

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

PRIMJENA MIKRO VJETROELEKTRANA

Rijeka, travanj 2015.

Mateo Licul

0069048488

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

PRIMJENA MIKRO VJETROELEKTRANA

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

Rijeka, travanj 2015.

Mateo Licul

0069048488

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/15-14/07
Rijeka, 06.03.2015.

ZADATAK za završni rad

Pristupnik: Mateo Licul

Matični broj:0069048488
Lokalni matični broj: 09800034

Naziv zadatka:

PRIMJENA MIKRO VJETROELEKTRANA

Naziv zadatka na
engleskom jeziku:

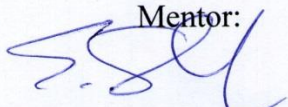
Micro wind plants application

Sadržaj zadatka:

U radu je potrebno dati teorijski pregled načina rada vjetroelektrana. Prikazati podjelu vjetroelektrana obzirom na snagu i priključak na elektroenergetsku mrežu. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti opisu mikro vjetroagregata, obzirom na korištenu tehnologiju. Prikazati primjenu mikro vjetroelektrana.

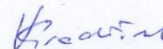
Zadano: 17.03.2015.

Mentor:



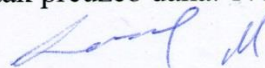
Izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.



(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovođa Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

IZJAVA

Sukladno s člankom 9. PRAVILNIKA o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku br. 602-04/14-14/06 od 17.03.2014.

Rijeka, travanj 2015.

Mateo Licul

1. UVOD	1
2. VJETAR	3
2.1. Energija vjetra	4
2.2. Brzina vjetra	5
2.2.1. Osnovna brzina vjetra	6
2.3. Tlak vjetra	8
2.4. Vjetrovi u priobalju Republike Hrvatske	9
2.4.1. Bura	9
2.4.2. Jugo	10
2.4.3. Ostali vjetrovi u priobalju	10
3. TREND OVI RAZVOJA VJETROELEKTRANA	12
3.1. Tržišni razvoj	14
3.2. Razvoj vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj	20
4. MALE VJETROELEKTRANE	22
4.1. Podjela vjetroelektrana obzirom na snagu	22
4.1.1. Male vjetroelektrane	22
4.1.2. Srednje i velike vjetroelektrane	25
4.1.3. Jako velike vjetroelektrane	26
4.2. Konstrukcijski oblici malih vjetroagregata	27
4.2.1. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje (VSHO)	29
4.2.2. Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje (VSVO)	30
4.3. Komponente malih vjetroagregata	31
4.3.1. Stup vjetroagregata	32
4.3.2. Rotor vjetroagregata.....	32
4.3.3. Generator vjetroagregata	33
4.3.4. Reduktor vjetroagregata	37

5. NAČINI PRILJUČKA VJETROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU	38
5.1. Vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje.....	40
5.2. Vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje	41
5.3. Primjeri mogućih priključenja na mrežu	42
6. ZAKLJUČAK	44
POPIS LITERATURE	45
POPIS SLIKA I TABLICA.....	47

1. UVOD

U ovom radu pažnja je posvećena načinu rada vjetroelektrana, njihovoj podjeli s obzirom na snagu te priključku na elektroenergetsku mrežu. Pažnja je također posvećena opisu mikro vjetroagregata, kako i njihovoj primjeni. Kako bi tema lakše bila shvatljiva potrebno je i dodatno zaviriti u povijest vjetroelektrana i korištenja energije vjetra.

Počeci korištenja energije vjetra sežu još od vremena kada su ljudi prvi puta postavili jedra na brodove. Time su si omogućili putovanja, ali su i svoje živote i puteve prepustili u okvire tog nepredvidljivog obnovljivog izvora energije. Neki čak smatraju da je vjetar bio glavni razlog pokretanja izmjene robe i prijenosa dobara na velike udaljenosti. Nakon nekog vremena osim za pokretanje jedrenjaka vjetar se počeo koristiti i za pokretanje vodenih pumpi te za obnavljanje mehaničkog rada, za što su pravi primjer mlinovi. Pronalaskom električne energije vjetar se počeo koristiti kao pokretač za proizvodnju iste, a još veći porast populacije dobio je u zadnja dva desetljeća kada se sve više počelo paziti i gledati na očuvanje Zemlje i smanjenje zagađenja okoliša. Osvrnuvši se na svjetsku proizvodnju električne energije, primjećuje se da najveći udio u njenoj proizvodnji imaju termoelektrane. One koriste fosilna goriva koja uvelike zagađuju i uništavaju Zemljinu atmosferu. Samom tom činjenicom nalaže se potreba za korištenjem alternativnih izvora energije koje Zemlja pruža. Među te izvore također spada i energija vjetra.

Sedamdesetih godina prošloga stoljeća počelo je moderno iskorištavanje vjetra, koje se zadržalo i danas. Do toga je došlo uslijed svjetske naftne krize 1973. godine. Početak razvoja krenuo je od malih vjetroagregata koji su se koristili na farmama, a njihova snaga iznosila je od 1kW do 25kW. Proširio se na više međusobno povezanih vjetroagregata čime su se počele dobivati prve vjetroelektrane srednjih snaga od 50kW do 600kW. Na vrhuncu razvoja u Kaliforniji bilo je sagrađeno 17000 vjetroagregata. Njihova ukupna snaga iznosila je 1700MW, a godišnje su proizvodili oko 3TWh, što je bilo dovoljno za opskrbu električnom energijom područja na kojima je boravilo 3 milijuna stanovnika.

Kako je već spomenuto, razvojem tehnologije, svijesti o ekologiji te potrebama za jeftinijom energijom, dolazi se do povećanja broja objekata koji imaju ugrađen barem jedan sustav koji koristi alternativne izvore energije koje pruža Zemlja. Takvi sustavi nazivaju se samoodrživi objekti ili autonomni sustavi. Kako bi došlo do sve veće populacije navedenih sustava mora se paziti na osnovne uvjete i zahtjeve krajnjih korisnika. Neki od tih uvjeta su prihvatljiva cijena, lako održavanje, optimalna iskoristivost.

Prilikom pristupanja izgradnji ovakvih uređaja potrebno je poznavati neke osnovne pojmove vezane za njih. Isto tako neizbježno je posvetiti pažnju energentu koji ih pokreće, uređaju za pretvorbu mehaničke energije u električnu, te saznati nešto o postojećim konstrukcijskim izvedbama na tržištu. Ako se na ovaj način pristupi izradi ovog uređaja uvelike će se smanjiti neki od nedostataka već postojećih proizvoda. Samom analizom dolazi se i do mogućnosti povećanja učinka sustava. Kod izgradnje bilo kojeg sustava cijena je jedan od glavnih faktora. Niska cijena uvelike povećava tržišnu zainteresiranost. Ove konstrukcije trenutno nisu predviđene za masovnu proizvodnju već za komadnu proizvodnju. Za takav način proizvodnje bitno je da u početku bude financijski isplativiji, stoga korišteni materijali moraju biti veoma lako dostupni, a tehnološki postupci jednostavni.

2. VJETAR

Horizontalno strujanje zraka nazivamo vjetar. Za vjetar također možemo reći da je to strujanje zračnih masa koje nastaju uslijed razlike između temperatura odnosno tlakova. Isto tako može se reći da se gibanje zračnih masa u atmosferi javlja zbog neravnomjernog zagrijavanja Zemljine površine. Zemljina površina zagrijava se neravnomjerno jer se zagrijava indirektno preko tla. More se grije sporije od kopna, a ekvator dobiva više energije od polova. Spomenuti način zagrijavanja Zemlje tjera globalni atmosferski sustav prijenosa topline s površine Zemlje stratosferi gdje stratosfera predstavlja virtualni strop. Veći dio te energije se nalazi na većim visinama i na njima vjetar prelazi brzinu od 160km/h. Trenjem dio energije vjetra prelazi kroz atmosferu i Zemljimu površinu u difuznu toplinu. Istraživanja pokazuju da je na Zemljinoj površini iskoristivost energije vjetra približna 72TW, no poznato je da sva ta energija teoretski nije iskoristiva. Zemlja od Sunca dobiva $1,7 \cdot 10^{17} \text{W}$ snage, a od toga 1% do 2% se pretvara u vjetar. Vjetar je nepredvidiva pojava, a njegova brzina je promjenjiva što sve uvelike ovisi i o klimatskim čimbenicima na Zemlji. Bez obzira na navedene činjenice energiju vjetra možemo koristiti na određenim djelovima Zemlje za proizvodnju električne energije. Električnu energiju dobivamo pretvaranjem kinetičke energije vjetra. [2,9]

2.1. Energija vjetra

Kada se priča o energiji vjetra misli se na njegovu snagu. Snaga samog vjetra određena je gustoćom i brzinom vjetra na određenoj jedinici površine na kojoj se vrše mjerenja, te je stoga mjerna jedinica za snagu vjetra $\frac{W}{m^2}$ (vat po metru kvadratnom)

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.1)$$

gdje je:

- P – snaga vjetra po jedinici površine
- ρ – gustoća zraka
- v – brzina vjetra

Iz predhodne jednadžbe lako se zaključuje da veliku ulogu u računanje snage vjetra ima i njegova brzina. Da se zaključiti da se snaga vjetra mijenja eksponencijalno u ovisnosti o brzini vjetra pošto je proporcionalna trećoj potenciji brzine vjetra. Na umu treba imati da se energija vjetra ne može u potpunosti iskoristiti. Po Betzovom zakonu može se iskoristiti 59,3% energije vjetra, no isto tako valja napomenuti da vjetroagregati današnjice kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehanički rad vrtnje rotora najčešće na brzinama od 3m/s do 25m/s, odnosno od 10,8km/h do 90km/h. [4]

2.2. Brzina vjetra

Kao što je već spomenuto zbog meteroloških mjena nastaje vjetar kao posljedica različitih tlakova u atmosferi. Određen je kao i sve vektorske veličine svojom brzinom i smjerom, ali i jačinom. Brzina vjetra označava se uobičajenom mjernom jedinicom za brzinu a to je m/s, km/h, čvorovima ili beaufort-om. Sama brzina mjeri se anemometrom. To je instrument za mjerenje jačine vjetra i brzine strujana zraka. Po svojoj konstrukciji morao bi izdržati i najveće nalete vjetra kako bi ih mogao izmjeriti. Isto tako mora prepoznati i najmanju količinu vjetra. Svo ovo bitno je radi ispravnog odabira smještanja vjetroagregata. Mjerne jedinice po Beaufortu vidljive su iz sljedeće tablice. [9]

Tablica 2.1. Brzine vjetra prema Beaufortu

Beaufort	Km/h
0	4
1	8
2	13
3	20
4	27
5	36
6	45
7	56
8	67
9	80
10	93
11	108
12	123
13	140
14	157
15	176
16	195
17	216

2.2.1. Osnovna brzina vjetra

Osnovna brzina vjetra je maksimalna brzina vjetra za koju se može očekivati da bude premašena u prosjeku jednom u 50 godina. Osnovna brzina vjetra mjeri se na visini od 10m od tla i na terenu hrapavosti visine 0,03m. Konačna meteorološka podloga kod koje se obavlja propačun opterećenja vjetrom sadrži zone opterećenja vjetrom ovisne o iznosu te brzine[5,16]. Na osnovu te zone ocjenjuje se maksimalno očekivano opterećenje konstrukcije, te određuju parametri potrebni za pravilno projektiranje samog vjetroagregata. Izračunavanje osnovne brzine vjetra je nužno pri projektiranju i izgradnji samih vjetroagregata kako bi se iskonstruirali na način da budu što otporniji na negativna djelovanje vjetra ekstremnih brzina. U nastavku dana je tablica sa primjerima kriterija zoniranja određenog područja s obzirom na osnovnu brzinu vjetra.

Tablica 2.2. Kriterij zoniranja određenog područja s obzirom na osnovnu brzinu vjetra

V_b (m/s)	Zona
<25	I
25-30	II
30-35	III
35-40	IV
>40	V

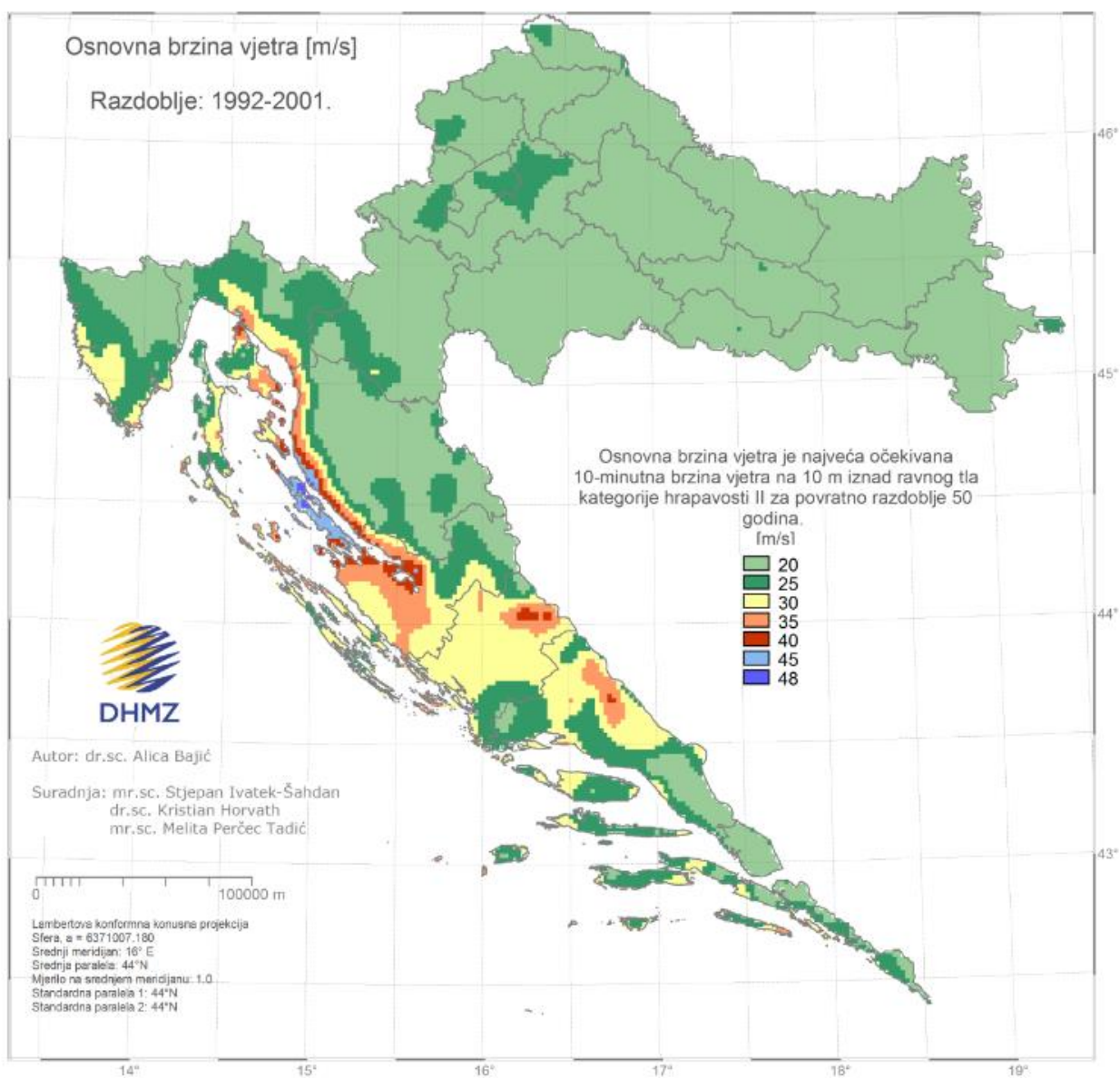
Osnovnu brzinu vjetra može se izračunati po sljedećoj formuli:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (2.2)$$

gdje je:

- c_{dir} – faktor smjera vjetra (najčešća vrijednost 1)
- c_{season} – koeficijent godišnjeg doba (najčešća vrijednost 1)
- $v_{b,0}$ – temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra

$v_{b,0}$ kao temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra određuje se iz karte osnovne brzine vjetra (Slika 2.1.)



Slika 2.1. Osnovne brzine vjetra u Republici Hrvatskoj[16]

2.3. Tlak vjetra

Kao što je poznato tlak zraka povećava se s njegovom visinom iznad tla, te je stoga sami tlak bitan kod odabira konstrukcije same vjetroelektrane. Točnije, konstrukcija mora izdržati i najveće udare vjetra u određenome trenutku. To se lako da primjetiti na primjerima koji nas okružuju na kojima se vidi da su u većini slučajeva stupovi vjetroagregata sačinjeni valjkastim oblikom radi manjeg otpora i lakšeg strujanja zraka. Zrak čine molekule plinova koje su u konstantnom gibanju i pomicanju. Njihovo pomicanje i utjecaj na bilo koju površinu označava silu, odnosno tlak zraka. Do vjetra dolazi prilikom promjene tlaka, odnosno takva promjena kao posljedicu donosi horizontalno i vertikalno pomicanje zraka zvano vjetar.

Vjetrovno opterećenje je promjenjivo djelovanje koje djeluje okomito na površinu konstrukcije, a pod to se podrazumijeva

- trenje vjetra po konstrukciji
- djelovanje vjetra na konstrukciju

Ovisnost o smjeru i brzini vjetra kojom vjetar djeluje na površine građevina označava se u

- kp/m^2 – kilopondima po metru kvadratnom
- kN/m^2 – kilonjutnima po metru kvadratnom

U nastavku dan je okvirni pregled iznosa tlaka vjetra u ovisnosti o visini iznad tla na kojoj se izmjerava vrši, te samoj brzini.

Tablica 2.3. Iznos tlaka vjetra u ovisnosti o visini izmjere

Tlak vjetra [kp/m^2]	Visina iznad tla [m]	Brzina vjetra [m/s]
50	0-8	28,3
80	8-20	35,8
110	20-100	42,0
130	>100	45,6

2.4. Vjetrovi u priobalju Republike Hrvatske

S obzirom na konfiguraciju terena u priobalju na značajke vjetrova utječu strma obala, te spoj mora i kopna. Pod strmom obalom podrazumjeva se izdizanje gorskih masiva u blizini obale kao što su Učka, Velebit. Radi svoga položaja ovi masivi djeluju tako da usmjeravaju hladnu struju vjetra. Spoj mora i kopna stvara razlike u tlakovima. Do tih razlika u tlakovima dolazi uslijed već spomenute pojave različite brzine zagrijavanja kopna i mora.

Najutjecajniji vjetrovi u priobalju su bura i jugo. Oni su jači u zimskom periodu nego u ljetnom. Njihov smjer određen je obalnom linijom. Bura je dakle sjeveroistočni vjetar koji udara okomito na obalu. Najčešći i najučestaliji je vjetar tokom siječnja i veljače, dok je jugo jugoistočni vjetar koji prati obalnu liniju te dolazi s juga Jadrana. Karakterističan je za početak proljeća i jeseni. Važno je još spomenuti da postoji još jedan vjetar koji je jako utjecajan na Kvarnerskom području a to je jugozapadnjak do kojeg dolazi zbog reljefa Velih Vrata[3].

2.4.1. Bura

Jak, hladan i suh vjetar koji dolazi sa sjeveroistoka. Naješći je u zimsko doba godine u sjevernom djelu istočne obale Jadranskog mora. Gdje se gorje proteže blizu morske obale (Velebit) puše velikom kadkad orkanskom brzinom. Nastaje na način da se hladan zrak sa kopna spušta niz strme obronke gorskog lanca kroz primorske drage prema moru što dovodi do velike brzine. Vertikalna komponenta gibanja je izrazito velika te time dobiva i jako nemirnu struju zraka. Navedene činjenice objašnjavaju njeno puhanje na mahove[1].

Trajanje bure je nepredvidljivo. Može potrajati više dana, a specifična je po tome što u većini slučajeva počinje naglo, a smiruje se postepeno. Kao što je spomenuto puše na mahove, te udarci znaju prelaziti brzinu od 20m/s. Prema Beaufortovoj ljestvici ta jačina odgovara stupnju 9, a kadkad prelazi i brzinu od 50m/s. Njena najveća brzina izmjerena je 2013. Godine na autocesti A1 a iznosila je 307km/h. Ovaj podatak nesmatra se službenim radi nepredviđenosti instrumenta

na tolike udare. Službeno najveća izmjerena brzina iznosi 248km/h (69m/s) postignuta 1998. Godine na Masleničkom mostu.

2.4.2. Jugo

Topao i vlažan vjetar koji se još naziva i široko. Obično je povezan s nadolazećom ciklonom iz zapadnog sredozemlja te puše s jugoistoka Jadrana. Njegova karakteristika je da razvija visoke valove, te da je praćen kišovitim vremenom. Najčešće se pojavljuje u hladnijim djelovima godine no nije izuzetak da se pojavi i ljeti. Njegov utjecaj na Jadranskoj obali je raspoređen. Od početka jeseni do kraja zime javlja se na južnom jadrano, a od kraja zime do početka ljeta na sjevernom[1,2].

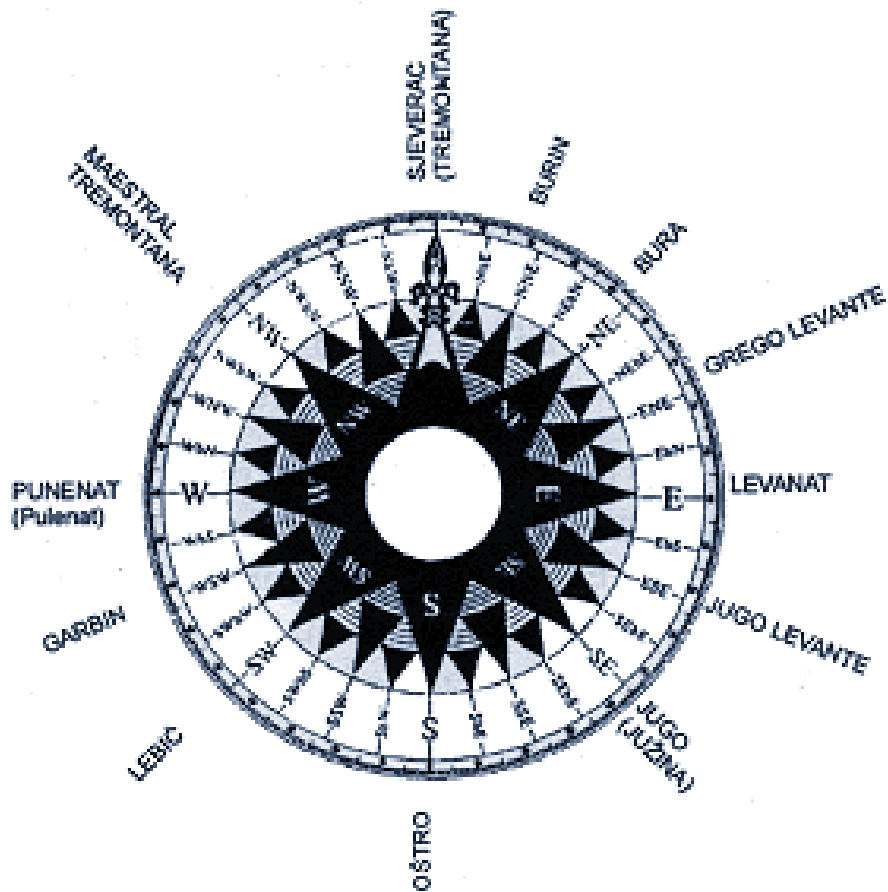
Trajanje juga ovisi o godišnjem dobu u kojem se pojavilo. Zimi može trajati od 8 dana pa sve do 3 tjedna. Ljeti je stvar potpuno drukčija pa njegovo djelovanje ne traje dulje od 3 dana. U odnosu na buru svoju krajnju brzinu dostiže postepeno, odnosno tek nakon 24 do 36 sati punaha. Njegova brzina puhanja nešto je manja od brzine puhanja bure te iznosi između 10m/s i 30m/s.

2.4.3. Ostali vjetrovi u priobalju

Osim navedenih, najznačajnijih vjetrova u priobalju se možemo susresti i sa sljedećim

- tramontana- N (S)- hladan vjetar sličan buri
- burin- NNE (SSI)- puše noću s kopna
- bura- NE (SI)- puše s kopna preko planina na more
- grego levante- ENE (IJ)- puše zimi
- levant- E (I)- slična obilježja bure. Kadkad topal s lijepim vremenom
- jugo levante- ESE (IJ)

- jugo- SE (JI)- donosi kišu i loše biometerološke prilike
- oštro-S (J)- kratko traje, ali ima veliku snagu
- maestral obalni- SSW (JJZ)
- lebić- SW (JZ)- kratko traje, često dolazi nakon juga
- garbin- WSW (ZJZ)
- pulenat- W (Z)- rijedak vjetar
- maestral- NW (SZ)- ljetni vjetar, puše popodne, nosi rashlađenje



Slika 2.2. Ruža vjetrova[9,16]

3. TRENDOWI RAZVOJA VJETROELEKTRANA

Za početak bitno je naglasiti kako mali vjetrogeneratori u odnosu na velike u aspektu konstrukcije ne odskaku previše. Jedina vidljiva razlika je u njihovoj veličini, što za sobom također povlači i manju iskoristivost kinetičke energije vjetra, a time i manju proizvodnju električne energije. Dolaskom i širenjem industrije za potrebe vjetroagregata počele su se koristiti neke nove konstrukcijske metode. Ovdje se osnovno misli na upotrebu novih materijala koji su povećali pouzdanost i kvalitetu uređaja. Samim time proizvodnja energije putem vjetroagregata postala je uvelike konkurentna ostalim konvencionalnim izvorima energije, kako cjenom tako i glede ekoloških aspekata.

Pod male vjetroagregate spadaju uređaji koju su namjenjeni za potrebe opskrbe kućanstvama, odnosno snage do 10kW. Iako je spomenuto da se konstrukcijskim oblikom previše ne razlikuju od velikih vjetroagregata od njih se razlikuju po sljedećim karakteristikama koje ih i svrstavaju među male vjetroagregate:

- u principu se postavljaju kao samostalne jedinice
- različita primjena i iskorištavanje energije
- različiti tržišni principi
- posebni kriteriji izbora lokacije i zahtjevi s obzirom na okoliš
- korištenje raznovrsnijih tehničkih rješenja
- energetska neovisnost korisnika
- električna energija se proizvodi na mjestu na kojem se i troši
- opskrba energijom izoliranih potrošača
- stabilnost cijene energije
- jednostavnija primjena i montaža
- veća zaštita okoliša

Gledajući u blisku budućnost moglo bi se zaključiti kako se energija vjetra nameće kao rješenje koje se neće moći izbjeći ukoliko na cilj gledamo kao zadovoljavanje energetske potrebe. Iz tog razloga može se reći kako mali vjetroagregati imaju dobre predispozicije za sve većim razvojem, a pri tome smatraju se i jedni od najjeftinijih načina za proizvodnju vlastite električne energije. Kako bi se zadovoljine energetske potrebe već se nameću rješenja u kojima bi svaka novosagrađena zgrada morala imati svoj izvor energije. Samim time potiče se na usavršavanje tehnoloških rješenja. Za male vjetroagregate može se reći da su primjenjivi u svim urbanističkim zonama. Kako u gradskim tako i u izoliranim područjima. Njihova prilagodljivost svim sredinama uvelike potpomaže njihovoj masovnijoj populaciji.

Iskorištavanjem vjetra kao energenta za proizvodnju električne energije uvelike se doprinosi i očuvanju okoliša, koji je u današnjem svijetu sve veći problem. Korištenjem vjetroagregata u atmosferu se ne ispuštaju staklenički plinovi koji negativno utječu na kompletni eko sustav, što bi danas trebalo biti od velike važnosti s obzirom na broj i veličinu tvornica u svijetu.

Mali vjetroagregati svojom su cjenom vrlo pristupačni i konkurentni, a i povrat investicije često nije primaran razlog prilikom njihovog postavljanja već energetska neovisnost. Oni omogućuju potpunu ili djelomičnu energetska neovisnost, ovisno o ciljevima i potrebama korisnika. Dokazano je kako uvelike djeluju na smanjenje računa za električnu energiju, čime se i smanjuje osjetljivost rasta cijene električne energije koju dostavlja distributer.

Ukoliko se žele postići sve ranije navedene pozitivne strane malih vjetroagregata mora se paziti i na neka načela i pravila vezanih za njihovo postavljanje, montažu te puštanje u rad[5,8].

- **mjesto montaže**- sami stup vjetroagregata mora biti postavljen na udaljenosti od najmanje jedne visine stupa od ruba čestice na kojoj se nalazi, te nesmiye ugrožavati susjedne čestice

- **estetika**- kako u današnjem svijetu ima različitih ljudi sa različitim stavovima i aspektima estetike moguće su pritužbe susjednog stanovništva te s toga treba paziti na način postavljanja, konfiguraciju terena.

- **buka-** za buku se može reći da je zanemarivi čimbenik. Mali vjetroagregati ne proizvode buku veću od nekih kućanskih aparata kao što je hladnjak. Ta količina buke nije velika ako se u obzir uzme da u njegovoj okolini postoji prometnica koja skoro u potpunosti prednjači u količini proizvedene buke.

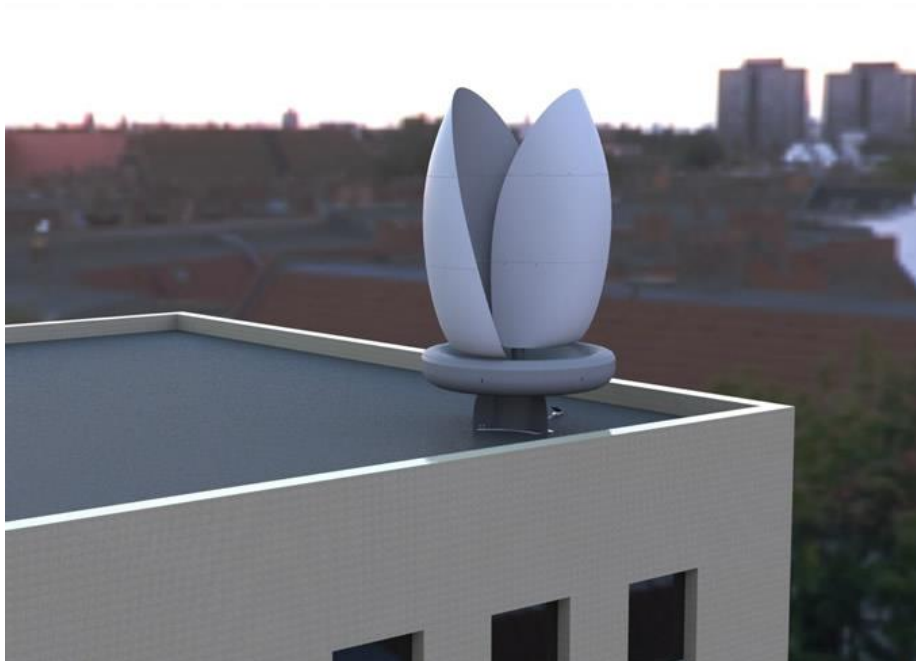
- **sigurnost-** pri instalaciji posebnu pažnju potrebno je posvetiti svim sigurnosnim mjerama radi visine na kojoj se oni smještaju kako se nebi smanjila njihova sigurnost i dugi životni vijek

- **vremenski uvjeti-** u priobalju pažnju valja posvetiti i vremenskim uvjetima kao što su jaka bura i blizina mora. Blizina mora pospješena burom utječe na povećanu koroziju na vjetroagregatima. Na navedenu činjenicu može se utjecati učestalim održavanjem te kontrolom[5].

3.1. Tržišni razvoj

U Republici Hrvatskoj postoji nešto manji broj dostupnih malih vjetroagregata nego na svjetskom tržištu. Danas se mali vjetroagregati proizvode u širokom rasponu snaga, ali i oblika. Kad se spomene oblik prvenstveno se misli na izgled „lopatica“, koje nemaju uvijek njihov izgled. Pojedinačna snaga vjetroagregata na tržištu je u rasponu od nekoliko stotina vata, pa sve do nekoliko desetaka kilovata. Kao što je već spomenuto takvi vjetroagregati često se postavljaju na nešto udaljenijim lokacijama gdje je teža dostupnost električne mreže. Najčešća uporaba je napajanje odašiljača ili mobilne stanice. Jedan takav primjer je nedavno izgrađen hibridni sustav na Velom Vrhcu iznad naselja Drenova kraj Rijeke, koji uključuje fotonaponsko i vjetronaponsko napajanje mobilne stanice u svrhu geodetskih izmjera. Karakteristike rada su im vrlo slične većim vjetroelektranama no potrebna brzina vjetra za proizvodnju električne energije je znatno niža. Za početak rada potrebna je brzina vjetra već od 3m/s, a u normalnom su pogonu na brzinama između 12m/s i 15m/s. Jedna od prednosti je što za razliku od većih vjetroagregata mogu raditi i pri puno jačim vjetrovima. U nekim izvedbama dozvoljena brzina vjetra iznosi i do 50m/s. Jedan takav primjer je vjetroagregat firme AriDolphin koja ima i mogućnost isporuke snage znatno veće od nominalne, čak i do 4 puta. Time se dobiva iskorištavanje i jakih vjetrova.

Osvrnuvši se na oblik i konstrukcijske izvedbe malih vjetroagregata danas nailazimo na široki spektar mogućnosti. Što se tiče vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje, može se reći da su u zadnjih nekoliko godina doživjeli dizajnerski procvat. U njihovom projektiranju ne sudjeluju više samo stručnjaci za aerodinamiku već i poznati svjetski dizajneri. Samim time vjetroagregati su počeli poprimati izgled cvijetova, na primjer tulipana ili lotusovog cvijeta. Takvi vjetroagregati u bližem vremenskom periodu nisu financijski isplativi već je njihova uporaba eventualno u dekorativne i prezentacijske svrhe. Kod takvih svrha ne gleda se pretjerano na financijska ulaganja. Pretpostavlja se da rastom tržišta i potražnjom novih ideja u skorije vrijeme može doći do pada njihovih cijena.



Slika 3.1. Vjetroagregat Wind Tulip[13]

Navedene vrste vjetroagregata instaliravaju se u urbanim područjima. Razlog tome je niska količina buke, malo treperenje, mala osjetljivost na turbulencije, kompaktne su, što ih također i razlikuje od velikih vjetroagregata. Za razliku od velikih vjetroagregata ovi dizajnerski primjeri vrlo su i ugodni oku te ih se može postaviti daleko više na manjoj površini. Radi svog konstrukcijskog oblika zahvaćaju manju površinu vjetra te im je time smanjena učinkovitost. Početak rada procjenjuje se na brzini oko 3m/s, dok je za nominalnu snagu potrebna brzina vjetra od 15m/s do 20m/s. Njihova snaga iznosi od 3,5kW do 5kW.

Ovakve izvedbe vjetroagregata najčešće uz sebe nude i još neke dodatne opcije. Neke od tih opcija su stup sa vjetroagregatom na vrhu u čijem sklopu je ugrađena i baterija, razni fotonaponski paneli, led i ina rasvjeta. Na taj način cijeli vjetroagregat postaje stup ulične rasvjete. Jedna od zanimljivijih opcija, s obzirom na sve veću populaciju električnih automobila, je vjetroagregat koji služi punjenju samih električnih automobila.



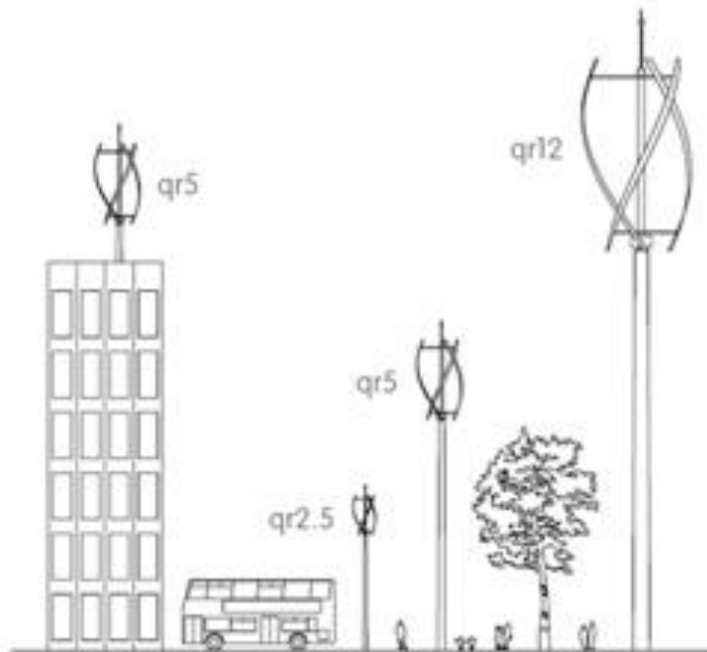
Slika 3.2. Vjetroagregati UGE[11]

U današnje vrijeme mnoge tvrtke ulaze u borbu predstavljanja novih ideja koje bi tržište trebalo prepoznati. Tako na primjer tvrtka AES predstavlja svoj model vjetroagregata LT 200/3dd. To je vjetroagregat koji umjesto lopatica ima koristi jedra. Njihova vrsta vjetroagregata namjenjena je korištenju na otocima.



Slika 3.3. Vjetroagregat tvrtke AES, LT 200/3dd[11,14]

Na tržištu se pojavljuju i modeli Qr2,5, Qr5, Qr12. U prijevodu quite revolution. Njihova nominalna snaga iznosi za Qr 2,5 3kW ili 4,5kW za Qr5 6,5kW i za Qr12 45kW ili 55kW. Predviđen je za instalaciju na krovovima kuća, no i ne manje interesantan je i u izvedbi instalacije na samostalnom stupu.



Slika 3.4. Vjetroagregati Qr2,5, Qr5, Qr12[12]

Pojavljaju se i vjetroagregati nominalne snage od 1kW do 2,5kW pod nazivom AeroTurbine. Njihova konstrukcija može biti samostalna, ali postoji i hibridna verzija u kombinaciji s fotonaponskim panelima. Sami vjetroagregat sačinjen je od spiralnog rotora. Posjeduje i aerodinamički progil postavljen unutar željeznog kaveza.



Slika 3.5. Vjetroagregat AeroTurbine[14]

Proizvođač IR Wind Power posjeduje vjetroagregate nominalnih snaga od 5kW i 10kW. Njihovi vjetroagregati koriste takozvane turbo lopatice. Nazivaju se turbo lopatice jer svojom konstrukcijom smanjuju volumen zraku, odnosno znatno povećavaju učinkovitost pretvorbe mehaničke energije u električnu. Oni su jedan od primjera proizvođača koji rasmišljaju o multifunkcionalnoj izvedbi, jer samim oblikom lopatica dobivaju prostor za oglašavanje svojih klijenata ili poslovnih partnera.



Slika 3.6. Vjetoagregat firme IR Wind Power[11]

Kako su već spomenuti dizajneri i njihov upliv u ovo područje, sljedeći primjer pripada dizajneru Philippeu Starcku. Prema njegovom dizajnu proizvođač RevolutionAir napravio je vjetoagregate snage 0,4kW i 1kW koje posebno ističe taj zanimljivi dizajn.



Slika 3.7. Vjetoagregat firme RevolutionAir[14]

3.2. Razvoj vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj

Prateći svjetske trendove i potrebe tržišta i Hrvatska je došla u poziciju u kojoj je morala započeti razvoj vjetroelektrana, odnosno iskorištavanje vjetra kao izvora za stvaranje električne energije.

Kao i kod ostatka svjetskih vjetroelektrana potrebno je bilo pažnju usmjeriti na pozicije na kojima brzina, smjer te učestalost vjetra zadovoljavaju neke osnovne karakteristike. Detaljnim mjerenjima došlo se do zaključka koja su područja veće isplativosti za postavljanje samih vjetroelektrana. Izračunima se zaključuje kako priobalni dio Republike Hrvatske, točnije Jadran ima veći vjetropotencijal u odnosu na kontinentalni dio. Stoga ne čudi činjenica da su prve vjetroelektrane počele s izgradnjom upravo na tim područjima, odnosno područja Zadarske, Šibensko- kninske, Splitsko- dalmatinske i Dubrovačko- neretvanske županije.

Prva vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj započela je sa izgradnjom 1988. Godine. Firma Končar izgradila je prvi vjetroagregat na teritoriju brodogradilišta Uljanik. Taj vjetroagregat se i danas tamo nalazi, no nakon nekog vremena razvijanje tog vjetroagregata je obustavljeno. U počecima Končar je bio glavna vodeća firma u razvoju vjetroagregata na području Republike Hrvatske, te se također istaknula i vjetroagregatom na području Splita, točnije na Pometenom brdu.

Na području Republike Hrvatske se nalazi 12 vjetroelektrana. One dostavljaju električnu energiju u elektroenergetski sustav od lipnja 2014. godine. Njihova ukupna instalirana snaga iznosi oko 280MW. U tim vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj se nalazi 148 vjetroagregata ukupne godišnje isporučene električne energije u iznosu od oko 810GWh. [9]

U sljedećoj tablici dan je prikaz svih vjetroelektrana koje su postavljene u Republici Hrvatskoj. Također dan je i prikaz instalirane snage, godišnje proizvodnje električne energije, te modeli vjetroagregata koji to postižu.

Tablica 3.1. Vjetro elektrane u Republici Hrvatskoj[9]

Vjetroelektrana	Županija	Instalirana snaga (MW)	Godišnja proizvodnja (GWh)	Model vjetroagregata	Broj vjetroagregata	Započela s radom
VE Ravne 1	Zadarska	6	15	Vestas V52-0,5MW	7	2004.
VE Pometeno Brdo1	Splitsko-dalmatinska	6	15	Končar KO-VA 57/1- 1MW	6	2012.
VE Crno Brdo	Šibensko-kninska	10	27	Leitwind LTW77-1,5MW	7	2011.
VE Jelinak	Splitsko-dalmatinska	30	81	Acciona Windpower-1,5MW	20	2013.
VE Kamensko-Voštane	Splitsko-dalmatinska	40	114	Siemens SWT-3,0-101- 3MW	14	2013.
VE Vrataruša	Ličko-senjska	42	125	Vestas V90-3MW	14	2011.
VE Velika Popina	Zadarska	9,2	26	Siemens SWT 93- 2,3MW	4	2011.
VE Orlice	Šibensko-kninska	9,6	25	Enercon (3x E-48- 0,8MW + 8x E-44- 0,9 MW)	11	2009.
VE Trtar-Krtolin	Šibensko-kninska	11,2	28	Enercon E-48-0,8MW	14	2006.
VE Bruška	Zadarska	36,8	122	Siemens SWT 93- 2,3MW	16	2012.
VE Ponikve	Dubrovačko-neretvanska	36,8	122	Enercon E-70-2,3MW	16	2013
VE Danilo	Šibensko-kninska	43,7	100	Enercon E-82-2,3MW	19	2014.
Ukupno		280,5	810		148	

4. MALE VJETROELEKTRANE

4.1. Podjela vjetroelektrana obzirom na snagu

S obzirom na snagu vjetroelektrane možemo podijeliti u četiri grupe

1. Male- od 1kW do 30kW
2. Srednje i velike- od 30kW do 1500kW
3. Jako male- <1kW
4. Jako velike- >1500kW

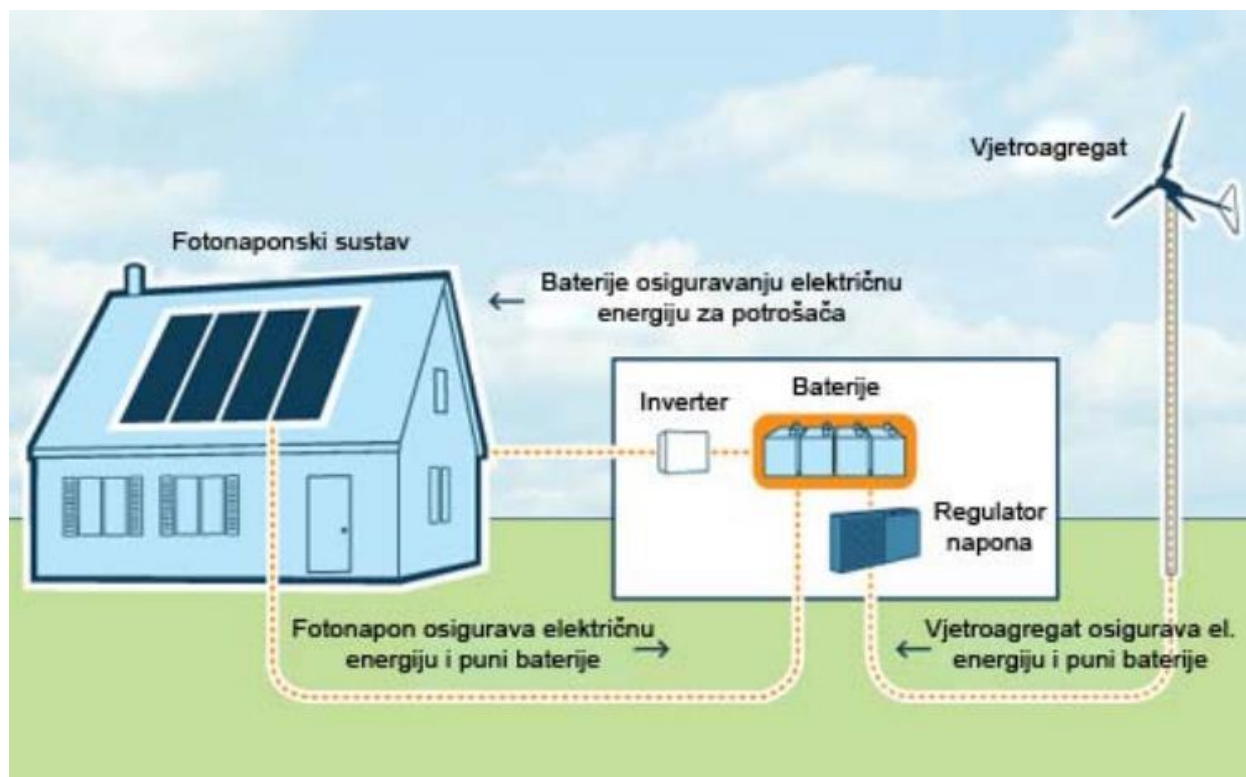
4.1.1. Male vjetroelektrane

Mali vjetroagregati u svijetu jedan su od najjeftinijih načina za proizvodnju vlastite električne energije. Često se koriste na udaljenijim mjestima do kojih je distribucija električne energije otežana samom udaljenosti. Koriste se i za punjenje akumulatora ili grijanje. Takvi vjetroagregati mogu služiti i za smanjenje vlastite potrošnje električne energije, no time se i dobiva znatno smanjenje opterećenja elektroenergetske mreže. Jedna od njihovih prednosti je i ta što ne zauzimaju mjesto na površini zemlje iz razloga postavljanja. Najčešće se postavljaju na krovove, fasade, nadstrešnice.

Danas je u svijetu u pogonu oko 200000 malih vjetroagregata koji služe kao punjači akumulatora. Glavna zadaća im je punjenje akumulatora električnom energijom koja se kasnije koristi ili pretvara ovisno o potrebama. Najjednostavniji način iskorištavanje tako dobivene električne energije za vlastite potrebe je korištenje kućanskih aparata koji koriste istosmjerni napon. Taj napon dobivljaju direktno iz akumulatora. Ukoliko za takav način rada ne postoji mogućnosti koriste se razni inverteri koji istosmjerni napon iz akumulatora pretvaraju u izmjenični napon u iznosu od 230V frekvencije 50Hz.

Kao i za ostale oblike vjetroagregata tako je i kod malih najvažniji parametar, za lokaciju na kojoj se planira njegova izgradnja, srednja brzina vjetra. Često se postavljaju na mjesta gdje je srednja godišnja brzina vjetra mala.

Mali vjetroagregati često se koriste u kombinaciji sa još jednim izvorom energije. Taj izvor energije je Sunce, koje stvara toplinsku energiju. Kombinacija energije Sunca i energije vjetra osobito je interesantna za korištenje na otocima Primorsko- goranske županije. Sama činjenica da je intenzitet Sunčeve ozračenosti veći tokom ljetnih mjeseci, a tokom zimskih energija vjetra, dolazi se do zaključka da ova dva izvora osiguravaju jako kvalitetnu energetska neovisnost i autonomnost. Klima otoka Primorsko- goranske županije jamči veliki broj osunčanih dana u zimskim mjesecima, a priobalna cirkulacija dovoljnu količinu vjetra i u ljetnim mjesecima, što osigurava električnu energiju točno kada je potrebna. Ukoliko dođe do situacije da nema vjetra niti Sunca, što se događa za mirnih ljetnih noći, energija se crpi iz predhodno napunjenih akumulatora.



Slika 4.1. Autonomni sustav[8]

Kod ulaganja u ovakav autonomni sustav bitno je imati na umu da objekti koji se koriste tokom cijele godine za stanovanje neće moći zadovoljiti svoje potrebe za električnom energijom samo iz obnovljivih izvora energije. Sustavi koji to omogućuju postoje no njihova financijska isplativost je uvelike upitna. Sama ulaganja u male hibridne sustave inicijalno iziskuju velike financijske izdatke, no razmatrajući njihov cijeli životni vijek sustava dolazi se do činjenice da je usporediv s konvencionalnim proključkom na električnu mrežu. Nakon dužeg korištenja ovakvog sustava cijena električne energije postaje neosjetljiva na promjenu tržišne cijene električne energije.

Važno je spomenuti i osnovne uvjete koji su jako bitni kod primjene ovakvih sustava

- postojanje interesa za ovaj sustav
- srednja godišnja brzina vjetra (minimalno 4m/s)
- nedostupnost električne mreže na određenoj lokaciji
- veliki materijalni troškovi za priključak na električnu mrežu
- smanjenje utjecaja na okoliš
- racionalizacija potrošnje energije u ovisnosti o količini vjetra i Sunca

Postavljanje ovakvog autonomnog sustava ovisi o resursima i potrebama za energijom. Energija sunca na otocima Primorsko-goranske županije uglavnom je ravnomjerno raspoređena, no za energiju vjetra u obzir se mora uzeti niz lokalnih čimbenika. Također bitno je paziti na prostornu i vremensku promjenjivost izvora vjetra. Pazeći na navedene čimbenike može se dostići velika iskoristivost.

4.1.2. Srednje i velike vjetroelektrane

Srednje i velike vjetroelektrane uobičajeno rade na mreži. Što znači da postrojenja koja one napajaju moraju imati proizvodnju energije i iz nekog drugog izvora. Također mogu funkcionirati samostalno ili u grupi što predstavlja vjetropark. Koriste se za komercijalnu proizvodnju električne energije, te njihova instalirana snaga iznosi do 1500kW. One preko 650kW u današnje vrijeme se proizvode u velikim serijama. Kao i ostale elektrane i one zahtijevaju određenu srednju godišnju brzinu vjetra. Ona kod ovog tipa vjetroelektrana iznosi od 6m/s na više[9].



Slika 4.2. Srednje i velike vjetroelektrane

4.1.3. Jako velike vjetroelektrane

Jako velike vjetroelektrane su elektrane instalirane snage preko 1500W pa sve do nekoliko stotina MW. Takve vjetroelektrane najčešće se postavljaju na pučini točnije na otvorenom moru radi veće količine strujanja vjetra, a samim time na takvim područjima je i srednja godišnja brzina vjetra mnogo veća. U današnje vrijeme su još u svom razvoju. Radi svoje veličine i načina postavljanja dolazi do financijskih zapreka, kao što je na primjer velika cijena samog postolja[9].



Slika 4.3. Jako velike vjetroelektrane

4.2. Konstrukcijski oblici malih vjetroagregata

Na početku samog planiranja izgradnje malog vjetroagregata mora se paziti na neke osnovne parametre. Jedan od glavnih i najznačajnijih parametara je srednja godišnja brzina vjetra. Taj parametar mora biti zadovoljen kako bi finalni proizvod imao svoj smisao i svrhu. U novije vrijeme, dolaskom novih konstrukcijskih rješenja i idejom o montiranju vjetroagregata na krovove kuća vjetroagregati imaju promjere rotora do 2 metra. Stupovi navedenih vjetroagregata su tipične visine od 3m do 5m. Nazivne snage takvih vjetroagregata je od 0,5kW do 3kW. Usput može se i spomenuti cijena jednog takvog sustava koja se kreće oko 30000kn. Ukoliko u okolini postavljanja vjetroagregata nema nekih većih prepreka u strujanju zraka kao jednostavnije i isplativije rješenje koriste se vjetroagregati koji se montiraju samostalno. Njihovi stupovi nešto su veći od vjetroagregata koji se montiraju na krovove te su uglavnom preko 15m visine. Sama konstrukcija takvih sustava uvelike utječe i na njihovu snagu te ona raste čak i do 10kW[7].



Slika 4.4. Mogući načini postavljanja malih vjetroagregata

Male vjetroagregate možemo podijeliti u dvije osnovne vrste prema položaju vrtnje njihovih osi, a to su

- vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje (VSHO)
- vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje (VSVO)

Dvije navedene vrste vjetroagregata mnogima su dale ideju i poticaj da na najbolji način iskoriste što veću energiju vjetra, te dobe veću učinkovitost. Kako bi se to postiglo najviše se pazi na oblik samih lopatica. Spajajući obje izvedbe dobivene su zanimljive izvedbe vjetroagregata kao što su Loopwing μ series, Magenn, Helix, Nneowind 3D.



Slika 4.5. Vjetroagregat Loopwing μ series



Slika 4.6. Vjetroagregat Magenn



Slika 4.7. Vjetroagregat Helix



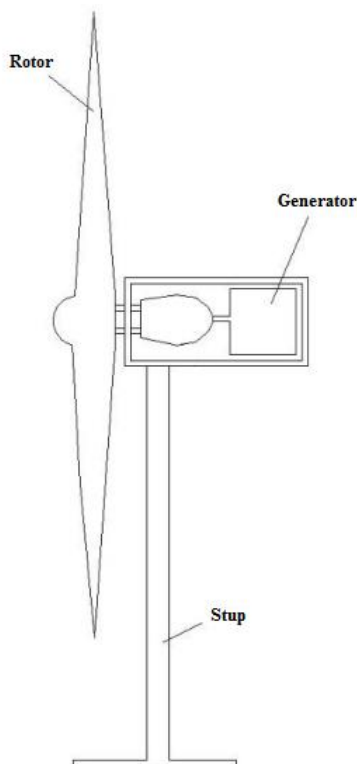
Slika 4.8. Vjetroagregat Nneowind 3D

4.2.1. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje (VSHO)

Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje se danas više koriste iz više razloga. Neki od tih razloga su mehanička jednostavnost, mali prostor potreban za ugradnju.

Kod ove konstrukcijske izvedbe vjetroagregata vratilo generatora postavljeno je paralelno sa površinom zemlje, a generator je obično postavljen na vrhu stupa. Osim generatora, ukoliko za time ima potrebe, postavlja se i multiplikator s kojim povećavamo brzinu vrtnje. On se postavlja ukoliko je brzina vrtnje premala da bi se proizvodila električna energija.

Vjetar ne dolazi uvijek iz istog smjera stoga ovakvi vjetroagregati imaju mogućnost zakretanja trupa. Pošto su male konstrukcijske izvedbe nemaju dodatni uređaj za zakretanje već su samozakretne, što također smanjuje njihovu cijenu. Iza lopatica nalaze se krilca koja s nailazkom vjetra usmjeravaju rotor vjetroagregata u struju vjetra.



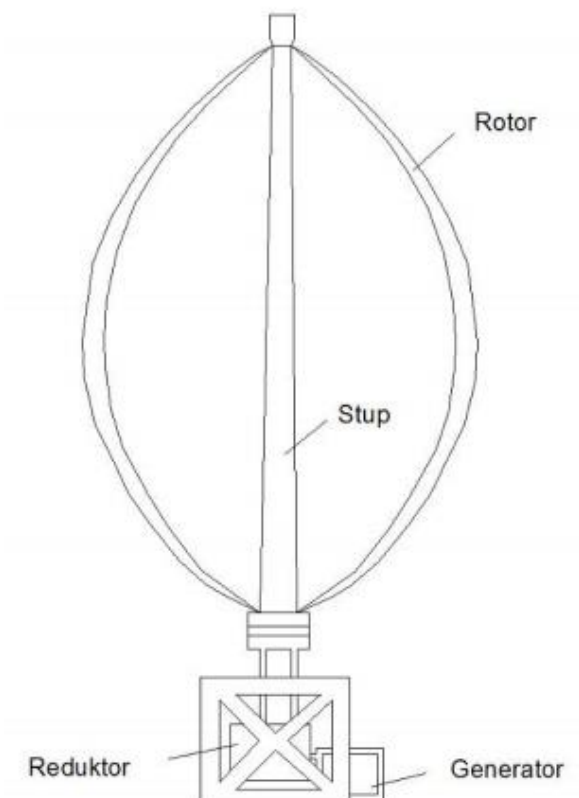
Slika 4.9. Vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje

4.2.2. Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje (VSVO)

Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje prvi puta su se pojavili dvadesetog stoljeća, kada je francuski inženjer zrakoplovstva Georges Jean Marie Darrieus konstruirao prvi vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje.

Kod ove konstrukcijske izvedbe vjetroagregata vratilo generatora postavljeno je okomito sa površinom zemlje, a generator se obično postavlja u podnožju stupa čime se je znatno smanjilo opterećenje stupa. Radi svoje konstrukcijske izvedbe zauzima nešto više prostora od vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje.

Cijeli stup predstavlja rotirajuće vratilo oko kojeg su postavljene aerodinamične lopatice. Radi takve aerodinamične izvedbe lopatica ova izvedba je učinkovita bez obzira o smjeru nailaska vjetra, jer se pretpostavlja da vjetar uvijek na lopaticu nailazi ravno.

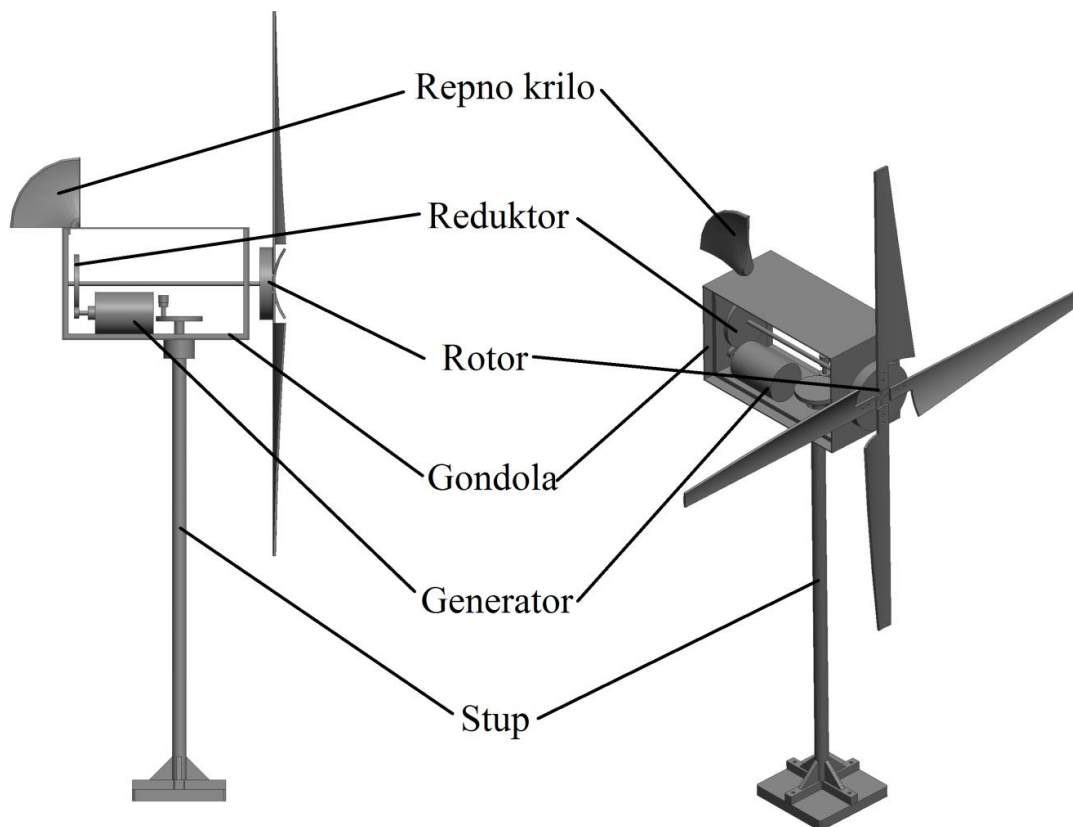


Slika 4.10. Vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje

4.3. Komponente malih vjetroagregata

Mali vjetroagregati se u odnosu na velike ne razlikuju punu u osnovnom izgledu. No sama činjenica da su mali i da proizvode manju snagu govori da su u globalu dosta jednostavniji od velikih vjetroagregata. Mali vjetroagregati sastoje se od nekolicine osnovnih djelova

- stup vjetroagregata
- rotor vjetroagregata
- generator vjetroagregata
- reduktor vjetroagregata
- gondola vjetroagregata
- repno krilo vjetroagregata



Slika 4.11. Komponente malih vjetroagregata

4.3.1. Stup vjetroagregata

Stupovi kod malih vjetroagregata obično su valjkastog oblika, te robusni što omogućuje sigurno fiksiranje vjetroagregata na zemlju ili krov kuće. Kako bi se postigla njihova još veća sigurnost i statičnost često se još postavljaju i sigurnosne sajle. One cijeli vjetroagregat čine uvelike stabilnijim. Stupovi općenito moraju biti konstruirani da izdrže ekstremne uvjete kao što su orkanski vjetrovi, kiša, tuča. Njihovo podizanje vrši se uz pomoć električnog vitla osim u slučajevima kada za to nema potrebe odnosno kada stupovi nisu znatno veliki. Manji stupovi koriste se za postavljanje vjetroagregata na krovove kuća.

4.3.2. Rotor vjetroagregata

Veličina odnosno promjer rotora određuje količinu energije koja će se iskoristiti iz vjetra. Iskorištena energija pretvara se u mehaničku energiju vrtnja. Na rotor vjetroagregata pričvršćena je glavčina na koju su pričvršćene lopatice vjetroagregata. Glavčina je povezana za rotor te osovinom za reduktor ili multiplikator.

Lopatice vjetroagregata najčešće su izrađene od stakloplastike ili metala radi što veće otpornosti na udare vjetra. Vjetar struji preko lopatica različitom brzinom. Radi te razlike brzina između privjetrinske i zavjetrinske strane nastaje potisna sila na lopatice vjetroagregata. Ovo je najjednostavnije objašnjen postupak pretvaranja kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju vrtnje rotora.

Kod horizontalnih vjetroturbina broj lopatica ima značajan utjecaj na karakteristike samog vjetroagregata. Najčešće korištena metoda je metoda s tri lopatice. Takva metoda naziva se Danski koncept. Dokazano je da je ova metoda najbolje rješenje zbog uravnoteženosti cijele konstrukcije vjetroagregata

Rotor vjetroagregata s jednom lopaticom

Smanjenjem broja lopatica smanjuju se i financijske potreba, no unatoč tome vjetroagregati s jednom lopaticom imaju svojih mana koje uvelike zasjenjuju financijske prednosti. Jedan od tih problema je veliko povećanje buke, što loše utječe na okolni eko sustav. Uz navedeni problem nameće se i potreba za postavljanjem protuutega na suprotnoj strani lopatice

Rotor vjetroagregata s dvije lopatice

Kao i kod predhodnog primjera smanjio se broj lopatica, čime su se smanjile i financijske potrebe. Maknuvši jednu lopaticu dobiva se potreba za većom brzinom vrtnje rotora, a samim time dobiva se i veća buka. Ovom načinu izvedbe rotora mora se omogućiti manji kut zakretanja u vertikalnoj osi kako bi se izbjegla opterećenja kod prolaska lopatice ispred stupa.

Rotor vjetroagregata s više lopatica

Ovaj način izvedbe rotora naziva se Američkim vjetroagregatom. Povećanjem broja lopatica smanjuje se brzina vrtnje što kao posljedicu nosi u manju iskoristivost kinetičke energije vjetra. Ovaj koncept nije popularan u komercijalne svrhe već se koristi na farmama za pogon pumpi za vodu.

4.3.3. Generator vjetroagregata

O generatoru je na početku već bilo rječi no bitno je spomenuti da je on jedan od bitnijih ako ne i najbitniji dio jednog vjetroagregata. On kinetičku energiju vjetra koja je pretvorena u mehaničku energiju vrtnje rotora pretvara u električnu energiju. Sami generator sastoji se od magneta i vodiča koji pomoću elektromagnetske indukcije proizvode električnu energiju. Vodič predstavlja

namotana žica. Taj vodič okružuje grupa magneta koja je u generatoru spojena vratilom. Pošto postoji vodič okružen magnetima i dio koji rotira u odnosu na drugi principom elektromagnetske indukcije dobiva se napon u vodičima. Odnosno, rotor pokreće vratilo koje pokreće magnete te time stvara napon.

Odabir generatora prikladnog za određenu vjetroelektranu vrlo je bitan, te ovisi o ciljevima koje želimo postići. U vjetroelektranama susreću se dvije vrste generatora

- sinkroni generatori
- asinkroni generatori

Naravno sve navedeno ovisi i o priključku vjetroelektrane na mrežu, pa ovisno o tome postoje

- vjetroelektrane s stalnom brzinom vrtnje
- vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje

Sinkroni generatori

Sinkroni generatori često se koriste kod većih vjetroagregata, te spadaju u strojeve izmjenične struje. Ovisno o frekvenciji napona i broju pari polova ovi kojim će se brzinom sinkroni generator okretati. Ova činjenica može se zaključiti iz sljedeće formule

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.1)$$

gdje je

n_s - sinkrona brzina [min^{-1}]

f - frekvencija mreže [Hz]

p - broj pari polova

Tablica 4.1. Sinkrone brzine s obzirom na broj pari polova

p	n_s za 50 Hz [min⁻¹]
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500
8	375

Uglavnom se koriste kada su uvjeti rada pogona poznati, odnosno ukoliko je brzina vrtnje vjetroagregata stalna, što se postiže sustavom za zakretanje lopatica. Imaju veliki stupanj djelovanja i pouzdani su no imaju i svojih mana. Mana sinkronih generatora je u tome što teško zadržavaju sinkronizam ukoliko dođe do poremećaja brzine vrtnje. Do poremećaja može doći uslijed razlike brzine vjetra ili poremećaja u mreži.

Uz uporabu sinkronog generatora dolazi do potrebe za dodatnim uređajima. Na primjer potreban je regulator brzine vrtnje kako bi se frekvencija i napon održali konstantnim. Kod vjetroagregata koji imaju promjenjivu brzinu potreban je statički pretvarač frekvencije. Također potreban je i uzbudni sustav. Kod većih vjetroelektrana, odnosno vjetroelektrana većih nazivnih snaga (>500kW) dolazi do potrebe za sustavom za regulaciju zakretanja elisa propelera. Iz navedenog razloga ovaj se sustav ne izvodi u svim jedinicama[6].

Asinkroni generatori

Isto kao i sinkroni asinkroni generatori spadaju u strojeve izmjenične struje. Razlikuje se od sinkronog potome što mu brzina vrtnje nije jednaka sinkronoj i ovisna je o opterećenju.

Pri radu asinkronog generatora priključivanjem na izmjenični simetrični trofazni izvor kroz namotaje statora protoku struje koje stvore rotirajuće magnetsko

polje koje određuje i smjer vrtnje rotora. To magnetsko polje rotira sinkronom brzinom. Rotirajući se magnetsko polje presjeca vodiče rotorskog i statorskog namota te se u njima inducira napon. Kao što je već spomenuto brzina vrtnje motora manja je od sinkrone brzine i ovisna je o opterećenju. Ta razlika u brzini vrtnje rotora i magnetskog polja izražava se klizanjem

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.2)$$

Gdje je

s- klizanje

n_s - sinkrona brzina

n- brzina vrtnje rotora

Ukoliko je brzina vrtnje nepoznata, a poznati su frekvencija mreže, broj pari polova i klizanje do brzine se dolazi na slijedeći način

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{f}{p} \cdot (1 - s) \quad (4.3)$$

Gdje je

n- brzina vrtnje rotora

n_s - sinkrona brzina

s- klizanje

f- frekvencija mreže

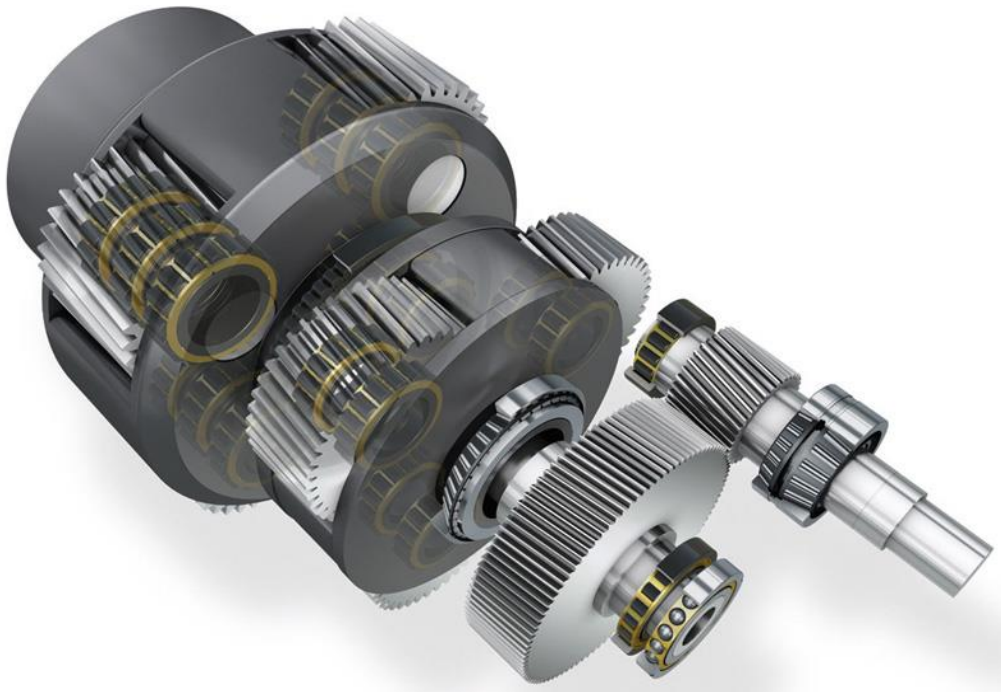
p- broj pari polova

Klizanje mora iznositi $s < 0$, a rotor se mora vrtiti brzinom $n > n_s$ u generatorskom načinu rada. Pošto asinkronom generatoru moramo dovoditi rad da bi dobili električnu energiju moment mu je negativna.

Asinkroni generatori često se koriste u slučaju ako je vjetroelektrana priključena na krutu mrežu. Da je vjetroelektrana priključena na krutu mrežu može se očitati iz velike naponske i frekvencijske krutosti. Asinkroni generatori imaju svoje prednosti i mane. Glavna prednost je jednostavnost, a samim time i jeftinija izvedba, no uz to se nalaže i potreba za kompenzacijskim i priključnim uređajima što predstavlja veliku manu. Kako bi se postigla početna sinkronizacija s mrežom koriste se priključni uređaji[6].

4.3.4. Reduktor vjetroagregata

Reduktorom se podešava brzina vrtnje rotora vjetroagregata na brzinu koja je potrebna za vrtnju generatora kako bi se proizvela električna energija. Na uređajima koji imaju snagu manju od 10kW ne upotrebljava se reduktor već je osovina vjetroturbine direktno povezana na generator. Takave izvedbe se sve češće koriste, a to se postiže sa generatorima sa mnogo pari polova. Za ispravljanje napona koji generator proizvodi upotrebljava se regulator napona



Slika 4.12. Reduktor vjetroagregata

5. NAČINI PRILJUČKA VJETROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

Energija gibajuće zračne mase pomoću sustava za pretvorbu energije transformira energiju vjetra u električnu energiju. Kao što je poznato vjetar je promjenjivi energetski, te s obzirom na nemogućnost njegovog skladištenja potrebno je definirati neke uvjete za pogon samog sustava pretvorbe njegove energije unurat elektroenergetskog sustava.

Vjetroelektrana sastoji se od sustava koju su projektirani s obzirom na nekoliko oblika energije. Ti oblici energije su

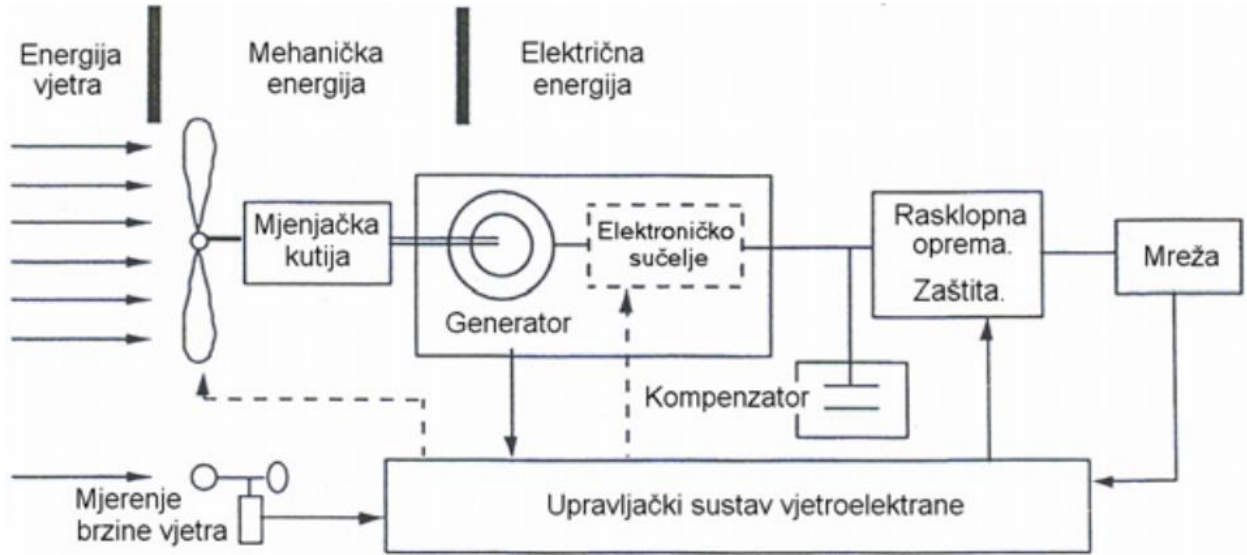
- energija vjetra
- mehanička energija vrtnje
- dobivena električna energija

Mehanička energija dobiva se transformacijom energije vjetra. Takva transformacija postiže se vjetroturbinom koja se može sastojati od jedne ili više lopatica, što ovisi o razini buke, iskoristivosti energije vjetra. Dokazano najčešće i najisplativije rješenje je izvedba s tri lopatice. Između same vjetroturbine i generatora nalazi se mehanička spojka, koja se nalazi u mjenjačkoj kutiji. Unutar mjenjačke kutije nalazi se prijenosnik koji nižu brzinu vrtnje rotora vjetroturbine prilagođava višoj brzini vrtnje rotora generatora. U današnje vrijeme radi se na tome da se ukloni mehanički prijenosnik te se to postiže višepolnim niskobrzinskim generatorima. Takvi generatori su uglavnom sinkroni s uzbudnim namotom ili permanentnim magnetima. Kod nekih vjetroturbina nailazi se na sustav koji upravlja kutem zakreta lopatica. Time se utječe na iznos snage same pretvorbe. Kao što je već spomenuto generatori mogu biti sinkroni ili asinkroni. Ukoliko se govori o sinkronom generatoru, opremu je potrebno dodatno proširiti sustavom uzbude ili permanentnim magnetima. U slučaju vjetroelektrane koja radi s promjenjivom brzinom vrtnj, njeno priključenje na elektroenergetsku mrežu postiže se pomoću sučelja zasnovanog na energetskej elektronici.

Uobičajeni i standardni zahtjev pojavljuje se kod priključenja vjetroelektrane na mrežu. Cilj se postiže rasklopnom opremom koja mora biti projektirana tako da

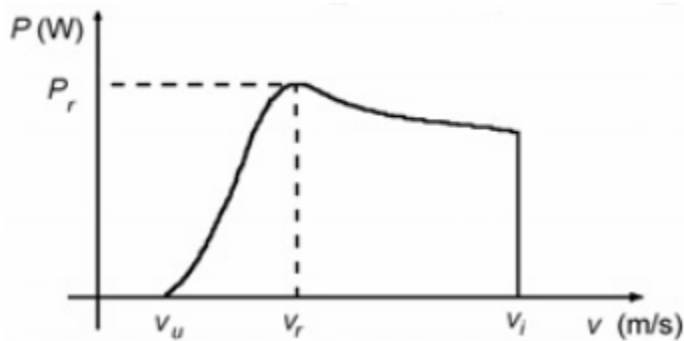
omogućuje glatko priključenje sustava na mrežu. Također u običajene standarde spadaju i zaštitni uređaji neophodni u pogonu proizvodne jedinice.

U nastavku dan je prikaz općenite sheme djelovanja vjetroelektrane. Punim crtama naznačeni su glavni dijelovi sustava, a isprekidanim dijelovi koji nisu prisutni u svim izvedbama.



Slika 5.1. Osnovno djelovanje vjetroelektrane

Bitno je napomenuti kako brzina vjeta direktno utječe na snagu koju vjetroturbina predaje generatoru. Ova činjenica lako se uoči iz slijedeće krivulje



P_r - referentna snaga vjetroturbine

v_r - referentna brzina vjeta

v_u - ulazna brzina vjeta

v_i - izlazna brzina vjeta

Slika 5.2. Ovisnost snage vjetroturbine o brzini vjeta

Referentna snaga vjetroturbine predstavlja najveću snagu koju vjetroturbina može postići

Referentna brzina vjetra je brzina vjetra koja je potrebna da se postigne referentna snaga

Ulazna brzina vjetra je brzina vjetra kod koje vjetroturbina započinje sa predajom snage

Izlazna brzina vjetra je gornja granica brzine vjetra kod koje vjetroturbina ostaje u pogonu.

Obzirom na priključak na elektroenergetsku mrežu i brzinu vrtnje, vjetroelektrane možemo podijeliti u dvije skupine

- vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje
- vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje

5.1. Vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje

U izvedbi vjetroelektrana sa stalnom brzinom vrtnje njegov generator je spojen izravno na mrežu. Brzina vrtnje generatora a samim time i rotora određena je frekvencijom sustava. Preko mjenjačke kutije s prijenosnikom dobiva se transformacija vrtnje rotora u vrtnju generatora. Konkretnije, kako bi se dobila željena brzina vrtnje generatora pomoću mjenjačke kutije s prijenosnikom niska se brzina vrtnje rotora transformira u visoku vrzinu generatora. Bitno je napomenuti da brzina vrtnje generatora ovisi o broju pari polova, te frekvenciji mreže.

Asinkroni generatori često se koriste u slučaju ako je vjetroelektrana priključena na krutu mrežu. Da je vjetroelektrana priključena na krutu mrežu može se očitati iz velike naponske i frekvencijske krutosti. Asinkroni generatori imaju svoje prednosti i mane. Glavna prednost je jednostavnost, a samim time i jeftinija izvedba, no uz to se nalaže i potreba za kompenzacijskim i priključnim uređajima

što predstavlja veliku manu. Kako bi se postigla početna sinkronizacija s mrežom koriste se priključni uređaji.

Sinkroni generatori često se koriste kod većih vjetroagregata. Uz uporabu sinkronog generatora dolazi do potrebe za dodatnim uređajima. Na primjer potreban je regulator brzine vrtnje kako bi se frekvencija i napon održali konstantnim. Također potreban je i uzбудni sustav. Kod većih vjetroelektrana, odnosno vjetroelektrana većih nazivnih snaga ($>500\text{kW}$) dolazi do potrebe za sustavom za regulaciju zakretanja elisa propelera. Iz navedenog razloga ovaj se sustav ne izvodi u svim jedinicama[4,11].

5.2. Vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje

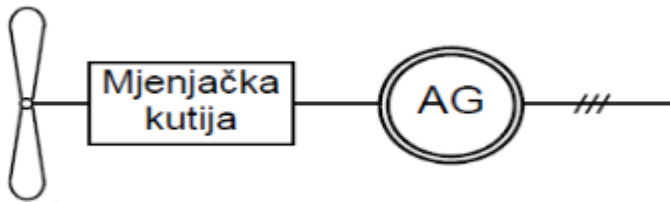
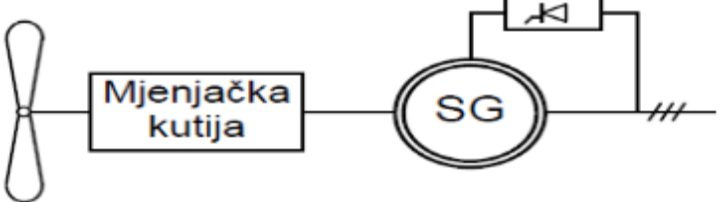
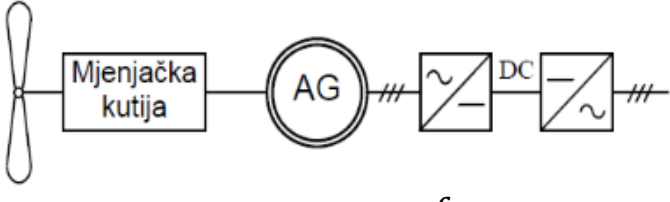
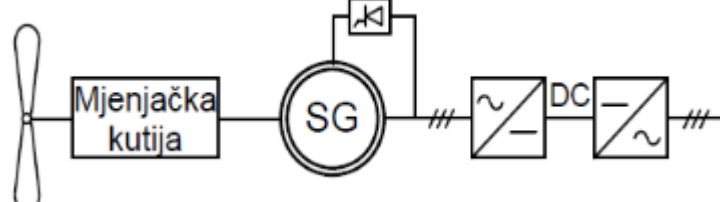
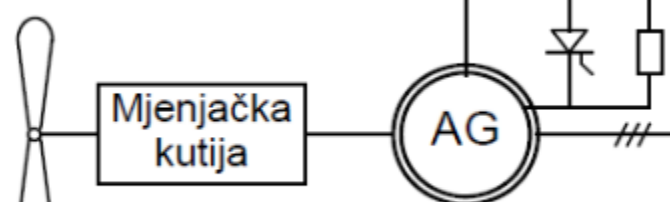
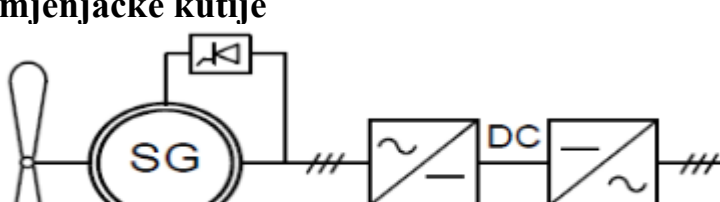
Kod vjetroelektrana s promjenjivom brzinom vrtnje generator je spojen na mrežu. Postoje dva načina njegovog spajanja. Može biti spojen na mrežu pomoću inverterskog sustava ili napajanjem uzbudnih namotaja generatora iz inverterskog sustava vanjske frekvencije. Brzina vrtnje rotora i brzina vrtnje generatora odnosno njegovok okretnog magnetskog polja, odvojena je od frekvencije sustava. Promjenjivom brzinom vrtnje rotor se prilagođava vanjskim uvjetima, točnije jačini i količini trenutnog vjetra.

Vjetroelektrane s promjenjivom brzinom vrtnje imaju potrebu za stalnom frekvencijom. Ta potreba zahtjeva pretvornike frekvencije, te zbog te činjenice postoji više vrsta vjetroelektrana s promjenjivom brzinom vrtnje[6,11]

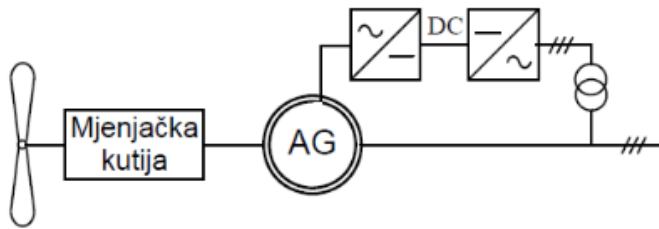
- asinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu
- asinkroni generator s upravljivim promjenjivim klizanjem
- asinkroni generator s nadsinkronom ili podsinkronom pretvaračkom kaskadom
- sinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu

5.3. Primjeri mogućih priključenja na mrežu

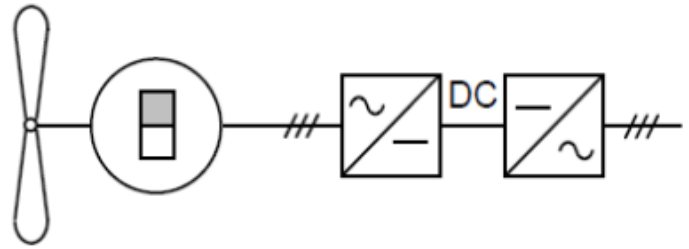
Tablica 5.1. Princip priljučenja vjetroelektrane na elektroenergetsku mrežu

Asinkroni generator	Sinkroni generator
<p>Izravno priključenje na mrežu</p>  <p>$n = \frac{(1-s)f}{p} \quad s = 0 \dots 0,08$</p> <p>Potrošač induktivne jalove snage</p>	<p>Izravno priključenje na mrežu</p>  <p>$n = \frac{f}{p}$</p> <p>Upravljiva izlazna jalova snaga</p>
<p>Mrežni priključak putem DC veze</p>  <p>$s = 0,8 \dots 1,2 \frac{f}{p}$</p> <p>Upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač</p>	<p>Mrežni priključak putem DC veze</p>  <p>$s = 0,5 \dots 1,2 \frac{f}{p}$</p> <p>Upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač</p>
<p>Dinamički upravljivo klizanje</p>  <p>$n = \frac{(1-s)f}{p} \quad s = 0 \dots 0,1 \dots 0,3$</p> <p>Potrošač induktivne jalove snage</p>	<p>Mrežni priključak putem DC veze, bez mjenjačke kutije</p>  <p>$s = 0,5 \dots 1,2 \frac{f}{p}$</p> <p>Upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač</p>

Asinkroni generator s dvostranim napajanjem



Sinkroni generator s permanentnim magnetima priključen putem DC veze



$$s = 0,5 \dots 1,2 \frac{f}{p}$$

Upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač

Bez obzira na veći broj načina spajanja na mrežu, niti jedan princip se ne može predstaviti kao najbolji ili bolji od ostalih. Razlog tomu su različite potrebe i konfiguracije električnog dijela vjetroelektrane.

Sve izvedbe naravno imaju svoje prednosti i nedostatke. Na primjer vjetroelektrane izvedene sa stalnom brzinom vrtnje kao prednost imaju jednostavnost te niske troškove. Veću proizvodnju električne energije omogućuju izvedbe s promjenjivom brzinom vrtnje, a uz to u manja mehanička naprezanja dijelova. Također manje je ovisna o promjenama vjetra i njihovim sustava. Važno je napomenuti da kod izvedbe s asinkronim generatorom dolazi do potrebe za ugradnjom dodatnog izvora jalove snage. U nekim vjetroelektranama spoj rotora i generatora napravljen je bez mjenjačke kutije. Kadkad je potrebno u sustav unijeti i zasebnu kompenzaciju viših harmoničkih članova radi elektroničkih pretvarača.

Najčešći princip priključenja je direktni priključak asinkronog generatora na mrežu. Koristi se kod vjetroelektrana čije su snage od 50kW do 1500kW. Kod samostojećih sustava odnosno malih vjetroelektrana koristi se izravni priključak pomoću sinkronog generatora.

6. ZAKLJUČAK

Razmatrajući sve spomenute činjenice lako je shvatiti potencijalne ciljeve iskorištavanja energije vjetra. Korištenjem energije vjetra znatno se može pospješiti globalno stanje u smislu smanjenja emisije stakleničkih plinova, smanjenje onečišćenja iz konvencionalnih postrojenja za proizvodnju električne energije. Osim navedenih ciljeva iskorištavanje vjetra uvelike utječe i na cijenu same električne energije. Korištenjem vjetroelektrana u kombinaciji sa fotonaponskim sustavom svaka osoba može imati svoj autonomni sustav iz kojeg crpi vlastitu električnu energiju, što smanjuje i opterećenje elektroenergetske mreže. Stoga, u današnje vrijeme posebnu bi pažnju trebalo posvetiti razvijanju i modernizaciji ovih sustava.

Dok se u svijetu dosta pažnje pridaje energiji vjetra, u današnje vrijeme energija vjetra kao energetska resurs u Republici Hrvatskoj nije ispravno tretirana. Odnosno njime se ne gospodari na sustavan i organiziran način. Tome uvelike pridonosi i birokracija koja malom potrošaču nameće previše procedure i ulaganja za razvitak vlastitog energetskeg sustava. Samim time dobiva se tržišna nezainteresiranost i neisplativost.

Iskorištavanje energije vjetra trebala bi biti budućnost. Trebala bi biti prihvaćena kao nešto normalno i svakodnevno od čega bi svi imali koristi. Počevši od eko sustava, države pa sve do krajnjih potrošača odnosno korisnika.

POPIS LITERATURE

- [1] Sijerković M.: „Karakteristike bure na sjevernom Jadranu“, Pomorski zbornik 26, 1988.
- [2] Šegota T.: „Klimatologija za geografe“, Školska knjiga Zagreb, 1996.
- [3] Penzar B., Penzar I., Orlić M.: „Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana“, Zagreb 2001.
- [4] Burton T.: „Wind energy“, John Wiley and Sons, England, 2004.
- [5] Tešić M.: „Značaj malih vjetroturbinu u proizvodnji energije i svijetskih trendova“, Neum 2009.
- [6] Ban D., Žarko D., Mađerčić M., Čulig Z., Petrinić M.: „Generatori za vjetroelektrane, trendovi u primjeni i hrvatska proizvodnja“, CIGRE Cavtat, Hrvatska, 2007.
- [7] Watson S., Infield D., Harding M.: „Predicting the Performance of Small Wind Turbines in the Roof- Top Urban Environment“, Milano, 2007.
- [8] „Mali vjetroagregati i fotonaponski moduli za autonomne aplikacije na otocima Primorsko- goranske županije“, Zagreb, rujna 2009.
- [9] <http://hr.wikipedia.org/>, 10. ožujka 2015.
- [10] <http://klima.hr/> , 13. ožujka 2015.
- [11] <http://www.vjetroelektrane.com/>, 22. ožujka 2015.
- [12] <https://gigaom.com/>, 02. travnja 2015.
- [13] <http://www.leviathanenergy.com/> , 07. travnja 2015.

[14] <http://www.allsmallwindturbines.com/> , 15. travnja 2015.

[15] <http://eko.zagreb.hr/> , 19. travnja 2015.

[16] <http://www.dhmz.htnet.hr/> , 19. travnja 2015.

.

POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 2.1. Osnovne brzine vjetra u Republici Hrvatskoj

Slika 2.2. Ruža vjetrova

Slika 3.1. Vjetroagregat Wind Tulip

Slika 3.2. Vjetroagregati UGE

Slika 3.3. Vjetroagregat tvrtke AES, LT 200/3dd

Slika 3.4. Vjetroagregati Qr2,5, Qr5, Qr12

Slika 3.5. Vjetroagregat AeroTurbine

Slika 3.6. Vjetroagregat firme IR Wind Power

Slika 3.7. Vjetroagregat firme RevolutionAir

Slika 4.1. Autonomni sustav

Slika 4.2. Srednje i velike vjetroelektrane

Slika 4.3. Jako velike vjetroelektrane

Slika 4.4. Mogući načini postavljanja malih vjetroagregata

Slika 4.5. Vjetroagregat Loopwing μ series

Slika 4.6. Vjetroagregat Magenn

Slika 4.7. Vjetroagregat Helix

Slika 4.8. Vjetroagregat Nneowind 3D

Slika 4.9. Vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje

Slika 4.10. Vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje

Slika 4.11. Komponente malih vjetroagregata

Slika 4.12. Reduktor vjetroagregata

Slika 5.1. Osnovno djelovanje vjetroelektrane

Slika 5.2. Ovisnost snage vjetroturbine o brzini vjetra

Tablica 2.1. Brzine vjetra prema Beaufortu

Tablica 2.2. Kriterij zoniranja određenog područja s obzirom na osnovnu brzinu vjetra

Tablica 2.3. Iznos tlaka vjetra u ovisnosti o visini izmjere

Tablica 3.1. Vjetro elektrane u Republici Hrvatskoj

Tablica 4.1. Sinkrone brzine s obzirom na broj pari polova

Tablica 5.1. Princip priljučenja vjetroelektrane na elektroenergetsku mrežu