

Pogonska karta vjetroagregata i vjetroelektrane

Petrović, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:190:205339>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad
**POGONSKA KARTA VJETROAGREGATA
I VJETROELEKTRANE**

Rijeka, svibanj 2023.

Ivan Petrović
0069061280

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad
**POGONSKA KARTA VJETROAGREGATA
I VJETROELEKTRANE**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, svibanj 2023.

Ivan Petrović
0069061280

Rijeka, 11. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Elektrane**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Ivan Petrović (0069061280)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Pogonska karta vjetroagregata i vjetroelektrane / Wind power plant capability curve**

Opis zadatka:

Pogonska karta vjetroagregata je dijagram koji definira dopušteno područje rada generatora vjetroagregata s obzirom na radnu i jalovu snagu. Uobičajeno se daje na generatorskom naponu za nazivni napon i eventualno za gornju i donju granicu dopuštenog opsega varijacije napona. Iz tako zadane pogonske karte može se za svaki iznos radne snage očitati maksimalni iznos jalove snage koju generator vjetroagregata može na svojim priključnicama injektirati ili apsorbirati iz mreže. Na temelju podataka pogonske karte za jedan stvarni vjetroagregat i podataka o internoj SN mreži u postrojenju vjetroelektrane te ukupnom borju vjetroagregata, potrebno je odrediti pogonsku vjetroelektrane na mjestu priključka.

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

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

Prof. dr. sc. Viktor Sučić

IZJAVA

Ovom izjavom potvrđujem da je diplomski rad na temu „Pogonska karta vjetroagregata i vjetroelektrane“ moje autorsko djelo koje sam samostalno izradio. Korištena literatura na koju sam se referirao navedena je na popisu literature i citirana u radu. Rad je pisan sukladno Uputama za izradu i samoarhiviranje završnog/diplomskog rada.

Rijeka, svibanj 2023.

Ivan Petrović

ZAHVALA

Na ovom mjestu htio bih izraziti nekoliko riječi zahvale ljudima bez čije pomoći pisanje ovog diplomskog rada ne bi bilo moguće.

Zahvaljujem se profesoru dr. sc. Dubravku Frankoviću na svim smjernicama, savjetima i kritikama prilikom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, posebice roditeljima, na svojoj potpori tijekom dugih godina studija. Posebna zahvala ide djevojci Nikolini za puno strpljenja i podršku, koja je bila i više nego potrebna tijekom svih izazova završnih godina studija.

Sadržaj

1	Uvod.....	5
2	Energija	6
2.1	Neobnovljivi izvori energije.....	8
2.1.1	Fosilna goriva.....	8
2.1.2	Nuklearna goriva.....	9
2.2	Obnovljivi izvori energije.....	9
2.2.1	Biomasa.....	11
2.2.2	Energija vode.....	12
2.2.3	Sunčeva energija	13
2.2.4	Geotermalna energija	13
2.3	Energetika.....	14
2.3.1	Razvoj energetike kroz vrijeme.....	15
2.3.2	Energenti	17
2.3.3	Ekologija i energetika.....	17
3	Vjetar i njegova energija	19
3.1	Definicija vjetra	19
3.2	Povijest korištenja energije vjetra.....	23
3.3	Princip rada vjetroagregata.....	24
3.4	Dijelovi vjetroagregata	28
3.5	Podjele vjetroagregata	30
3.6	Spoj vjetroagregata na elektroenergetsku mrežu.....	32
3.6.1	Generator vjetroagregata	32
3.6.2	Blok-transformator vjetroagregata	34
3.6.3	Regulacija snage vjetroagregata lopaticama	35
3.7	Primjena vjetroagregata u elektroenergetske svrhe	36
3.7.1	Vjetroelektrane u Hrvatskoj	38
4	Pogonska karta vjetroagragata i vjetroelektrane	40

4.1	Konstrukcija pogonske karte vjetroelektrane	45
4.1.1	Elementi vjetroelektrane	45
4.1.2	Proračun tokova snage za različite režime rada vjetroelektrane	46
4.1.3	Pogonska karta vjetroelektrane	48
5	Zaključak.....	51
6	Literatura.....	53
	Sažetak	54
	Summary	55
	Dodatak A	56

Slika 2.1 Prikaz podjele oblika energije	6
Slika 2.2 Rudnik ugljena	8
Slika 2.3 Udio OIE u svjetskoj proizvodnji električne energije [2]	10
Slika 2.4 Električna energija dobivena iz OIE [2]	11
Slika 3.1 Anemometar.....	19
Slika 3.2 Prikaz Blythovog vjetroagregata.....	23
Slika 3.3 Poul la Cour ispred svojih eksperimentalnih vjetroagrgata	24
Slika 3.4 Prikaz djelovanja sila uzgona i sila otpora.....	26
Slika 3.5 Snaga agregata ovisno o brzini vjetra	27
Slika 3.6 Dijelovi vjetroagregata.....	28
Slika 3.7 HAWT i VAWT izvedba vjetroagregata	31
Slika 3.8 Električna energija proizvedena vjetrom u svijetu [7].....	37
Slika 4.1 Fazorski dijagrami.....	40
Slika 4.2 Jedinična kružnica snage.....	41
Slika 4.3 Radna točka i uzbuda	42
Slika 4.4 Ograničenja uzbude.....	42
Slika 4.5 Granice stabilnosti.....	43
Slika 4.6 Ograničenja pogonskog stroja.....	43
Slika 4.7 Primjer pogonske karte generatora	44
Slika 4.8 Primjer pogonske karte vjetroagregata [12].....	44
Slika 4.9 Pogonska karta sinkronog generatora	45
Slika 4.10 Pogonska karta vjetroelektrane	48

Tablica 2.1 Prikaz pretvorbe primarnih oblika energije u korisnu energiju.....	7
Tablica 2.2 Prikaz korisnosti pojedinih uređaja prilikom pretvorba energije	7
Tablica 2.3 Prikaz gustoće energije.....	17
Tablica 3.1 Lokalni vjetrovi u Hrvatskoj	20
Tablica 3.2 Parametri vertikalnog gradijenta brzine vjetra za različite površine [5]	22
Tablica 3.3 Izvedbe generatora kod vjetroagregata	33
Tablica 3.4 Električna energija proizvedena vjetrom 2021. godine po zemljama [8]	37
Tablica 3.5 Instalirana snaga vjetroelektrana po zemljama u 2021. godini [7]	38
Tablica 3.6 Popis VE u Hrvatskoj [9]	39
Tablica 4.1 Tokovi snage na generatoru i na sabirnici VE 110 kV	46
Tablica 4.2 Podaci za izradu pogonske karte	49

1 Uvod

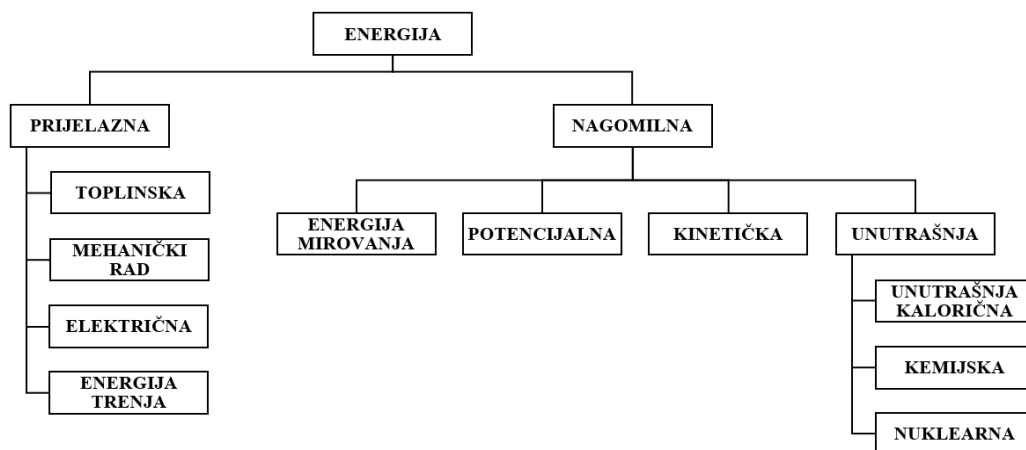
Vjetar se kao izvor energije koristi od davnih vremena. Početci iskorištavanja energije vjetra datiraju iz razdoblja između 5. i 9. stoljeća kada su Perzijanci konstruirali prve vjetrenjače. Primarna upotreba prvih vjetrenjača bila je za pogon mlinova i u svrhu pumpanje vode, a kako je tehnologija vremenom napredovala, širila se i mogućnost upotrebe vjetrenjača. Otkriće električne energije prati početak upotreba vjetrenjača u njenoj proizvodnji. Prva vjetrenjača koja je koristila energiju vjetra za stvaranje električne energije izgrađena je 1887. godine. Od onda do danas proces pretvorbe energije vjetra u električnu energiju se uvelike unaprijedio te je uporaba vjetra kao energenta za proizvodnju električne energije u stalnom porastu. U 2022. godini je u Republici Hrvatskoj u redovnom pogonu bilo 25 vjetroelektrana, s ukupnom instaliranom snagom u iznosu od 834,15 MW koje su proizvele 2.263,1 GWh električne energije. Prednost vjetra kao energenta je u tome što vjetar spada u obnovljive izvore energije, odnosno izvore energije koji imaju neiscrpne resurse. Vjetar je zapravo horizontalno strujanje zraka koje je posljedica razlika tlakova unatoč vremenskim promjenama, reljefnim obilježjima, prirodnim i umjetnim preprekama itd.

Vjetroagregat pomoću svojih lopatica transformira energiju vjetra u mehaničku energiju koja se koristi za okretanje rotora električnog stroja, čime se u njemu generira električna energija. Električni generatori se pomoću blok transformatora povezuju na energetske sustav, a povezivanjem više generatora vjetroagregata u jedan sustav stvara se vjetroelektrana. Svaki generator vjetroagregata ima pripadajuću pogonsku kartu, koja definira dopušteno područje rada generatora vjetroagregata s obzirom na radnu i jalovu snagu. Pogonska karta omogućava da se za svaki iznos radne snage očita maksimalni iznos jalove snage koju generator vjetroagregata može injektirati ili apsorbirati iz mreže.

U ovom radu simulirat će se pogonska karta vjetroelektrane na osnovu pogonske karte vjetroagregata od kojih je ta vjetroelektrana sačinjena. Razlike između pogonske karte vjetroagregata i elektrane posljedica su utjecaja blok transformatora koji se koriste za prilagođavanje izlaznog napona generatora na napon mreže, interne kableske mreže koja povezuje vjetroagregate u cjelinu te mrežnog transformatora koji služi za spoj vjetroelektrane na elektroenergetsku mrežu.

2 Energija

Gotovo je pa i nemoguće navesti neku aktivnost, bilo u Svemiru ili na Zemlji, koja se zbiva, a da za tu aktivnost nije potrebna određena razina energije. U fizici, energija se označuje slovom E te opisuje sposobnost nekog tijela ili sustava da obavlja neki rad. Naime, radi se o veličini koja karakterizira gibanje, mirovanje ili položaj nekog tijela, tekućine, čestice ili sustava čestica te veličina za opis čestica polja koje prenose prirodne sile i međudjelovanja čestica. Prema međunarodnom sustavu mjernih jedinica mjerna jedinica za energiju je džul – J (prema fizičaru Jamesu Prescottu Jouleu.) Sva tijela i sustavi u Svemiru posjeduju neku vrstu energije, pronalazimo je u raznim oblicima u prirodi i tehnici za kojih svih vrijedi zakon o očuvanju energije. Prema zakonu očuvanja energije, energija se ne može stvoriti niti potrošiti, već može samo promijeniti svoj oblik i prelaziti s tijela na tijelo. Energija se pojavljuje u dva osnovna oblika: nagomilana i prijelazna energija. U nagomilani oblik energije spadaju gravitacijska potencijalna energija, kinetička energija, unutarnja energija i energija mirovanja (energija koju ima svako tijelo koje ima masu te koja je jednaka umnošku mase i kvadrata brzine svjetlosti). Prijelazni oblik energije karakterizira kratkotrajnost pojave, odnosno energija se pojavljuje samo onda kada oblik nagomilane energije mijenja oblik ili prelazi s jednog tijela na drugo. U prijelaznu energiju spadaju toplinska energija, električna energija i energija trenja te mehanički rad.



Slika 2.1 Prikaz podjele oblika energije

Gotova sva energija na Zemlji dolazi od Sunca kao glavnog izvora energije.[1] Količina Sunčeve energije koju Zemlja upija u jednom danu, u području gdje živi najveći broj svjetskog stanovništva, iznosi između 3,5 i 7,0 kWh/m². Sunčeva energija pohranjuje se u fosilnim gorivima (ugljen, nafta, plin), drvu, uzrokuje gibanje vode (morske struje, valovi, tokovi) i vjetar. Ostatak energije na Zemlji nalazi se u energiji Zemlje (geotermalna energija) i energiji gravitacije (posljedica gravitacijskih sila koje djeluju između Sunca, Mjeseca i Zemlje).

Energija koja se u svojim oblicima pronalazi u prirodi naziva se primarna ili prirodna energija. Često su ti oblici takvi da se ne mogu neposredno koristiti, već se moraju promijeniti u oblike energije koje možemo koristiti.

Tablica 2.1 Prikaz pretvorbe primarnih oblika energije u korisnu energiju

Primarni oblici energije		Pretvoreno pomoću	Komponenta energetskog sustava	U	Nosilac energije
Neobnovljivi izvori	Ugljen		Pretvoreno pomoću		Postrojenje na fosilna goriva
	Nafta	Rafinerija nafte		Tekuća goriva	
	Prirodni plin	Elektrana na fosilna goriva		Električna energija, mehanička energija, toplinska energija	
	Prirodni uran i torij	Nuklearna elektrana		Električna energija	
Obnovljivi izvori	Sunčeva energija	Fotonaponska ćelija		Električna energija	
	Energija vjetra	Solarni kolektor		Toplinska energija	
	Pad i tok vode, energija plime i oseke	Vjetroelektrana		Električna energija	
	Biomasa	Hidroelektrane, farme valova		Električna energija, mehanička energija	
	Geotermalna energija	Postrojenje na biomasu		Električna energija, toplinska energija	
		Geotermalno postrojenje		Električna energija, toplinska energija	

Tablica 2.2 Prikaz korisnosti pojedinih uređaja prilikom pretvorba energije

Uređaj	Pretvorba energije	Korisnost
električni generator	mehanička u električnu	98%
elektromotor	električna u mehaničku	95%
plinska peć	kemijska u toplinsku	95%
goriva ćelija	kemijska u električnu	50%
parna turbina	toplinska u mehaničku	45%
dizelski motor	toplinska u mehaničku	30%
benzinski motor	toplinska u mehaničku	20%
fotoćelija	radijacijska u električnu	20%
obična žarulja	električna u svjetlosnu	3%

2.1 Neobnovljivi izvori energije

Izvore energije koje ne možemo stvoriti ili ponovno upotrijebiti nazivamo neobnovljivim izvorima energije, u koje spadaju fosilna i nuklearna goriva.

2.1.1 Fosilna goriva

Trenutno glavni izvor energije kojim se civilizacija koristi još od doba Prve industrijske revolucije pa do današnjeg dana, nalazi se u energiji pohranjenoj u fosilnim gorivima. Fosilna goriva svoj naziv dobila su prema svojem podrijetlu te vremenu i načinu nastanka, a njihova starost se broji u stotinama milijuna godina. U skupinu fosilnih goriva spadaju ugljen, nafta i zemni plin, a u njima je pohranjena unutarnja, kemijska energija, koja prelazi u druge korisne oblike energije pomoću procesa izgaranja. Ugljen je najrasprostranjeniji oblik fosilni goriva te su njegove količine najveće. Nalazimo ga uglavnom ispod slojeva stijena i blata te se do njega dolazi iskapanjem u rudnicima. Prva primjena ugljena datira 1000 godina prije nove ere, kada se u Kini koristio za obradu bakra. Značajno povećanu uporabu ugljena dovela je prva industrijska revolucija. Međutim, iako je ugljen nekad bio primarni izvor energije te su njegove zalihe velike i podjednako rasprostranjene po svijetu, primjena ugljena svakim je danom sve manja. Glavni uzrok sve manjeg korištenja ugljena kao energenta je što isti predstavlja najvećeg zagađivača okoliša od svih fosilnih goriva.



Slika 2.2 Rudnik ugljena

Nafta se, za razliku od ugljena, koji je u krutom agregatnom stanju, nalazi u tekućem agregatnom stanju, i to u sitnim pukotinama između stijena. Do nje se dolazi pomoću bušotina koje prolaze kroz debele slojeve stijena, mulja i pijeska. Uporaba nafte počinje 1859. godine u Pensylvaniji gdje je prvi put otkrivena zajedno s načinom njenog dovoda na površinu. Od fosilnih goriva ona je najčešće upotrebljavano gorivo. Prirodni plin, kao što i sam naziv govori, nalazi se u plinovitom agregatnom stanju i to u sklopu nalazišta nafta ili kao posebno nalazište. Uporaba prirodnog plina uvelike se povećala nakon završetka Drugog svjetskog rata kao rezultat napretka

u svojstvima metala te napretka u tehnologiji izrade metala i cijevi, što je doprinijelo mogućnosti izgradnje jeftinijih plinovoda. U današnje vrijeme, kada se svijet okreće čistim obnovljivim izvorima energije, prirodni plin nalazi sve veći porast primjene kao takozvano „tranzicijsko gorivo“ jer je, u odnosu na naftu, prirodni plin puno manji zagađivač okoliša.

2.1.2 Nuklearna goriva

U neobnovljive izvore energije, osim fosilnih goriva, spadaju i energenti koji se koriste za atomsku energiju, bolje poznati kao nuklearna goriva. Nuklearna goriva su goriva koja se sastoje od atomskih jezgri određenih teških kemijskih elemenata koji imaju mogućnost ostvariti nuklearni proces iz kojega se oslobađa energija. Kao nuklearno gorivo najviše se upotrebljavaju uranij ^{235}U , uranij ^{233}U i plutonij ^{239}Pu , a od navedenih jedino se izotop uranija ^{235}U pronalazi u prirodi u većoj koncentraciji od samo tragova. U prirodnom uraniju, udio izotopa uranija ^{235}U čini samo 0,7%. Ostala dva navedena elementa dobivaju se umjetnim putem, odnosno bombardiranjem neutronima. Izvorni kemijski elementi koji se koriste kao nuklearno gorivo uvelike su zastupljeni u Zemljinoj kori te kao takvi predstavljaju veliku energetska rezervu. Do njih se dolazi procesom rudarenja, slično kao i ugljen, ali postoji dodatna opasnost zbog radijacije. Za razliku od ugljena, uranij ima puno veću energetska moć u istoj količini mase, odnosno energija koju dobijemo prilikom potpune fisije 1 kg uranija ^{235}U približno je jednaka energiji koju dobijemo izgaranjem 2,7 milijuna kg ugljena. Značajka koja nuklearnim gorivima daje veliku prednost u odnosu na fosilna goriva je ta da proces kojim se iz nuklearnog goriva dobiva nuklearna energija nema emisije CO_2 , a uz to su i rezerve energije koje su pohranjene u nuklearnim gorivima veće nego rezerve energije pohranjene u fosilnim gorivima. Međutim, proizvodnja nuklearne energije ima i nedostatke poput skladištenja ostataka radioaktivnog nuklearnog goriva te opasnost koju predstavlja mogućnost kvara na reaktoru u kojemu se odvija proces dobivanja energije. Šanse za takvim kvarom su minimalne, ali kako ipak postoje, izazivaju nesigurnost među ljudima, pogotovo onim stanovništvom koje živi u bližoj okolini nuklearnih postrojenja.

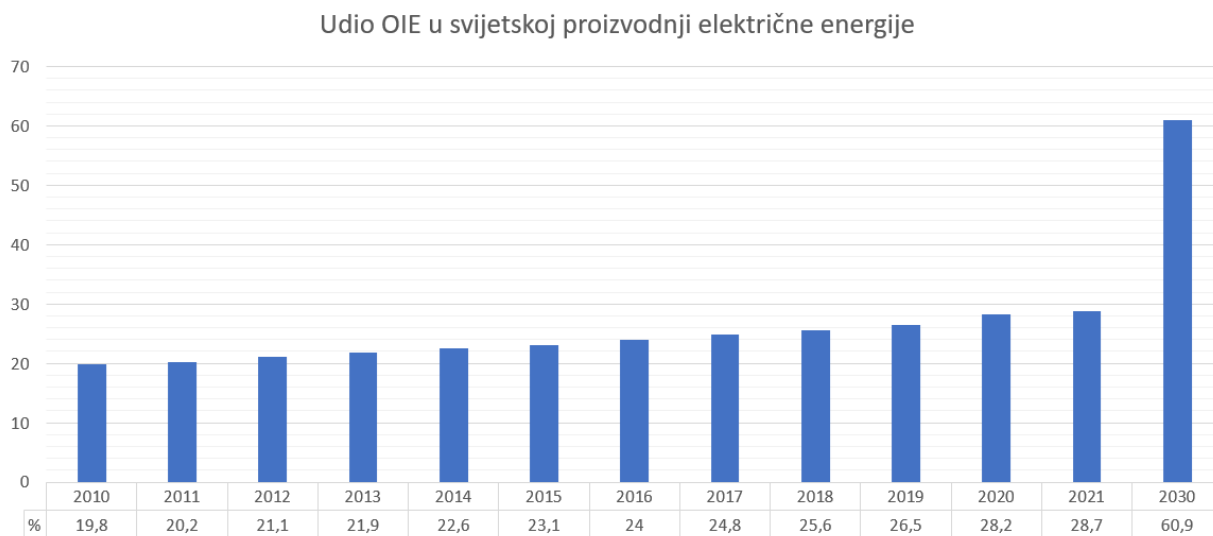
2.2 Obnovljivi izvori energije

Nasuprot od neobnovljivih izvora postoje i obnovljivi izvori energije koji imaju neiscrpane resurse odnosno izvori energije koji se konstantno ili posebnim procesima obnavljaju pa je tako moguće njihovo korištenje bez straha od iscrpljivanja resursa. U hrvatskom Zakonu o energiji, obnovljivi izvori energije se definiraju kao: „izvori energije koji su sačuvani u prirodi i obnavljaju se u cijelosti ili djelomično, posebno energija vodotoka, vjetra, neakumulirana sunčeva energija, biodizel, biomasa, bioplin, geotermalna energija itd.”.

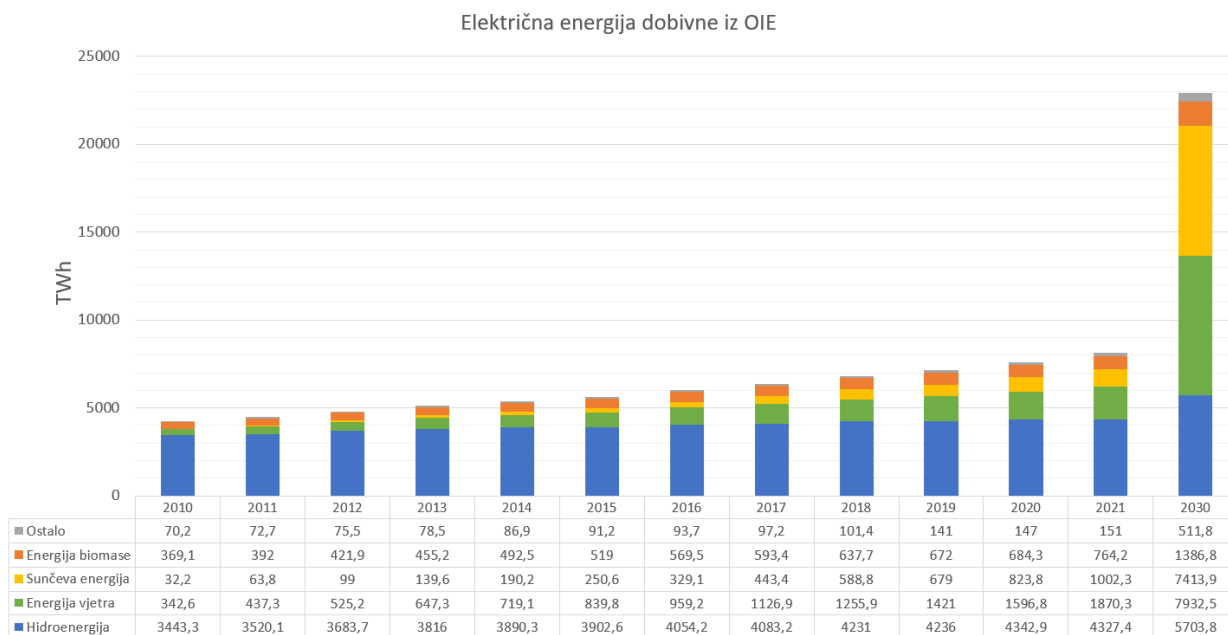
U skupinu obnovljivih izvori energije spadaju:

- kinetička energija vjetra (energija vjetra)
- Sunčeva energija
- biomasa (biogoriva, bioplin)
- geotermalna energija (toplinska energija Zemljine unutrašnjosti i vrući izvori)
- hidroenergija
- potencijalna energija vodotoka (vodne snage)
- potencijalna energija plime i oseke
- potencijalna energija morskih valova
- toplinska energija mora

Osim njihove neiscrpnosti, zajedničko svojstvo obnovljivih izvora energije je da se njihovim korištenjem ne zagađuje okoliš. Kako obnovljivi izvori energije čuvaju okoliš, nazivaju se još i izvorima čiste energije. Sve veći broj svjetskih zemalja, upravo zbog važnog ekološkog čimbenika, okreće svoju energetiku prema obnovljivim izvorima energije. Uvodeći namete na fosilna goriva te tim nametima sufinancirati potporu za izgradnju postrojenja na obnovljive izvore energije jedan je od načina. [2]



Slika 2.3 Udio OIE u svjetskoj proizvodnji električne energije [2]



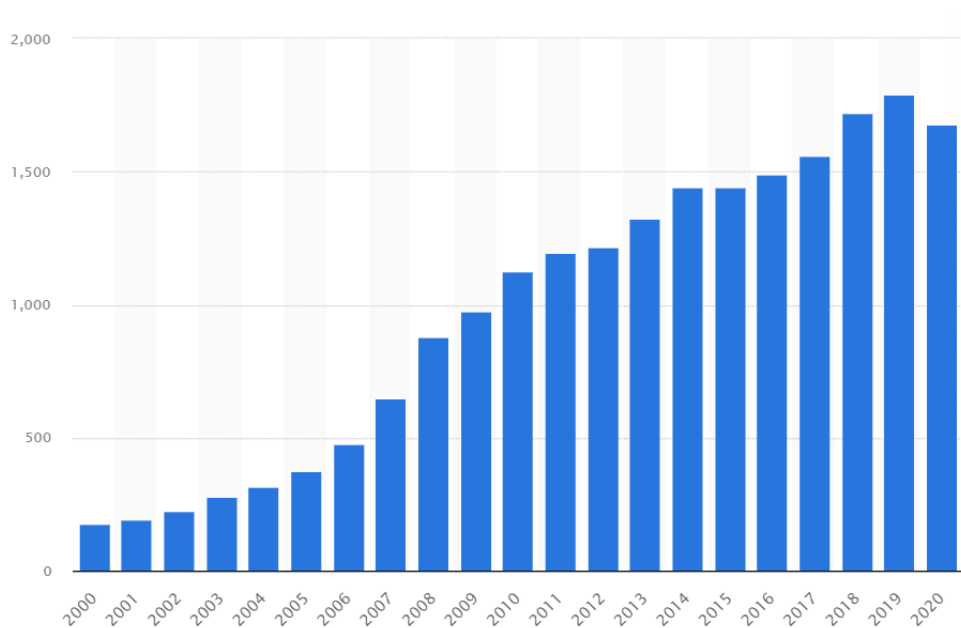
Slika 2.4 Električna energija dobivena iz OIE [2]

2.2.1 Biomasa

Biomasa se može direktno koristiti kao izvor energije, što je vidljivo na jednostavnom primjeru korištenja drva kao goriva za vatru te to ujedno svrstava biomasu kao najstariji čovjeku poznat izvor energije. Pojam biomasa opisuje široki raspon organskih materijala:

- ostaci drvene biomase
- uzgojena drvena i nedrvna biomasa
- ostaci i otpaci iz poljoprivrede
- životinjski otpad i ostaci
- gradski i industrijski otpad.

Osim biomase, kao izvori energije, koriste se biogorivo i bioplin. Pojam energija biomase koristimo prilikom opisa energije koja se oslobađa procesom oksidacije (gorenjem) različitih organskih materijala. Biogorivo je gorivo proizvedeno iz biomase u kratkom vremenskom periodu, za razliku od fosilnih goriva za koja je potreban dug prirodan proces. Biljke te biootpad iz poljoprivrede, domaćinstva i industrije služe za proizvodnju biogoriva. Dva najčešća biogoriva su biodizel i bioetanol. Biodizel se dobiva iz ulja i masti procesom transesterifikacije, a bioetanol je alkohol dobiven fermentacijom, najčešće ugljikohidrata dobivenih iz šećerne trske, kukuruza ili slatkog sirka. Proizvedeni biodizel i bioetanol može se direktno koristiti u motorima s unutarnjim izgaranjem, ali se uobičajeno koristi kao aditiv dizelu ili benzinu kako bi se smanjio broj čestica, ugljikovodika i ugljikovog monoksida otpuštenog iz dizelom pogonjenih vozila, povećanje oktanske vrijednosti i smanjenja emisije štetnih plinova.



Slika 2.3 Godišnja proizvodnja biogoriva u 1000 barela po danu za razdoblje od 2000. do 2020. godine [3]

Pored biogoriva, kao izvor energije iz biomase, postoji i bioplin. Bioplin je plinovito gorivo dobiveno procesima anaerobne razgradnje ili fermentacije organskih tvari kao što su na primjer gnojivo, kanalizacijski mulj i bilo koji drugi biorazgradivi otpad. Sastav bioplina uglavnom tvore ugljikov dioksid i metan. Upravo u bioplinu, kao obnovljivom izvoru energije, leže velike nade za budućnost, a kao jedan od glavnih razloga je velika količina dostupne suhe biomase koja ima stalnu godišnju proizvodnju od oko 2 000 milijardi tona.

2.2.2 Energija vode

Trenutno je najkorišteniji obnovljivi izvor energije. Energija vode ili hidroenergija predstavlja snagu dobivenu iz tekuće vodene mase. U hidroenergiju spadaju energija vodotoka, energija plima i oseke, energija morskih struja i energija morskih valova. Kako je voda široko rasprostranjena preko cijele Zemlje, odnosno kako prekriva 71% ukupne Zemljine površine, ljudi su je koristili od samih početaka. Uporaba hidroenergija datira još u davna vremena kada se energija vode koristila za navodnjavanje i pokretanje različitih mehaničkih strojeva poput vodenica ili pilana, a danas je najzastupljenija u proizvodnji električne energija gdje nalazimo široki raspon snaga elektrana od nekoliko stotina kilowata do nekoliko gigawata. Postoji široki spektar elektrana koje iskorištavaju energiju vode na različite načine. Grupiramo mi ih elektrane koje koriste kopnene vodotoke, koje imaju najširu primjenu, elektrane na morske valove i elektrane na plimu i oseku.

2.2.3 Sunčeva energija

Sunce godišnje, na površinu Zemlje, nakon refleksije koja iznosi otprilike 30% energije, zrači $1,53 \cdot 10^{18}$ kWh što ga čini najvećim izvorom energije na Zemlji. Od ukupne količine Sunčeve energije, 47% se troši na zagrijavanje Zemlje, 23% na isparavanje vode, 0,2% na vjetar i valove te 0,02% na fotosintezu. Spektar Sunčeva zračenja na površinu Zemlje sastoji se od 7% UV zračenja, 47% vidljive svjetlosti i 46% infracrvenog zračenja. Kako je Sunce jaki i konstantni izvor energije, pronalaze se različite metode koje tu Sunčevu energiju pretvaraju u druge oblike korisne energije, najčešće u električnu energiju. Pretvorba energije Sunca u električnu energiju je u zadnjih nekoliko desetaka godina doživjela veliki razvoj. Napredovala je od laboratorijskih postrojenja do današnjih postrojenja koja dosežu i nekoliko stotina megavata snage. Dva su glavna načina dobivanja korisne električne energije iz energije Sunca, fotonaponska konverzija i toplinska pretvorba. U fotonaponskoj konverziji, fotonaponski moduli koriste energiju Sunca kako bi pokrenuli šupljine i elektrone te tako proizveli napon. Fotonaponski moduli se dalje povezuju u željene nizove te se električna energija dobivena iz njih skladišti u baterijske spremnike ili se pomoću izmjenjivača spajaju na elektroenergetsku mrežu, gdje se dobivena električna energija troši. Fotonaponski moduli napravljeni su uglavnom od poluvodiča silicija, u monokristalnom, polikristalnom ili amorfnom obliku. Kod toplinske pretvorbe, Sunčeva energija se prvo pretvara u toplinu, potom se ta toplina u termodinamičkom procesu pretvara u mehaničku energiju koja se na kraju pomoću generatora pretvara u električnu energiju. Sunčana termoelektrana razlikuje se od klasične termoelektrane jedino u načinu dobivanja toplinske energije, gdje se u sunčanim elektranama do topline dolazi tako što se Sunčeva energija koncentrira te tako prelazi u toplinsku za razliku od sagorijevanja fosilnih goriva koje se dešava u klasičnim termoelektranama. Zbog samo te razlike otvorena je mogućnost hibridizacije postrojenja. Oblik pretvorbe Sunčeve energiju u električnu, koji se vrši u sunčanim termoelektranama, ima puno više prednosti u odnosu na fotonaponsku konverziju, ali fotonaponske elektrane zbog svoje jednostavne ugradnje i održavanja te velike mogućnosti prilagodbe bilježe značajniji rast u uporabi. Treći način, tehnologija fotokemijske pretvorbe je još uvijek na laboratorijskoj razini.

2.2.4 Geotermalna energija

Geotermalna energija je zapravo toplinska energija pohranjena u unutrašnjosti Zemlje. Najveći udio geotermalne energije dolazi iz polaganog prirodnog raspada radioaktivnih elemenata (uran, torij i kalij) dok je ostatak produkt trenja prilikom kretanja tektonskih masa i egzoenergijskih kemijskih reakcija. Iako je njena količina ograničena, gledajući sa strane potrebe čovječanstva za energijom ta količina je toliko velika da se smatra neiscrpnom tako da se geotermalna energija svrstava u obnovljive izvore energije. Kako bi bilo moguće korištenje

geotermalne energije mora postojati određena razlika temperature. Tako je za potencijalno korištenje geotermalne energije vrlo bitan toplinski gradijent [K/km] koji nam daje vezu između povišenja temperature i dubine tla. Iskorištavanje geotermalne energije zapravo znači iskorištavanje energije skladištene u toploj vodi i pari te suhim stijinama u unutrašnjosti Zemljine kore, a za postizanje tog iskorištavanja potreban je proces kruženja vode, bio on prirodan ili umjetno stvoren. Proces kruženja vode može se jednostavno objasniti, voda zagrijana u dubljim slojevima Zemlje dolazi na površinu gdje se hladi i ponovno vraća u dubinu na grijanje. Danas su nam zbog tehničko-ekonomskih problema dostupne jedino topla voda i para koje se nalaze u manjim dubinama te se ta geotermalna energija koristi za proizvodnju električne energije, potrebe grijanja te lječilišne i rekreacijske potrebe.

2.3 Energetika

Energija, neovisno o obliku u kojemu se nalazi, je neophodna u svim sferama današnjeg života. Međutim osim o proizvodnji energije, treba brinuti o njenoj racionalnoj potrošnji, ali i o transportu. Kako bismo mogli racionalno koristiti energiju potrebno je pažljivo analizirati mnogo čimbenika, poput tehnoloških i tehničkih, ali i društvenih, ekonomskih i ekoloških. Ti čimbenici pomažu nam u odabiru potrebnih energetske izvora kako bi dobili ekonomski isplativ oblik energije, koji će zadovoljiti potrebe čovječanstva, a uz to neće ugroziti okoliš ekološkim onečišćenjem. Tim složenim područjem upravljanja energijom bavi se energetika. Energetika je znanost koja se bavi energijom, njenim upravljanjem te tehnologijama koje nam omogućavaju uporabu izvora energije. Svojstvo da energija može promijeniti oblik temelj je energetike. Njen zadatak je pružiti potrošačima konstantu opskrbu potrebnom energijom. Energetika kao svoju glavnu jedinicu koristi energetski lanac odnosno energetski sustav. Na energetski sustav možemo gledati kao na mrežu koja se sastoji od izvora energije, spremnika energije i potrošača energije. Te tri jedinice povezuju se prijenosom energije od izvora i/ili spremnik energije preko distribucijskih sustava do potrošača te energije. Primjer jednog energetskog sustava je elektroenergetski sustav koji prenosi električnu energiju iz njenog izvora do krajnjih potrošača koji je potom koriste kao koristan oblik energije.

Imamo ukupno 7 načela energetike, od kojih se 4 odnose na zakone termodinamike, a 3 na ekologiju.

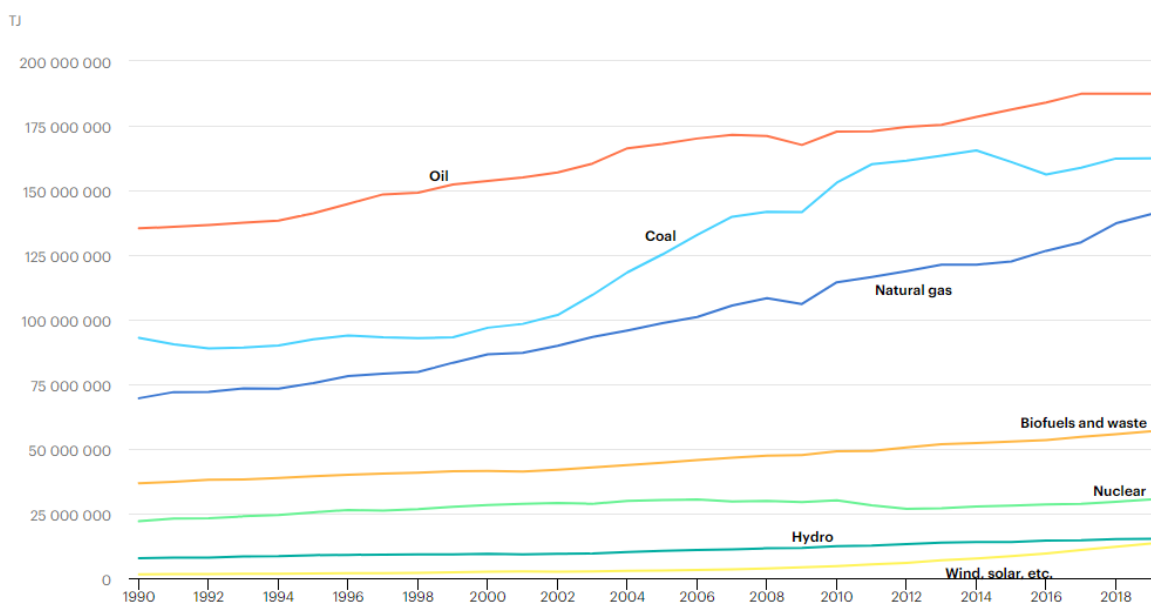
- Nulto načelo energetike – Ako su dva termodinamička sustava A i B u termičkoj ravnoteži, i ako su sustavi B i C u termičkoj ravnoteži, onda su i sustavi A i C u termičkoj ravnoteži.
- Prvo načelo energetike – Povećanje unutarnje energije sustava jednako je količini energije dodanoj u sustav grijanjem umanjen za iznos rada obavljenog između sustava i okoline

- Drugo načelo energetike – Ukupna entropija izoliranog termodinamičkog sustava raste tijekom vremena, približavajući se maksimalnoj vrijednosti
- Treće načelo energetike – Kako se temperatura sustava približava apsolutnoj nuli, svi procesi prestaju i entropija sustava se približava minimalnoj vrijednosti ili nuli za slučaj savršeno kristalne tvari
- Četvrto načelo energetike – Postoji u obliku dviju opcija, prva je opcija da je četvrto načelo energetike isto kao i četvrti zakon termodinamike odnosno Osangerovi recipročni odnosi, a druga je opcija da četvrto načelo pripada ekologiji energetike te da je to načelo maksimalne snage
- Peto načelo energetike – Faktor kvalitete energije povećava se hijerarhijski. Tokovi energije tvore hijerarhijske mreže gdje postoji aktivnost među ulaznim tokovima koji se radom transformiraju u energetske oblike više razine te time doprinose u maksimiziranju snage sustava.
- Šesto načelo energetike – Materijali s većom energijom po masi imaju veću sposobnost recikliranja, odnosno omjer energije i mase nam daje hijerarhijski uzorak ciklusa materijala.

2.3.1 Razvoj energetike kroz vrijeme

Potreba civilizacije za energijom u početku su bile veoma niske. Prvim ljudima je za grijanje bila dovoljna toplina Sunca te slama i drvo iz kojih se toplina dobivala gorenjem. Pri obavljanju mehaničkog rada trošila se snaga u mišićima u ljudskome tijelu ili pak snaga pripitomljenih životinja. U transportu, koristila se snaga konja za vuču zaprega u kopnenom prijevozu ili pak energija vjetra koju su brodovi pomoću svojih jedara koristili u pomorskom prijevozu. Energija vode i vjetra koristila se u prvim mlinovima. Međutim, s vremenom, kako se civilizacija razvijala, rasle su i njene potrebe za energijom. Prvi veliki napredak u korištenju energije događa se sredinom 18. stoljeća, kada su James Watt i Thomas Newcomen izumili i konstruirali prvi parni stroj. Taj izum prvog parnog stroja, koji pomoću toplinske energije dobivene iz ugljena pretvara vodu u vodenu para te potom ta para vrši mehanički rad, pokretač je prve industrijske revolucije. Ugljen je tada dobio veliku važnost u svijetu energetike te je ta važnost prisutna i do dan danas. Slijedeća velika promjena i napredak zbiva se 1876. godine izumom motora s unutarnjim izgaranjem za kojega je zaslužan Nicolaus August Otto. Motor s unutarnjim izgaranjem efikasniji je od parnog motora, a kao pogonsko gorivo koristi benzin. Nedugo zatim, 1893. godine, pojavljuje se još jedan novi motor s unutarnjim izgaranjem, ali ovaj motor kao pogonsko gorivo koristi dizel. Ovi izumi uvelike su doprinijeli razvoju industrije, a upravo je razvoj industrije omogućavao efikasnije iskorištavanje izvora energije. Krajem 19. stoljeća počinje izgradnja i neprestani razvoj

elektrana i elektroenergetskog sustava. S vremenom se grade sve veće i veće elektrane, a zajedno s njima i sve veći prijenosni vodovi pomoću kojih električna energija stiže kako i do urbanih sredina tako i do ruralnih krajeva. Broj korisnika električne energije je svakim danom bio sve veći i veći, a količina potrošene električne energije se udvostručivala svakih 10 godina. Tehnološki razvoj omogućavao je sve manje troškove proizvodnje i prijenosa električne energije tako da je energetska učinkovitost pala u drugi plan. Krajem drugog svjetskog rata pojavio se novi izvor energije, nuklearna energija. Njezina prva uporaba nije bila u svrhu boljitka čovječanstva, do toga se trebalo pričekati do 1954. godine kada je u Obninsku u tadašnjem SSSR-u puštena u pogon prva nuklearna elektrana. Iako je bilo dostupno više različitih izvora energije, svjetska energetika uvelike se oslanjala na fosilna goriva na što je utjecala lakoća korištenja i transporta te niske cijene ugljena i nafte. Naftne krize koje su se dogodile 1973. i 1979. godine uzdrmale su svjetsku energetiku i uvelike utjecale na cijenu. Nedugo zatim dogodile su se i katastrofe u nuklearnim elektranama, započevši sa nesrećom 1979. u elektrani Three Mile Island u Pennsylvaiji te nesrećom 1986. u Memorijalnoj elektrani Vladimir Iljič Lenjin u Pripjatu, koja spada u jednu od najvećih nesreća u povijesti čovječanstva. Od tada je energetika u konstantnom razvoju i potrazi za novim, učinkovitijim, sigurnijim i ekološki prihvatljivijim oblicima energije među koje spadaju i obnovljivi izvori energije poput energije vjetra i energije sunca, čiji porast zastupljenosti raste iz godine u godinu. Na slici 2.4 prikazana je količina energije proizvedena iz pojedinih primarnih izvora energija tijekom godina.



Slika 2.4 Prikaz količine energije dobiven iz pojedinih primarnih izvora energije [4]

2.3.2 Energenti

Od početka prve industrijske revolucije pa do unazad 40-tak godina, ugljen je kao fosilno gorivo bio vodeći korišteni primarni izvor energije. U novo, moderno vrijeme, njegova se uporaba smanjuje, ali je i danas na drugom mjestu u opskrbi primarnim izvorima energije. Nafta se kao primarni izvor energije počinje upotrebljavati 1860-tih godina te je od onda njezina uporaba u stalnom porastu što je čini današnjim najvećim korištenim izvorom primarne energije. Prirodni plin, kao treće fosilno gorivo, zauzima treće mjesto u poretku korištenih primarnih izvora energije te je i njegova primjena u stalnom porastu. Porast korištenja prirodnog plina proizlazi iz njegovog povoljnijeg utjecaja na okoliš, odnosno njegove puno manje emisije CO₂ u usporedbi sa ugljenom i naftom. Mnogo postrojenja koja su u prošlosti koristila ugljen kao energent, danas su modernizirana i kao energent koriste prirodni plin. Nakon prva tri mjesta koja uvjerljivo drže fosilna goriva, dolazimo do obnovljivih izvora energije. Trenutno se na četvrtom mjestu nalaze biogoriva i bio otpad, dok su na petome mjestu nuklearni izvori energije koji trenutno bilježe lagani pad. Energija vode je na šestome mjestu, sa vrlo malim promjenama u količini korištenja tokom godina dok su na posljednjem mjestu energija sunca i energija vjetra. Energija sunca i energija vjetra su relativno novi primarni izvori energije, no kako se s vremenom razvija nova i poboljšana tehnologija za njihovu uporabu tako i njihovo korištenje vrlo brzo raste. Upravo se u obnovljivim izvorima energije vidi budućnost opskrbe energijom, dok će se uporaba fosilnih goriva pokušati sve više i više smanjiti.

Tablica 2.3 Prikaz gustoće energije

Izvor energije	Gustoća energije [MJ/kg]	Izvor energije	Gustoća energije [MJ/kg]
mc ²	9*10 ¹⁰	drvo	14
fuzija vodika	3*10 ⁸	tekući vodik + kisik	13
fisija urana	8*10 ⁷	kućni otpad	4
vodik	143	TNT	4
prirodni plin	54	LiSOC12 baterija	2
dizelsko gorivo	46	Li-ionska baterija	0,6
biodizel	42	Zn-zrak baterija	0,6
etanol	30	NiCd baterija	0,2
metanol	20	voda na 100m visine	0,001
šećer	17	lignit	16

2.3.3 Ekologija i energetika

U zadnje vrijeme, ekološki aspekt zauzima sve veći značaj. Razlog tome je znanstveni i stručni konsenzus koji govori o tome kako je sve izraženiji problem globalnog zatopljenja upravo direktni negativni rezultat sve većega ispuštanja i akumuliranja stakleničkih plinova u Zemljinoj atmosferi. Staklenički plinovi su plinovi koji otežavaju prolazak dugovalnog toplinskog zračenja iz atmosfere planeta. Među stakleničke plinove ubrajaju se vodena para (H₂O), ugljikov dioksid (CO₂), metan

(CH₄), ozon (O₃), freon R12 i dr. Zbog tog razloga, toplinsko zračenje ostaje u atmosferi i omogućuje temperaturu ugodnu za život na Zemlji, odnosno podiže prosječnu temperaturu Zemlje za približno 33°C, sa -18°C na 15°C. Međutim, staklenički plinovi u prevelikoj količini, upravo zbog tog nepropuštanja zagrijavanja, imaju i negativne posljedice koje dovode do prevelikog podizanja prosječne temperature odnosno globalnog zatopljenja koje sa sobom donosi brojne neželjene efekte poput globalne promjene klime, otapanje ledenjaka i snježnih pokrivača, podizanja razine mora, pojave sušnih razdoblja itd. Svi ti efekti za sobom povlače veliki broj posljedica. Upravo fosilna goriva svojim korištenjem, odnosno u najčešćem slučaju izgaranjem, koje datira još od 18. stoljeća i od onda je u stalnom porastu, u Zemljinu atmosferu otpuštaju razne štetne i opasne plinove poput ugljičnog monoksida CO, ugljičnog dioksida CO₂, sumpornog dioksida SO₂ i dr. koji nepovoljno utječu na okoliš. Procjenjuje se da se godišnje, izgaranjem fosilnih goriva, u Zemljinu atmosferu otpušta oko 34 milijardi tona stakleničkog plina ugljikovog monoksida. Zbog ekoloških razloga, trenutna količina korištenja fosilnih goriva nije prihvatljiva jer nas vodi ka neodrživosti i drastičnim posljedicama na Zemlju koje bi mogle rezultirati prestankom života kakvog znamo. To je razlog zbog kojega se sve veći broj država svijeta okreće ka obnovljivim izvorima energije kao glavnim pokretačima novo energetske politike na putu prema čistoj i održivoj energiji. Kyoto protokol usvojen je 11.12.1997. godine, a stupio je na snagu 16.02.2005. godine. Do danas je to jedini međunarodni sporazum koji ima obvezujuće ciljeve u vidu smanjenja emisije stakleničkih plinova. Potpisnici sporazuma su industrijalizirane zemlje i zemlje u tranziciji koje su se obvezale smanjiti emisiju stakleničkih plinova sukladno dogovorenim ciljevima. Ukupni broj zemalja potpisnica je 192. Protokol od potpisnica zahtijeva jedino da prihvate mjere, prate promjene mjerenjem te o tim promjenama podnose periodička izvješća. Kao prvi cilj Kyoto protokola postavljeno je smanjenje emisije stakleničkih plinova za minimalno 5% u odnosu na 1990. godinu, u razdoblju od 2008. do 2012. godine. Mehanizmi pomoću kojih se dolazi do postavljenog cilja Kyoto protokola su trgovanje emisijama između strana potpisnica protokola, zajednička implementacija te mehanizam čistog razvoja sa strankama koje nisu potpisale protokol. Nakon isteka prvog razdoblja, 08.12.2012. u Dohi je usvojen Amandman u Dohi, kao dopuna Kyoto protokola. Amandman u Dohi odnosi se na novi vremenski period, od 2013. do 2020. godine, a do dana 15.06.2022. potpisale su ga 147 zemlje potpisnice, čime je prijedjen prag od minimalno 144 zemlje potpisnice. Ciljevi Amandmana u Dohi su smanjenje emisije stakleničkih plinova za minimalno 18% u odnosu na 1990. godinu. Ciljevi Europske unije koji povezuju energiju i ekologiju su smanjenje emisije stakleničkih plinova za 40% u odnosu na 1990. godinu, povećanje udjela energije dobivene iz obnovljivih izvora na 32%, poboljšanje energetske učinkovitosti za 32,5% te međusobno povezivanje barem 15% elektroenergetskog sustava Europske unije. Navedeni ciljevi planiraju se ostvariti do 2030. godine.

3 Vjetar i njegova energija

3.1 Definicija vjetra

Zrak je smjesa različitih plinova (gdje najviše prevladavaju dušik i kisik) koji se ponašaju kao fluid. To znači da se čestice zraka gibaju iz jednog mjesta prema drugome, odnosno s područja višeg tlaka prema području nižeg tlaka. Time dolazimo do definicije vjetra, koja govori da je vjetar zapravo pretežno horizontalno gibanje neke količine zraka (ili drugih plinova) od mjesta višeg tlaka prema mjestu nižeg tlaka. Do razlike u tlakovima dolazi zbog različite gustoće zraka, a razlika gustoće zraka posljedica je različitih temperatura zraka. Što je zrak topliji, to mu je gustoća manja. Razlika u temperaturi zraka proizlazi iz nejednolikog zagrijavanja različitih lokacija na Zemlji Sunčevim zračenjem, što zbog razlika u reljefu, promjene dana i noći, vremenskih uvjeta (naoblaka, kiša...). Energija vjetra tako zapravo dolazi od energije Sunca, odnosno 1-2% energije koju Sunce zrači prema Zemlji se pretvara u energiju vjetra. Sunce grije zrak, što dovodi do toga da se topli i rjeđi zrak diže uvis i tvori područje niskog tlaka, a hladni zrak je gušći te se spušta prema površini Zemlje i tvori područje niskog tlaka. Strujanje odnosno mijenjanje toplog i rjeđeg zraka koji se diže uvis sa hladnim i gušćim zrakom zove se konvekcija, a ta energija se naziva konvekcijskom strujom te predstavlja energiju vjetra. Kako Sunce stalno zrači i grije Zemlju, konvekcija se pojavljuje stalno, a njezin intenzitet ovisi ponajviše o razlici tlakova koji ju je uzrokovao. Glavne odrednice vjetra su njegov smjer (strana svijeta odakle vjetar puše) i njegova brzina tako da vjetar zapravo možemo promatrati kao vektor. Smjer vjetra određuje se vjetrokazom, a sprava za mjerenje brzine vjetra zove se anemometar. I smjer i brzina vjetra se učestalo mijenjaju na nekoj lokaciji te je zbog toga potrebno izvršiti prikupljanje podataka o njihovim veličinama, kako bi mogli što bolje procijeniti energetske potencijal vjetra na određenoj lokaciji. Preciznost procjene je veća što je rezolucija podataka veća te što je vremenski period skupljanja podataka duži. Prikupljeni podatci prikazuju se pomoću ruže vjetrova iz koje se može pročitati udio i prosječna brzina vjetra za različiti smjer vjetra.



Slika 3.1 Anemometar

Vjetrove možemo, po lokaciji na kojoj pušu, razlikovati na globalne ili lokalne, a po njihovoj brzini i smjeru, razlikovati na stalne ili promjenjive. U globalne vjetrove spadaju pasati, zapadni vjetrovi i polarni istočni vjetrovi. Pasate karakterizira smjer puhanja prema ekvatoru, a djeluju na obje Zemljine polutke u pojasu od 0° do 30° geografske širine. Kao posljedica Coriolisove sile, pasati skreću udesno na sjevernoj polutki te stoga imaju jugozapadni smjer, a na južnoj polutki skreću ulijevo te stoga imaju sjeveroistočni smjer. Coriolisova sila je inercijska sila koja u rotirajućim sustavima djeluje na sve čestice koje se gibaju pod nekim kutom u odnosu na taj sustav. Njezin smjer je okomit na brzinu gibanja sustava, odnosno na rotacijsku os. Ovisna je o brzini i masi čestica koje se gibaju unutar sustava te o kutnoj brzini sustava. Kako je Zemlja rotirajući sustav, Coriolisova sila djeluje na sva gibanja u njenim oceanima i njenoj atmosferi. Djelovanje sile na ekvatoru jednako je nuli te raste dok ne stigne polove gdje je najveće. Na sjevernoj polutki Zemlje, sila ima smjer djelovanja udesno dok je na južnoj polutki Zemlje smjer djelovanja ulijevo. Zapadne vjetrove karakterizira smjer puhanja od ekvatora prema polu, a djeluju na obje Zemljine polutke u pojasu od 30° do 60° geografske širine. I oni, kao i pasati, zbog Coriolisove sile skreću udesno na sjevernoj polutki i ulijevo na južnoj polutki. Polarne istočne vjetrove karakterizira smjer puhanja od polove prema ekvatoru, a djeluju na obje Zemljine polutke u pojasu od 60° do 90° geografske širine. Lokalni vjetrovi se stvaraju djelovanjem reljefnih karakteristika poput planina, vodenih površina, vegetacije, ali i djelovanjem dnevnog hlađenja i zagrijavanje Zemlje. Upravo zbog toga, lokalni vjetrovi imaju mogućnost puhanja iz različitih smjerova. Za područje Hrvatske među lokalne vjetrove se ubrajaju:

Tablica 3.1 Lokalni vjetrovi u Hrvatskoj

Naziv vjetra:	Smjer:	Karakteristika
tramontana	sjever	hladan i suh vjetar, puše s planina prema more, sličan buri, ali stabilniji i slabiji
burin	sjever - sjeveroistok	puše danju s mora na kopno, a noću s kopna na more
bura	sjeveroistok	hladan, suh i jak vjetar, puše s planina prema moru, najjači vjetar na Jadranu
levant	istok	hladan i vlažan vjetar
jugo	jugoistok	topli i vlažni vjetar stabilne brzine, prati ga loše 0vrijeme, a na može stvarati velike valove na moru
oštro	jug	topli i vlažni vjetar, kratkotrajan, ali može dosegnuti veliku jakost
lebić	jugozapad	topli i vlažni vjetar, nastaje nakon juga, može stvarati velike valove uz obalu
maestral	sjeverozapad	vlažni ljetni vjetar umjerene jačine, puše samo uz obalu i prati ga lijepo vrijeme

Jedan od primjera utjecaja reljefa na stvaranje lokalnog vjetra je primjer kojem možemo svjedočiti u Jadranskom priobalju. Kako se more i kopno zagrijavaju i hlade različitim intenzitetom, odnosno kopno se brže hladi i grije od mora. Razlika u temperaturi stvara i razliku u tlakovima tj. danju je kopno toplije od more te je time nad kopnom područje nižeg tlaka u odnosu na more te dolazi do stvaranja vjetra koji puše s mora prema kopnu. Noću je more, zbog sporijeg hlađenja, toplije od kopna te se tada nad morem nalazi područje nižeg tlaka zbog kojeg vjetar puše s kopna prema moru. Slični primjer nastanka lokalnog vjetra može se vidjeti i u kopnenoj Hrvatskoj, gdje se vjetar stvara između nizina i planina, zbog razlika u temperaturi zraka odnosno njegovom tlaku, kao i na primjeru mora i kopna. Reljef, osim svojim razlikama u zagrijavanju i hlađenju različitih površina odnosno razlici tlaka između tih površina, utječe na jačinu vjetra i svojom konfiguracijom, vegetacijom i preprekama, bile one prirodne ili umjetne. Te značajke imaju isti utjecaj na vjetar kao što ga trenje ima na neku silu. Što je površina zemlje hrapavija odnosno što ima više prepreka i vegetacije, vjetar će sporije puhati te će dolaziti do pojave turbulencija. Turbulencija označava vrtložno i nepravilno gibanje koje uzrokuje smanjenje brzine gibanja čestica. Primjer stvaranja turbulencija kao posljedica reljefnih karakteristika može se primijetiti na liticama. Vjetar, dolaskom na liticu, zbog nagle promjene nagiba stvara vrtložna gibanja odnosno turbulencije koje smanjuju brzinu vjetra. Suprotno tome, dolaskom vjetra na blago zaobljeno brdo ne stvaraju se nikakve turbulencije te čak padina brda stvara efekt ubrzanja vjetra. Osim litice ili šume kao prirodne prepreke, razne ljudske građevine poput grada i motova se mogu ponašati kao umjetne prepreke i stvarati turbulencije te tako zbog nastanka vrloga i nepravilnog strujanja vjetra u različitim smjerovima smanjiti mogućnost njegove iskorištavanja njegove energije. Uz samu kopnenu površinu, upravo zbog trenja odnosno hrapavosti površine, nema gibanja vjetra, a njegova brzina raste udaljavanjem od hrapave površine. Primjer glatke površine koja povoljno utječe na brzinu i smjer puhanja vjetra su jezera i mora. Iako pri većim brzinama vjetra dolazi do stvaranja valova odnosno povećanja trenja vjetra s površinom te nepravilnosti su male i djeluju samo uz vodenu površinu. Daljnjim povećanjem visine iznad vodene površine vjetar ne mijenja značajno svoju brzinu te postoje povoljni uvjeti za iskorištavanje njegove energije. Brzina vjetra (v) na nekoj određenoj visini (z) od tla izračunava se eksponencijalnim ili logaritamskim zakonima koji uključuju koeficijent hrapavosti površine (α) te rezultate meteoroloških mjerenja brzine (v_r) na standardnoj visini (z_r) koja iznosi 10 metara od tla.

Vertikalni gradijent brzine vjetra v eksponencijalnim postupkom prikazuje se kao:

$$v = v_r \cdot \left(\frac{z - z_0}{z_r} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

Vertikalni gradijent brzine vjetra u logaritamskim postupkom prikazuje se kao:

$$v = v_r \cdot \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}} \quad (3.2)$$

Tablica 3.2 Parametri vertikalnog gradijenta brzine vjetra za različite površine [5]

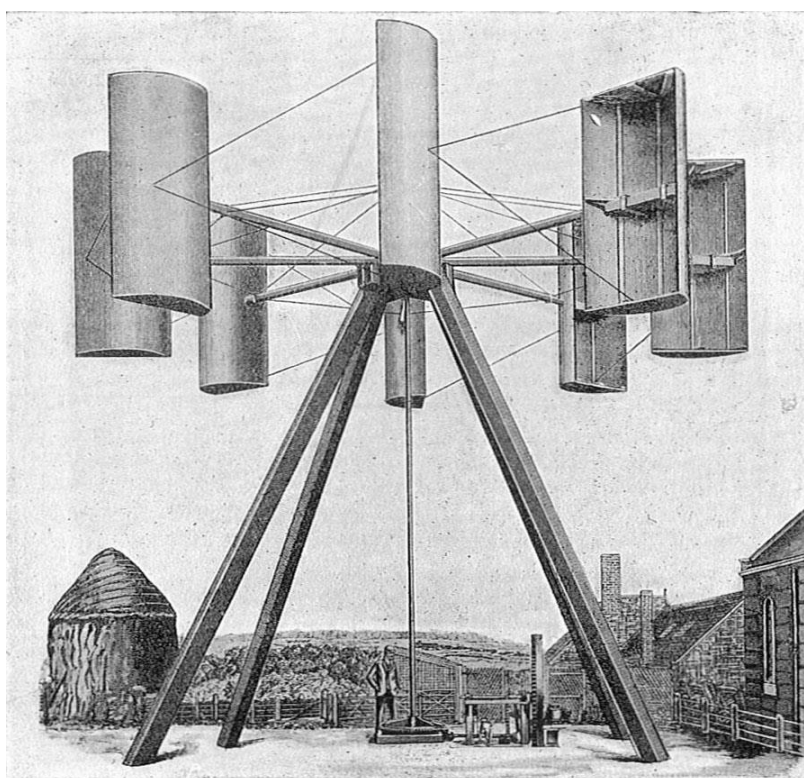
Opis površine	Skupina hrapavosti	Visina hrapavosti z_0 [m]	Koeficijent hrapavosti površine α
Vodena ploha	0	0,0002	0,01
Potpuno otvorena ploha s glatkom površinom (npr. avionska pista, pokošena trava)	0,5	0,0024	-
Otvorena poljoprivredna zemljišta bez ograda, živica, sa jako udaljenim zgradama	1	0,03	0,12
Poljoprivredna zemljišta s pojedinim zgradama i 8 m visokim drvoredom udaljenim oko 1250 m	1,5	0,055	-
Poljoprivredna zemljišta s pojedinim zgradama i 8 m visokim drvoredom udaljenim oko 500 m	2	0,1	0,16
Poljoprivredna zemljišta s pojedinim zgradama i 8 m visokim drvoredom udaljenim oko 250 m	2,5	0,05	-
Sela, manji gradovi, poljoprivredna zemljišta s puno zgrada ili drvoreda, šumom i vrlo neravnim i grubim terenom	3	0,4	0,28
Veći gradovi s visokim zgradama	3,5	0,8	-
Vrlo veliki gradovi s visokim zgradama i neboderima	4	1,6	-

Do brzina vjetra na određenim visinama dolazi se računskim putem jer bi meteorološko mjerenje za velike visine iziskivalo veliki financijski trošak. Međutim, računskim postupkom dolazimo do približnih, ali dovoljno preciznih rezultata samo kada je u pitanju jednolik teren uz prisustvo stabilnih atmosferskih uvjeta. Ako na terenu postoje razne reljefne karakteristike poput prije spomenutih litica ili više različitih tipova vegetacije te raznih drugih prirodnih i umjetnih prepreka, izračun zbog različitih faktora hrapavosti nije precizan. Preciznost također opada ako vladaju promjenjivi atmosferski uvjeti. Proučavanjem povezanosti trajanja brzine vjetra sa

visinom na kojoj vjetar puše dobivaju se rezultati koji nam govore da vjetrovi većih brzina duže traju na većim visinama, a vjetrovi manjih brzina duže traju na nižim visinama. Time dolazimo do zaključka da je prilikom iskorištavanja energije vjetra, kao što to na primjer rade vjetroagregati, količina dobivene energije veća što je visina na kojoj se pretvorba energije vrši viša. Na višim visinama veća je dostupnost energije vjetra, a na primjeru vjetroagregata veće visine omogućavaju i veću duljinu lopatica vjetroagregata čime se povećava njegova izlazna snaga.

3.2 Povijest korištenja energije vjetra

Počeci čovječanstva u iskorištavanju energije vjetra za obavljanje mehaničkog rada datiraju između 5. i 9. stoljeća nove ere kada su Perzijanci konstruirali prve vjetrenjače, odnosno mlinove pogonjene vjetrom. Prve vjetrenjače imale su vertikalnu os zbog jednostavnije izvedbe te male pravokutne lopatice s jedrima. Osim mlinova, energija vjetra iskorištavala se i za pumpanje vode. Krajem 12. stoljeća dolazi do široke primjene vjetrenjača s horizontalnom osi, pogotovo u sjeverozapadnoj Europi. Veliki broj tih vjetrenjača postoje i danas te služe kao povijesne znamenitosti. Otkrićem električne energije počinje istraživanje o kombiniranju energije vjetra i električne energije, odnosno korištenje energije vjetra za proizvodnju električne energije. Prva vjetrenjača koja je pretvarala energiju vjetra u električnu energiju izgrađena je 1887. godine od strane škotskog profesora Jamesa Blytha, bila je visoka 10 m te je svojom proizvodnjom električnom energijom služila za osvjetljavanje vikendice.



Slika 3.2 Prikaz Blythovog vjetroagregata

Do velikog napretka dolazi 1891. godine kada se danski znanstvenik Poul la Cour prvi koristi pravilima aerodinamike te zaključuje da je rotor s manje lopatica koji se brže vrti, korisniji od rotora s više lopatica koji se sporije vrti. To dovodi do značajnog smanjenja broja lopatica od kojih je sastavljen rotor, a tim novim rotorom i vjetroagregatom Poul la Cour je srednjoj školi omogućio napajanje za proizvodnju vodika te za rasvjetu. Osim toga, Poul la Cour je razvio i regulator koji je omogućio stabilniju izlaznu električnu snagu čime je došlo do mogućnosti šire primjene. Francuski inženjer Georges Jean Marie Darrieus je u 1931. godini napravio prvi patent vjetroagregata s vertikalnom osi. Za razliku od vjetroagregata s horizontalnom osi, izvedba vjetroagregat s vertikalnom osi omogućuje iskorištavanje vjetrova iz svih smjerova bez potrebe za sustavom zakretanja. Osim toga, oprema generatora se može zajedno s mjenjačkom kutijom postaviti na razinu zemlje, za razliku od vjetroagregata gdje se sve nalazi na vrhu tornja. Iako se krajem Drugog Svjetskog rata Danskom proširili vjetroagregati snage 25 kW, zbog velike dostupnosti i niske cijene fosilnih goriva termoelektrane privlače puno više investitora zbog čega je razvoj vjetroagregata tekao sporo sve do energetske krize 1970-tih godina. Tada se energija vjetra počinje značajnije iskorištavati u proizvodnji električne.

3.3 Princip rada vjetroagregata

Vjetroagregat nam omogućava pretvorbu energije vjetra u električnu energiju. Do pretvorbe dolazi kada vjetar svojom silom djeluje na lopatice rotora, time dolazi do pojave okretnog momenta koje okreće te iste lopatice rotora te time dolazi do stvaranja promjenjivog elektromagnetskog toka odnosno električne energije. Princip u kojemu se od mehaničke energije dolazi do električne energije jednak je onome koji se primjenjuje kod termoelektrana ili hidroelektrana. Sličnost vjetroelektrana sa hidroelektrana je u tome da oboje koriste fluid koji pokreće turbinu koje je mehanički vezana za generator, samo je kod hidroelektrana fluid voda, a kod vjetroelektrana je fluid zrak. Koliko će se energije vjetra prenijeti na rotor vjetroagregata zavisi o brzini vjetra, gustoći zraka te površini kruga koju rotor opiše tokom svoje rotacije.



Slika 3.3 Poul la Cour ispred svojih eksperimentalnih vjetroagrgata

Maksimalna teorijska energija vjetra (E_{MAXt}) jednaka je kinetičkoj energiji vjetra (E_{kz}) koja se prikazuje formulom:

$$E_{MAXt} = E_{kz} = \frac{1}{2} \cdot m_z \cdot v_z^2 \quad (3.3)$$

Masu zraka (m_z) možemo izraziti preko gustoće zraka (ρ_z) i volumena zraka koji prolazi u jedinici vremena (V_z) pa formula sada glasi:

$$E_{MAXt} = \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot V_z v_z^2 \quad (3.4)$$

Izraz za volumen zraka koji prolazi u jedinici (V_z) vremena je:

$$V_z = A \cdot v_z \quad (3.5)$$

gdje A predstavlja površinu kroz koju vjetar prolazi, u ovom slučaju površinu koju opisu lopatice vjetroagregata. Uvrstivši taj izraz u formulu dobivamo izraz za maksimalnu teorijsku energiju vjetra u jedinici vremena, odnosno maksimalnu teorijsku snagu vjetra (P_{MAXt}) koja iznosi:

$$P_{MAXt} = \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot A \cdot v_z^3 \quad (3.6)$$

Međutim, vjetroagregat može iskoristi samo određeni dio energije vjetra, odnosno samo dio energije vjetra možemo smatrati korisnim. O tome nam govori Betzov zakon koji stavlja u spregu raspoloživu snagu strujanja slobodnog vjetra i snagu na osovini vjetroagregata. Snaga strujanja slobodnog vjetra ne može se u potpunosti iskoristiti jer vjetar mora nastaviti strujanje kroz lopatice vjetroagregata kako bi se omogućio dolazak novom vjetru koji struji iza njega. Betzova granica, odnosno najveći mogući stupanj aerodinamičke pretvorbe iznosi $16/27$ odnosno $0,593$ ($59,3\%$) i označava se s C_p .

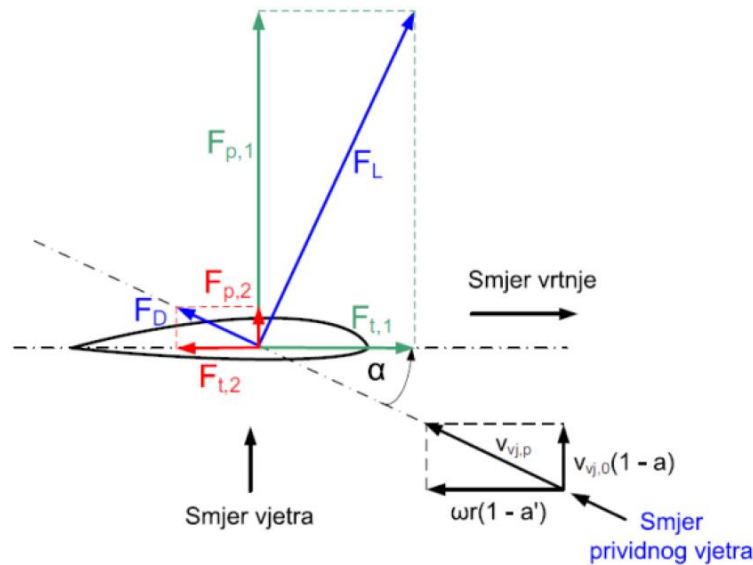
Uzevši u obzir Betzov zakon, maksimalna snaga koju može razviti idealan vjetroagregat [6] (P_{MAX}) iznosi:

$$P_{MAX} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_z A \cdot v_z^3 \quad (3.7)$$

Osim Betzove granice u proračun korisne snage koju možemo dobiti iz vjetra potrebno je uračunati i stupanj korisnosti zračne turbine (η_T) i stupanj korisnosti generatora (η_G) te tako dobivamo konačnu formulu za izlaznu snagu vjetroagregata (P_{VA}):

$$P_{VA} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot A \cdot v_z^3 \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (3.8)$$

Vjetar svojim strujanjem stvara silu na lopaticama rotora te ih, kada dosegne potrebnu snagu, počinje vrtjeti. Lopatice su ili direktno vezane sa rotorom generatora ili tu mehaničku energiju prenašaju dalje pomoću sporohodne osovine na sustav za promjenu brzine vrtnje koji potom preko brzohodne osovine okreće rotor generatora. Kod pojedinih izvedbi je sustav za promjenu brzine neophodan jer bi bez njega kutna brzina koju proizvode lopatice generatora bila premala za okretanje rotora generatora. Do same pretvorbe energije vjetra u mehaničku energiju dolazi zbog aerodinamičkog oblika lopatica rotora koje svojim profilom nalikuju na profil krila zrakoplova. Prilikom struja zraka preko lopatica, na lopaticama se stvaraju sila uzgona F_L i sila otpora F_D .



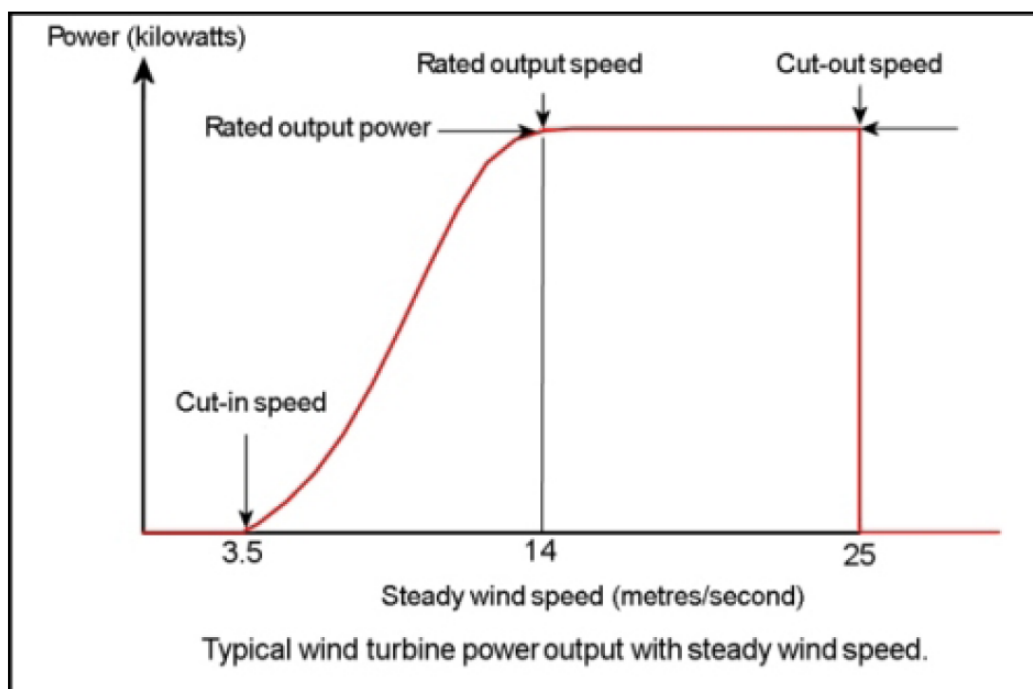
Slika 3.4 Prikaz djelovanja sila uzgona i sila otpora

Rastavivši sile, primjećujemo da su je za zakretni moment odgovorna razlika sila F_{t1} i F_{t2} , dok zbroj sila F_{p1} i F_{p2} svojim djelovanjem potiskuje rotor generatora prema nazad te savija toranj vjetroagregata u smjeru vjetra. Te sile uzrokuju da se vjetroagregat njiše, ali pošto je on elastični sustav, nastoji se vratiti u početno stanje. Sila uzgona javlja se zbog samog oblika lopatica. Lopatice su konstruirane tako da vjetar svojim strujanjem prolazi kraći put s donje strane krila u odnosu na duži put s gornje strane krila. To uzrokuje gušće silnice vjetra na gornjoj strani krila te je onda i brzina vjetra veća. Bernoullijev zakon govori da veća brzina strujanja zraka rezultira njegovim manjim tlakom te tako dolazi do stvaranja sile uzgona. Sila otpora ponajviše ovisi o napadnom kutu α lopatica (kut između smjera vrtnje lopatice i prividnog smjera vjetra) te stalno raste s porastom napadnog kuta. Sila uzgona također raste s porastom napadnog kuta, ali u jednom kritičnom trenutku dolazi do sloma uzgona i on počinje padati s porastom napadnog kuta. Za najbolju iskoristivost potrebno je odrediti optimalni napadni kut za koji vrijedi da je omjer sile otpora i sile uzgona maksimalan. Kako je smjer kretanja lopatica generatora okomit na smjer

strujanja vjetra, silu uzgona i silu otpora stvara smjer prividnog strujanja vjetra kao što je prikazano na slici 3.4.

Gledajući na brzinu vjetra kao vektorsku veličinu, zadanu smjerom i brzinom, brzina prividnog vjetra je zbroj vektora stvarne brzine vjetra i obodne brzine lopatica. Kako se uz konstantnu kutnu brzinu lopatica mijenja obodna brzina dijelova duž cijele lopatice, odnosno najveća je na kraju lopatice i smanjuje se kako se približavamo centru vrtnje, tako se mijenja i napadni kut duž cijele lopatice. Zbog toga, kako bi se postigli optimalni radni uvjeti, lopatice su konstruirane tako da se udaljavanjem od centra vrtnje uvijaju kako bi zadržale optimalni kut napada tokom cijele lopatice. Kako se vidi u formuli 3.8, snaga energije vjetra je proporcionalna površini lopatica i trećoj potenciji brzine vjetra pa je stoga potrebno prilikom konstruiranja postignuti zadovoljavajuću robusnost na promjene brzine vjetra.

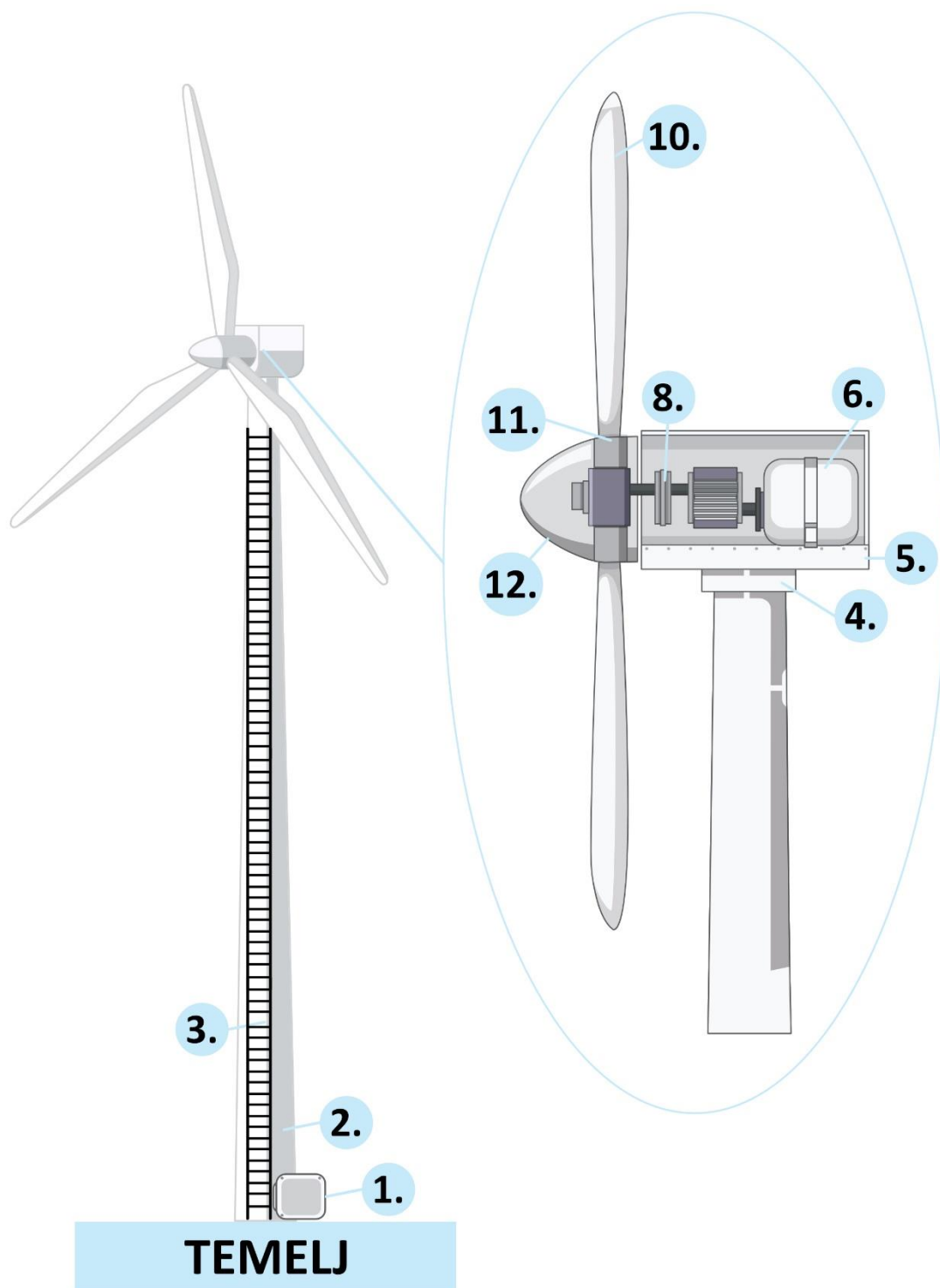
Ovisno o brzini vjetra, radno područje vjetroagregata možemo podijeliti na 4 dijela. U prvome dijelu brzina vjetra nije dovoljna za dovoljnu silu koja bi pokrenula vjetroagregat. U drugome dijelu brzina vjetra uspijeva pokretati vjetroagregat, ali ta brzina nije dovoljna da vjetroagregat postigne svoju nazivnu snagu. U trećemu dijelu, sustav regulacije vjetroagregata drži nazivnu snagu sustava za sve brzine vjetra iz određenog područja. U četvrtome dijelu, brzina vjetra je prevelika te se vjetroagregat isključuje kako bi se spriječilo njegovo moguće oštećenje zbog prevelikog mehaničkog naprezanja. Ovisno o svojoj izvedbi, današnji vjetroagregati imaju brzinu uključenja od 3-4 m/s i brzinu isključenja od 25-30 m/s.



Slika 3.5 Snaga agregata ovisno o brzini vjetra

3.4 Dijelovi vjetroagregata

Sastavne dijelove vjetroagregata možemo vidjeti prikazane na slici 3.6 i objašnjene u daljnjem tekstu. Neki od navedenih dijelova nisu prisutni kod pojedinih verzija vjetroagregata.



Slika 3.6 Dijelovi vjetroagregata

Temelj – najniži konstruktivni element konstrukcije, prenosi opterećenje i povezuje građevinu s tlom.

1. Priključak na EES – veza pomoću transformatora između vjetroagregata i elektroenergetske mreže. Osim transformatora, priključak sadrži i jedinice za mjerenje i upravljanje vjetroagregatom.
2. Stup – element konstrukcije koji drži glavne elemente vjetroagregata na projektiranoj visini. Postoje razne izvedbe poput cjevastih, konusnih, teleskopskih, rešetkastih itd. Danas je u uporabi najčešće cjevasta verzija zbog njene velike čvrstoće i otpornosti na vibracije.
3. Ljestve ili dizalo – omogućuju pristup glavnim elementima vjetroagregata radi lašeg održavanja ili popravka.
4. Mehanizam za zakretanje – nalazi se na vrhu stupa i koristi se za zakretanje turbinsko-generatorskog sustava u željenome smjeru. Zakretanje vrši motor pomoću velikog zupčastog prstena i pužnog prijenosa. Mehanizam ima i kočnicu koje se koristi za sprječavanje zakretanja prilikom jakih naleta vjetra.
5. Kućište stroja ili gondola – nalazi se na vrhu stupa, istovremeno štiti generatorski sustav od vanjskih utjecaja okoliša i okoliš od buke sustava.
6. Generator – električni stroj koji pretvara mehaničku energiju u električnu energiju.
7. Anemometar - mjerni instrument za mjerenje brzine smjera vjetra. Služi za mjerenje i regulaciju rada vjetroagregata.
8. Mehanizam za kočenje - djeluje kada brzina vjetra prijeđe vrijednost za koju je sustav siguran i stabilan kako bi se spriječila moguća oštećenja nastala zbog velikog dinamičkog opterećenja na lopatice. Mehanizam u tim slučajevima zaustavlja rotor. Osim funkcije sigurnosti, mehanizam za kočenje služi i za održavanje projektne brzine vrtnje kako bi sustav bio u dinamičkoj ravnoteži. Mehanizam je najčešće izveden kao disk kočnica koja se upravlja pomoću sustava za regulaciju.
9. Prijenosnik snage (mjenjač) - kako se lopatice kreću relativno malom brzinu vrtnje, mjenjač je veza između sporohodne osovine lopatica i brzohodne osovine generatora te služi za povećanje ulazne brzine prije prijenosa na rotor generatora. Lopatice se uglavnom vrte brzinom od 30-60 okr/min te je ta brzina premala za stvaranje električne energije u generatoru. Početna brzina lopatica se najčešće pomoću multiplikatora podiže se na brzinu od 1200-1500 okr/min koja je potrebna generatoru.
10. Lopatice rotora – služe za pretvaranje energije vjetra u mehaničku energiju. Svojim aerodinamičnim dizajnom iskorištavaju strujanje vjetra te pomoću sile uzgona i sile otpora generiraju okretni moment. Izvedbom razlikujemo lopatice sa zakretnim vrhovima ili lopatice s krilcima. U obje izvedbe služe i kao sekundarni kočioni sustav u slučaju otkazivanja mehanizma za kočenje. Brzina vrtnje lopatica ovisi o njihovom broju (danas je najčešća izvedba s tri lopatice) i o njihovom napadnom kutu.

11. Mehanizam za zakretanje lopatica – motorizirani mehanizam koji služi za mijenjanje napadnog kuta lopatica te tako pomaže u reguliranju njihove kružne brzine. Također služi kao sekundarni kočioni sustav okretanjem lopatica u smjer vjetra čime se smanjuju sile koje djeluju na njih.
12. Rotor - glavčina koja povezuje lopatice sa sporohodnom osovinom prijenosnika snage. Može na sebi sadržavati sustav za zakretanje lopatica ili se regulacija može vršiti pomoću aerodinamičkog efekta poremećenog trokuta brzina.

3.5 Podjele vjetroagregata

Vjetroagregate možemo podijeliti ovisno o različitim svojstvima. Neka od uobičajenih podjela su:

- instalirana snaga
- način iskorištavanja energije vjetra (princip uzgona ili princip otpora)
- lokacija postavljanja (pučina, priobalje, kopno)
- izvedba (horizontalna ili vertikalna osovina)

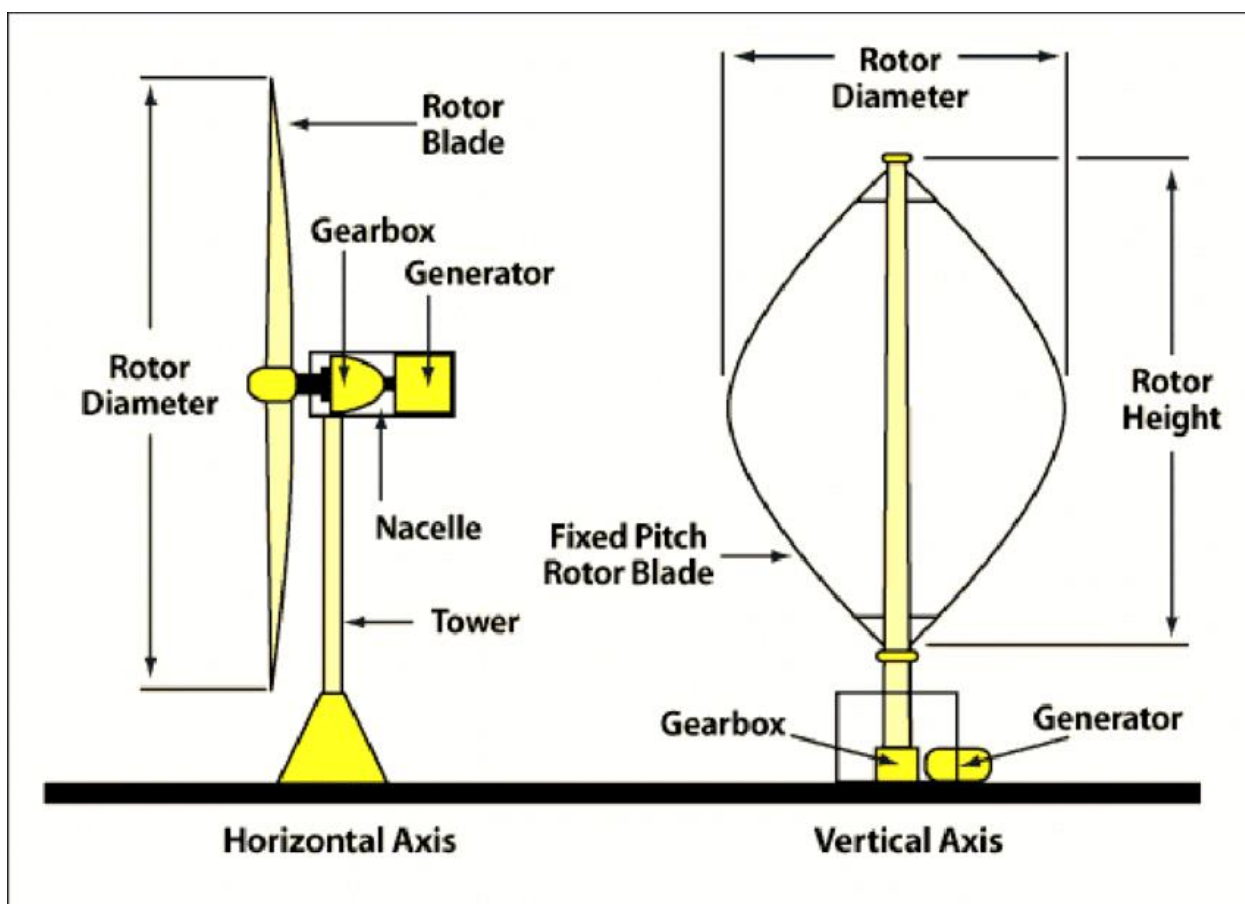
Prema instaliranoj snazi vjetroagregate možemo razvrstati u male, srednje i velike. Mali vjetroagregati imaju snagu do 10 kW, najčešće se primjenjuju za kućnu upotrebu, postavljaju se na krovove ili stupove. Srednji vjetroagregati imaju raspon snage od 10 kW do 100 kW, uglavnom se koriste za napajanje manjih industrijskih postrojenja, postavljaju se na zemlju ili visoke stupove. Veliki vjetroagregati imaju snagu veću od 100 kW te se međusobnim povezivanjem u vjetroelektrane koriste kao izvori energije u elektroenergetskim mrežama srednjeg ili visokog napona.

Podjela s obzirom na način iskorištavanja energije vjetra dijeli vjetroagregate na one koji koriste princip uzgona ili princip otpora. Podjela s obzirom na lokaciju postavljanja vjetroagregata može biti na pučinske, priobalne ili kopnene agregate. Pučinski vjetroagregati mogu dosizati najveće snage, ali su trenutno još u fazi razvoja, priobalni vjetroagregati su nešto manje snage te im uporaba raste zahvaljujući novim tehnološkim otkrićima. Kopneni vjetroagregati nadjuža su i najbrojnije upotrebljavana izvedba, zbog prednosti lakšeg postavljanja i održavanja.

Podjela s obzirom na izvedbu dijeli vjetroagregate na one s horizontalnom osovinom i one s vertikalnom osovinom. Vjetroagregati s horizontalnom osovinom (eng. HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine) su vjetroagregati kojima se rotor okreće oko horizontalne osi. Rotor HAWT-a može biti usmjeren u smjer vjetra ili suprotno od smjera vjetra. Izvedba s rotorom u smjeru vjetra se češće koristi s obzirom da kod nje nema zavjetrine nastale stupom vjetroagregata, međutim, kod takve izvedbe lopatice moraju biti krute te rotor koji ih nosi mora biti na određenoj udaljenosti od

stupa kako ne bi došlo do udaranja lopatica u stup vjetroagregata. Takva izvedba ne omogućava pasivno praćenje smjera vjetra već je nužan mehanizam za okretanje rotora u smjeru vjetra. Izvedba s rotorom suprotnom od smjera vjetra omogućava pasivno praćenje smjera vjetra te fleksibilne lopatice koje svojim savijanjem pri velikim brzinama vjetra smanjuju otpor i pritom time smanjuju opterećenje na stup. Savijanje lopatica ima i negativne utjecaje jer njime dolazi do smanjenja izlazne snage, veće buke te zamora materijala. HAWT može imati različit broj lopatica. Veći broj lopatica znači i veću korisnost turbine, ali se pritom čvrstoća lopatica smanjuje. Danas se kao najbolja tehnološko-ekonomska izvedba koristi ona s tri lopatice.

Vjetroagregati s vertikalnom osovinom (eng. VAWT – Vertical Axis Wind Turbine) su vjetroagregati kojima se rotor okreće oko vertikalne osi. Ovakva izvedba omogućava iskorištavanje vjetra iz svih smjerova bez potrebe mehanizma za zakretanje te mogućnost postavljanja glavnih komponenti agregata na tlo što sve zajedno doprinosi lakšoj izvedbi i održavanju. VAWT izvedba ima i nedostatke u vidu velikih promjena zakretnog momenta te velikog naprezanja lopatica što za posljedicu ima pucanje lopatica. Tome su uzrok promjena smjera i brzine vjetra. Zbog manje iskoristivosti manje se primjenjuje kao rješenje.



Slika 3.7 HAWT i VAWT izvedba vjetroagregata

3.6 Spoj vjetroagregata na elektroenergetsku mrežu

Promatrajući vjetroagregat iz elektroenergetske perspektive, kao cjelinu ga možemo promatrati kao izvor električne energije u elektroenergetskoj mreži. Ta cjelina se sastoji od 2 glavna elementa, generatora pokretanog vjetrom i transformatora koji služi za prilagođavanje razine izlaznog napona na željenu razinu. Uz njih postoji i kontrolni sustav koji cjelinu održava stabilnom te mrežna oprema koja služi za zaštitu i povezivanje vjetroagregata na mrežu. Električna je energija, tranzijent u procesu pretvorbe energije elektromagnetskih polja (elektrostatičkih i magnetskih), stvorenih mehaničkim odvajanjem elektrona od jezgre atoma, u neki drugi oblik energije. Elektroenergetski sustav je najkompliciraniji tehnički sustav upravo zbog činjenice da je električna energija prijelazni oblik energije; oblik koji se ne može direktno pohraniti i onda po volji rabiti u vrijeme kada nam to odgovara. Postupak spajanja vjetroagregata na elektroenergetsku mrežu (EEM) počinje u generatoru u kojemu se mehanička energija pretvara u električnu. Kako bi se ta električna energija mogla prenijeti u EEM potrebno je da bude na odgovarajućem naponskom nivou. Za transformacija naponskih razina zadužen je transformator, koji izlaznu naponsku razinu iz generatora pretvara u odgovarajući naponski nivo na kojem funkcionira EEM na koju se vjetroagregat spaja. Vjetroagregat i transformator spojeni su preko sklopke s EEM. Sklopka omogućava uklop i isklup vjetroagregata u EEM po potrebi, što je važno za održavanje EEM stabilnom. Nakon što je vjetroagregat spojen s EEM, elektronički uređaji prate kvalitetu struje i napona koji se predaju u mrežu te upozoravaju na bilo kakve probleme vezane za njih. Osim kvalitete, mora se regulirati i snaga vjetroagregata kako bi se održala ravnoteža između proizvodnje i potrošnje u EEM. Za praćenje kvalitete napona i struje te regulaciju snage zadužen je sustav za upravljanje. Kako je potencija vjetar glavna odrednica za gradnju vjetroelektrana, vrlo je važno poznavati brzinu vjetra i njegov smjer kako bi se predvidjela mogućnost iskorištavanja vjetra u svrhu proizvodnje električne energije. I brzina vjetra i njegov smjer vrlo su promjenjive karakteristike te su potrebna precizna mjerenja u dužem vremenskom periodu kako bi donijeli ispravan zaključak.

3.6.1 Generator vjetroagregata

Za vjetroagregate se, upravo zbog promjenjive brzine vjetra, koriste verzije generatora sa visokom učinkovitosti u širokom pojasu brzine okretaja i opterećenja. Uz to, kako bi se osigurala pravilna i sigurna funkcija cijelog sustava, rotor mora izdržati povećani broj okretaja za slučaj otkazivanja svih sustava zaštite, konstrukcija generatora mora biti postojana na velika dinamička opterećenja koja izazivaju uključivanje i isključivanje generatora te kratki spojevi. Dodatna otpornost i robusnost generatora potrebna je i zbog nepovoljnih uvjeta u kojima se oni mogu nalaziti, poput atmosfera s povećanom vlagom i/ili povećanom slanosti, prisutnost krutih čestica u zraku, povišena temperatura itd. Iako se mogu koristiti i istosmjerni generatori, u najširoj su

primjeni izmjenični generatori zbog jednostavnijeg povezivanja s elektroenergetskom mrežom te zbog veće pouzdanosti. Kod generatora koji se upotrebljavaju u vjetroagregatima ima više izvedbi, svaka sa svojim prednostima i nedostacima, prilagođena određenome području primjene. Izvedbe generatora prikazane su u tablici 3.3.

Tablica 3.3 Izvedbe generatora kod vjetroagregata

Izvedba generatora	Prednosti	Nedostaci
Asinkroni kavezni jedno ili dvobrzinski generator	<ul style="list-style-type: none"> - Jednostavna izrada i održavanje - Prigušenje pulzacija momenta turbina - Izravani spoj na mrežu - Niska nabavna cijena 	<ul style="list-style-type: none"> - Potrebna jalova energija - Potrebna soft start uređaj za prvo priključenje na mrežu - Potrebna multiplikator - Primjenjivo samo za fiksne brzine turbina - Neupotrebljivo za veliki broj polova (>20)
Asinkroni klizno-kolutni dvostrano hranjeni generator	<ul style="list-style-type: none"> - Bitno smanjena snaga i cijena pretvarača - Mogućnost regulacije brzine vrtnje za optimalno korištenje energije - Za magnetiziranje stroja se koristi jalova snaga iz pretvarača - Moguć podsinkroni i nadsinkorni rad 	<ul style="list-style-type: none"> - Trošenje i održavanje kliznih koluta i četkica - Složeno upravljanje agregatom - Otežan izravni spoj na mrežu
Sinkroni generator s uzbudnom strujom na rotoru	<ul style="list-style-type: none"> - Jednostavno upravljanje jalovom snagom - Široko područje brzina vrtnje - Jednostavan za upravljanje 	<ul style="list-style-type: none"> - Trošenje i održavanje kliznih koluta i četkica - Potrebna pretvarač za ukupnu snagu - Potrebna uzbudni sustav
- direktan pogon	<ul style="list-style-type: none"> - Jednostavnija izvedba cijelog vjetroagregata jer nema multiplikatora - Veća korisnost agregata 	<ul style="list-style-type: none"> - Velike dimenzije i masa - Problem izrade, transporta i montaže generatora
- pogon s multiplikatorom	<ul style="list-style-type: none"> - male dimenzije i masa generatora - standardni generator 	<ul style="list-style-type: none"> - Problem održavanja multiplikatora - Gubici (2-3%) - Visoka cijena
Sinkroni generator s trajnim magnetima	<ul style="list-style-type: none"> - Jednostavan rotor bez potrošnih dijelova i uzbudnog namota - Nema gubitaka u rotoru pa je korisnost agregata veća 	<ul style="list-style-type: none"> - Visoka cijena trajnih magneta - Mogućnost razmagnetiziranja - Nema regulacije struje uzbude
- direktan pogon	<ul style="list-style-type: none"> - Jednostavnija izvedba cijelog vjetroagregata jer nema multiplikatora 	<ul style="list-style-type: none"> - Velike dimenzije i masa - Problem izrade, transporta i montaže generatora
- pogon s multiplikatorom	<ul style="list-style-type: none"> - Male dimenzije i masa generatora - Standardni generator 	<ul style="list-style-type: none"> - Problem održavanja multiplikatora - Gubici (2-3%) - Visoka cijena

Ovisno o vrsti priključka na elektroenergetsku mrežu vjetroagregati mogu biti izvedeni s konstantnom brzinom vrtnje i izravnim priključenjem na mrežu ili s varijabilnom ili djelomično varijabilnom brzinom vrtnje. Kod izravnog priključenja na mrežu moguće su varijante asinkronog i sinkronog generatora. Asinkroni generator primjenjuje se najčešće kod izravnog priključenja na krutu mrežu, odnosno mrežu koja zahtijeva držanje napona i frekvencije konstantnima. Sinkroni generatori primjenjuju se kod otočnih pogona, a zbog potrebe uzbudnog sustava i regulatora brzine koji će održavati napon i frekvenciju konstantnim ne primjenjuju se u pogonu na krutu mrežu. Vjetroagregati s varijabilnom ili djelomično varijabilnom brzinom napravljeni su kao sinkroni ili asinkroni generatori s pretvaračem u glavnom strujnom krugu, asinkroni generatori s upravljivim promjenjivim klizanjem i asinkroni generatori s nadsinkronom ili podsinkronom pretvaračkom kaskadom. Takvi vjetroagregati povezani na elektroenergetsku mrežu proizvode više električne energije od skupljih i složenijih vjetroagregata sa stalnom brzinom vrtnje, a uz to imaju ravnomjerniju proizvodnju sa manjim mehaničkim naprezanjem dijelova te manje ovise o promjenama brzine vjetra. Pogon s varijabilnom brzinom vrtnje vjetroagregata imaju, osim generatora, i elektroenergetski pretvarač koji služi za reguliranje izlazne energije, odnosno održavanje konstantnog napona i frekvencije. Pogon s varijabilnom brzinom velikoj mjeri koristi dostupnu energiju vjetra tako imajući optimalni stupanj učinkovitosti. Spajanjem različitih vrsta generatora i elektroenergetskih pretvarača rezultira različitim svojstvima u vidu složenosti, dinamičkih svojstava, pogonskih i regulacijskih karakteristika, harmonijskih članova, regulacije faktora snage i troškova.

3.6.2 Blok-transformator vjetroagregata

Kako bi se troškovi smanjili, vjetrogeneratori se projektiraju na nižim naponskim razinama te su im potrebni transformatori za podizanje naponske razine izlaznog generatorskog napona na željenu naponsku razinu kako bi se omogućila njena predaja u mrežu. Njihov broj i lokacija ovise o vrsti i snazi vjetroagregata te o samom načinu spajanja vjetroagregata na mrežu. Ovisno o lokaciji, transformatori mogu biti smješteni u samoj gondoli vjetroagregata, u njegovom stupu ili na tlu blizu vjetroagregata. Energetski transformatori koji se koriste u vjetroagregatima često su izloženi naprezanjima i opterećenjima koja odstupaju od normalnih uvjeta rada energetskih transformatora te su stoga robusnije izrade. Kako su brzina i smjer vjetra vrlo varijabilne komponente, a ujedno su i ulazne komponente vjetroagregata, cijeli sustav pa tako i transformator mora biti prilagođen njima. Tokom dana i noći brzina vjetra može rasti i padati pa tako generator može biti u pogonu dio dana, a ostatak dana van pogona zbog premale ili prevelike brzine vjetra. Takvi režimi paljenja i gašenja izazivaju toplinske cikluse na transformatoru te pojavu prenapona. Kod transformatora hlađenih ulje, takovi ciklusi mogu izazvati pojavu mjehurića zraka u ulju što

dovodi do toplih točaka unutar ulja te postupnog trošenja i slabljenja izolacije. Kod transformatora hlađenih zrakom, toplinski ciklusi dovode do zamora materijala u namotima i slabljenja izolacije. Pojava prenapona javlja se prilikom isklopa zbog prekida struje koji izaziva veliku promjenu struje u kratkom vremenu (veliki di/dt) što može izazvati veliki oscilatorni napon unutar namota transformatora koji potom može izazvati kvar. Osim sklopnih operacija, transformator mora biti sposoban izdržati naponska nadvišenja i pojavu viših harmonika koji oboje vrlo nepovoljno djeluju na transformator. Naponska nadvišenja uzrokuju ubrzano trošenje izolacije transformatora dok viši harmonici uzrokuju trošenje i gubitke u namotima te ostalim metalnim dijelovima uzrokujući temperature i opterećenja i do 2-3 puta veće nego kod normalne frekvencije od 50 Hz. Osim električnih smetnji, transformatori trpe i mehaničke poput vibracija i korozije. Zbog svih navedenih uvjeta koji odstupaju od normalnih, energetske transformatori koji se primjenjuju kod vjetrogeneratora imaju različiti dizajn od standardnih energetskih transformatora. Problem toplinskih ciklusa i pregrijavanja rješava se projektiranjem zavoja s kanalima za rashladno sredstvo. To omogućava rashladnom sredstvu glatko, konvektivno strujanje posvuda po zavojima te se time smanjuje put koji toplinska energija mora prijeći do rashladnog medija čime se eliminiraju pojave stvaranja vrućih točaka te se mjehurići, koji mogu nastati, udaljuju od papirnate izolacije. Ublažavanje nepovoljnih efekata viših harmonika postiže se dodavanjem elektrostatskog štita između primarnog i sekundarnog namota transformatora. Elektrostatski štit stvara kapacitet između sebe i namota te tako djeluje poput filtra koji sprječava prolaz neželjenih harmonika s primarne na sekundarnu stranu. Prolazni prenaponi, koji izazivaju fizička opterećenja, rješavaju se uporabom okrugle jezgre i okruglih namota što omogućava širenje sile u 360 stupnjeva te se tako štiti oblik i izolacija zavoja. Uz sve navedeno, bitno je redovno nadzirati uvjete rada transformatora, pregledavati njegove dijelove i sukladno tome ih održavati kako bi životni vijek transformatora bio što duži.

3.6.3 Regulacija snage vjetroagregata lopaticama

Kako snaga vjetroagregata uvelike ovisi o kubu brzine vjetra, regulacija snage vjetroagregata vrši se odnosom između lopatica i strujanja vjetra. Regulacija se može vršiti pasivno ili aktivno. Pasivna regulacija (eng. stall regulation) vrši se pomoću specijalnih lopatica koje svojim aerodinamičkim dizajnom, kada vjetar dosegne određenu visoku brzinu, počinju gubiti brzinu vrtnje ili moment. Zove se pasivna regulacija jer nema potrebe za nikakvom dodatnom snagom za rad. Aktivna regulacija vrši se pomoću mehanizma koji zahtijevaju neku energiju. Razlikujemo regulaciju kontrolom nagiba (pitch regulation), kontrolu skretanjem (yaw control) i aktivno pasivnu regulaciju (active stall regulation). Kontrola nagiba vrši se mehanizmom za zakretanje lopatica čime se mijenja napadni kut lopatica. Pri slabijem vjetru se lopatica okreće tako da ima

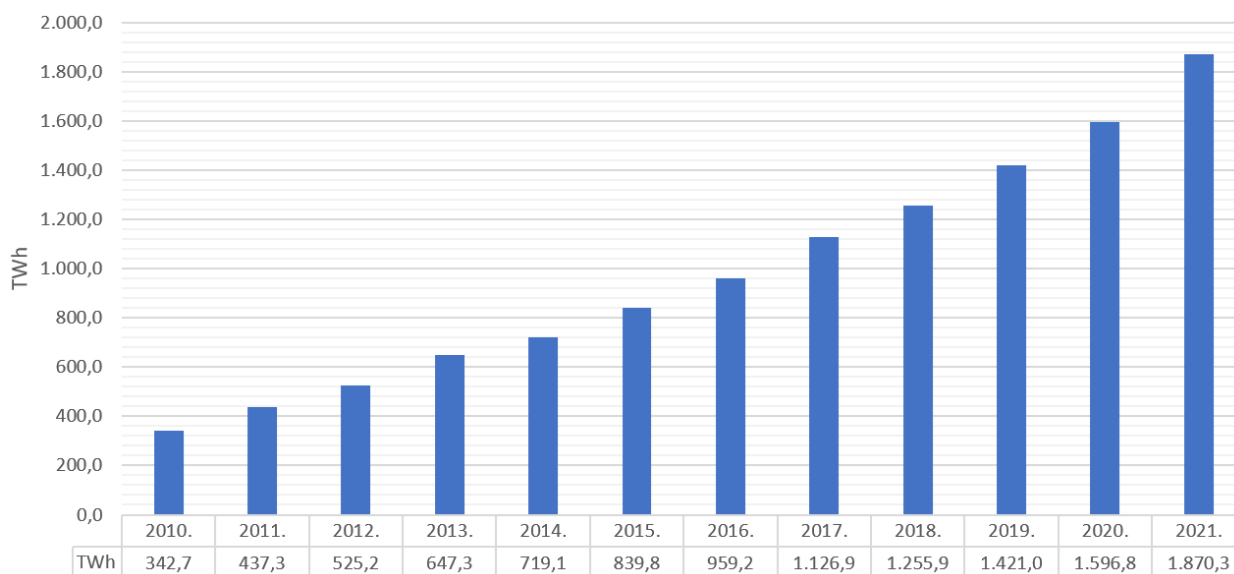
veću površinu izloženu vjetru, a pri jakom vjetru se izložena površina lopatice smanjuje. Kontrola skretanjem vrši se mehanizmom za zakretanje koji okreće kućište vjetroagregata tako da je vjetroturbina uvijek okomita na smjer vjetra. Aktivno-pasivna regulacija kombinacija je pasivne regulacije i kontrole nagiba.

3.7 Primjena vjetroagregata u elektroenergetske svrhe

Kako je uzrok vjetru razlika tlakova, koja je posljedica djelovanja Sunčeva zračenja, vjetar se svrstava u obnovljive izvore energije. Prilikom korištenja energije vjetra za stvaranje električne energije ne dolazi do nikakve emisije stakleničkih plinova, međutim prilikom proizvodnje dijelova od kojih je sačinjena vjetroelektrana, kao i kod njene izgradnje dolazi do određene emisije stakleničkih plinova. Energija vjetra je trenutno druga energija po zastupljenosti u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora energije. Iako je njena primjena u proizvodnji električne energije počela unazad par desetljeća, njezin je rast stalan, naročito zadnjih godina.

Uspoređujući vjetroelektrane i fotonaponske elektrane gledajući opremu od kojih su sačinjene, vjetroelektrane pretvaraju energiju vjetra u mehaničku pa potom u električnu energiju pomoću opreme koja je u širokoj uporabi i nad kojom su provedena široka ispitivanja za razliku od fotonaponskih elektrana koje koriste specifičniju i manje istraženu opremu za pretvaranje Sunčeva zračenja direktno u električnu energiju. Iako su time vjetroelektrane u prednosti nad fotonaponskim elektranama, kod vjetroelektrana postoji izazov u konstrukciji, odnosno ravnoteži između potrebne fleksibilnosti i uloženog materijala. Uspoređujući vjetroelektrane i fotonaponske elektrane s pogleda vremena proizvodnje električne energije, fotonaponske elektrane ograničene su na proizvodnju samo tokom dana, dok vjetroelektrane mogu raditi i za vrijeme dana i za vrijeme noći. Također, izazov sa kojim se susreću vjetroelektrane je i lokacija na kojoj se grade. Osim povoljnog potencijala energije vjetra, kao glavnog parametra prilikom odabira lokacije, potrebno je uzeti u obzir vizualni utjecaj, utjecaj buke, ali i ekološki utjecaj koji vjetroagregati imaju na ptice i šišmiše koji žive ili se kreću u tome području. Sami vjetroagregati ne zauzimaju puno prostora, ali potrebno je obratiti pažnju na nužni razmaka između njih kako ne bi dolazilo do međusobnog negativnog utjecaja te je potom potrebno povezati vjetroagregate u cjelinu, kako u električnom tako i u prometnome smislu. Unatoč svim izazovima, svjetska proizvodnja električne energije korištenjem energije vjetra je u stalnom porastu. Prema podacima iz 2021. u svijetu [7] [8][9] je bilo instalirano 837.451 MW vjetroelektrana koje su proizvele 1.870,3 TWh električne energije. Hrvatska je sa svojih proizvedenih 2,1 TWh na 39. poziciji po količini proizvedene električne energije.

Električna energija proizvedena vjetrom u svijetu



Slika 3.8 Električna energija proizvedena vjetrom u svijetu [7]

Tablica 3.4 Električna energija proizvedena vjetrom 2021. godine po zemljama [8]

	Zemlja:	TWh:	%
1.	Kina	650,56	34,78%
2.	SAD	379,77	20,31%
3.	Njemačka	115,79	6,19%
4.	Brazil	72,24	3,86%
5.	Indija	68,08	3,64%
6.	Ujedinjeno Kraljevstvo	64,37	3,44%
7.	Španjolska	62,27	3,33%
8.	Francuska	36,66	1,96%
9.	Kanada	36,01	1,93%
10.	Turska	31,21	1,67%
11.	Švedska	27,32	1,46%
12.	Australia	24,56	1,31%
13.	Mexico	21,06	1,13%
14.	Italija	20,91	1,12%
15.	Nizozemska	18,01	0,96%
16.	Danska	16	0,86%
17.	Poljska	15,84	0,85%
18.	Portugal	13,16	0,70%
19.	Argentina	12,96	0,69%
20.	Belgija	12,52	0,67%
39.	Hrvatska	2,26	0,12%

Tablica 3.5 Instalirana snaga vjetroelektrana po zemljama u 2021. godini [7]

	Zemlja:	Instalirana snaga – kopno [MW]	Instalirana snaga – more [MW]	Instalirana snaga – sveukupno [MW]
1.	Kina	310.629,0	27.680,0	338.309,0
2.	SAD	134.354,0	42.000,0	176.354,0
3.	Južna Koreja	1.579,0	133.000,0	134.579,0
4.	Njemačka	56.814,0	7.728,0	64.542,0
5.	Indija	40.084,0		40.084,0
6.	Ujedinjeno kraljevstvo	14.064,0	12.522,0	26.586,0
7.	Brazil	21.580,0		21.580,0
8.	Francuska	19.131,0		19.131,0
9.	Kanada	14.255,0		14.255,0
10.	Švedska	11.915,0		11.915,0
11.	Turska	10.681,0		10.681,0
12.	Australija	9.041,0		9.041,0
13.	Meksiko	7.262,0		7.262,0
14.	Japan	4.523,0		4.523,0
15.	Čile	3.444,0		3.444,0
16.	Argentina	3.287,0		3.287,0
17.	Vijetnam	3.231,0		3.231,0
18.	Južnoafrička Republika	3.163,0		3.163,0
19.	Nizozemska		3.003,0	3.003,0
20.	Danska		2.308,0	2.308,0
	Hrvatska	0,834		0,834

3.7.1 Vjetroelektrane u Hrvatskoj

U 2022. godini je u Hrvatskoj u redovnom pogonu bilo 25 vjetroelektrana, s ukupnom instaliranom snagom u iznosu od 834,15 MW i odobrenom snagom priključenja u iznosu od 824,85 MW. U izgradnji/probnom roku bila je još jedna vjetroelektrana instalirane snage u iznosu od 156 MW te isto toliko odobrene priključne snage. Za 2022. godinu, vjetroelektrane su proizvele 2.263,1 GWh električne energije, a prosječna satna proizvodnja iznosi 258,37 MWh. Kao još jedan pokazatelj rada vjetroelektrana možemo uzeti i FLH (Full Load Hours), broj koji opisuje koliko sati godišnje su vjetroelektrane radile u punom (normalnom) pogonu, odnosno koliko sati u određenom vremenskom periodu je sva instalirana snaga proizvela energije koliko bi bilo proizvedeno u normalnom pogonu (instalirana snaga [W] x vremenski period [h] = energija normalnog pogona [Wh]). FLH je za vjetroelektrane u Hrvatskoj, za 2022. godinu iznosio 2319, odnosno od 8760 sati godišnje vjetroelektrane su u normalnom pogonu bile 2319 sati (26,5%).

Najveći broj vjetroelektrana nalazi se u Šibensko-kninskoj županiji (7), Splitsko-dalmatinskoj županiji (6), Dubrovačko-neretvanskoj županiji (2) i Ličko-senjskoj županiji (1 + 1 u pokusnom radu). Što se tiče priključenja, najviše elektrana (16 + 1 u pokusnom radu) priključeno je na prijenosnu mrežu (220 kV i 110 kV) dok je ostalih 9 priključeno na distribucijsku mrežu (35 kV, 20 kV i 10 kV). Detaljan popis nalazi se u tablici 3.5.

Tablica 3.6 Popis VE u Hrvatskoj [9]

	Naziv VE	Lokacija	Instalirana snaga [MW]	Odobrena snaga priključenja [MW]	Napon priključenja [kV]	U redovnom pogonu od:
1.	Ravne	Zadarska	5,95	5,95	10	2005.
2.	Trtar Krtolin	Šibensko - kninska	11,2	11,2	30	2007.
3.	Orlice	Šibensko - kninska	9,6	9,6	30	2009.
4.	Vrataruša	Ličko - senjska	42	42	110	2010.
5.	Pometeno Brdo	Splitsko - dalmatinska	20	20	110	2010.
6.	Velika Popina	Zadarska	53,4	54	110	2011.
7.	Crno Brdo	Šibensko - kninska	10,5	10	10	2011.
8.	Bruška	Zadarska	36,8	36	110	2011.
9.	Ponikve	Dubrovačko-neretvanska	36,8	34	110	2012.
10.	Jelinak	Šibensko - kninska	30	30	110	2013.
11.	Voštane	Splitsko-dalmatinska	42	40	110	2013.
12.	Zadar4	Zadarska	9,2	9,2	10	2013.
13.	Velika Glava	Šibensko - kninska	43,7	43	110	2014.
14.	Zelengrad	Zadarska	42	42	110	2014.
15.	Ogorje	Splitsko-dalmatinska	42	44	110	2015.
16.	Rudine	Dubrovačko-neretvanska	34,2	35	110	2015.
17.	Glunča	Šibensko - kninska	20,7	22	110	2016.
18.	Katuni	Splitsko-dalmatinska	34,2	39	110	2016.
19.	Lukovac	Splitsko-dalmatinska	48,75	48	110	2018.
20.	Kom-Orjak-Greda	Splitsko-dalmatinska	10,25	10	35	2020.
21.	Jasenice	Zadarska	11,5	10	35	2020.
22.	Krš Pađane	Šibensko - kninska	144	142	220	2021.
23.	Korlat	Zadarska	63	58	110	2021.
24.	Ljubač	Šibensko - kninska	21,6	20	35	2022.
25.	Ljubač II	Šibensko - kninska	10,8	9,9	35	2022.

4 Pogonska karta vjetroagragata i vjetroelektrane

Pogonska karta predstavlja dijagram snage s ucrtanim ograničenjima dopuštenog trajnog rada električnog stroja. Zasniva se na vektorsko-faznom dijagramu električnog stroja, uzimajući u obzir i radnu i jalovu snagu. Nastaje iz vektorskog prikaza naponskih stanja električnog stroja. Osim dopuštenog stanja, ucrtavaju se i područja rada koja zbog ograničenja nisu dopuštena.

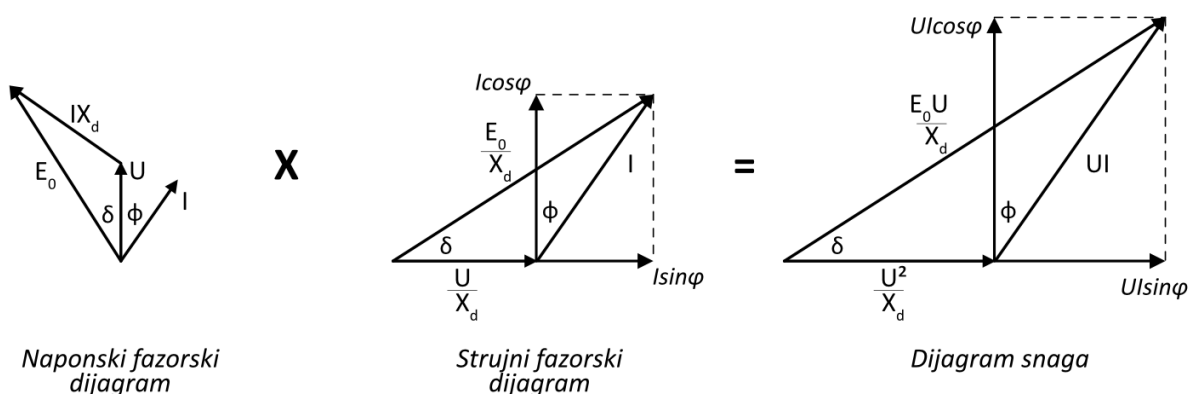
Pri konstruiranju pogonske karte zadaju se sljedeće veličine:

- nazivna prividna snaga S_n
- nazivni napon U_n
- nazivni faktor snage $\cos\varphi_n$
- faktor korisnosti η
- reaktancija armature X_d
- minimalna i maksimalna dozvoljena vrijednost napona uzbuđe E_{MIN} i E_{MAX}
- minimalna i maksimalna dozvoljena vrijednost snage pogonskog stroja P_{MIN} i P_{MAX}

Radi lakšega konstruiranja pogonske karte sve vrijednosti izražavaju se u jedinični vrijednostima (p.u.). Prvi korak je pretvaranje vektorskog sustava napona u vektorski prikaz snaga, odnosno množenje napona sa strujom u vektorskom prikazu. Struja se prikazuje kao:

$$\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}} = \frac{\vec{U}}{jX} \quad (4.1)$$

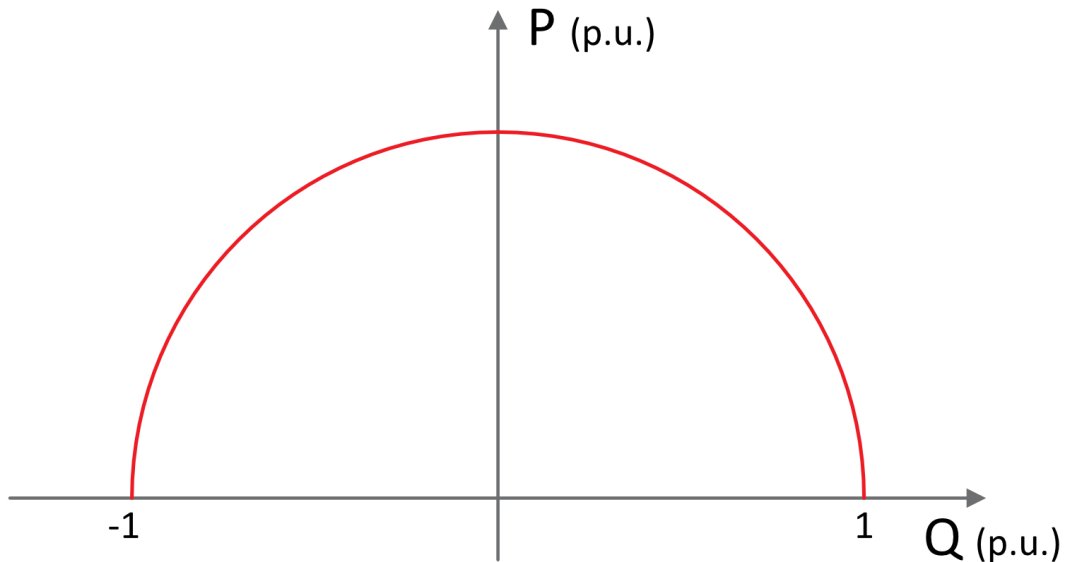
jer se impedancija u najvećem dijelu sastoji od induktivne reaktancije.



Slika 4.1 Fazorski dijagrami

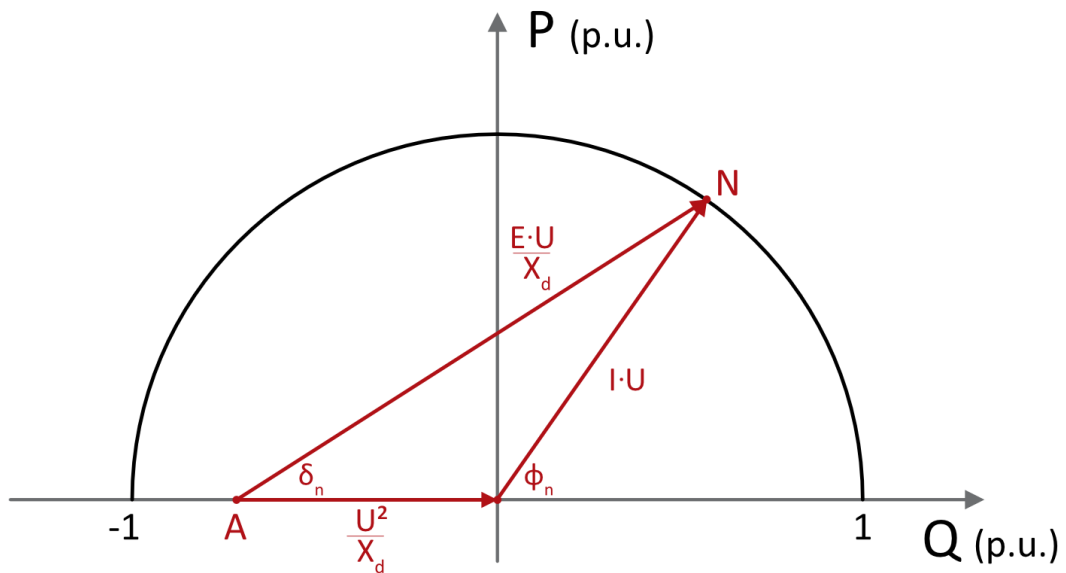
U nastavku je prikazana metodologija konstrukcije pogonske karte turboagregata, dok je primjer pogonske karte vjetroagregata dan u vidu slike na kraju ovog potpoglavlja.

Konstrukcija pogonske karte turboagregata započinje tako što se ucrtava gornja polovica jedinične kružnice koja predstavlja generatorski način rada stroja (pozitivna vrijednost snage). Jedinična kružnica je također i ograničenje zbog prividne snage, odnosno zagrijavanja statora.



Slika 4.2 Jedinična kružnica snage

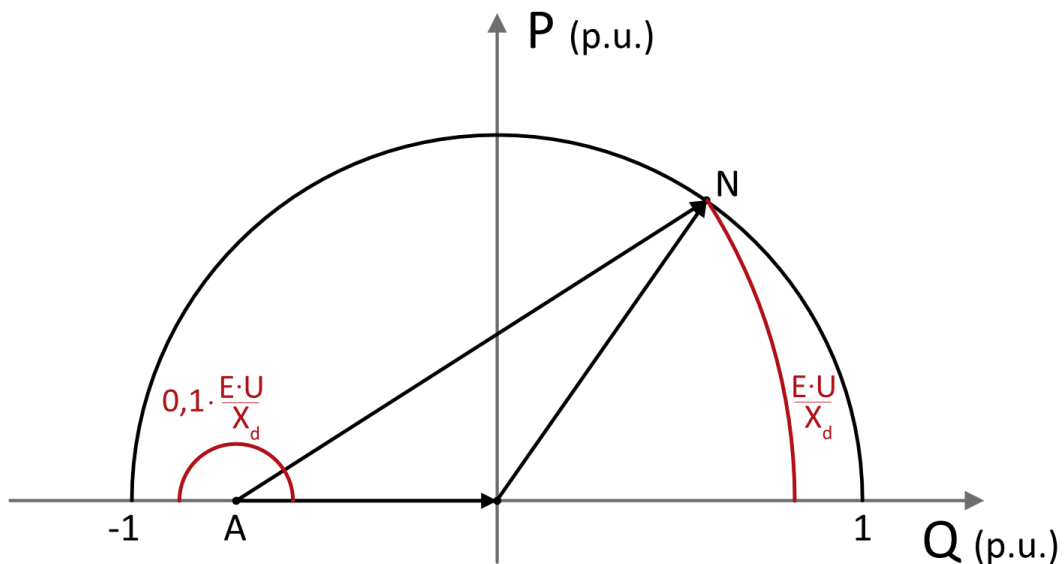
Na dobivenu polovicu kružnice prvo iz ishodišta iscrtavamo vektor $U \cdot I$ pod nazivnim kutem φ_n u odnosu na os X (os Q). Točka susreta vektora $U \cdot I$ i jedinične kružnice je točka N koja predstavlja nazivnu radnu točku. Za slučaj kada je nazivna radna snaga jednaka maksimalnoj snazi, ucrtavamo i vodoravni pravac kroz točku N. Osim točke N ucrtavamo i točku A koja je od ishodišta udaljena za $\frac{U^2}{X_d}$. Točka A predstavlja uzbudu. Spajanjem točke A s N dobivamo vektor nazivne uzbude koji sa osi X zatvara kut uzbude δ_n .



Slika 4.3 Radna točka i uzbuda

Ograničenja koja su posljedica minimalne i maksimalne uzbude crtaju se kao dvije kružnice sa središtem u točki A. Prva kružnica predstavlja minimalnu uzbudu i jednaka je 10% nazivne vrijednosti. Druga kružnica predstavlja maksimalnu uzbudu i u većini slučajeva je jednaka njenoj nazivnoj vrijednosti.

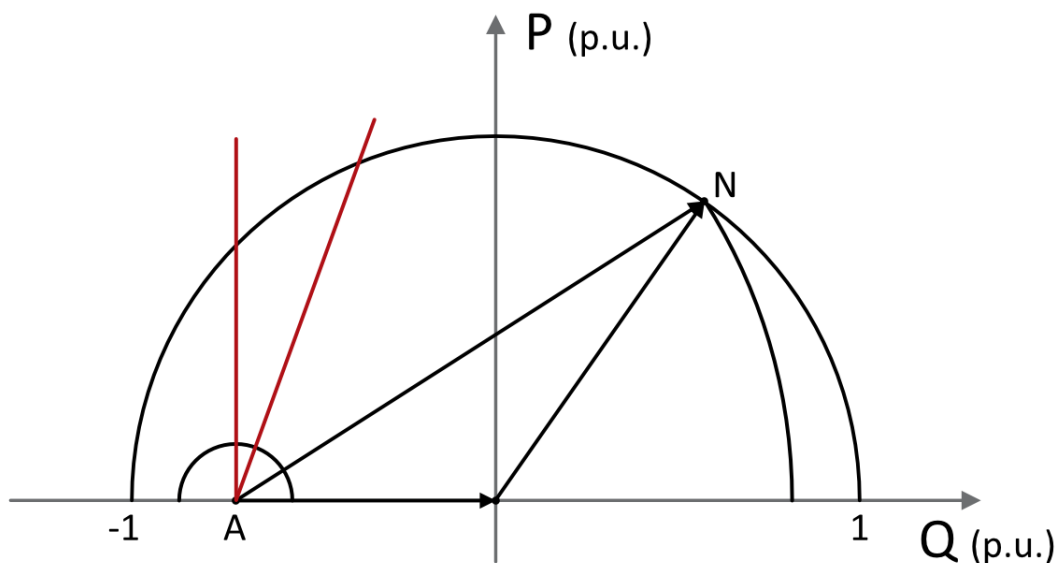
$$r_{MIN} = 0,1 \cdot \frac{E \cdot U}{X_d} \quad r_{MAX} = \frac{E \cdot U}{X_d} \quad (4.2)$$



Slika 4.4 Ograničenja uzbude

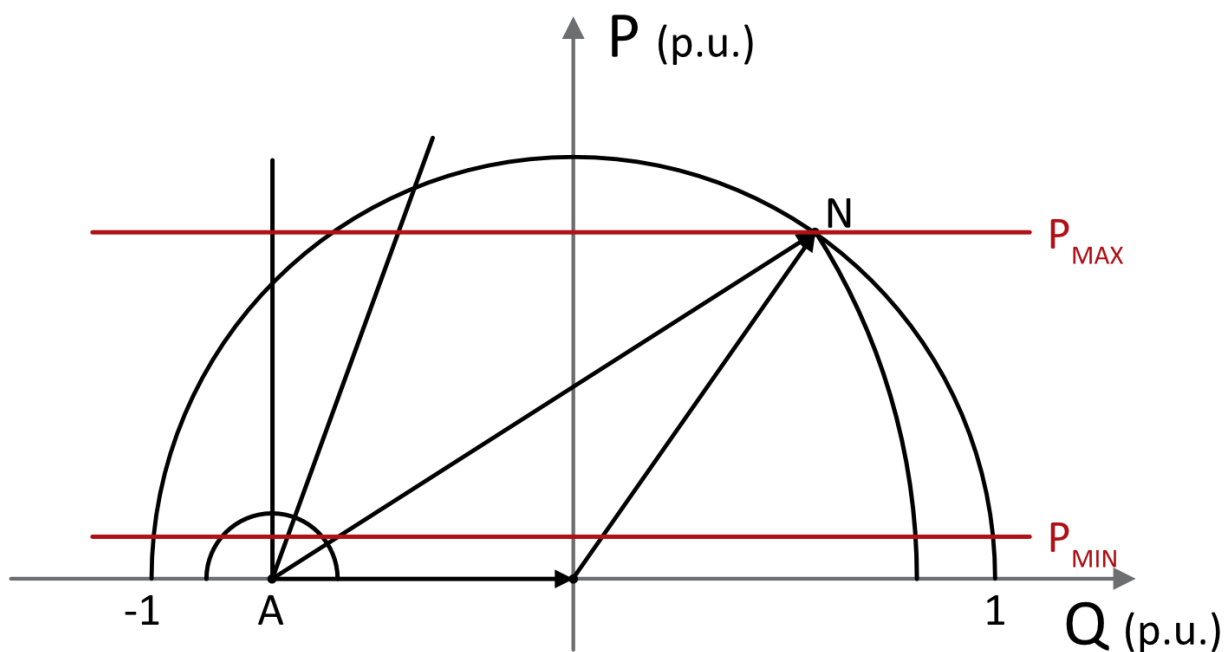
Sljedeće ograničenje predstavlja stabilnost uslijed kuta opterećenja. U teoriji, generator može raditi stabilno samo ako mu je kut opterećenja manji od 90° , međutim, u praksi se kut opterećenja generatora ne dovodi nikad blizu te granice. Sukladno tome, ucrtavaju se dva ograničenja, ograničenje teorijske granice stabilnosti i ograničenje praktične granice stabilnosti. Ograničenje

teorijske stabilnosti crta se kao okomica u točki A, dok se ograničenje praktične granice stabilnosti crta pod određenim kutom manjim od 90° (npr. 70°) iz točke A.

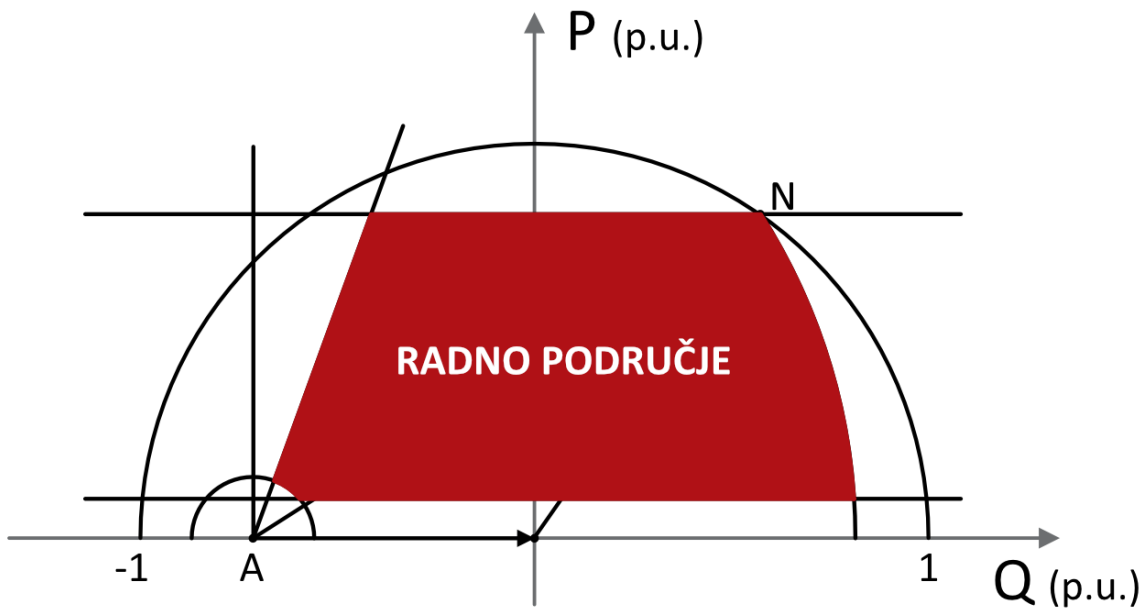


Slika 4.5 Granice stabilnosti

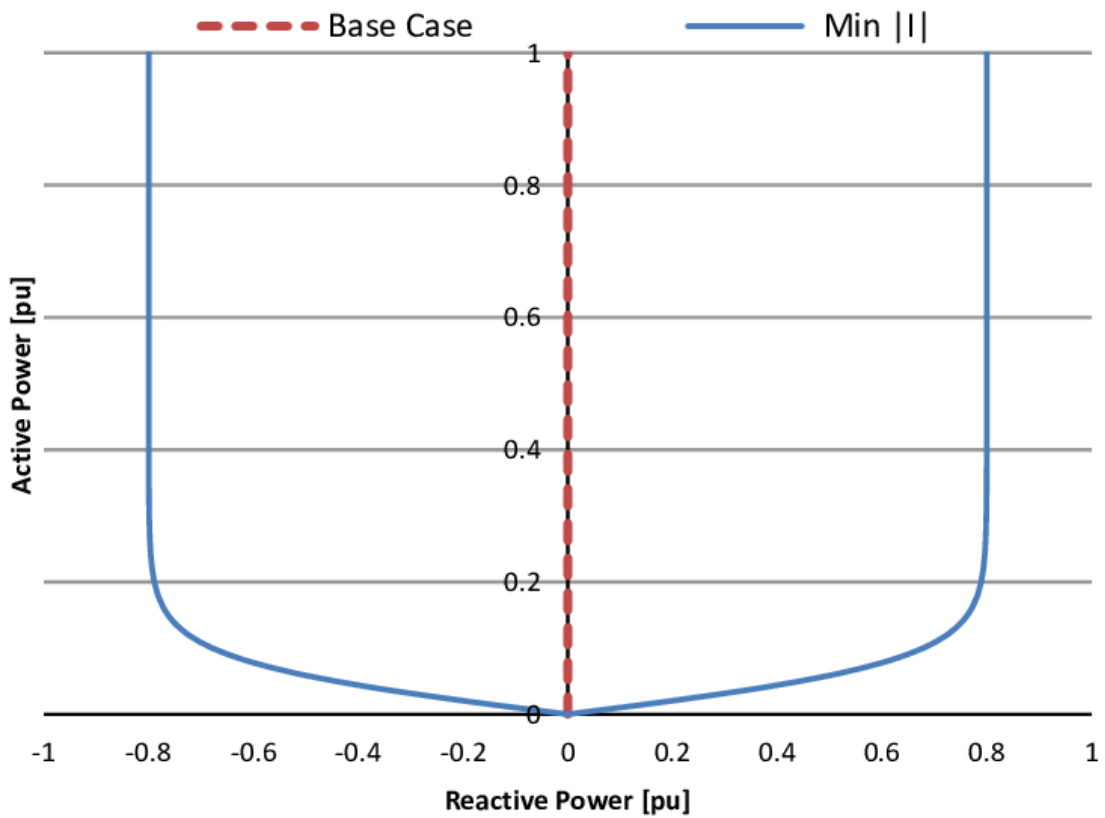
Posljednja ograničenja koja se ucrtavaju su minimalna i maksimalna snaga pogonskoga stroja, stroja zaduženog za mehaničko okretanje rotora. Ona se ucrtavaju kao vodoravni pravci koji sijeku os Y (os P) u točkama P_{MIN} i P_{MAX} .



Slika 4.6 Ograničenja pogonskog stroja



Slika 4.7 Primjer pogonske karte generatora



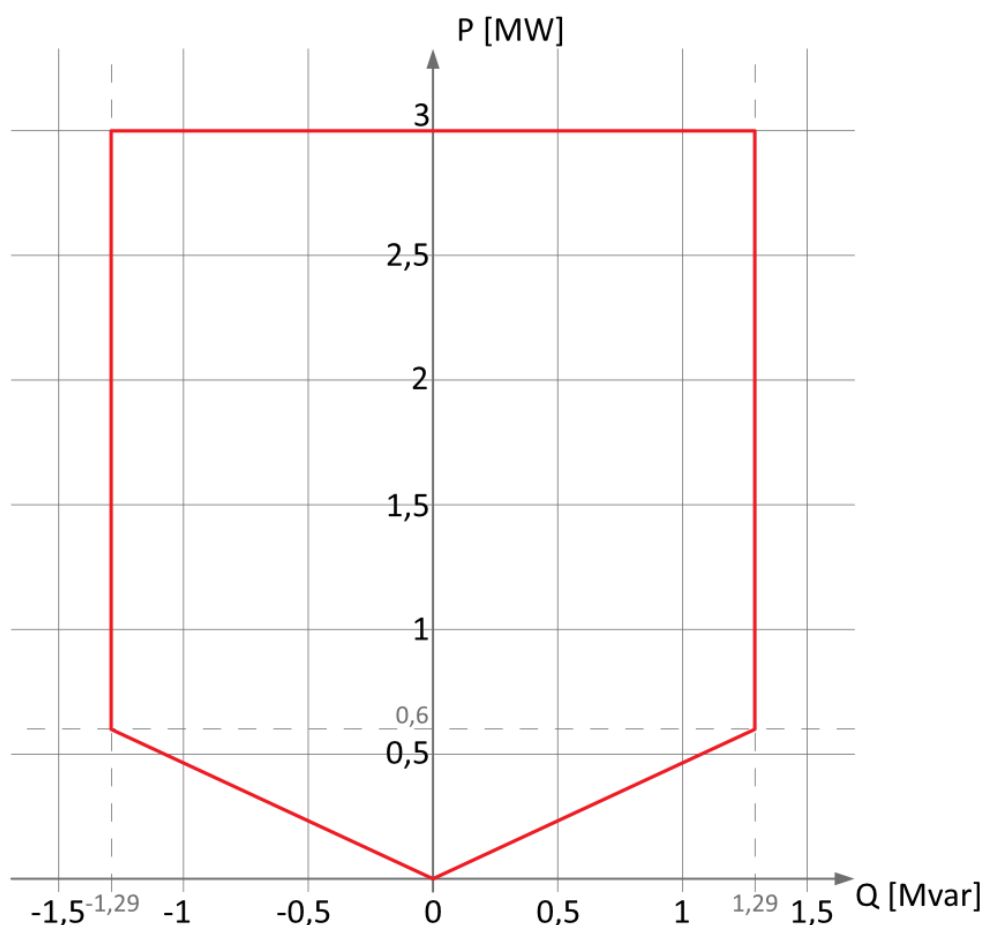
Slika 4.8 Primjer pogonske karte vjetroagregata [12]

4.1 Konstrukcija pogonske karte vjetroelektrane

Koristeći se računalnim programom NEPLAN simulirana je vjetroelektrana priključena na prijenosnu mrežu te su provedeni proračuni tokova snaga kako bi se došlo do podataka potrebnih za izradu pogonske karte vjetroelektrane.

4.1.1 Elementi vjetroelektrane

Vjetroelektrana je sačinjena od 20 međusobno povezanih vjetroagregata. Kao generator se koristi sinkroni stroj s permanentnim magnetima, nazivnog napona $U_n=0,69 \text{ kV}$ i nazivne radne snage $P_n=3,00 \text{ MW}$. Uz generator je priložena i pogonska karta prikazana na slici 4.8.



Slika 4.9 Pogonska karta sinkronog generatora

Za priključak generatora na internu 20 kV mrežu koristi se blok transformator, snage $S_n=3,30 \text{ MVA}$, prijenosnog omjera 0,69/20 kV, napona kratkog spoja $u_k=8\%$, u spoju Yd5 i mogućnosti ručne regulacije napona u iznosu $\pm 2 \times 2,5\%$. 20 kV sabirnice vjetroagregata prvo su međusobno povezane pa potom u cjelinama na glavnu 20 kV sabirnicu VE 20 kV. Za cijelu internu mrežu vjetroelektrane koristi se kabel XHE 49-A 185 mm² karakteristika $R_l=0,164 \text{ } \Omega/\text{km}$, $X_l=0,115 \text{ } \Omega/\text{km}$, $C_l=0,261 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ i $I_r=390 \text{ A}$.

Spoj između glavne sabirnice vjetroelektrane *VE 20 kV* i *VE 110 kV* sabirnice prijenosne mreže izveden je preko energetskog transformatora, snage $S_n=63$ MVA, prijenosnog omjera 110/20 kV, napona kratkog spoja $u_k=12\%$, u spoju YNy0 i mogućnosti automatske regulacije napona u iznosu $\pm 10 \times 1,5\%$. Vanjska mreža definirana je snagom $S_{k3}=10\ 000$ MVA.

Svi opisani elementi zajedno sa svojim parametrima uneseni su u računalni program NEPLAN te su spojeni u cjelinu koja predstavlja EEM. Shema spajanja svih elemenata zajedno sa dužinom vodova prikazana je na nacrtu broj 1.

4.1.2 Proračun tokova snage za različite režime rada vjetroelektrane

Svi podaci vezani za konstrukciju pogonske karte vjetroelektrane promatraju se na mjestu razgraničenja prijenosne mreže i vjetroelektrane, na sabirnici *VE 110 kV* koja predstavlja obračunsko mjerno mjesto. Ukupna radna i jalova snaga koja se na sabirnici *VE 110 kV* preda u prijenosnu mrežu jednaka je razlici radne i jalove snage koju proizvedu generatori i radne i jalove snage gubitaka. Gubici nastaju na elementima interne mreže poput transformatora i vodova te utječu na granice pogonske karte vjetroelektrane zbog čega se ona razlikuje od pogonske karte generatora. U tablici 4.1 prikazani su rezultati simulacije koji sadrže izlaznu radnu i jalovu snagu na generatoru i na sabirnici *VE 110 kV* ovisno o željenom režimu rada.

Tablica 4.1 Tokovi snage na generatoru i na sabirnici *VE 110 kV*

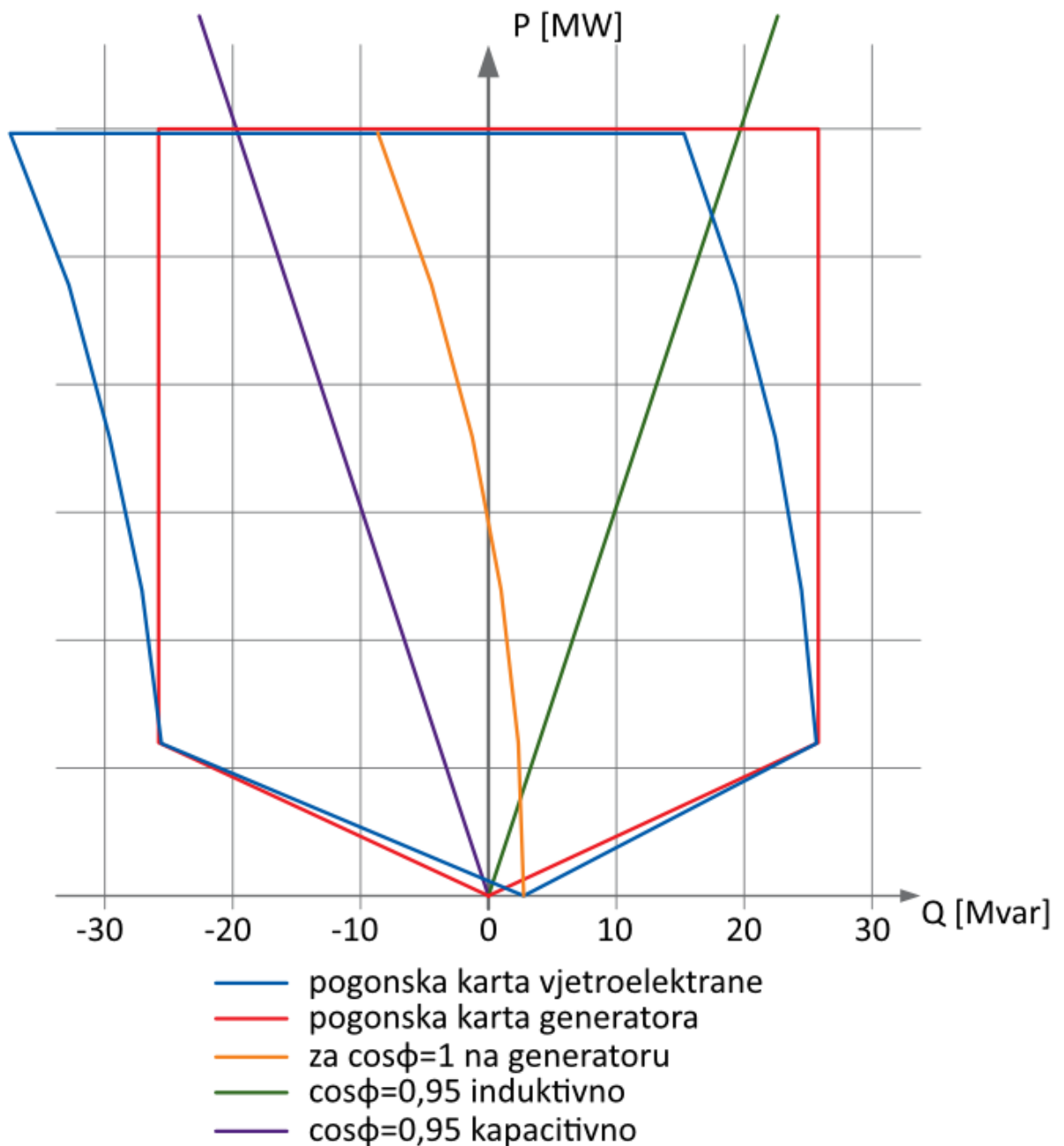
Postavke generatora					Izlazna snaga na sabirnici <i>VE 110 kV</i>			
P [MW]	Q [Mvar]	cosφ			P [MW]	Q [Mvar]	cosφ	
3	0	1		→	59,711	-8,659	0,99	kapacitivno
3	0,986	0,95	induktivno	→	59,685	10,015	0,986	induktivno
3	-0,986	0,95	kapacitivno	→	59,667	-29,157	0,898	kapacitivno
3	0,435	0,99	induktivno	←	59,709	0	1	
3	1,516	0,893	induktivno	←	59,652	19,617	0,95	induktivno
3	-0,514	0,986	kapacitivno	←	59,694	-19,636	0,95	kapacitivno

Ulazni podaci za proračun tokova snaga pomoću računala sadržavali su radnu snagu generatora u iznosu od 3 MW koja je bila ista za sve slučajeve te željene iznose faktora snage $\cos\phi$ bilo na generatoru ili na sabirnici *VE 110 kV*. Temeljem rezultata provedenih simulacija moguće je uočiti razliku ulaznih postavki snage na generatoru i rezultatnih tokova snage na sabirnici *VE 110 kV*. Kada generatori rade sa $\cos\phi=1$, odnosno samo s radnom komponentom snage, izlazna snaga na sabirnici *VE 110 kV* osim radne ima i jalovu komponentu snage kapacitivnog karaktera. Smanjenje radne snage na sabirnici *VE 110 kV* i pojava jalove snage direktna su posljedica djelovanja blok transformatora, vodova i mrežnog transformatora koji su nužni elementi za prijenos električne energije od sinkronog generatora do EEM. Kako u simulaciji nisu uračunati gubici koji nastaju u namotajima bakra na transformatoru, većina gubitaka radne i jalove snage u

internoj mreži vjetroelektrane odnosi se na gubitke u kabelima koji su kapacitivnog karaktera. Kada generatori rade s faktorom snage $\cos\varphi=0,95$ induktivno faktor snage na sabirnici *VE 110 kV* ostaje induktivnog karaktera, ali većeg iznosa, odnosno u mrežu se injektira manje jalove snage nego što se proizvede na sabirnicama generatora upravo zbog gubitka na kabelima koji je kapacitivnog karaktera. Kada generatori rade s faktorom snage $\cos\varphi=0,95$ kapacitivno faktor snage na sabirnici *VE 110 kV* je također kapacitivnog karaktera, ali se zbog već spomenutih gubitaka u kabelima faktor snage dodatno smanji, odnosno iz mreže se prima više jalove snage nego što je iznos na sabirnicama generatora. Za odabrani $\cos\varphi=1$ na sabirnici *VE 110 kV* i izlaznu radnu snagu generatora $P=3$ MW, generatori moraju raditi s faktorom snage $\cos\varphi=0,99$ induktivno, kako bi se namirili kapacitivni gubici u kabelima. Za odabrani $\cos\varphi=0,95$ induktivno na sabirnici *VE 110 kV* i izlaznu radnu snagu generatora $P=3$ MW, generatori moraju raditi s faktorom snage $\cos\varphi=0,893$ induktivno, što je niže od dopuštenih $\cos\varphi=0,919$ pri $P=3$ MW, odnosno pomiče radnu točku generatora izvan njihove pogonske karte te taj režim rada nije moguć. Za odabrani $\cos\varphi=0,95$ kapacitivno na sabirnici *VE 110 kV* i izlaznu radnu snagu generatora $P=3$ MW, generatori moraju raditi s faktorom snage $\cos\varphi=0,986$ kapacitivno.

4.1.3 Pogonska karta vjetroelektrane

Na slici 4.9 prikazana je pogonska karta vjetroelektrane u usporedbi sa sumarnom pogonskom kartom svih generatora.



Slika 4.10 Pogonska karta vjetroelektrane

Iako je vjetroelektrana sastavljena od više generatora, za izradu njene pogonske karte nije dovoljno samo zbrojiti snage generatora, već je u to potrebno uključiti i jalovu snagu koja će se razvijati na vodovima, transformatorima i ostalim elementima vjetroelektrane. Uvažavanjem utjecaja svih elemenata sustava dobit će se pripadajuća pogonska karta vjetroelektrane sa svim mogućim područjima rada na mjestu priključka na mrežu.

Svaka točka na pogonskoj karti generatora ima sebi pripadajuću točku u pogonskoj karti vjetroelektrane i obrnuto. Svi režimi rada koji su sadržani u pogonskoj karti vjetroelektrane rezultat su režima rada sinkronog stroja pod utjecajem interne mreže vjetroelektrane. Na internu mrežu možemo gledati kao na matematičku funkciju. Ulazni parametri funkcije su postavke radne i jalove snage na generatoru, samu funkciju predstavlja interna mreža vjetroelektrane sa svim svojim elementima i njihovim utjecajima na radnu i jalovu snagu, a kao rezultat funkcije dobivamo radnu i jalovu snagu na spoju vjetroelektrane s EEM. U tablici su prikazani ulazni parametri u obliku radne i jalove snage na jednom generatoru zajedno s pripadajućim rezultatima simulacije koji su kasnije služili za izradu pogonske karte vjetroelektrane.

Tablica 4.2 Podaci za izradu pogonske karte

1 generator			20 generatora			Vjetroelektrana	
P [MW]	Q [Mvar]	X 20 kom	P [MW]	Q [Mvar]	utjecaj mreže	P [MW]	Q [Mvar]
0	0	→	0	0	→	0	2,76
0,6	-1,29	→	12	-25,8	→	11,937	-25,585
1,2	-1,29	→	24	-25,8	→	23,899	-27,097
1,8	-1,29	→	36	-25,8	→	35,834	-29,652
2,4	-1,29	→	48	-25,8	→	47,753	-32,794
3	-1,29	→	60	-25,8	→	59,637	-37,415
0,6	1,29	→	12	25,8	→	11,93	25,783
1,2	1,29	→	24	25,8	→	23,897	24,456
1,8	1,29	→	36	25,8	→	35,844	22,441
2,4	1,29	→	48	25,8	→	47,767	19,348
3	1,29	→	60	25,8	→	59,665	15,289

Konstruirana pogonska karta vjetroelektrane precizno nam definira iznose snage i faktora snage koje vjetroelektrana može imati na mjestu priključka s EEM. Ti iznosi snage i faktora snage jednaki su onima na sabirnicama generatora, umanjanim za gubitke snage koji se uglavnom proizvedeni u internoj kabelskoj mreži te su zbog toga kapacitivnog karaktera. Ti kapacitivni gubici u mreži uzrokuju pomak pogonske karte vjetroelektrane u odnosu na pogonsku kartu vjetroagregata u kapacitivnom smjeru. Maksimalna jalova snaga svih generatora definirana je sa $Q = \pm 25,8 \text{ Mvar}$ i može biti dosegnuta uz minimalnu radnu snagu od $P = 12 \text{ MW}$. U području rada kada je radna snaga generatora manja od 12 MW između granica pogonske karte generatora i vjetroelektrane nema velike razlike, osim u točki kada su radna i jalova snaga generatora jednake 0, a na sabirnici VE 110 kV je prisutna jalova snaga kapacitivnog karaktera u iznosu od 2,76 Mvar. Za područje gdje radna snaga prelazi 12 MW, razlika između granica pogonske karte generatora i vjetroelektrane postaje sve veća s porastom radne snage. Kapacitivni utjecaj vodova izraženiji je za nižu vrijednost $\cos\varphi$ postavljenu na sabirnicama generatora. Kada generatori proizvode 60 MW radne snage uz $\cos\varphi = 0,919$ induktivno, što je najniža vrijednost faktora snage s kojim generatori

mogu raditi pri punom opterećenju, proizvode i 25,8 Mvar jalove snage, ali zbog utjecaja interne mreže, na priključnom mjestu elektrane dobivamo 59,637 MW radne i 15,289 Mvar jalove snage što je razlika od 10,51 Mvar u jalovoj snazi. Isti slučaj je i kada generatori proizvode 60 MW radne snage uz $\cos\varphi=0,919$ kapacitivno, proizvode -25,8 Mvar jalove snage kapacitivnog karaktera, a na sabirnicama dobivamo 59,637 MW radne i -37,415 Mvar jalove snage što je razlika od 11,615 Mvar. Sukladno tim karakterističnim točkama definirane su granice pogonskog dijagrama vjetroelektrane.

5 Zaključak

Čovječanstvo počinje iskorištavati energiju vjetra još u 5. stoljeću nove ere. Od tada pa do danas korištenje vjetra kao primarnog izvora energije poprima sve veći razmjer. U početcima se energija vjetra koristila za mehanički pogon mlinova ili pak za pogon crpki za vodu dok se danas energija vjetra ponajprije koristi za proizvodnju električne energije. Prvi električni vjetroagregat u uporabi je bio 1887. godine, a služio je za opskrbu vikendice strujom. Paralelno s razvojem električnih strojeva, novim spoznajama u vidu konstrukcija, aerodinamike i ostalih inženjerskih grana razvijaju se i vjetroagregati. Danas ih pronalazimo u različitim veličinama, rasponima snage, mjestima montaže, načinom izvedbe osi vrtnje itd.

U elektroenergetskom smislu posebno su zanimljivi vjetroagregati srednjih i velikih snaga, koji, povezivanjem u jednu cjelinu, tvore vjetroelektranu. Prednosti električne energije dobivene vjetrom je neograničeni izvor energije uz povoljan ekološki učinak na Zemlju, kako prilikom pretvorbe energije vjetra u električnu energiju ne dolazi do emisije nikakvih štetnih plinova ili drugih neželjenih produkata. Prije gradnje vjetroelektrane potrebno je i pažljivo odabrati lokaciju vjetroelektrane na osnovu meteoroloških podataka kako bi se odabrala lokacija s dobrim vjetropotencijalom.

Osim lokacije, za vjetroelektranu je bitan i odabir električnih strojeva koji će imati funkciju generatora. Različite izvedbe generatora dolaze svaka sa svojim prednostima i nedostacima, a razlikuju se, osim u načinu izrade i u načinu spoja na mrežu. Svaki generator opisuje njegova pogonska karta. Pogonska karta je dijagram snage s ucrtanim ograničenjima trajno dopuštenog rada električnog stroja. Kako je vjetroelektrana sastavljena od generatora kao izvora energije, tako i pogonska karta vjetroelektrane ovisi o pogonskoj karti tih istih generatora. Pogonska karta vjetroelektrane prikazana je kao sumarna pogonska karta svih generatora od kojih je sačinjena vjetroelektrana, zajedno s utjecajem svih pratećih elemenata koji sudjeluju u internoj mreži vjetroelektrane. Iz nje možemo očitati sva moguća trajna područja rada vjetroelektrane, odnosno sve kombinacije djelatne snage s različitim faktorom snage koje se mogu pojaviti na mjestu priključka vjetroelektrane s EEM.

Koristeći računalni program NEPLAN, simulirana je vjetroelektrana sastavljena od 20 sinkronih generatora opisanih pripadajućom pogonskom kartom. Osim generatora, za formiranje vjetroelektrane koristi se i 20 blok transformatora zaduženih za prilagođavanje razine izlaznog napona generatora na naponsku razinu vjetroelektrane, vodovi koji generatore s transformatorima povezuju u cjelinu i mrežni transformator, koji naponsku razinu vjetroelektrane podiže na naponsku razinu EEM na koju se vjetroelektrana spaja. Nakon što su uneseni i spojeni svi elementi

vjetroelektrane zajedno sa svojim parametrima, proveden je izračun tokova snage na izlaznim sabirnicama vjetroelektrane. Unosom karakterističnih točaka radne i jalove snage za sinkrone generatore, računalni program izračunao je pripadajuća stanja na izlaznim sabirnicama vjetroelektrane te je tako omogućena izrada pogonske karte vjetroelektrane.

Dobivena pogonska karta vjetroelektrane od velikog je značaja za operatora sustava koji uvjetuje priključak vjetroelektrane na prijenosni sustav i njen pogon. Poznavanjem pogonske karte, operator sustava može odabrati željeni režim rada vjetroelektrane te tako njenim doprinosom sustavu održavati EEM stabilnom. Ovisno o potrebi, vjetroelektrana može raditi u induktivnom režimu rada gdje injektira jalovu snagu u mrežu ili u kapacitivnom režimu rada gdje preuzima jalovu snagu iz mreže. Pogonskom kartom precizno su definirana rubna područja koja se ne smiju prekoračiti ili dolazi do mogućih kvarova i oštećenja kako u vjetroelektrani tako i u EEM na koju je vjetroelektrana spojena.

6 Literatura

- [1] Višković, A.: „Električni sustavi za energiju“, Školska knjiga, Hrvatska, 2020/2021.
- [2] International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity>, 23. travnja 2023.
- [3] Statista, <https://www.statista.com/statistics/274163/global-biofuel-production-in-oil-equivalent/>, 23. travnja 2023.
- [4] Our World in Data, <https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-source-bar>, 23. travnja 2023.
- [5] Pandžić, H. i dr.: „Obnovljivi izvori energije“, Gimnazija Matija Mesić, Hrvatska, 2016.
- [6] Franković, D.: Predavanje iz kolegija „Elektrane“ – „Osnove korištenja OIE - VE“, Tehnički fakultet Rijeka, Hrvatska, 2020.
- [7] Lee, J; Zhao, F.: „GWEC Global wind report 2022“, Global Wind Energy Council, Belgija, 2022.
- [8] International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/wind-electricity>, 26. travnja 2023.
- [9] Wilkes, J i dr.: „EU Energy Policy to 2050“, European Wind Energy Association, Belgija, 2011.
- [10] Ivanković, I.: „Godišnji izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj“, Hrvatski operator prijenosnog sustava d.d., Hrvatska, 2023.
- [11] Franković, D.: Predavanje iz kolegija „Elektrane“ – „Pogon elektrana“, Tehnički fakultet Rijeka, Hrvatska, 2020.
- [12] Murphy, C; Keane A.: „Optimisation of wind farm reactive power for congestion management“, 2013 IEEE Grenoble Conference, str 1-6, Francuska, 2013.
- [13] Enrique, E. H.: „Generation Capability Curves for Wind Farms“, IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), str 103-106, SAD, 2014.

Sažetak

Energija je svuda oko nas, nemoguće je zamisliti bilo koju aktivnost bez prisutnosti energije. Iako je čovječanstvo već dugi niz godina okrenuto prema fosilnim gorivima kao glavnim izvorima energija, uslijed posljedica klimatskih promjena i globalnog zatopljenja kojima su glavi uzrok upravo ta fosilna goriva, ljudi se okreću prema novim čistim izvorima energije. Upravo je energija vjetra jedna od tih ekološki prihvatljivih izvora energije. Početci njenog iskorištavanja datiraju još od 5. stoljeće Nove Ere, a primjena svakim danom sve više raste. Proces pretvorbe energije vjetra u električnu energiju počinje na lopaticama vjetroagregata, koje hvataju tu energiju vjetra i pretvaraju je u mehaničku energiju. Dobivena mehanička energija potom se koristi za okretanje rotora električnog stroja čime se na njegovim stezaljkama inducira električna energija. Ta električna energija se potom različitim transformatorima i vodovima prenosi dalje kroz EEM. Svaki električni stroj opisan je pogonskom kartom koja točno opisuje moguća trajna područja rada tog stroja. Kako se povezivanjem više vjetroagregata u cjelinu tvori vjetroelektrana, povezivanjem pogonskih karti vjetroagregata uključivši utjecaj elemenata interne mreže poput transformatora i vodova od kojih je sačinjena vjetroelektrana dobiva se pogonska karta vjetroelektrane. Pogonska karta vjetroelektrane daje točan prikaz svih mogućih trajnih područja rada te vjetroelektrane, odnosno prikaz svih mogućih tokova snage sa pripadajućim faktorima snage.

Ključne riječi: energija vjetra, vjetroagregat, pogonska karta

Summary

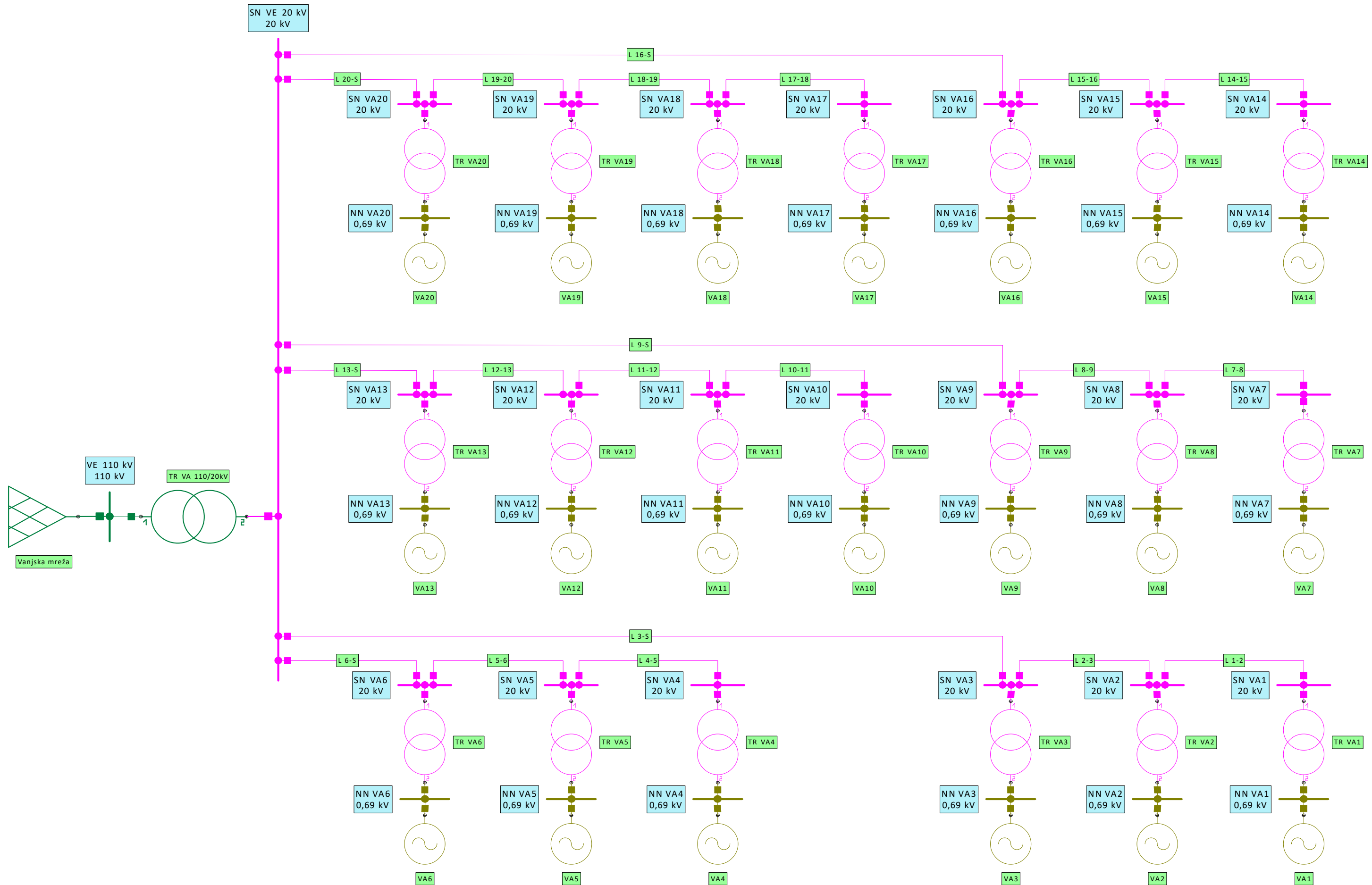
Energy is everywhere around us; it is impossible to imagine any activity without the presence of energy. Although humanity has been relying on fossil fuels as the main sources of energy for many years, the consequences of climate change and global warming, primarily caused by these fossil fuels, have led people to turn towards new clean sources of energy. Wind energy is one of these environmentally friendly sources of energy. Its utilization dates back to the 5th century AD, and its application is growing day by day. The process of converting wind energy into electrical energy begins with the blades of a wind turbine, which capture the wind energy and convert it into mechanical energy. The obtained mechanical energy is then used to rotate the rotor of an electric generator, inducing electrical energy in its terminals. This electrical energy is further transmitted through the power grid using different transformers and power lines. Each electric generator is described by a characteristic operating map, which precisely defines its possible operating regions. By connecting multiple wind turbines into a single entity, a wind farm is formed. By combining the operating maps of individual wind turbines, including the influence of internal grid elements such as transformers and power lines, the operating map of the wind farm is obtained. The operating map of a wind farm provides an accurate representation of all possible operating regions and power flows with their corresponding power factors.

Key words: wind energy, wind turbine, capability curve

Dodatak A

Tehnička dokumentacija:

Nacrt 1: Jednopolna shema vjetroelektrane



Naziv:			
Jednopolna shema vjetroelektrane			
Zadatak:		Mentor:	
Pogonska karta vjetroagregata i vjetroelektrane		izv. prof. dr. sc. Dubravko Franković	
Autor:	JMBAG:	Datum:	Broj nacрта:
Ivan Petrović	0069061280	Svibanj, 2023.	1.