. Krajem 19. stoljeća došlo je pojave električnih generatora, a ljudi su već tada pokušavali otkriti kako pokretati generatore pomoću vjetroturbina. Najpoznatiji rani primjer vjetroturbine za proizvodnju električne energije izgradio je Charles Brush u Clevelandu 1888. godine (slika 2.2.) [4].



Slika 3.1. Brushova vjetroturbina za proizvodnju el. energije u Clevelandu, SAD 1888. [5]

Iako Brushova turbina nije potaknula široku primjenu vjetroturbina, u narednim godinama mali električni generatori postali su uobičajeni, posebno zahvaljujući znanstveniku Marcellusu

Jacobsu. Njegove vjetroturbine, s tri lopatice aerodinamičkog oblika, bile su preteče današnjih turbina i uključivale su baterijsko skladištenje [4].

U prvoj polovici 20. stoljeća zabilježen je značajan razvoj većih vjetroturbina za proizvodnju različitih oblika energije. Godine 1919., njemački fizičar Albert Betz formulirao je Betzov zakon, koji pokazuje da vjetroturbina može pretvoriti 59% kinetičke energije u mehaničku energiju. Ova teorija se i danas koristi kao osnova za izgradnju vjetroturbina [6].

Godine 1941. instalirana je prva turbina koja je proizvodila više od 1 [MW] snage. U Njemačkoj, Ulrich Hütter istraživao je moderne aerodinamičke principe primijenjene na dizajn vjetroturbina. U Sjedinjenim Američkim Državama značajna je bila Smith–Putnamova vjetroturbina izgrađena u Vermontu krajem 1930-ih, međutim, taj projekt je napušten jer su nakon otprilike 1000 sati rada zakazale lopatice [4, 6].

Danski znanstvenik Poul La Cour je uz financijsku pomoć vlade izgradio više od 100 vjetroturbina snage od 25 do 35 [kW] za proizvodnju vodika primjenom tehnike elektrolize. Također, u danskom gradu Gedseru je 1957. izgrađena jedna od većih vjetroturbina toga razdoblja, snage 200 [kW]. Danas se dijelovi Gedser vjetroturbine mogu razgledati u muzeju energije Bjerringbro (slika 2.3.) [4].



Slika 3.2. Dijelovi Gedser vjetroturbine iz 1957. u sklopu muzeja energije Bjerringbro [7]

Naftna kriza je 1973. godine potaknula nova istraživanja u SAD-u i Danskoj o većim vjetroturbinama koje bi se mogle povezati s električnim mrežama. Do 2008. godine, SAD je dosegao 15,4 [GW], a do 2012. instalirani kapacitet bio je 60 [GW] [6].

Danas vjetroturbine dolaze u različitim veličinama, od malih stanica za punjenje baterija u udaljenim domovima do priobalnih vjetroelektrana (eng. *Offshore Wind Farm*) koje proizvode električnu energiju za elektroenergetske mreže [6].

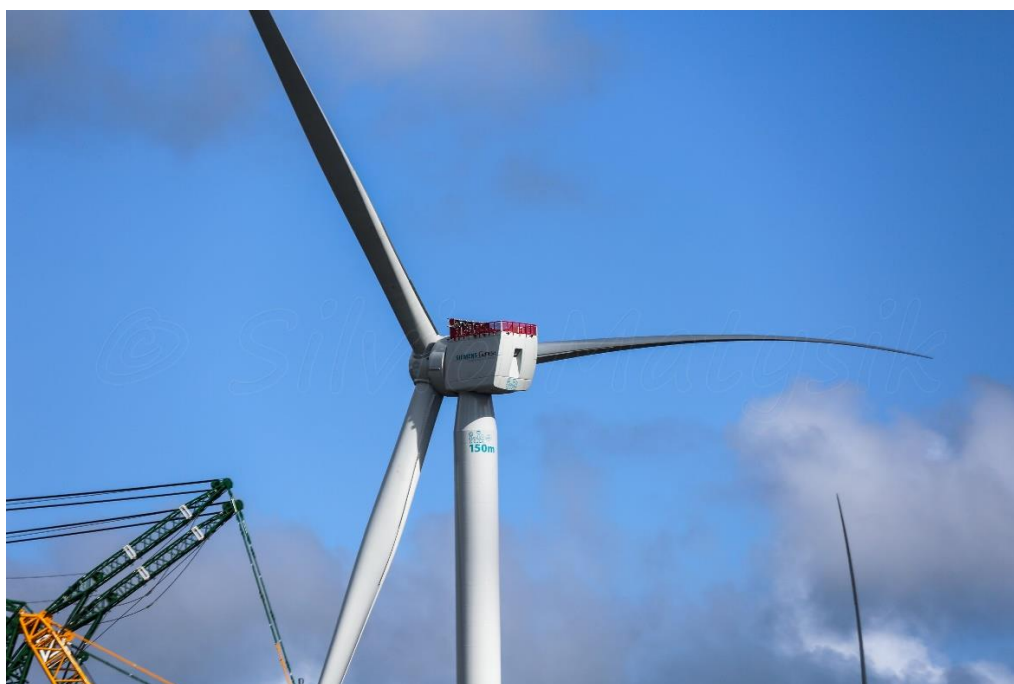
3.2. Primjeri suvremenih vjetroturbina za proizvodnju električne energije

U nastavku je dan pregled suvremenih vjetroturbina koje se koriste za proizvodnju električne energije. Ove vjetroturbine, koje se razlikuju po proizvođaču, veličini, kapacitetu i dizajnu, predstavljaju vrhunac tehnologije u iskorištavanju energije vjetra [8].

3.2.1. Siemens Gamesa SG 14-222 DD

Siemens Gamesa SG 14-222 DD je jedna od najnovijih i najmoćnijih priobalnih vjetroturbina dostupnih na tržištu. Ova vjetroturbina, čija je proizvodnja počela 2021. godine, ima nazivnu snagu od 14 [MW], a uz odgovarajuće nadogradnje može dosegnuti čak 15 [MW]. Rotor ima promjer od 222 [m], dok svaka lopatica duljine 108 [m] omogućuje ogromnu površinu zahvata vjetra. Vjetroturbina je prikazana na slici 2.4 [9].

Vjetroturbina je dizajnirana za instalaciju na obali, gdje može maksimalno iskoristiti stalne i jake vjetrove. Obalna područja poput onih uz Sjeverno more idealna su za ovu vrstu vjetroturbine. Njezina veličina i kapacitet omogućuju značajnu proizvodnju energije, čime doprinosi smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima i smanjenju emisija CO₂ [9].



Slika 3.3. Priobalna vjetroturbina Siemens Gamesa SG 14-222 DD [10]

3.2.2. General Electric Haliade-X

Haliade-X predstavlja jednu od najnaprednijih vjetroturbina na svijetu, s kapacitetom od 12 [MW], koji se može povećati na 13 [MW] u budućnosti. Proizvodnja ove turbine započela je 2019. godine. Ova vjetroturbina je prva koja je dosegla ove razine snage, a njezina je instalacija započela na nekoliko ključnih priobalnih lokacija [11].

Tablica 3.1. Tehničke karakteristike priobalne vjetroturbine Haliade-X [11]

Nazivna snaga [MW]	12
Promjer rotora [m]	220
Duljina lopatica [m]	107
Visina stupa [m]	od 138 do 150
Površina zahvata vjetra [m ²]	38 000

Haliade-X se ugrađuje na priobalnim područjima kao što su obale Sjeverne Amerike i Europe, gdje vjetrovi pružaju optimalne uvjete za visoku proizvodnju energije. Posebno je važno napomenuti da ova vjetroturbina može opskrbljivati električnom energijom oko 16 000 europskih kućanstava po jedinici. Slika 2.5. prikazuje vjetroturbinu Haliade-X u Rotterdamu [11].



Slika 3.4. Priobalna vjetroturbina Haliade-X u Rotterdamu [12]

3.2.3. Vestas V164-10.0

Vjetroturbina V164-10.0 (slika 2.6.) proizvođača MHI Vestas ima nazivnu snagu od 10 [MW], a njezin je rotor promjera 164 [m]. S duljinom lopatica od 80 [m], ova vjetroturbina je sposobna zahvatiti velike količine vjetra [13].



Slika 3.5. Priobalna vjetroturbina V164-10.0 proizvođača MHI Vestas [13]

3.2.4. Enercon E-126

Enercon E-126 je poznata po svojoj visokoj učinkovitosti i prilagodljivosti različitim uvjetima. Ima nazivnu snagu od 7.5 [MW] i jedna je od najmoćnijih kopnenih vjetroturbina (eng. *Onshore Wind Turbine*) na tržištu. Vjetroelektrane u Njemačkoj, Belgiji i Nizozemskoj iskorištavaju puni potencijal ove vjetroturbine. Proizvodnja ovog modela započela je 2007. godine. Na slici 2.7. prikazana je inačica E-126 u njemačkom gradu Magdeburgu [14].



Slika 3.6. Kopnena vjetroturbina E-126 u Magdeburgu [15]

3.2.5. Nordex N149/4.0-4.5

Kopnena vjetroturbina N149/4.0-4.5 proizvođača Nordex ima nazivnu snagu od 4.5 [MW]. Često se koristi u europskim zemljama kao što su Njemačka i Francuska. Poznata je po svojoj pouzdanosti i sposobnosti da isporuči visoke razine električne energije čak i u srednje vjetrovitim područjima. Na slici 2.8. prikazana je vjetroturbina N149/4.0-4.5 u sklopu vjetroelektrane u Njemačkoj [16].

Tablica 3.2. Tehničke karakteristike kopnene vjetroturbine N149/4.0-4.5 [16]

Nazivna snaga [MW]	4.5
Promjer rotora [m]	149
Duljina lopatica [m]	74.5

Visina stupa [m]	125
Površina zahvata vjetra [m ²]	17 460



Slika 3.7. Vjetroturbina N149/4.0-4.5 u sklopu vjetroelektrane u Njemačkoj [17]

3.3. Defekt vjetroturbina Siemens Gamesa

Jedan od najvećih proizvođača vjetroelektrana, Siemens Gamesa, se početkom 2023. godine suočio nizom problema kod svojih proizvoda kada je Španjolska podružnica uočila nedostatke u kvaliteti gore od očekivanih, tj. od kvarova do malih pukotina. Nedostatci u proizvodnji zamijećeni su kod kopnenih platformi 4.X i 5.X čiji je trošak razvoja procijenjen na 500 milijuna eura, gdje je nakon utvrđivanja nepravilnosti procijenjena šteta/gubici u okvirima od 5 milijardi eura. Objavljeno je kako je došlo do problema s kontrolom kvalitete. Tijekom problematike sa dobavljačima materijala, nisu naveli proizvođača (treće strane), već su ih isključili iz danjih poslovanja.

Problemi koji su se pojavili povezani su s lopaticama rotora i ležajevima. Na lopaticama rotora pojavljuju se nabori, dok je kod ležajeva problematičnost s pojavom čestica u ležajevima koje ih uništavaju. Uslijed mogućih oštećenja ključnih komponenata, postoji mogućnost da se bi se neke od turbina mogle susresti sa uvijanjem ili pomicanjem bitnih strukturnih dijelova te dovesti

do daljnjih oštećenja kritičnih komponenti. Modeli koji su u upotrebi jesu oko 2100 4.X , te 800 5.X. Tvrtka procjenjuje da je 15-30% od toga broja problematično. Prema podacima iz 2023. godine kompanija je proizvela više od 132 GW energije kroz sustave svih vjetroelektrana.

Pojave kvarova i nedostaci navedenih modela dovela je do toga da se djelomično zaustavio projekt u Norveškoj, Odal Vind vjetropark veličine 163 MW koji je smješten u blizini Švedske granice, gdje se i ustanovio kvar. Projekt se sastoji od 34 Siemens Gamesa 4.X turbine. Početkom 2024. od ukupnih 34, 13 vjetroturbina su bili van funkcije dok su još dvije na popravku. Navedeno je da se glavni razlog uzorkovanih oštećenja zbog proizvodnih defekata na lopaticama, a preostale dvije koje su na popravku zbog drugih oštećenja pri popravku.

4. DIJELOVI VJETROELEKTRANE

Pod aktivne dijelove se misli na one dijelove koji imaju direktnu funkciju kod proizvodnje električne energije.

4.1. Lopatice vjetroturbine

Prvi dio je vjetroturbina na kojoj se nalaze glava gdje su smještene lopatice, osovina i lopatice koje pod utjecajem strujanja zraka pod specijalnom izvedbom, prethodno objašnjeno, djeluje tako da se zakreće. Najčešća izvedba je u obliku trokrakog rotora te predstavlja najekonomičniju i najefikasniju izvedbu, s obzirom na druge izvedbe od 2 ili 4 elise gdje su brzine rotacije uvelike veće te samim time dodatno opterećuju sustav, odnosno stvaraju nepovoljne uvijete i lošiju učinkovitost.



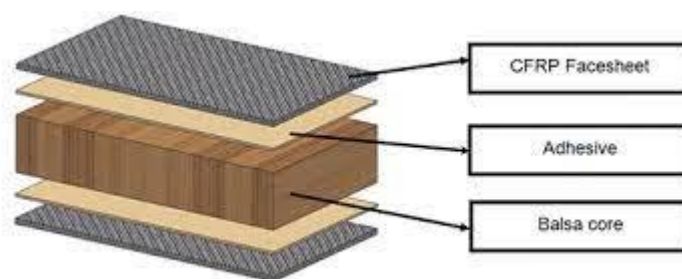
Slika 4.1. Vjetrene turbine u stvarnosti

Materijal za izradu ima veliku važnost, moraju biti izrađene da toleriraju nepovoljne utjecaje tlaka vjetra i gravitacijske sile. Konstruiraju se tako da bi proizvodnja energije bila što veća, no duljina lopatica je tada veća i traži bolja idejna rješenja. Pod takva rješenja osim izvedbe duljine i čvrstoće, u današnje vrijeme se standardi svode većinom da se nakon korištenja teži ka recikliranju istog materijala.

Izbor materijala važan jer utječe na troškove i trajnost komponenti. Svojstvo materijala izrade lopatica je ta da imaju manju gustoću. Prvi uvjet koji mora zadovoljavati je da stvara dobar otpor od napetosti, udaraca i zamora materijala. Lopatice moraju također biti prilagodljive na promjene uvjeta okoline, a pod to podrazumijevamo insekte, životinje (ptice), kišu, vlažnost,

prašinu, zagađivale i slično. Osim što je bitna gustoća, isto tako je bitno da je materijal ima dovoljnu krutost. U obzir osim tehničkih svojstava pri izboru materijala uzimaju se i činjenice da se bira minimalni troškovi izrade i samog materijala, te njegova dostupnost. Zato se ulažu određena sredstva za daljnji razvoj materijala i sličnih primjesa.

U početku izrade elektrana, kao glavni materijal je bilo drvo. Ono je lako dostupno, cjenovno povoljno, ima dobre karakteristike na habanje i zamor materijala. Kao svaki materijal koji nije doradivan, i drvo ima svoje negativna svojstva u primjeni. Najveća mana je što nije otporno na vlagu, veliki udio iste djeluje najviše na mehanička i fizikalna svojstva, ono stvara puknuća kao posljedica unutarnjih opterećenja, samo smanjivanje čvrstoće te na kraju truljenje drva. Kao alternativa za smanjenjem tih utjecaja, došlo je do izrade kompozita drveta. Izvedba je takozvani sendvič panel koji se sastoji od jezgre drveta koji je sa obje vanjske strane obložen kompozitnim polimernim materijalom. Tako je izvedeno da jezgra od drveta preuzima čvrstoću i naprezanja, dok je obloženi dio otporan ga savijanja i vanjske utjecaje, no mana je nepovoljni utjecaj vrlo visokih temperatura. Danas se drvene konstrukcije koriste samo kod malih turbina.

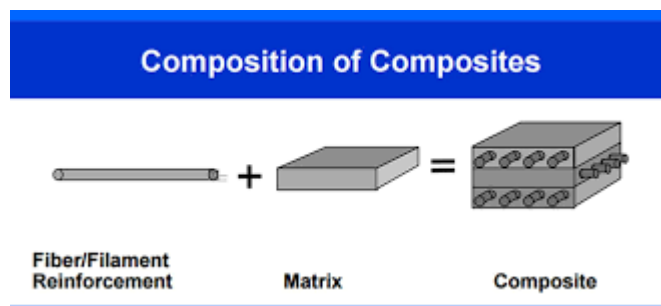


Slika 4.2.. Drveni panel izrade lopatica

Odgovor na nedostatke drveta je zamjena sa čelikom. Čelik je tako smatran optimalnim materijalom jer je pokazao čvrstoću protiv kompresije, udara, zamora i drugih negativnih čimbenika. Čelik je svrhu postizao tako da je imao premaz niklom koji je zaštita. On je također van upotrebe iako je zadovoljavao određene tehničke uvijete, težina je predstavlja veliki problem i ona je najveća mana zbog velike gustoće materijala. Njegova zamjena je predstavljena aluminijem, sam aluminij je lagan materijal i ima manju gustoću od čelika. Aluminij je dosta slabiji od čelika, ima visku cijenu koja ne opravdava trajnost jer je kao materijal slabiji i ima malu tolerantnost na zamor, i također je zamijenjen. U današnje vrijeme za izradu se koriste kompozitnim materijalom koji ima široku primjenu.

Kompozitni materijali sačinjavaju se od dva ili više materijala različitih svojstava. Nastaje tako da se matrici dodaju vlakna. Dodavanjem u vlakana u poliestersku, odnosno polimersku matricu stvaraju se povoljni učinci i otpornosti materijala na prethodno postavljene uvijete npr.

čvrstoća i sl. Matrica . Ova matrica može biti izrađena od poliesterske smole, vinilne smole ili termoplastične smole. Međutim, epoksidna smola se ističe po svojoj popularnosti zbog niza povoljnih svojstava, uključujući dobru nosivost tereta, otpornost na degradaciju nad okolišem, snažno povezivanje, visok modul elastičnosti i niska viskoznost



Slika 4.3. Kompozicija materijala

Ojačanja u smislu vlakana služe da se postigne bolja konfiguracija. Maksimalni udio vlakana koji se unosi ne smije prijeći 60-65% što utječe na zamor materijala i kakvoće. Vlakna koja su u najčešća u upotrebi su ugljična vlakna, S-staklo, E-staklo, aramidna i hibridna vlakna.

Ugljična vlakna koriste su najzastupljenija zbog svoje krutosti i gustoće te su zato povoljnije za izradu, no nisu tolerantne na oštećenja i imaju veću cijenu, u odnosu na staklena vlakna.

Staklena vlakna dijele se na S-staklena i E-staklena . E-staklena imaju nisku osjetljivost na variranje temperature i vlažnosti, imaju dobru otpornost na abraziju i vibracije. S- Staklena vlakna su slična E-Staklenim vlaknima, no imaju bolju čvrstoću i savitljivost.

Aramidna vlakna su sintetička vlakana koja imaju veliku izdržljivost, dobar omjer kod težine i čvrstoće, zadovoljava sve kriterije poželjne za izradu lopatica, no cjenovno su najskuplje od drugih materijala.

4.2. Multiplikator i izravni pogon

Multiplikator je prijenosnik snage koji povezuje rotorsku sa generatorskom jedinicom. Predstavlja sustav međusobno povezanih zupčanika kojima je svrha da omogućava nesmetan rad generatora, čiji cilj je postizanje odgovarajuće rotacije traženih zahtjeva koji moraju biti ispunjeni

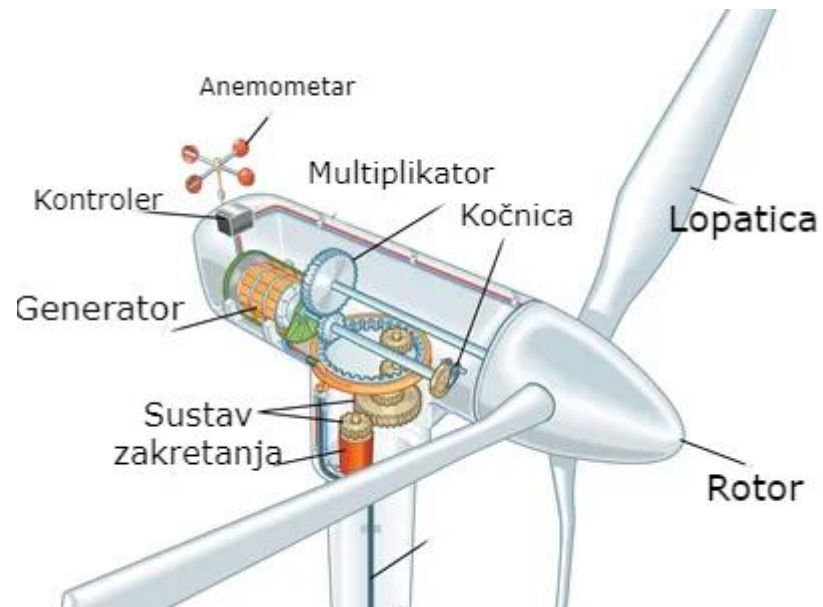
pri proizvodnji energije. Izveden je tako da preuzima brzinu vrtnje lopatica te je pretvara i kraj spaja na generator, to jest nisku brzinu i veliki moment povećava na veću brzinu. Izravni pogon moderniji je način, uporaba je pri generatorima koji imaju mogućnost direktnog spajanja bez prijenosa snage, tj. brzina se može regulirati elektronskim putem.

4.3. Dijelovi unutar kućišta i konstrukcije

Kućište je konstrukcija unutar kojeg se nalaze skoro svi dijelovi za pretvorbu energije. Elementi koji su uz glavne mehaničke dijelove bitni u proizvodnom procesu, kako je opisano najvažniji konstruktivni dijelovi za proizvodnju jesu lopatice koje pokreće vjetar, osovina te njen prijenos i sam generator za proizvodnju električne energije, ostali dijelovi koji sudjeluju u radu su jesu sljedeći.

- Sustav za zakretanje turbine je vratilo kojim je povezano kućište (gondola) i nosivi stup. Zadatak je da se pri nepovoljnom položaju osi turbine ona prilagođava turbinu okomito na strujanje vjetra. Sustav se sastoji od ležajeva, aktuatora, reduktora te kočnice za fiksiranje položaja. Iako je dobro idejno rješenje, više je u upotrebi regulacija osi lopatica jer je ovaj pothvat postavljanja položaja predstavlja mehaničko opterećenje na sustav koji prekomjernom upotrebom može biti nepovoljno.
- Sustav zakretanja lopatica također radi na sličnom principu zakretanja. Kod ovog načina se prilagođava položaj lopatica da pri određenoj brzini strujanja vjetra se regulira izlazna snaga, odnosno stvaraju povoljni uvjeti rada.
- Sustav upravljanja i kontrole su cjelokupno povezani regulatori kojima se vrši komunikacija unutar postrojenja, daje potrebne informacije o radu i stanju rada. Zbog toga što sustav nije linearan zbog utjecaja vjetra, najčešće upotrebljavan je PID (Proporcionalno-integracijsko-derivacijski) regulator. PID regulator radi na principu usporedbe stvarne i zadane vrijednosti te prema razlike u pogrešci djeluje.
- Kočnica je važan dio koji djeluje kao zaštita. Najčešća upotreba je pri jakim naletima vjetra, odnosno da reagira na pojavu i isključi potencijalna mehanička i ostala oštećenja na sustav. Izrađena je kao mehanička disk kočnica, hidraulična, ili na principu elektromagnetnog kočenja.
- Anemometar je postavljen za praćenje parametara vjetra, odnosno opisano je u prethodnom poglavlju.

- Stup vjetroelektrane je konstrukcijski dio najčešće izrađen od betona i željezne konstrukcije koja služi za mehaničku čvrstoću. Sam stup mora izdržati vibracije i mehanička naprezanja jer je nosivi dio cijelog sklopa, te njegova visina varira (cca 80m). Unutar stupa nalaze se stepenice (lift), kabeli, a na dnu najčešće je postavljen transformator.



Slika 4.4. Dijelovi turbine

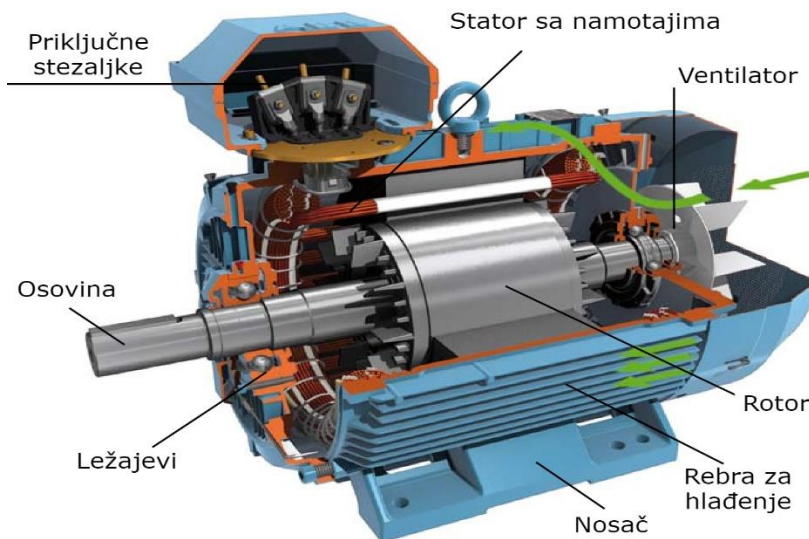
5. PODJELA PO VRSTAMA GENERATORA

5.1. Asinkroni generatori

Asinkroni generatori su vrsta električnih strojeva koji služe za pretvorbu mehaničke energije u električnu na principu indukcije, stoga se nazivaju još i indukcijski strojevi. Asinkroni stroj radi u režimu kao generator kad se djeluje na osovinu stroja vanjskim momentom, zatim moment stroja postaje negativan te stroj vrti brzinom većom od sinkrone i vraća energiju u mrežu. Pri generatorskom radu iako stroj predaje energiju u mrežu, potrebno mu je osigurati jalovu energiju pomoću kondenzatora ili iz mreže zbog stvaranja magnetskog polja, odnosno potrebna mu je struja magnetiziranja. Asinkroni stroj se konstruiran je od statorskog dijela i rotorskog. Statorski dio sastoji se od statorskog paketa, statorskog namota te samog kućišta. Kućište je dio koji služi kao nosač i kao osiguranje funkcionalnosti komponenti, odnosno služi za zaštitu unutarnjih dijelova te treba odvoditi toplinu u okolinu. Izrađuje se od lijevanog željeza, valjanog čelika, slitina aluminijskih. Ono je potrebno biti dovoljno mehanički čvrsto da izdrži vibracije i opterećenja tijekom rada stroja. Konstruiran je na način da se sa vanjske strane kućišta nalaze rebra kroz koje se strujanjem zraka brže odvodi toplina te samim time ima veću površinu hlađenja.

Statorski paket sastoji se od laminiranih prstenastih čeličnih limova paralelno spojenih koji su sklopljeni u oblik šupljeg valjka. Sa unutrašnje strane limova urezani su utori koji su simetrično raspoređeni. Utori su napravljeni da se u njima smještaju armaturni višefazni namoti. Statorski namot je ključni dio asinkronog stroja jer je bitan za stvaranje elektromagnetskog polja. Statorski namot je simetričan višefazni koji se sastoji od bakrenih ili aluminijskih međusobno izoliranih žica postavljenih u utore statorskog paketa. Namotaji mogu biti povezani u zvijezdu ili delta spoj, ovisno potrebnoj konfiguraciji stroja.

Rotor je dio stroja koji radi na principu djelovanja elektromagnetskog polja, međusobnim utjecajem sa statorom svojom rotacijom pretvara jedan oblik energije u drugu (električnu energiju u mehaničku i obratno). Rotor sastoji se od rotorskog paketa, namota i osovine. Rotorski paket je izrađen kao valjak od izoliranih limova sa utorima u koji su smješteni namotaji.



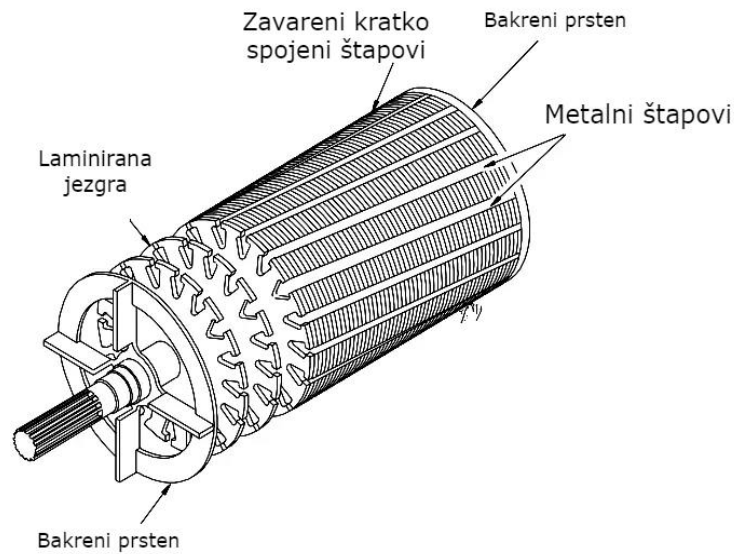
Slika 5.1. Asinkroni stroj sa opisom komponenti

Asinkroni generatori su pogodni za korištenje u vjetroelektranama za konverziju energije zbog više razloga. Jednostavna konstrukcija korištenjem manje dijelova izrade u odnosu na druge vrste strojeva, samim time stroj je jednostavniji za održavanje gdje dolazimo do nižih troškova održavanja i proizvodnje. Uz to možemo spomenuti robusnost stroja koji je izrađen tako da može izdržati opterećenje i promjenu opterećenja te otpornost na mehanička oštećenja. Osim fizikalnih i ekonomičnih prednosti, do izražaja dolazi i široki opseg brzina vrtnje što omogućuje rad na širokom spektru brzina vjetra.

5.1.1. Kavezni asinkroni generator

Kavezni asinkroni generator je vrsta indukcijskog generatora istog principa rada indukcijskih strojeva, koji se razlikuje po izvedbi rotora. Rotor kaveznog stroja izrađen je od osovine koja se sastoji od prstenova na početku i kraju, jezgra je izolirana što smanjuje utjecaj induciranih vrtložnih struja sadrži utore, na prstenove koje povezuju početak i kraj su zavarene metalne šipke ubačene u rotorske utore koje svojom konstrukcijom čine oblik kaveza, a vodiči (metalne šipke) najčešće su izrađene od bakra ili aluminija.

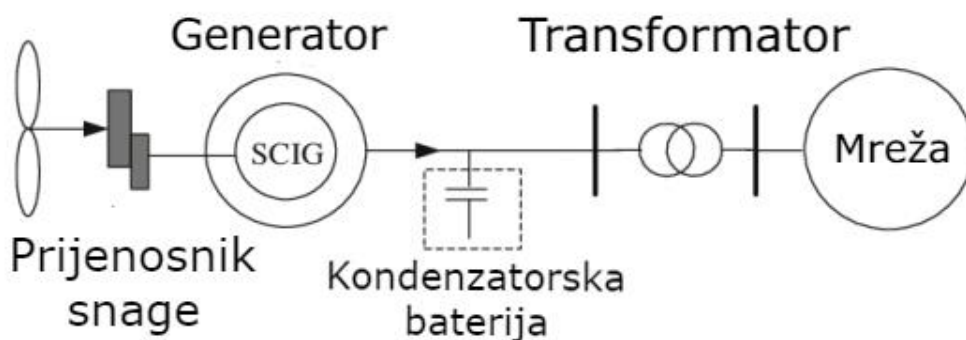
Kavezni stroj je najčešći u optjecaju u vjetroelektranama, hidroelektranama i drugim postrojenjima zbog svoje jednostavnosti i niskih troškova održavanja koje su prednost obzirom na samu efikasnost. Najčešća izvedba stroja je u obliku trofaznog sustava.



Slika 5.2. Opis kaveznog rotora

Kavezni asinkroni generator koristi se u izvedbi pri najčešće konstantnoj brzini vrtnje stoga je na mrežu priključen direktno preko transformatora. Kako ovakva vrsta generatora radi pri fiksnoj brzini pri varijaciji brzine vjetra dolazi do smanjenja učinkovitosti stroja te potreba za modernizacijom dolazi do izražaja.

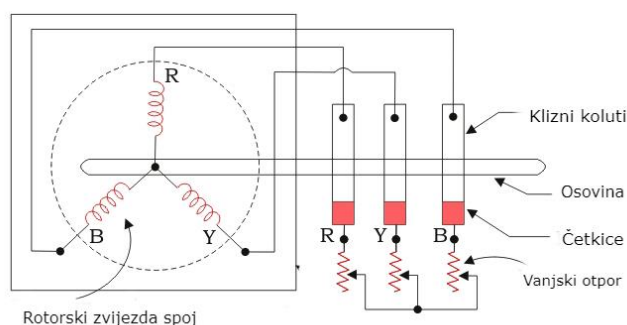
Prva potreba je uvođenje sklopova elektronske energetike, zatim potreba za nadomještanjem jalove snage kod izoliranih sustava pomoću kondenzatorskih baterija koje osiguravaju bolji faktor snage i jalovu energiju, uz to potrebno je spomenuti da je izvođenje ovakvog sklopa potrebno nadomjestiti pomoću mjenjača, odnosno multiplikator.



Slika 5.3. Model turbine korištenjem kaveznog asinkronog generatora

5.1.2. Asinkroni kliznokolutni generator

Kliznokolutni stroj na statorskom dijelu je konstrukcijski jednak asinkronom stroju, razlika je u izvedbi rotora. Rotor je cilindričnog oblika na kojem se nalaze međusobno izolirani višefazni namotaji namotani na lameliranoj osovini, odnosno jezgri. Namotaji su međusobno povezani u spoj zvijezdu(Y) ili spoj trokut (Najčešće korišteni spoje je spoj zvijezda).



Slika 5.4. Shema rotorskog dijela kliznokolutnog stroja

Klizni koluti, to jest prsteni su spojeni na jednu od namotaja rotora na njihovom kraju, te se preko njih izvode van stroja. Četkice su sastavni dio ove vrste stroja, a njihova zadaća je da prenose električnu energiju između rotirajućih i vanjskih komponenti poput otpornika.

Četkice su izrađene tako da prijanjaju na klizne kolute i održavaju čvrst kontakt koji je potreban za nesmetan rad stroja bez prekida toka električne energije. Izrađene su od grafita, ugljičnog materijala. Iako su dobro rješenje, jednostavne i učinkovite, veliki problem predstavlja to što su kratkog vijeka te iziskuju nešto veće održavanje.

Vanjski otpornici povezani preko kliznih koluta koju si promjenjivih vrijednosti. Pomoću njih moguće je upravljati brzinom i momentom radnog stroja. Promjenom brzine ili momenta djeluje sa na klizanje stroja te tako se može smanjiti opterećenost stroja. Tako stroj djeluje pogodno i fleksibilno što je dobro svojstvo kod vjetroturbina.

Klizanje je zaostajanje brzine rotiranja rotora za okretnim magnetskim poljem, a računski se dobiva preko sljedeće formule:

$$s = \frac{ns - n}{ns}$$

(5.1.)

Gdje je :

S - klizanje stroja

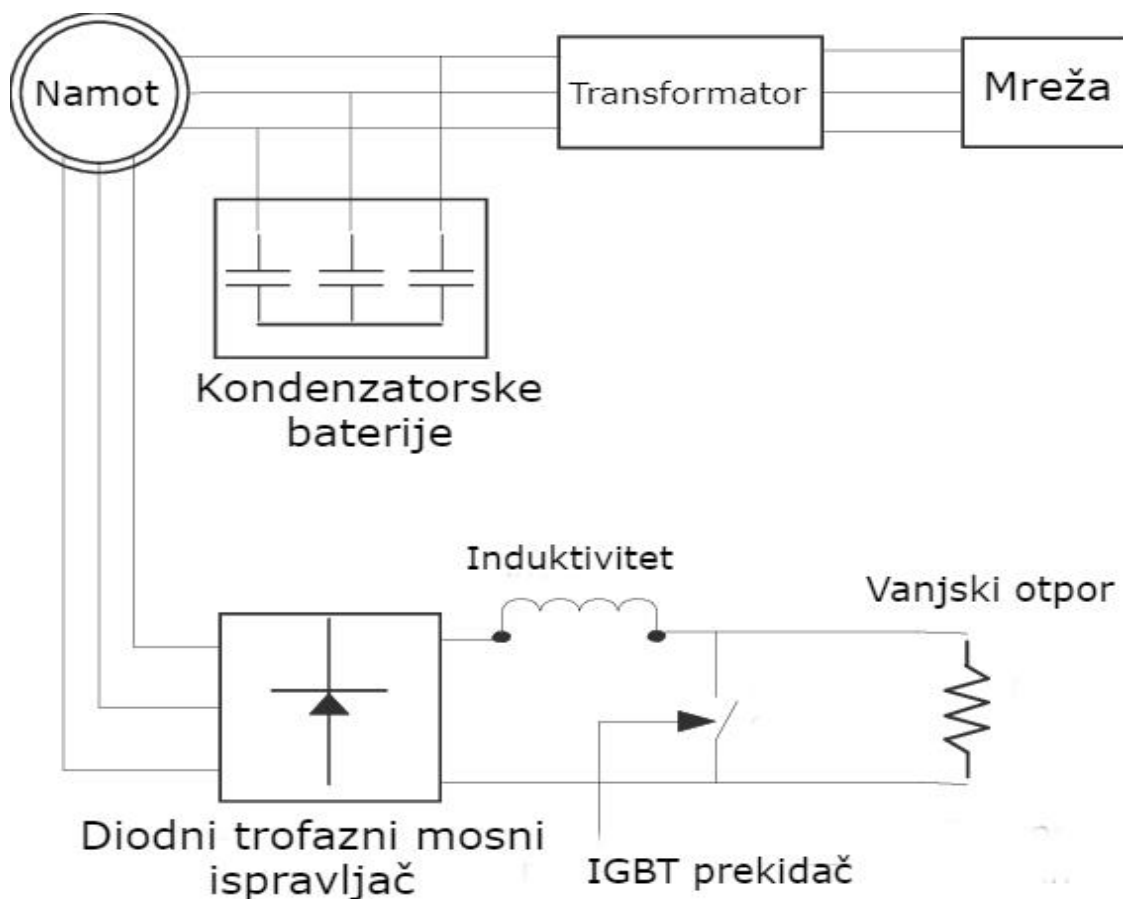
N_s - sinkrona brzina (okr/min)

N - brzina rotora (okr/min)

5.1.3. OptiSlip kliznokolutni asinkroni generator

OptiSlip je koncept modernije vrste generatora koji radi u raznim uvjetima rada. Osmišljen je da radi sa promjenjivim opterećenjima i brzinama vjetra. Promjenjivo klizanje ovog stroja predstavlja prednost u vjetroturbinama jer kod nagle promjene naleta vjetra ima fleksibilnost i tako povećava učinkovitost stroja. Rad se odvija pomoću elektronskih sklopova koji kontroliraju rad stroja i optimiziraju radni proces. Usporedbom ovakve vrste generatora sa ostalima dolazi do izražaja jer pri velikim brzinama vjetra se smanjuju opterećenja i gubitci, te pri malim brzinama vjetra daje veliku učinkovitost i iskoristivost energije.

Na klizanje generatora djeluje se vanjskim rotorskim otporom, odnosno promjenom istog otpora. Kako je klizanje upravljano pomoću elektronskih pretvarača, klizni koluti i četkice nisu potrebne pri konstruiranju stroja. Može se napomenuti da je opseg brzine ograničen u ovisnosti o promjenjivom otporu te otežana je kontrola snage.

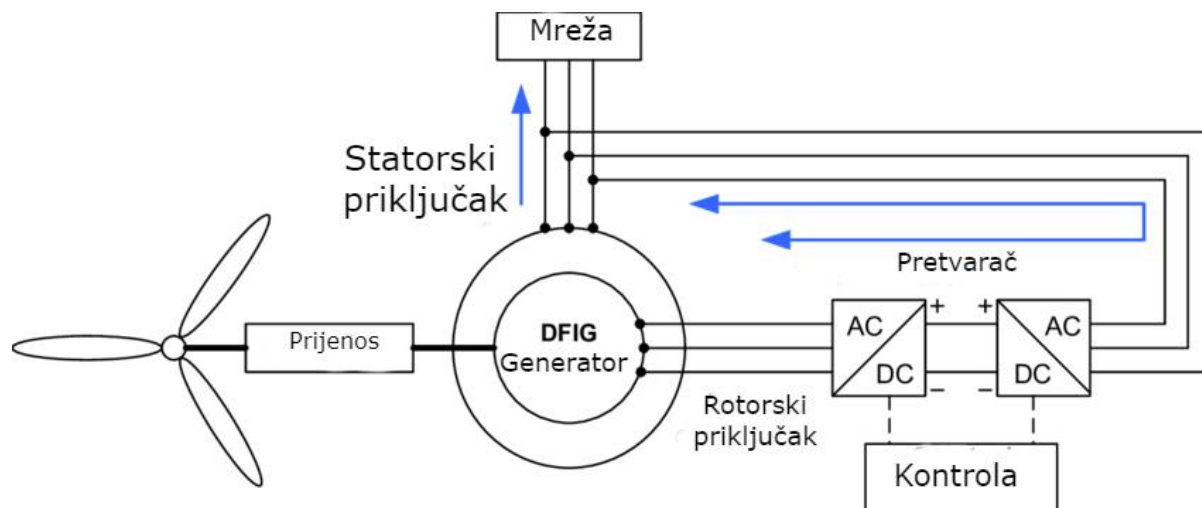


Slika 5.5 Shema optislip sklopa vjetroturbine

5.1.4. Dvostruko napajani asinkroni generator

Dvostruko napajani asinkroni generator je široko rasprostranjen oblik generatora u novijim tipovima vjetroelektrana. Njegova izvedba bazirana je prema kliznokolutnom stroju. Statorski namotaji spojeni su direktno na mrežu, dok je rotorski namotaji su spojeni pomoću IGBT pretvarača snage na naponski izvor. Od te činjenice je stroj dobio naziv dvostruko napajani generator. Preko pretvarača se inducira električna struja u rotoru promjenjive frekvencije, uloga pretvarača je kompenzacija frekvencije između mehaničke i električne u rotoru.

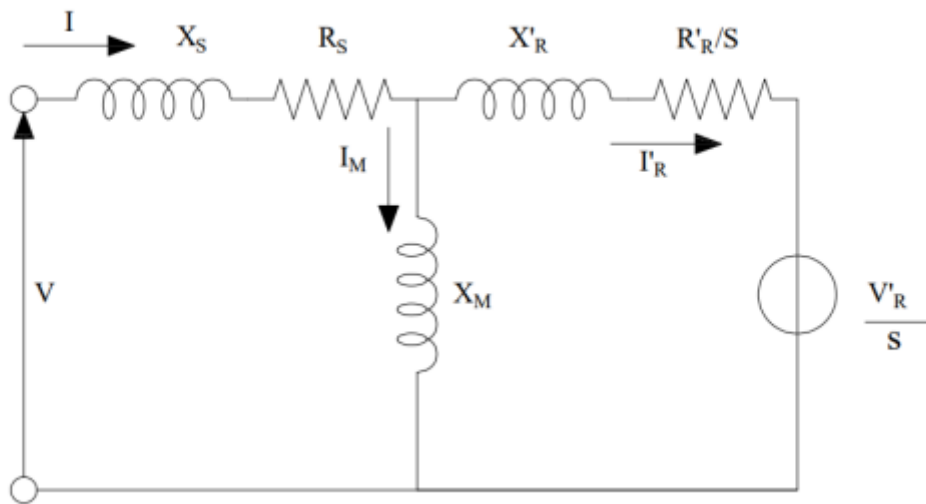
Pretvarač sastoji se od dva međusobno neovisna sklopa. Na rotorskoj strani nalazi se pretvarački sklop koji kontrolira klizanje stroja i brzinu vrtnje rotora, što omogućuje rad na promjenjivim brzinama. Također pomoću struje rotora regulira se aktivna i reaktivna snaga. Na mrežnoj strani nalazi se pretvarački sklop kojem je svrha kontroliranje istosmjernog napona napajanja i omogućavanje rada pretvarača bez reaktivne snage (faktor snage iznosi 1), održava konstantno stabilno napajanje prema mreži.



Slika 5.6. Shema vjetroturbine sa dvostruko napajanim generatorom

Izmjena snage sa stroja mrežom predstavlja ukupan zbroj snage stroja predane preko statorskog dijela i snagu izmijenjenu sa rotorom. Stator uvijek predaje aktivnu snagu mreži. Prednost stroja je ta što je rotor odvojen od mreže, pa se frekvencija regulira. Širi opseg klizanja je pogodan stoga je klizanje u opsegu od 10%-20%, što je optimalnije usporedno sa indukcijskim strojem kojem je klizanje ograničeno na 0% - 2%. Rotorski krug može neovisno proizvoditi ili smanjivati reaktivnu snagu, ovisno potrebi stroja, te time održava kontinuirani napon. Maksimalna snaga kroz pretvarač od ili prema rotoru maksimalno iznosi 25% ukupne izlazne snage generatora što ih čini isplativima.

U slučaju ozbiljnih kvarova na sustavu može doći do kolapsa, može doći do pada napona na mreži. Kada dolazi do nestabilnosti, stroj pokušava nadomjestiti gubitke te mogu poteći jako velike struje kroz rotor i pretvarače. Takve struje mogu ozbiljno termički oštetiti uređaj, pa se pridodaje kontrola elektronskim mehanizmom koji ima odziv od 20 milisekunda i prekida rad stroja.



Slika 5.7. Električna shema dvostruko napajanog stroja.

5.2. Sinkroni generator

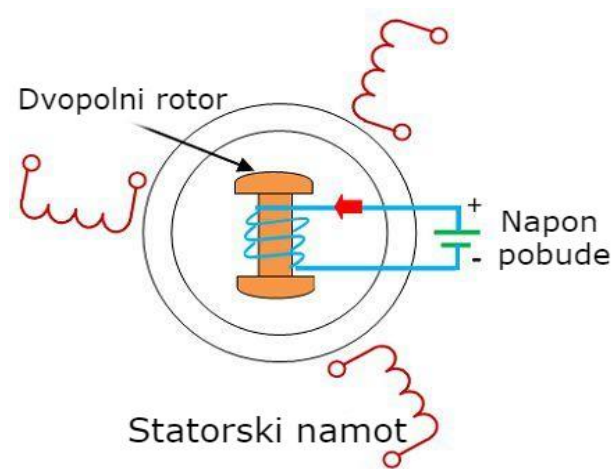
Sinkroni generator je vrsta električnog stroja čija je svrha pretvorba mehaničke energije u električnu. Sinkroni generatori sastoji se od armaturnog i uzbudnog namota. Kod sinkronog generatora brzina vrtnje rotora je jednaka brzini okretnog magnetnog polja, odnosno njihove vrtnje su u sinkronizmu.

Uzбудni namot nalazi se na obodu rotora pri čemu se rotacijom magnetnog polja inducira napon na namotima statora međusobno razmaknutim za 120° (kada govorimo o trofaznom generatoru koji je najčešći). Kod jednofaznog sustava više namota je spojeno u seriju koji tvore jedan krug (dobivamo jedan sinusni val). Armaturni namot nalazi se na statorskom dijelu stroja.

Velika prednost sinkronog generatora u odnosu na asinkroni generator je ta što mu nije potrebna reaktivna struja za magnetiziranje. To je zato što magnetsko polje u sinkronom generatoru može nastati korištenjem permanentnih magneta ili uobičajenih namota.

Sinkroni generatori mogu raditi direktno bez reduktora ako imaju podešeni odgovarajući broj parova polova. Međutim, za maksimalnu kontrolu nad izlaznom snagom, potrebno je koristiti energetske pretvarače prilikom povezivanja na mrežu. Ovaj pretvarač mora biti sposoban pohraniti energiju koja nastaje kod naleta vjetra, čime se smanjuju disperziju snage, te omogućiti kontrolu nad magnetizacijom kako bi se izbjegli problemi prilikom sinkronizacije frekvencije s mrežom. Pretvarač najprije pretvara struju generatora promjenjive frekvencije u istosmjernu struju preko ispravljača, a zatim tu istosmjernu struju pretvara natrag u izmjeničnu struju s frekvencijom koja

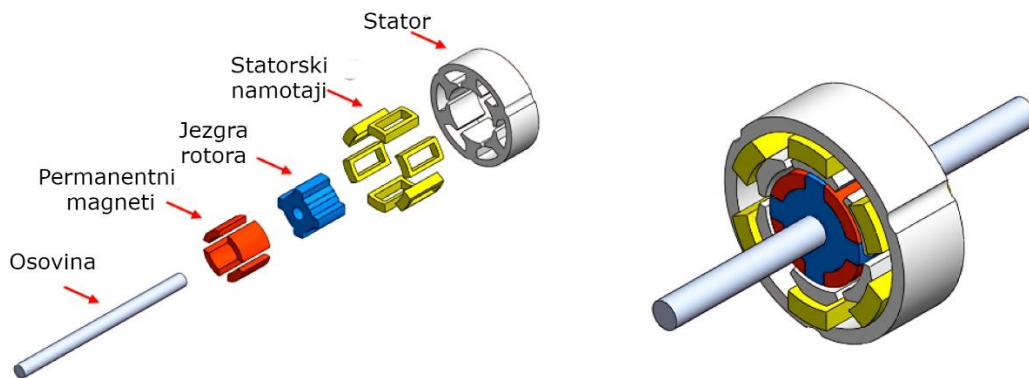
odgovara mreži. U slučaju naponski slabe mreže, sinkroni generator može proizvesti jalovu snagu. Dva najčešća tipa sinkronih generatora koja se koriste u vjetroelektranama su sinkroni generator s namotanim rotorom i sinkroni generator s permanentnim magnetima.



Slika 5.8. Shema sinkrona stroja

5.2.1. Sinkroni generator sa permanentnim magnetom

Sinkroni generator sa permanentnim magnetima je vrsta stroja koja na rotorskom dijelu umjesto klasičnih namotaja koristi permanentne magnete. Kako je rotor napravljen korištenjem magneta, isključuje se potreba za dodatnim napajanjem za stvaranje uzbude jer ovakva vrsta generatora stvara samouzбудu. Uklanjanjem te potrebe povećava se korisnost stroja te radi sa visokim faktorom snage. Permanentni magneti nalaze se na obodu rotora, umetnuti u rotor ili su postavljeni u samu jezgru rotora. Zračni raspor između rotorskog i statorskog dijela maksimalno je reduciran tako da se poveća korisnost, odnosno manjim zračnim rasporom fluks se povećava čime se smanjuju gubici. Također manjim zračnim rasporom utječe se na veličinu magneta jer takva vrsta magneta je cjenovno skupa.



Slika 5.9. Rotor sa permanentnim magnetima

Ovaj generator je pogodan u izradama vjetroturbina zbog svoga svojstva što podržava sustav direktnog pogona kod malih brzina vrtnje, to jest spaja se bez prijenosa snage (reduktora). Više pari istaknutih polova kod ovog tipa stroja omogućuje ovakav način rada u odnosu na druge vrste sinkronih generatora. Uz to je kompetitivan naspram generatora sa namotanim rotorom jer sadrži 60 i više polova.

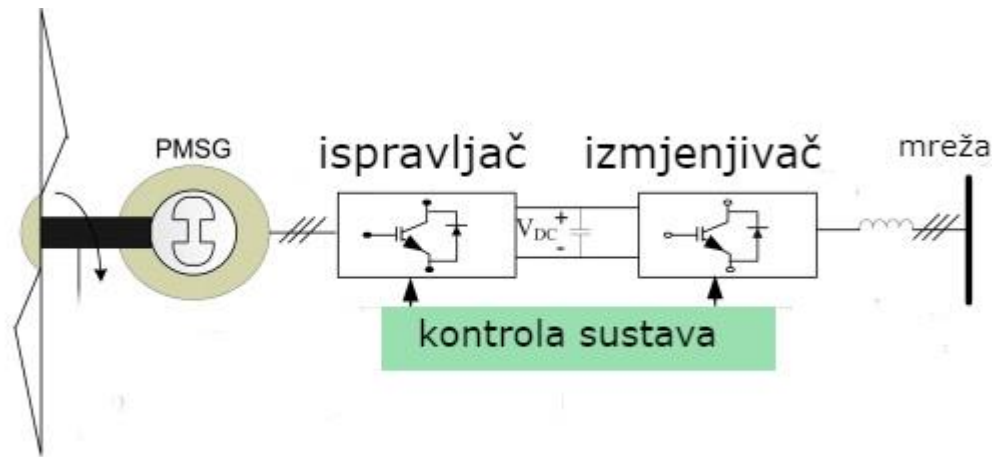
Kako je ovo samouzbudni stroj, potrebno je koristiti pretvarač energije kako bi se izjednačio napon i frekvencija predane energije prema mreži.

Prednosti generatora sa permanentnim magnetima :

- Nema potrebe za vanjskim napajanjem što smanjuje troškove
- Manji gubici pri promjenjivim brzinama vrtnje
- Smanjenje troškova pri dizajniranju i održavanju zbog jednostavnosti sklopa, te dug vijek trajanja stroja.

Nedostaci:

- Jako visoka cijena sirovina magneta, najčešće rijetkih zemljanih magneta.
- Osjetljivost magneta na vrlo visoke temperature, strujne udare i slično što dovodi do oštećenja magneta

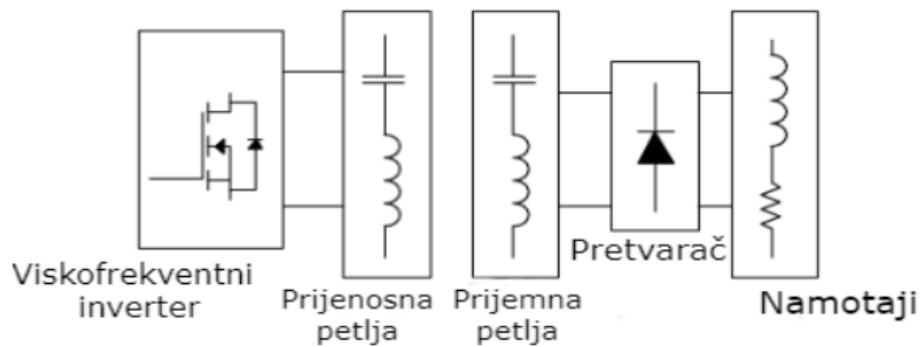


Slika 5.10. Shema turbine sa sinkronim generatorom sa permanentnim magnetima

5.2.2. Sinkroni generator sa klasično namotanim rotorom

Statorski dio izveden je kao u svim sinkronim generatorima, izrađen od višefaznih međusobno izoliranih namotaja (Za češće izmjenične/AC struje) ili samo imati jedan namotaj (slučaj jednofaznog generatora). Uzbudni namotaji su klasično namotani na rotoru. Rotorski krug je preko kliznih prstena i četkica spojen na vanjski izvor napajanja (stroj je napajan istosmjernom strujom) koji je potreban za stvaranje uzbude. Obzirom da je sinkroni stroj, nema pojave klizanja, a time se postiže kontrola proizvodnje električne energije i smanjenje gubitaka proizvodnje. Ona održava konstantnu, odnosno preciznu frekvenciju i napon prema mreži.

Kako bi se pojednostavilo dizajniranje i održavanje ovog stroja, moguće je izvesti zamjenu sklopa četkica i kliznih prstena, odnosno „brushless“ generator. Postiže se tako da se umjesto sklopa kliznih prstena, na rotor dovodi struja preko pomoćnog generatora. Način prijenosa snage je pomoću magnetskog sprega između odašiljanog i prijemnog rezonantnog diska. Za takav način potreban je sklop uređaja koji se sastoji od pet dijelova: napajanje, visokofrekventni inverter, rezonantni disk, diodni pretvarač i sami namoti rotora.



Slika 5.11. sustava bez kliznih prstena i četkica

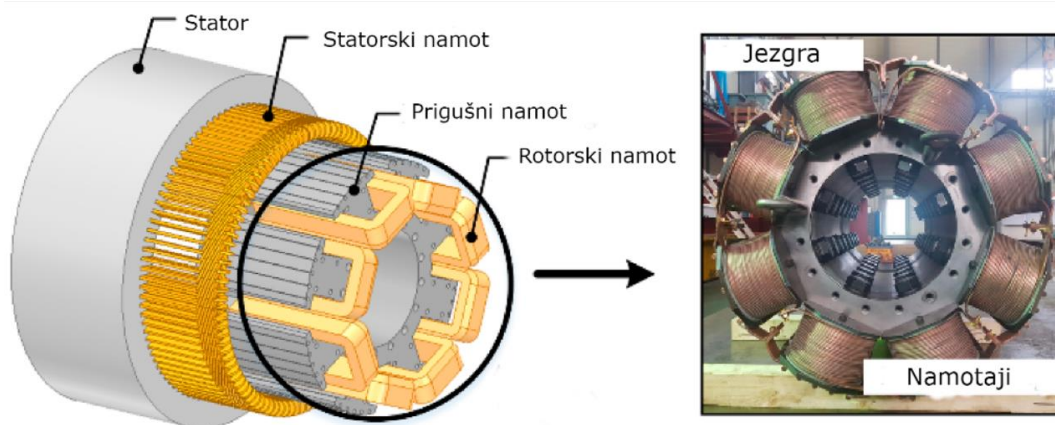
Klasično namotani sinkroni generator u usporedbi sa asinkronim generatorom nema potrebu za kompenzacijom reaktivne snage. Rotorski namotaji generiraju uzбудno polje koje stvara sinkronu brzinu vrtnje koja ovisi o broju pari polova i frekvencijom.

Rotor ovog generatora je mehanički složen i skuplji za izradu uspoređujući sa drugim vrstama generatora. Dodatno, izolirani namotaji na rotoru su, zbog varijacija i nestabilnosti vjetra, stalno izloženi mehaničkim naprezanjima, što skraćuje njegovu dugotrajnost i pouzdanost.

Izvedba turbina korištenjem sinkronog generatora sa klasično namotanim rotorom može biti ili spojen direktno ili korištenjem reduktora. Direktni spoj se također određuje brojem pari polova.

Sinkroni generatori s namotanim rotorom često se koriste u velikim vjetroelektranama zbog njihove sposobnosti za direktan prijenos energije na mrežu s visokom razinom kontrole nad proizvodnjom. Ovi generatori su posebno korisni u offshore (morskim) vjetroelektranama zbog svoje robusnosti i sposobnosti rada u teškim uvjetima. Također, zbog svoje sposobnosti preciznog upravljanja snagom i frekvencijom, idealni su za velike vjetroturbine koje zahtijevaju pouzdanu integraciju s mrežom.

Sinkroni generatori s namotanim rotorom su složeniji od nekih drugih vrsta generatora, što povećava početne troškove i troškove održavanja. Ova složenost uključuje i kompleksan sustav uzbude koji zahtijeva redovno održavanje. Dodatno, klizni prstenovi i četkice koji prenose struju do rotorskih namota su podložni habanju, što također zahtijeva redovito održavanje i povremene zamjene



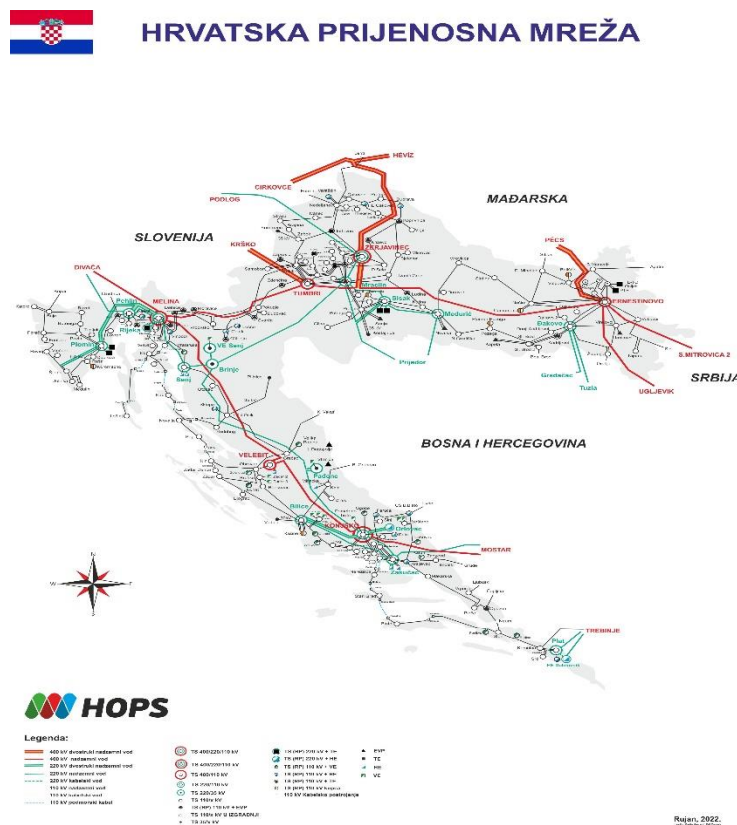
Slika 5.12. Sinkroni generator sa klasično namotanim rotorom

6. PRIKLJUČIVANJE VJETROELEKTRANE NA ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

U ovom poglavlju objašnjenje će većinskim dijelom biti bazirano na priključenju vjetroelektrana na europski energetska sustav, odnosno mreže hrvatske i susjednih zemalja te ostalih europskih zemalja koje zajedno čine sinkronu mrežu kontinentalne Europe.

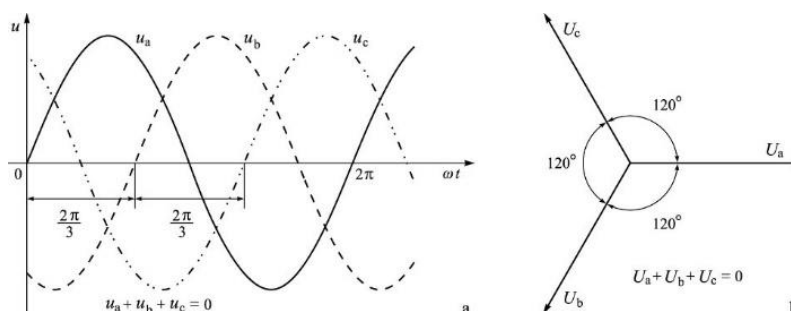
6.1. Analiza elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski sustav (EES) je cjelina koja se sastoji od proizvodnih jedinica (elektrane) i njihovih postrojenja, prijenosnih i distribucijskih energetskih mreža te krajnjih potrošača. Elektroenergetski sustavi nekih država povezani su međusobno što tvori međunarodni elektroenergetski sustav. Svi dijelovi elektroenergetskog sustava povezani su, te pogonska stanja u jednom dijelu sustava imaju utjecaj na neki drugi dio. Rad elektrana svodi se na paralelni pogon koji je jednake frekvencije. Elektroenergetski sustav povezan je sa susjednim državama i drugim članicama ENTSO-a i kompletiraju sinkronu mrežu kontinentalne Europe.



Slika 6.1. Prijenosna mreža Hrvatske (HOPS)

Elektroenergetsku mrežu predstavlja niz povezanih vodova i postrojenja kojima je iznos nazivnog napona jednak, odnosno linijskog napona efektivne vrijednosti. Uloga mreže je kvalitetno i sigurno snabdijevanje korisnika električne energije kao i razmjena. Elektroenergetska mreža dijeli se na prijenosnu i distribucijsku mrežu. Distribucijsku mrežu možemo podijeliti po iznosu napona odnosno na srednje naponsku (SN) i nisko naponsku (NN). Moderni elektroenergetski sustavi prijenosa i distribucije dizajniran je kao izmjenični trofazni sustav sinusnog napona, ili kao specifičan jednofazni izmjenični sustav izveden od trofaznog, frekvencije 50 Hz.



Slika 6.2. Trofazni izmjenični sustav

Elektroenergetske mreže (EEM) definiraju se prema razini nazivnog napona, što je kriterij koji određuje njihovu funkciju i primjenu unutar elektroenergetskog sustava. Podjela prema nazivnom naponu :

- Nisko naponske mreže (NN) nazivnog napona $U_n \leq 1 \text{ kV}$, služe za distribuciju električne energije do krajnjih korisnika
- Srednje naponske mreže (SN) nazivnog napona $1 \text{ kV} \leq U_n \leq 110 \text{ kV}$, služe za prijenos energije između distribucijskih centara i lokalnih mreža
- Visokonaponske mreže (VN) nazivnog napona $110 \text{ kV} \leq U_n \leq 275 \text{ kV}$, služe za prijenos energije na velikim udaljenostima, te povezuju distributivne centre sa proizvodnim sustavima
- Mreže vrlo visokog napona (VVN) nazivnog napona $275 \text{ kV} \leq U_n \leq 400 \text{ kV}$, služe za prijenos na izrazito velikim udaljenostima, kao što su međunarodne veze

Prijenos i distribucija su standardiziranog napona.

- Postojeće stanje: 400 kV – 220 kV – 110 kV – 35 kV – 20 kV – 10 kV – 0,4 kV
- Planirano stanje: 400 kV – 220 kV – 110 kV – 20 kV – 0,4 kV

6.2. Mrežna pravila i uvjeti priključenja

Kako bi se proizvodni pogon priključio prijenosnim mrežama, potrebno je zadovoljiti neka načela koja su definirana nekolicinom zakona. Uvjeti koji su traženi za priključenje zadani su od operatora prijenosnog sustava (HOPS u Republici Hrvatskoj). Pravila su izdana da bi se održavala i kontrolirala sigurnost napajanja, kvaliteta, pouzdanost isporučene energije. Priključenje generatora na mrežu nije dozvoljeno bez suglasnosti operatora. Mrežna pravila definirana su zakonima koja su izdana na službenim stranicama i javna su [34], što je i citirano „Na temelju članka 93. stavka 3. Zakona o tržištu električne energije (»Narodne novine«, broj 111/2021 i 83/2023) te uz suglasnost Hrvatske energetske regulatorne agencije, klasa: 391 – 43/22-01/11; urbroj: 371-06-23-14, od 29. prosinca 2023. godine, Hrvatski operator prijenosnog sustava d.d. je na 129. sjednici Uprave održanoj 9. siječnja 2024. godine donio mrežna pravila prijenosnog sustava“. Pravila koja su određena moraju ih se pridržavati svi korisnici sustava. Priključenje na prijenosnu mrežu je utvrđeno uvjetima koji osiguravaju pouzdano priključenje pogona ili korisnika na mrežu kako bi se izbjeglo negativno povratno djelovanje od korisnika prema mreži i obratno. Prema HOPS-u navedeni su sljedeći načini priključenja:

- Priključak na najbližu transformatorsku stanicu (TS) 110/x kV putem jednostrukog ili dvostrukog dalekovoda od 110 kV.
- Priključak na jedan krak postojećeg dvostrukog dalekovoda 2x110 kV kroz ulaz/izlaz u transformatorskoj stanici 110/x kV na lokaciji objekta.
- Priključak na novi 110 kV mrežni čvor.
- Ulaz/izlaz dalekovoda od 110 kV u transformatorskoj stanici 110/x kV na lokaciji objekta, uz izradu studije utjecaja na elektroenergetski sustav.

Priključenje vjetroelektrane na prijenosni ili distribucijski sustav određuje se prema nazivnoj naponskoj razini mjesta priključenja i kapacitetu vjetroelektrane. Odabir odgovarajuće naponske razine ovisi o veličini vjetroelektrane i stanju okolne mreže. Manje vjetroelektrane, s kapacitetom do oko 10 MW, obično se priključuju na distribucijski sustav (do 35 kV). Veće vjetroelektrane s kapacitetom većim od 20 MW, koje su predmet ovog rada, trebaju biti povezane s prijenosnim sustavom (110 kV i više). U Hrvatskoj se planirani projekti vjetroelektrana kreću između 20 MW i 150 MW, pri čemu većina razmatra priključak na 110 kV mrežu. S obzirom na veličinu i karakteristike hrvatskog elektroenergetskog sustava, posebno u kontekstu regulacije snage i frekvencije, procijenjeno je da trenutno nije moguće integrirati sve vjetroelektrane za koje postoji interes investitora. Trenutni tretman priključaka planiranih vjetroelektrana uzima u obzir

one koje su već izgrađene ili su u izgradnji, s ukupnom snagom oko 574,2 MW (stanje 2017. godine).

Prema navedenim mrežnim pravilima izrađeni su tehnički kriteriji za priključenje na mrežu:

1. Regulacija napona
2. Regulacija frekvencije
3. Radna(djelatna) i jalova snaga
4. Stanje kvara
5. Kvaliteta električne energije
6. Posebni uvjeti za vjetroelektrane

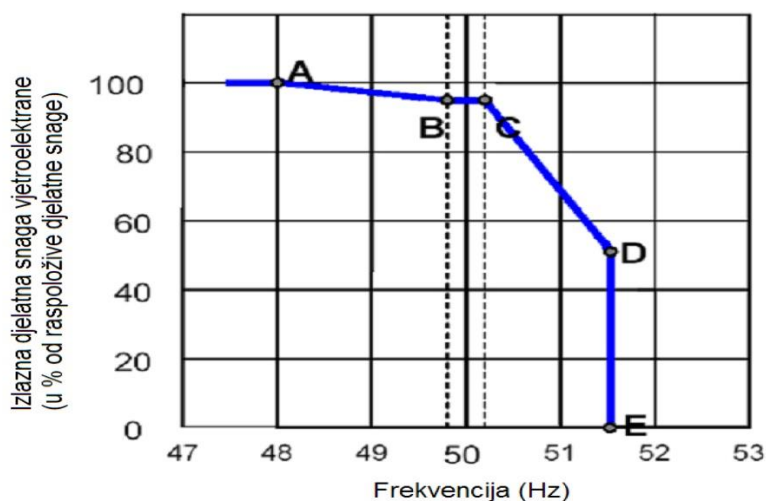
Regulacija napona i njegovo održavanje važna je stavka sustava, pri tome sudjeluju svi članovi sustava(od proizvodnje do korisnika). Zbog toga operator mora imati postrojenje za nadomještanje jalove snage(induktivne i kapacitivne). U normalni pogonskim djelovanjima naponi imaju određena odstupanja, tako je određeno da mreže sljedećih napona imaju određena odstupanja:

- 400 kV, odstupanja su od 360 – 420 kV(-10%,+ 5%). Poremećeni sustav je odstupanja 340-440 kV(-15%,+10%)
- 220 kV, odstupanja su od 198 – 246 kV(-10%,+11.8%). Poremećeni sustav je odstupanja 187-253 kV(+/- 15%)
- 110 kV, odstupanja su od 99 – 123 kV(-10%,+11.8%). Poremećeni sustav je odstupanja 94 – 127 kV(+/- 15%)

Frekvencija mreže nazivno je 50 Hz. Pri normalnim uvjetima pogona ona može varirati u iznosu 49,5 Hz – 50,50 Hz. Zadana frekvencija treba biti održiva tijekom godine u prosjeku 99,5% na svakih 10 sekundi mjerenih intervala. Također frekvencija mora uvijek biti održavana u krajnjim granicama od 47 Hz do 52 Hz. U poremećenim uvjetima rada pogona frekvencija je u granicama 47,5 Hz – 51,5 Hz.

Stanje kvara je slučaj kada se događaju nepovoljni uvjeti na mrežu, a uklapanjem pogona u mrežu djeluje se preko sigurnosnih uređaja za isklapanje. Vrijeme isklapanja se računa od nastanka kvara do kompletnog prekida. Vremena za isklapanje prema pravilniku iznose 80ms za 400 kV, 100 ms za 220 kV i 120 ms za 110 kV. Uzemljenje postrojenja osigurano je preko uzemljenja s faktorom iznosa manje od 1,4. Transformatori su izolirani na strani visokog napona(110 kV naviše) preko spoja zvijezda sa uzemljenim zvjezdištem.

Snaga pogonskog sustava određena je naponom i frekvencijom. Regulacija faktora snage prema kriterijima mora biti u rasponu od 0.85 za induktivnu, te 0.9 za kapacitivnu. Vjetroelektrane i transformatori su induktivna karaktera te troše jalovu snagu koju uzimaju iz mreže ili ga same proizvode.



Slika 6.3. Prikaz izlazne radne snage u ovisnosti frekvencije

Kvaliteta električne energije je najvažnija u mrežnom sustavu. Vjetroelektrane su kao takve dosta nestabilne na sustav zbog načina kojim dobivaju energiju. Kvaliteta napona u prijenosnoj i distribucijskoj mreži tijekom normalnog rada, osim u slučajevima poremećaja, prekida napajanja ili neovlaštenog negativnog utjecaja iz distribucijske mreže, određena je prema normi HRN EN 50160, kako je navedeno u pravilniku. Kvaliteta energija klasificirana je prema tri načela, a to su nesimetričnost sustava, harmonijsko izobličenje i treperenje napona. Nesimetričnost sustava prijenosne mreže je 1,4%, određuje se na 95% deseto minutnih intervala u jednotjednom razdoblju. Harmonijsko izobličenje kod predaje ili preuzimanja energije ograničeno je na 1,5% na 400 kV i 220 kV dijelu, te 3% na 110 kV.

Posebni uvjeti za vjetroelektrane su navedeni u par stavki. Kako proizvodnja ovisi o stanju vjetra mora imati uređaj koji treba zahtijevati frekvencijski odziv koji utječe u regulaciji frekvencije. Mora biti sposobno zadržavati priključak na mrežu kod pada frekvencije koja se odvija vremenski do 0,07 Hz/s, regulirati snagu i faktor snage (cosfi). Komunikacija treba biti učinkovita između komponenti vjetroelektrane i upravljačkog sklopa, i tako imati pravovremenu reakciju. Promjena snage se treba regulirati prema specifikacijama operatora prijenosna sustava. Promjena snage u jednominutnoj i petnaesto minutnoj srednjoj snazi vjetroelektrane ograničene

su na 10% i 50% odobrene snage pro priključenju. Isključenje se događa kada frekvencija prelazi 51,5 Hz, i uključuje se tek uz odobrenje operatora kada se frekvencija dosegne 50,05 Hz.

Prethodni opisi priključenja većinski orijentirani su za elektroenergetsku mrežu koja je iznosa 110 kV.

6.3. Integracija vjetroelektrane u elektroenergetski sustav

Vjetroelektrana da bi proizvedenu energiju plasirala u mrežu, kao što je opisano u prethodim dijelovima, treba osigurati stabilnost mreži i zadovoljiti parametre operatora prijenosnog sustava. Kako se vjetroelektrane dijele po generatorskoj jedinici i pogonu, odnosno upravljanje i regulacija, podijeljene su na: stalna brzina vrtnje, regulirana brzina vrtnje sa ograničenjima, agregat sa potpunom upravljivosti te dvostruko napajani asinkroni generator.

Pri regulaciji parametara u današnje vrijeme najveću ulogu igraju sklopovi energetske elektronike, odnosno upravljivi pretvarači. Primjena pretvarača je također ovisna o izvedbi generatora, gdje se kod npr. dvostruko napajanog generatora brzina regulira pomoću uzbude te nije predviđen. Generatori koji su direktno spojeni na mrežu, regulirani su na frekvenciju potrebnu za predaju u mrežu i predstavljaju slabu iskoristivost. Kod generatora promjenjive brzine vrtnje, potrebno je odvojiti proizvodni napon promjenjive frekvencije sa naponom koji je namijenjen za predaju na mrežu. U uporabi su najčešće frekvencijski pretvarači, uređaj koji služi za promjenu izmjenične veličine napona i frekvencije. Frekvencijski pretvarač dimenzionira se po traženoj snazi i sastoji se od ispravljača, međukruga koji služi kao filter i izmjenjivača.



Slika 6.4. Sklop elektroenergetskog pretvarača u VE

Princip rada pretvarača je sljedeći. Na generatorskoj strani pretvarač izmjeničnu električnu energiju konvertira u istosmjernu i upravljivim pretvaračem regulira energiju koju treba proizvesti (u najvećem slučaju trofazni sustav). Ispravljač je podijeljen na neupravljivi(diodni), upravljivi(tiristorski) koji su bolji jer postoji mogućnost povrata energije. Ispravljački međukrug koji odvaja dva pretvarača je važan dio u oblikovanju amplituda i frekvencije, odnosno zadržava napon stabilnim i filtrira ga i izveden je kao kondenzator (može biti još zavojnica, otpori). Izmjenjivač je sklop za izmjenu frekvencije i napona te izlaz predstavlja spoj na mrežu, zato mora modificirati signale u traženim parametrima i radi na principu pulsno-širinske modulacije (PWM).

Za upuštanje vjetroelektrane treba spomenuti transformator, jer je jednako važan za isporuku energije. Primarni zadatak transformatora je da napon koji je generiran u agregatu podiže na višu naponsku razinu energije unutar elektrane. Zatim se također transformatorom u priključnoj stanici napon podiže na napon prijenosne mreže (110 kV i više).

Međuodnos transformatora i pretvarača je ta da transformator na priključne stezaljke dobiva energiju sa stabilnim i podešenim parametrima sa strane pretvarača i da istu podiže na više naponske razine. Bez pravilne pretvorbe parametara transformator ne bi bio učinkovit i imao bi velike gubitke. Bitno je napomenuti da transformator također služi za „gladenje“ struje i napona, odnosno dokidanje viših harmonika.

7. VJETROELEKTRANE U REPUBLICI HRVATSKOJ

7.1. Razvoj i položaj vjetroelektrana u Hrvatskoj

Razvoj vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj započet je 1988. razvojem prvog vjetroagregata tvrtke Končar, koja je razvoj istoga obustavila. Zatim je 2008. godine postavljen prvi Končarev prototip pušten u rad, lociran nedaleko Dugopolja na Pometenom brdu. Ovim projektom je konkurentnost Hrvatske unaprijeđena jer projekt financiran vlastitim sredstvima i znanjem što pruža kompetentnost hrvatskog poduzeća u projektiranju, izgradnji i puštanju u pogon ovu vrstu obnovljivih izvora energije. Projekt vjetroelektrane Pometeno brdo u prvoj fazi 2011. godine je priključeno sa 6 vjetroagregata, no godinu kasnije je završen cjelokupni projekt koji je kompletiran sa 17,5 MW snage, od kojih su jedan vjetroagregat snage 2,5 MW do je ostalih petnaest iznosa po 1 MW. Naknadno je u pogon pušten još jedan vjetroagregat snage 2,5 MW, te je ukupna snaga vjetroelektrane koja je priključena ukupnih 20MW.



Slika 7.1. Končar Pometeno brdo

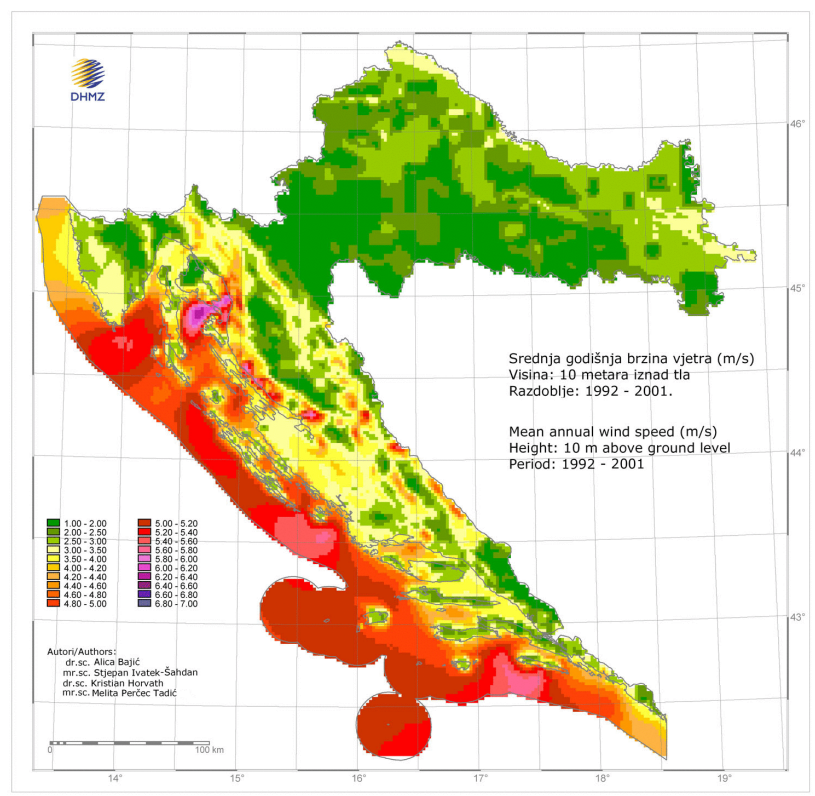
Prva instalirana vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj jest Ravna 1., koja se nalazi na otoku Pagu na predjelu Ravne. Ujedno je prvi projekt HEP-a za komercijalizaciju proizvodnje električne energije putem korištenja energije vjetra, a izgrađena je preko tvrtke Adria Wind Power.

Vjetroelektrana je instalirane proizvodne snage 5,95 MW. Sastoji se od sedam proizvodnih generatora, snage 850 kW po generatorskoj jedinici, tip generatora je Vestas V52.



Slika 7.2. Primjer jedinice Vestas V52

Geografski položaj u Hrvatskoj povoljan je za iskorištavanje energije vjetra. Izbor lokacije vjetroelektrane je određena vjetropotencijalom, karakteristikom vjetra na pojedinim lokacijskim dijelovima. Čimbenici koji sudjeluju od odabiru je vrednovanje makrolokacije pomoću kriterija kao što su veličina prostorne lokacije za postavljanje jedinica, srednja brzina vjetra u rasponu od godine dana, prometna povezanost, utjecaj na okoliš (floru i faunu), udaljenost od postojeće mreže za priključak. Mikrolokacija se uvjetuje iz makrolokacijskih uvjeta, te se provode mjerenja karakteristika vjetra. Kako brzina vjetra, da bi uopće se upogonio rad vjetrogeneratora, mora iznositi više od oko 3 m/s. Pri toj brzini količina proizvedene energije minimalna, te se ona povećava porastom brzine vjetra, a najpovoljnija brzina je od oko 12 m/s, dok je nastupanje nepovoljne brzine vjetra kada premašuje 30 m/s. Postavljenim kriterijima, u Hrvatskoj, najpovoljnija je regija na obalnom i otočnom dijelu gdje je srednja brzina u rasponu 3 m/s – 6 m/s. Najviša brzina ostvaruje se u zimskom periodu sa najviše udara Bure. Bura iako je važan čimbenik proizvodnje energije, zbog svog karaktera i turbulencija iziskuje dodatnu analizu, no pri udarima Bure vjetroelektrana prestaje sa radom zbog mogućnosti oštećenja. Jugo u jadranskom dijelu utječe na povećanje brzine najviše u periodu proljeća i jeseni. U ljetnim mjesecima vrijeme je najstabilnije, no zbog vremena je i brzina vjetra najniža. Prostor oko Velebita je najizraženiji zbog nadmorske visine (na vrhovima planina najveći je energetska potencijal). Sa najmanje vjetra su Lika, Istra te Dubrovačka regija. Prema podacima Državnog hidrometeorološkog zavoda, može se primijetiti da je priobalje znatno povoljnije nego kontinentalna Hrvatska. Većina vjetroelektrana nalazi se u Šibensko-kninskoj, Zadarskoj, Splitsko-dalmatinskoj, Dubrovačko-neretvanskoj i Ličko-senjskoj županiji.



Slika 7.3. Brzine vjetra u Republici Hrvatskoj

7.2. Vjetroelektrane u pogonu

Godine 2024. prema stanju vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj upogonjeno je 25 vjetroelektrana koje su u stalnom pogonu. Stalne vjetroelektrane su instalirane snage 834,15 MW kojima je odobrena priključna snaga iznosa 824,85 MW. Uz vjetroelektrane u stalnom pogonu, pridružene su još 3 vjetroelektrane koje su u pokusnom pogonu (izgradnji) čija instalirana snaga iznosi 326 MW, a snaga priključenja koja je odobrena iznosi 312 MW. Najveći broj vjetroelektrana, uključujući 16 stalnih i 3 u pokusnom radu, povezan je s prijenosnom mrežom (220 kV i 110 kV), dok su ostale spojene na srednjenaponsku distribucijsku mrežu (35, 30 i 10 kV).

Vjetroelektrane u probnom radu prema stanju u Lipnju 2024. godine sljedeće su:

- VE Senj locirana u Ličko-Senjskoj županiji, mjesto Senj, čija instalirana snaga iznosi 156 MW, od kojih je 156 MW odobreno za priključenje na mrežu. Priključak napona je na 220 kV

- VE ZD2P&3P locirana u Zadarskoj županiji, mjesto Benkovac, čija instalirana snaga iznosi 125 MW, od kojih je 111 MW odobreno za priključenje na mrežu. Priključak napona je na 110 kV
- VE Bruvno također locirana u Zadarskoj županiji, mjesto Gračac, čija instalirana snaga iznosi 45 MW, od kojih je 45 MW odobreno za priključenje na mrežu. Priključak napona je na 110 kV

Prema ovim podacima ukupna snaga koja je instalirana je 326 MW, od koji je 312 MW odobreno za priključenje na mrežu.

Vjetroelektrane koje su u stalnom pogonu prikazane su iz Slike 7.4.

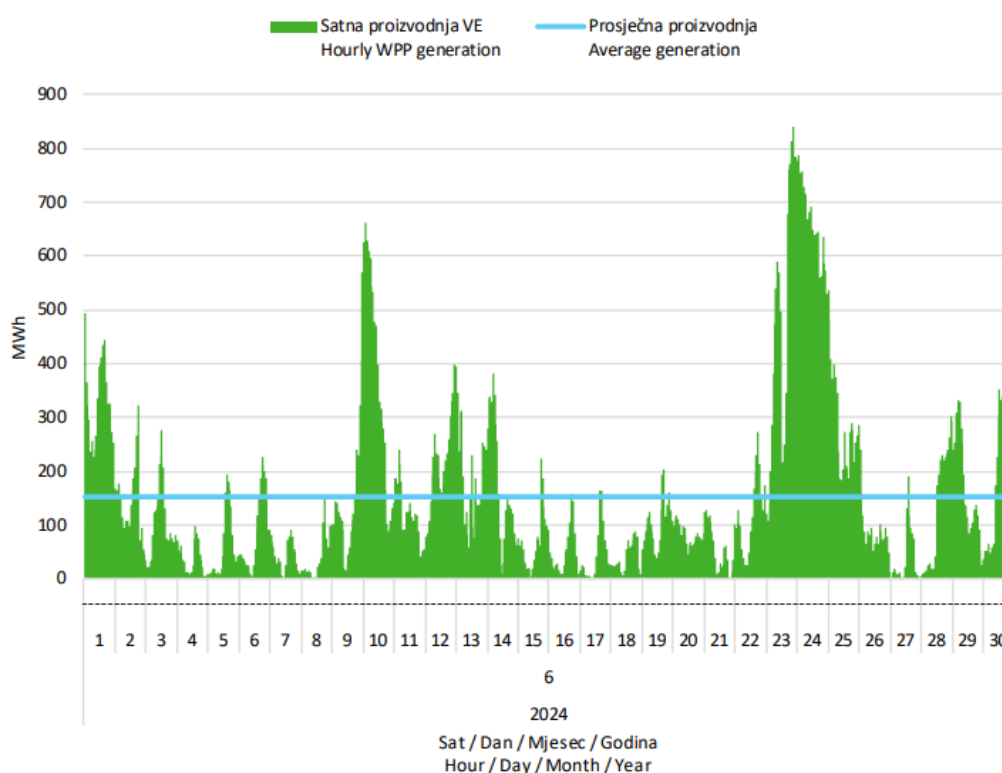
Br No	Naziv VE WPP name	Lokacija (županija/općina) Location (county/municip.)	Ukupna instalirana snaga (MW) Total installed capacity (MW)	Ukupno odobrena snaga priključenja (MW) Total approved connected capacity (MW)	Napon priključenja (kV) Connection voltage (kV)	U redovnom pogonu od In normal operation since
1	Ravne	Zadarska/Pag	5,95	5,95	10	2005
2	Trtar Krtolin	Šib-Knin/Šibenik	11,2	11,2	30	2007
3	Orlice	Šib-Knin/Šibenik	9,6	9,6	30	2009
4	Vrataruša	Lič-Senj/Senj	42	42	110	2010
5	Zadar 6&6P	Zadarska/Gračac	53,4	54	110	2011 / 2017
6	Pometeno Brdo	Split-Dalm/Split	20	20	110	2010 / 2011 / 2012 / 2015
7	Crno Brdo	Šib-Knin/Šibenik	10,5	10	10	2011
8	Bruška	Zadarska/Benkovac, Obrovac	36,8	36	110	2011
9	Ponikve	Dub-Neret/Ston	36,8	34	110	2012
10	Jelinak	Šib-Knin/Marina, Seget	30	30	110	2013
11	Voštane	Split-Dalm/Trilj	42	40	110	2013
12	Zadar4	Zadarska/Benkovac	9,2	9,2	10	2013
13	Velika Glava	Šib-Knin/Drniš, Šibenik, Unešić	43,7	43	110	2014
14	Zelengrad	Zadarska/Obrovac	42	42	110	2014
15	Ogorje	Split-Dalm/Muč	42	44	110	2015
16	Rudine	Dub-Neret/Dubrovačko primorje	34,2	35	110	2015
17	Glunča	Šib-Knin/Šibenik	20,7	22	110	2016
18	Katuni	Split-Dalm/Šestanovac	34,2	39	110	2016
19	Lukovac	Split-Dalm/Cista Provo	48,75	48	110	2018
20	Kom-Orjak-Greda	Split-Dalm/Blato na Cetini	10,25	10	35	2020
21	Jasenice	Zadarska/Jasenice	11,5	10	35	2020
22	Krš Pađene	Šib-Knin/Ervenik	144	142	220	2021
23	Korlat*	Zadarska/Korlat	63	58	110	2021
24	Ljubač	Šib-Knin/Vrbnik	21,6	20	35	2022
25	Ljubač II	Šib-Knin/Vrbnik	10,8	9,9	35	2022

Slika 7.4. Stanje vjetroelektrana(2024.g.) u RH

7.3. Proizvodnja električne energije vjetroelektrana

Za proizvedenu električnu energiju referirat ćemo se prema izvještajima Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS). Kako proizvodnja električne energije ovisi o brzini vjetra, odnosno vremenskim prilikama, tada proizvodnja varira od godišnjeg doba. Tako da pri ovim informacijama bit će referirano pri povoljnim i nepovoljnim razdobljima (Zimski i ljetni period).

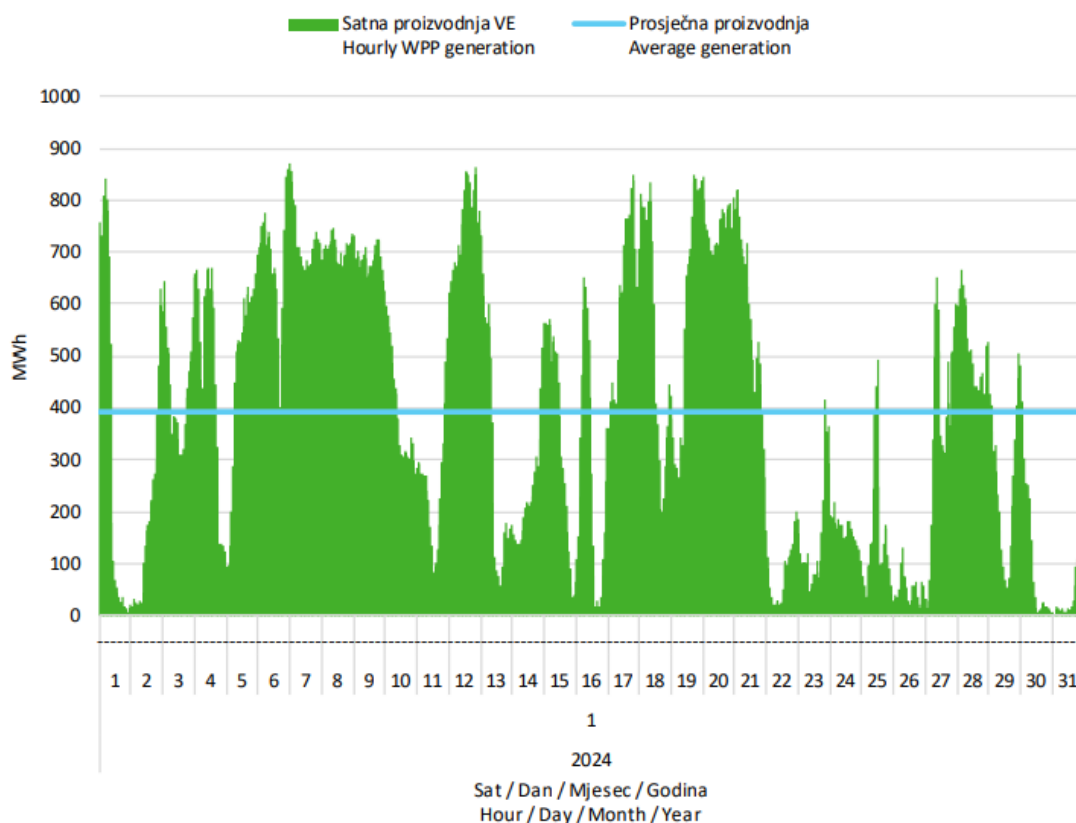
Prema izvještaju (HOPS lipanj) ukupna proizvedena vjetroelektrana za mjesec lipanj 2024. godine iznosi 110723,85 MWh. Ukupna satna proizvodnja svih vjetroelektrana ovog mjeseca varirala je, s najvećom ostvarenom proizvodnjom od 840,19 MWh, koja je zabilježena 23. lipnja 2024. godine u 21 sat, dok je najmanja proizvodnja od 0,28 MWh zabilježena 17. lipnja 2024. godine u 11 sati. Satna proizvodnja veća od 300 MWh postignuta je tijekom 104 sata u lipnju 2024. godine. Prosječna satna proizvodnja svih vjetroelektrana iznosila je 153,78 MWh.



Slika 7.5. Proizvodni dan svih vjetroelektrana, lipanj 2024.

Usporedno navedenom proizvodnjom, prema podacima HOPS-a [siječanj] najviši iznos proizvedene električne energije je u Siječnju. U siječnju 2024. godine, ukupna proizvodnja svih vjetroelektrana bila je 292.039,92 MWh. Najveća satna proizvodnja bila je 871,51 MWh,

zabilježena 6. siječnja 2024. godine u 23 sata, dok je najmanja proizvodnja iznosila 2,5 MWh, ostvarena 31. siječnja 2024. godine u 00 sati. Satna proizvodnja veća od 300 MWh zabilježena je tijekom 424 sata u siječnju 2024. godine, a prosječna satna proizvodnja svih vjetroelektrana iznosila je 392,53 MWh.



Slika 7.6. Proizvodni dan svih vjetroelektrana, siječanj 2024.

8. ZAKLJUČAK

Energija vjetra je spoznat u dalekoj prošlosti gdje se pomoću vjetrenjača pretvarala u drugi oblik energije, odnosno u kinetičku energiju. U današnje vrijeme vjetroelektrane privlače veliku pažnju u proizvodnji električne energije kao obnovljivi izvor energije. Da bi vjetar bio imao veliku iskoristivost bilo je potrebno proučiti fizikalna svojstva vjetra. Kroz povijest vjetroturbine su se značajno mijenjale, gdje je veliki korak napravljen pomoću razvoja elektronike. Samim razvojem vjetroturbina razvijali su se i tipovi električnih generatora te se odabir vrsti temeljio na položajima i iskoristivosti vjetra. Vjetroelektrane su zanimljiv projekt i relativno jednostavan, no najveći problem predstavlja to što vjetar nije konstantnih vrijednost, tako da se mogu manifestirati u raznim smjerovima, brzinama koje su nepovoljne (jako male brzine ili nagli udari vjetra). Vjetroelektrane su velika cjelina i masivne konstrukcije te je potrebno pomno odabrati mjesto na koji se treba instalirati, kao i problem prijevoza i proizvodnja komponenti.

Vjetroelektrane nisu prilagođene za sve lokacije, te su izraženija pojava na priobalju i na samom moru(offshore elektrane) gdje je velika koncentracija promjene mase zraka. Zato se u Republici Hrvatskoj u proteklom razdoblju povećava izgradnja i interes u investiranje izgradnje vjetroelektrana, jer geografski odgovara za zadovoljavajuću količinu proizvodnje. Proizvedena energija vjetra u Hrvatskoj povezana je na europski mrežni sustav, a u RH prijenosnom mrežom upravlja Hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS) te se prema njihovim predstavljanim kriterijima za priključenje na mrežu spajaju elektrane.

U izradi ovog rada svrha je opisati pojednostavljeni prikaz iskorištavanja energije vjetra, od samog početka, opisa komponenti vjetroelektrana, spajanja istih na mrežu te prikazati stanje iskorištavanja energije vjetra u Republici Hrvatskoj.

LITERATURA

- [1] W. Tong, „Fundamentals of wind energy“, s interneta, <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/9781845642051/9781845642051001FU1.pdf> , 30. travnja 2010.
- [2] s interneta, <https://enciklopedija.hr/slike/he/slike/Ruza%20vjet.jpg> , preuzeto 27. svibnja 2024.
- [3] D. A. Krawczyk, A. Rodero, M. Zukowski, T. J. Teleszewski, D. B. Marin, K. Jasiunas, P. Milius, V. Urboniene, J. C. Arrebola, „Buildings 2020+. Energy Sources“, s interneta, https://www.researchgate.net/publication/333699609_Bulidings_2020_Energy_sources , siječanj 2019.
- [4] J.F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, „Wind Energy Explained: Theory, Design and Application; Second Edition“, John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [5] s interneta, https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Wind_turbine_1888_Charles_Brush.jpg , preuzeto 27. svibnja 2024.
- [6] „Harnessing the power of the wind: exploring examples of wind energy“, s interneta, <https://www.sterlingtt.com/2023/06/21/examples-of-wind-energy/> , 21. lipnja 2023.
- [7] s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Gedser_wind_turbine#/media/File:Gedserm%C3%B8llens_vinger.jpg , preuzeto 27. svibnja 2024.
- [8] s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_powerful_wind_turbines . 27. svibnja 2024.
- [9] s interneta, <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd> , 27. svibnja 2024.
- [10] s interneta, https://en.wind-turbine-models.com/getfoto-aPL6t9wRHR2-turbine-siemens-gamesa_sg-14-222-dd-aPL6t9wRHR2.jpg , preuzeto 27. svibnja 2024.
- [11] s interneta, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1809-ge-general-electric-ge-haliade-x-12-mw> , 27. svibnja 2024.
- [12] s interneta, https://en.wind-turbine-models.com/getfoto-3PrJtgKRSWP-turbine-general-electric_haliade-x-21608.jpg , preuzeto 27. svibnja 2024.

- [13] Frangoul A., „MHI Vestas claims industry first as it unveils huge wind turbine“, s interneta, <https://www.cnn.com/2018/09/26/mhi-vestas-claims-industry-first-as-it-unveils-huge-wind-turbine.html> , 26. rujna 2018.
- [14] s interneta, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/14-enercon-e-126-7.580> , 27. svibnja 2024.
- [15] s interneta, https://en.wind-turbine-models.com/getfoto-WPpJtqKosK2-turbine-enercon_e-126.jpg , preuzeto 27. svibnja 2024.
- [16] s interneta, <https://www.nordex-online.com/en/product/n149-4-0-4-5/> , 27. svibnja 2024.
- [17] s interneta, https://en.wind-turbine-models.com/getfoto-3PrJtggntWP-turbine-nordex_n149-4.0-4.5-21810.jpg , preuzeto 27. svibnja 2024.
- [18] s interneta, <https://www.semanticscholar.org/paper/Three-phase-asynchronous-motors-Generalities-and-of/5d43658dbc4bf04b730a432e0592fd32d8fd9921>
- [19] s interneta, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122112000314>, preuzeto 5. lipnja 2024.
- [20] s interneta, <https://www.intechopen.com/chapters/48819>,preuzeto 10. lipnja 2024.
- [21] s interneta, https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-SCIG-system_fig1_258169533, preuzeto 10. lipnja 2024.
- [22] Elektrane i okoliš, autori Danilo Feretić, Željko Tomšić, Dejan Škanata, Nikola Čavlina, Damir Subašić
- [23] Wind power plants(fundamentals, design, construction and operation)- autor R. Gasch, J. Tvele
- [24] s interneta, <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/wind-energy/wind-turbine> , preuzeto 16. lipnja 2024.
- [25] s interneta, https://click2electro.com/forum/industrial-electrical-electronics/slip-ring-induction-motor-construction-advantages-and-disadvantages/#google_vignette , 22. lipnja 2024.
- [26] s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Doubly_fed_electric_machine ,22. lipnja 2024.
- [27] s interneta, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.2631> , 5. srpnja 2024.
- [28] s interneta,<https://www.slideshare.net/slideshow/permanent-magnet-synchronousgenerator/237205835>,16. srpanja 2024.

[29] s interneta,

https://www.researchgate.net/publication/337691352_Design_and_Analysis_of_Brushless_Wound_Field_Synchronous_Machine_With_Electro-Magnetic_Coupling_Resonators, , 20. srpnja 2024.

[30] Pavlica, L. (2021). 'Usporedba generatora u vjetroelektranama', Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, citirano: 9.08.2024

[31] s interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2024_01_10_199.html

[32] s interneta, <https://www.hops.hr/post-file/egyVwkMBzT6hzZLG02TEYK/objava-desetogodisnjeg-plana-razvoja-hrvatske-prijenosne-mreze-2018-2027-s-detajnom-razradom-za-pocetno-trogodisnje-i-jednogodisnje-razdoblje/HOPS2017plan.pdf>, preuzeto 10. kolovoza 2024.

[33] s interneta, <https://www.hops.hr/page-file/50VcX3mTJq64RR6zW5wdZ5/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh/HOPS%20-%20Mjesečni%20izvještaj%20o%20proizvodnji%20VE%20u%20HR%20za%20Lipanj%20%202024.pdf> preuzeto 11. kolovoza 2024

[34] s interneta, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2024_01_10_199.html, preuzeto 18. kolovoza.

[35] s interneta, <https://www.windfarmbop.com/wind-turbine-tower>, preuzeto 13. kolovoza 2024.

[36] s interneta, <https://www.windpowermonthly.com/article/1865157/defects-siemens-gamesa-4x-turbines-cause-partial-shut-down-wind-project>, preuzeto 25. kolovoza 2024.

[37] s interneta, <https://electrek.co/2023/09/18/siemens-gamesas-onshore-wind-turbines>, preuzeto 25. kolovoza 2024.

SAŽETAK

Pri izradi ovog rada svrha je da se približi kompletan proces rada vjetroelektrana. Počevši od same energije vjetra, pa do razrade pojedinih komponenti koje sudjeluju u cijelom procesu. Također ciljano je i istaknuti komponente koje su direktnije povezane sa električnom energijom. Fokusrana je i razrada prema energetske pretvaračima, većim dijelom je opisan odabir generatora (električnih strojeva). Uz proces obrade vjetroelektrana, istaknut je položaj vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj gdje je opisana povijest proizvodnje, odabir položaja te sama usporedba proizvodnje energije prema povoljnim i nepovoljnim uvjetima.

Ključne riječi: vjetar, komponente, generator, sinkroni generator, asinkroni generator, pretvarači, lokacija.

SUMMARY

In the preparation of this paper, the purpose is to bring closer the complete process of operation of wind farms. Starting with the wind energy itself, to the elaboration of individual components that participate in the entire process. It is also aimed at highlighting components that are more directly related to electricity. The elaboration according to energy converters is also focused, for the most part selection of generators (electrical machines) is described. In addition to the process of processing wind farms, the position of wind turbine sin the Republic of Croatia is highlighted, where the history of production, the selection of positions and the comparison of energy production according to favorable and unfavorable conditions are described

Keywords: wind, components, generator, synchronous generator, asynchronous generator, converters, location

