

Modeliranje profila vjetra u urbanim prostorima za potrebe korištenja u edukacijskog simulatora vjetroelektrana

Lekšan, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:068874>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

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



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

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**MODELIRANJE PROFILA VJETRA U URBANIM
PROSTORIMA ZA POTREBE KORIŠTENJA
EDUKACIJSKOG SIMULATORA
VJETROELEKTRANA**

Diplomski rad

Marko Lekšan

Osijek, 2022

SADRŽAJ

1.UVOD	1
1.1 Zadatak diplomskog rada	1
2. PREGLED LITERATURE U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA MODELA PROFILA VJETRA U URBANIM PROSTORIMA POMOĆU EDUKACIJSKOG SIMULATORA	2
3.VJETAR-OBNOVLJIVI IZVOR ENERGIJE	3
3.1 Općenito o energiji vjetra	3
3.2 Da li vjetroelektrane zahtjevaju rezervno generiranje proizvodnje	5
3.3 Snaga vjetra	5
3.4 Vjetroturbine	6
3.5 Male vjetroturbine	9
3.6 Vjetroelektrane u Hrvatskoj	17
3.8 Prednosti i nedostaci vjetroelektrana	21
4. EDUKACIJSKI SIMULATOR I KOMPONENTE U UPORABI POKUSA	23
4.1 Panel- regulator punjenja baterije 12 V	23
4.2 Panel- sinkroni generator sa trajnim magnetima 12 V	24
4.3 Panel-Izvanmrežni pretvarač 230 V, 275 VA	25
4.4 Panel-dinamičko ispitivanje servo stroja 0,3 Kw	26
4.5 Dodatne komponente za sigurnosni spoj osovine generatora i motora	29
4.6 Multimetar	30
4.7 Mala vjetroturbina 370 W sa demonstracijskim jarbolom	32
4.8 Komplet jarbola za instalaciju male vjetroturbine	35
5. SOFTVERI KORIŠTENI PRI RAČUNALNOM RADU NA SIMULATORU	37
5.1 Interaktivni asistent simulacija za male vjetroelektrane LabSoft	37
5.2 Active Servo	42
5.3 Softver VI starter	43
6. MOGUĆNOSTI APLIKACIJA TRENAŽERA MALIH VJETROELEKTRANA	46
6.1. Emisija flikera vjetroelektrana tokom kontinuiranog rada	46
6.2 Šum treperenja napona u izlazu vjetroturbine	49
6.3 Proizvodnja male vjetroelektrane korištenjem automobilskog alternatora	50
6.4 Energetska učinkovitost malih vjetroturbina u urbanim prostorima	51
ZAKLJUČAK	61
SAŽETAK	62
ABSTRACT	63
LITERATURA	64

1.UVOD

Vjetar kao jedan od prirodnih resursa energije je dostupan u velikim količinama kao obnovljivi i čist izvor. Uporaba vjetra se prostire kroz mnoge epohe čovječanstva. Počevši još od doba prvih brodova i postavljanja jedra kao mjere za plovidbu. Primjena se širi i u agrikulturne grane kod mlinova i vodenih pumpi. Pojavom električne energije javlja se i novi pristup pohranjivanja i iskorištavanja tog nepresušnog izvora. Počinju izgradnje prvih vjetrenjača kao ranijih inačica današnjih vjetroelektrana. Vjetroelektrane predstavljaju set od nekoliko vjetroagregata smještenih u neposrednoj maloj udaljenosti jedne od drugih spojenih na isti elektroenergetski sustav posredstvom rasklopnih uređaja. Vjetroagregat je element vjetroelektrane čiji su glavni dijelovi električni generator postavljen u kućištu na vrhu stupa i vjetroturbina. Princip rada se temelji na zaprimanju kinetičke energije vjetra na lopatice turbine i pretvaranje te energije u novu mehaničku energiju. Potom se mehanička energija prenosi na generator koji ju pretvara u električnu energiju i prosljeđuje dalje u mrežu za daljnju uporabu. Vjetroelektrane nažalost pokrivaju manje od 10% ukupnih proizvođača električne energije u svijetu danas.

Iz prikupljenih podataka o analiziranim brzinama i kretanjima vjetra s mjerne postaje instalirane na krovu zgrade fakulteta elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija i provedenim mjerenjima na više različitih lokacija i visina uzimajući u obzir sve aspekte mogućih smetnji i poremećaja u rezultatima se obavljanja mjerenje ruža vjetrova u urbanoj sredini. Rezultati se unose u program i uporabom simulatora male vjetroelektrane Lucas-Nuelle se definiraju optimalni modeli profila vjetra.

1.1 Zadatak diplomskog rada

Zadatak rada je da se korištenjem edukacijskog simulatora vjetroelektrane (Lucas Nuelle-Small Wind Power Plant Trainer) naprave podloge za različite dinamičke promjene vjetra koje bi poslužile za proučavanje rada malih vjetroelektrana na različitim pozicijama unutar urbanog prostora. Potrebno je mjerenjima prikupiti podatke brzine vjetra na različitim lokacijama (unutar naselja, na vrhu obiteljske kuće, na krovu zgrade i sl.) te ih pripremiti u obliku predložaka koji bi se onda mogli koristiti u istraživanjima različitih vrsta vjetroturbina za potrebe proizvodnje električne energije. Edukacijski simulator sastavni je dio istraživačkog laboratorija za hibridne pogonske sustave te se koristi za proučavanje korištenja energije vjetra u napajanju električnih vozila.

2. PREGLED LITERATURE U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA MODELA PROFILA VJETRA U URBANIM PROSTORIMA POMOĆU EDUKACIJSKOG SIMULATORA

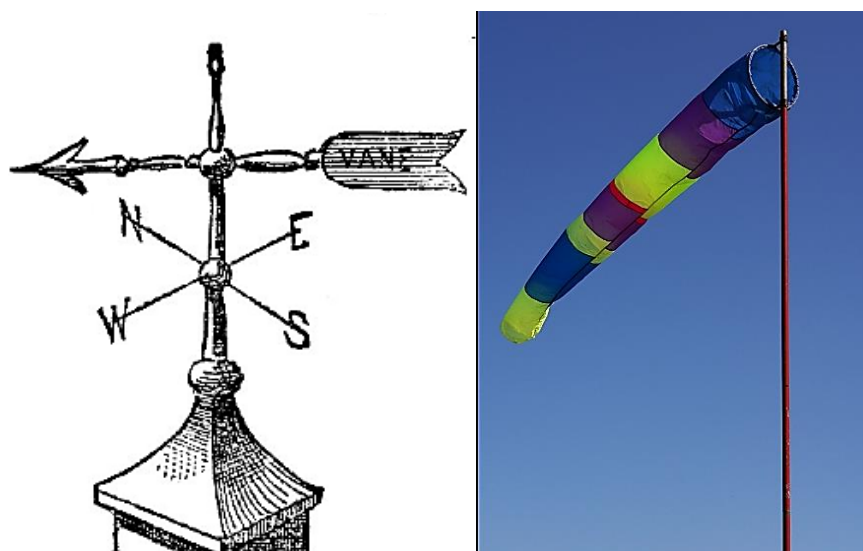
U literaturama [1] autor članka govori o energiji vjetra kroz povijest od samih začetaka pa do suvremenijih razdoblja, daje detaljniji uvid u svrhu i načine uporabe energije vjetra u prošlosti, i u područja odnosno države koje su prve prakticirale korištenje vjetra kao izvora energije. Autori literatura [2], [5] i [7], [11] i [12] daju uvid u osnovne pojmove vezane za vjetroelektrane modernog svijeta, njihov potencijal iskorištavanja, osnovne dijelove vjetroturbina, opisivanje pojmova kao što su ruže vjetrova, vjetroparkovi, efekt zavjetrine, snage vjetrova... . Detaljnije o Lucas Nuelle maketi, proizvodima, komponentama i računalnim programima se govori u literaturama [3] i [4], kao i o simulacijama malih vjetroturbina pa i mnogih drugih pokusa kojih se ovaj rad ne dotiče ali je korisno imati u saznanju. Za stanje u Hrvatskoj oko obnovljivih izvora energije, njihove dostupnosti, efikasnosti, raspodjele po prostorima i iskorištavanja odgovore daju literature [6] i [9]. Literature [8] i [10] daju detaljan i kvalitetan pogled na energetske vrijednosti i uporabljivost energije vjetra. Autor literature [13] govori o alternativnim načinima pokretanja turbine preko sinkronih generatora, njihove prednosti i nedostatke te osnovna obilježja jednog takvog generatora u primjeni. Literatura [14] opisuje načine kontroliranja raspodjele proizvedene energije iz energije vjetra preko dodatnih izvora pohranjivanja, dok se u literaturama [15] [18], [20] i [24] pobliže upozna s podvrstom vjetroturbina zvanom male vjetroturbine, primjenama u životu, vrstama malih vjetroturbina, komponentama, dizajnom, efikasnošću, korisnošću, proizvodnjom i generiranjem energije vjetrova temeljene na brzinama vjetrova. Priručnik [16] ukratko pojašnjava osnovne komponente LabSoft računalnog programa za primjenu u školstvu, kao edukacijski simulator, specifično u suradnji s UniTrain uređajem i Lucas-Nuelle maketama. Autori u literature [17] govore o emisiji flikera na vjetro farmama tijekom kontinuiranog rada, njihove pozitivne i štetne utjecaje, dijagrame ponašanja flikera pri različitim scenarijima i uvjetima. Šumovi koje proizvodi emisija naponskih flikera su pobliže pojašnjeni u literature [19]. Literatura [21] pak predstavlja alternativni način generiranja energije iz vjetroturbina koristeći se alternatorom iz automobila, kao jednim praktičnim rješenjem. U literature [22] daju se prijedlozi za različite koncepte izgradnje vjetroturbina, uspoređuju prednosti i nedostaci svake od njih, rezultati rada u identičnim uvjetima, adekvatna upotreba svake od njih, a u literature [23] autori govore detaljnije o ponašanju vjetrova u urbanim sredinama, okruženjima gdje protok nije tečan, utjecaju takvih vjetrova na ljude, ispituju brzine vjetrova na različitim lokacijama kako bi se prepoznale zone jačeg ili slabijeg puhanja vjetra i kako bi se znalo po tim podacima pravilno locirati mjesto najbolje iskoristivosti energije vjetra radi najefikasnije proizvodnje.

3.VJETAR-OBNOVLJIVI IZVOR ENERGIJE

3.1 Općenito o energiji vjetra

Vjetrovi nastaju uglavnom posljedičnim zagrijavanjem ili hlađenjem pojedinih dijelova Zemlje. Energetski potencijal vjetra dolazi do izražaja tijekom 90-tih godina prošlog stoljeća. Najveća zastupljenost je u zemljama poput Danske gdje pokrivenost potreba za električnom energijom doseže i do 20%, i Njemačka. Drugi najznačajniji obnovljivi izvor energije nakon hidroenergije. Plan je do godine 2030-e u Europskoj uniji pokriti s raspoloživih 100 GW instalirane snage oko 10% svih energetskih potreba. U Hrvatskoj je uporaba energije vjetra iako u blagom porastu zbog iskakanja vjetroelektrana na nekoliko lokacija u južnoj I jugozapadnoj Hrvatskoj, i dalje relativno niska. No potražnja nadilazi proizvodnju, pogotovo za ove male vjetroturbine za potrebe opskrbljivanja manjih stambenih lokacija, a koje se obrađuju i u ovom radu.

Vjetar opisujemo dvjema komponentama-smjer i snaga strujanja. Smjer se određuje na temelju pokazivanja vjetrokaza, u kojem smjeru se zakreće otkriva iz kojeg smjera dolazi zavjetrina. Snaga odnosno brzina vjetra se pak mjeri aparaturom koju zovemo anemometar.



Slika 3.1 Starija i novija izvedba vjetrokaza



Slika 3.2 Anemometar za ručnu primjenu i onaj koji se instalira na krov ili neku povišenu podlogu

Često se za prikaz smjerova vjetra koristi takozvanim ružama vjetrova. Grafičkim prikazima smjera vjetra. Oblika poput zvjezdastog dijagrama sa 4,8 ili 12 mogućih smjerova kretanja kao pokazateljima strana svijeta. Duljina vrha strelica predstavlja frekvenciju kojom vjetar puše u promatranom smjeru u nekom vremenskom periodu.



Slika 3.3 Ruže vjetrova Hrvatske

Druga veličina je brzina vjetra. Opisuje se trima vrijednostima, trenutna srednja i promjenjiva brzina. Trenutačna brzina je sumarna srednjoj i promjenjivoj brzini strujanja. Bitno je naglasiti da se brzina odnosno snaga vjetra mijenja s nadmorskom visinom. Što je veća udaljenost od tla, to su struje vjetrova izraženije. Takvi podaci bitni su pri procjeni potencijala vjetra za proizvodnju energije.

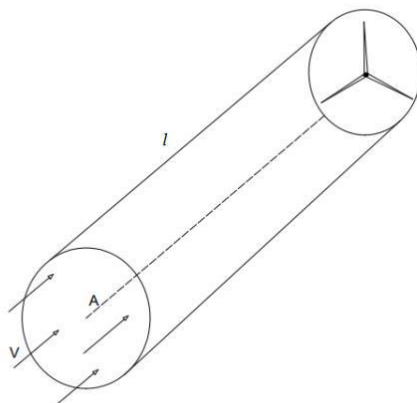
Glavna vrijednost energije vjetra je što može nadoknaditi potrošnju goriva i rezultirajuće emisije, uključujući i ugljik kao izvor energije. Samo mali dio proizvodnje energije vjetra se isporučuje tijekom perioda vršnih snaga i visoko rizičnih razdoblja; iz tog razloga vjetroelektrane imaju ograničene kapacitetne sposobnosti.

3.2 Da li vjetroelektrane zahtjevaju rezervno generiranje proizvodnje

U elektroenergetskom sustavu nužno je održavanje kontinuiteta između proizvodnje i potrošnje. Operatori sustava implementiraju kontrolirano generiranje radi praćenja promjene ukupne potražnje, a ne varijance jednog proizvođača ili opterećenja kupaca. Nije potrebno jer bi bilo prilično skupo za mrežne operatere da prate varijacije generiranja od jednog proizvodnog postrojenja ili opterećenja kupaca. Takozvana rezervna postrojenja namijenjena vjetroelektranama ili bilo kojim drugim proizvodnim postrojenjima nisu potrebna i bila bi neekonomična pri upotrebi resursa za proizvodnju energije.

3.3 Snaga vjetra

Snagu vjetra možemo podijeliti na teorijsku i onu stvarnu, pravu snagu. Teorijska je ulazna snaga na lopatice rotora dobivena pretvorbom sile vjetra u okretnu silu odnosno mehaničku energiju. Količina prenesene energije je ovisna o volumenu cilindra vjetra.



Slika 3.4 Cilindar vjetra [2]

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (3.1)$$

Snaga vjetra ovisi o gustoći zraka, površini kruga rotora i kubičnoj brzini vjetra. No također se mora voditi računa i o nekoliko drugih faktora poput promjene brzine vjetra tijekom vremena, promjene ovisne o visini. Snaga je pak još ovisna i o gustoći zraka, a gustoća ovisi o temperature, nadmorskoj visini i vlažnosti. Kinetičku energiju vjetra je ne moguće potpuno iskoristiti zbog strujanja koje ne može prestati ni nestati. Dio energije odlazi i na trenje. Zato se definira stvarna snaga vjetra. Ona je proporcionalna kvadratnoj razlici dolazne brzine vjetra na početku rotora i kvadratu odlazne brzine vjetra na kraju rotora.

$$P = \frac{1}{2} \times q \times (v^2 - v_0^2) \quad (3.2)$$

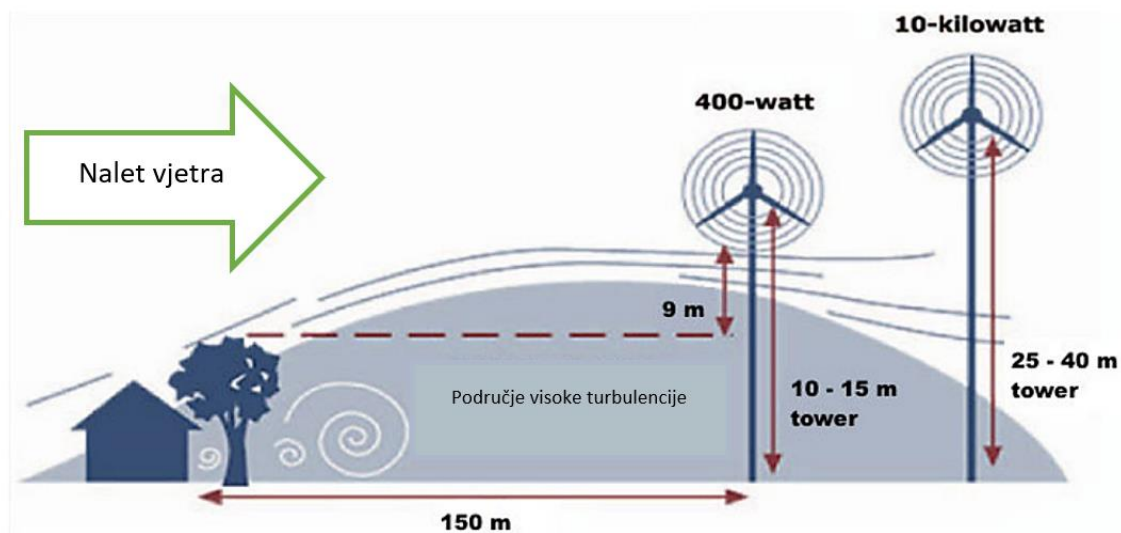
Konačni izraz za stvarnu snagu vjetra glasi:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (3.3)$$

C_p je faktor udjela ulazne snage vjetra na elisama rotora. Preostala snaga odlazi izlaznim vjetrom s elisa rotora. Još se zove i koeficijent snage rotora ili učinkovitosti rotora. Ovisi o omjeru ulaznih i izlaznih brzina vjetra na elise.

3.4 Vjetroturbine

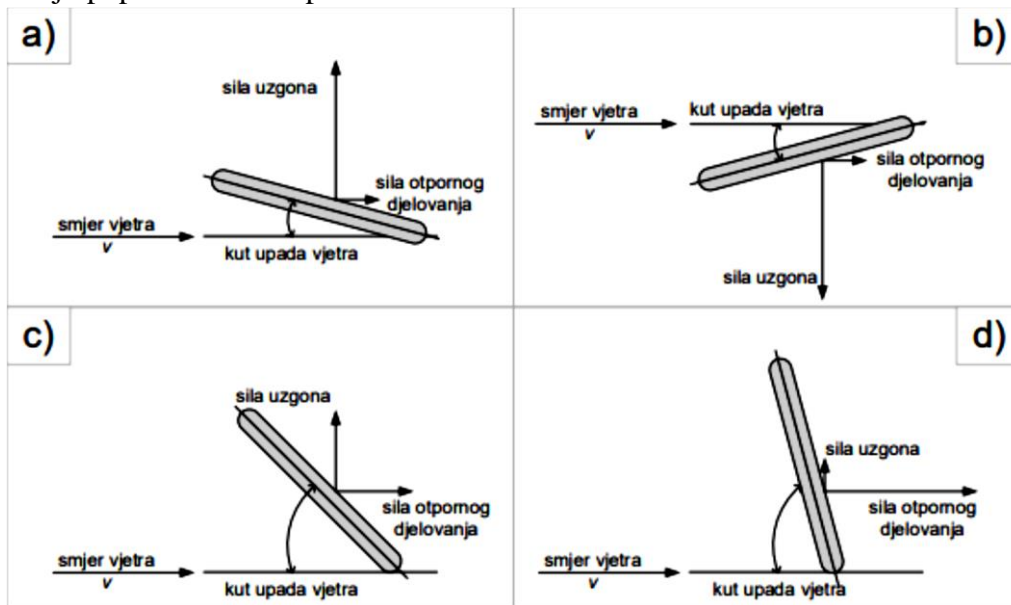
Vjetroturbine mogu biti postavljene same na svojem stupu što je uglavnom i slučaj ili pak na krovovima zgrada. Postoji pravilo instalacije koje kaže da turbina mora biti postavljena barem 9 metara više od bilo koje prepreke unutar 150 metara udaljenosti. Ako se nastoji instalirati turbine na krov standardi su dvostruko utegnutiji zbog težih uvjeta, visina krova, brojne opstrukcije, prekinuti naleti vjetra iz različitih smjerova su sve razlozi slabije izlazne snage turbine te naprezaju rad turbinskih lopatica i generatora što smanjuje životni vijek. Provedbom istraživanja utvrđeno je da bi pravilno bilo instalirati malu vjetroturbinu na sredinu krova zgrade više nego uz rub zbog turbulencija koje su intenzivnije na vanjskim obrubima zgrade.



Slika 3.5 Pravilna udaljenost vjetroturbine od drugih objekata radi izbjegavanja turbulentnih vjetrova [24]

Pogonski strojevi koji pretvaraju kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju. Dobivenom mehaničkom energijom pogone električni generator. U današnje vrijeme je u uporabi istaknutija vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje i dvije/tri lopatice. Vertikalne su u fazi razvoja. Na samom vrhu horizontalnih turbina odnosno stupa nalazi se mjenjačka kutija s generatorom električne struje. Vjetroturbine startaju s radom pri brzini vjetra od 18 km/h i dosegnu maksimalni radni napon do nekih 108 km/h, pri čemu se lopatice zaustavljaju kako ne bi došlo do oštećenja. Baš iz tih razloga je bura neupotrebijiva zbog dosezanja brzina i do 150 km/h. Uvijek je potrebno sprovesti nužna mjerenja dinamičkih promjena vjetra na godišnjoj bazi, ponekad i na period više godina, prije nego se odluči za instalaciju vjetroturbine. Kako se znaju javljati varijacije snage u radu potrošači moraju osim glavnog imati priključen i dodatni izvor energije, a vjetroturbine sposobnost predavanja viškova energije u mrežu. U manjim jedinicama ti viškovi se spremaju u akumulatore ili se koriste pri zagrijavanju prostora. Najveće mane vjetroturbina su vizualna šteta okolišu i naravno buka koju proizvode. Aerodinamičnost

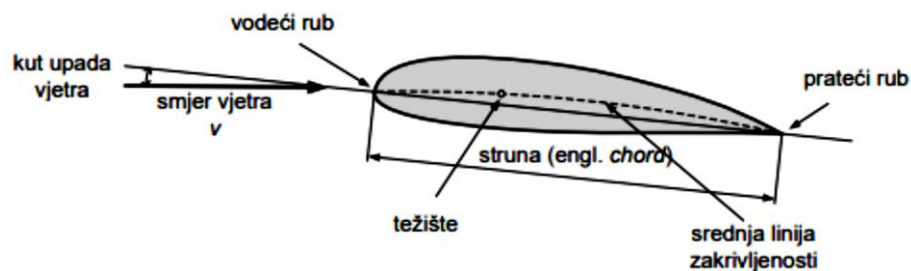
vjetroturbine osigurava postizanje idealnih vjetroturbina. Iz tog kuta gledanja lopatice turbine se profiliraju poput krila zrakoplova.



Slika 3.6 Sile na lopaticama vjetroturbine [11]

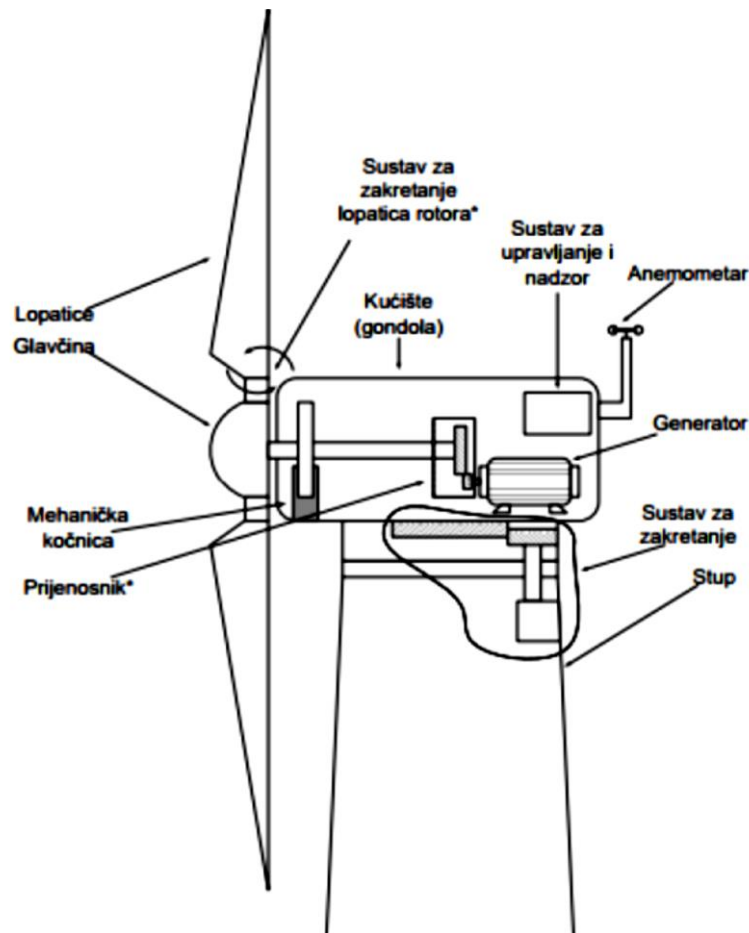
Sile na lopaticama prikazuju odnos dvaju sila, one otpora i uzgona. Uvjeti za ispunjenje dobrog aerodinamičkog profila lopatica:

- Oštar prateći rub
- Zaobljen vodeći rub
- Mali omjer debljine lopatice i duljine strune
- Glatka površina
- Veliki omjer dvaju sila



Slika 3.7 Poprečni presjek lopatica vjetroturbine [11]

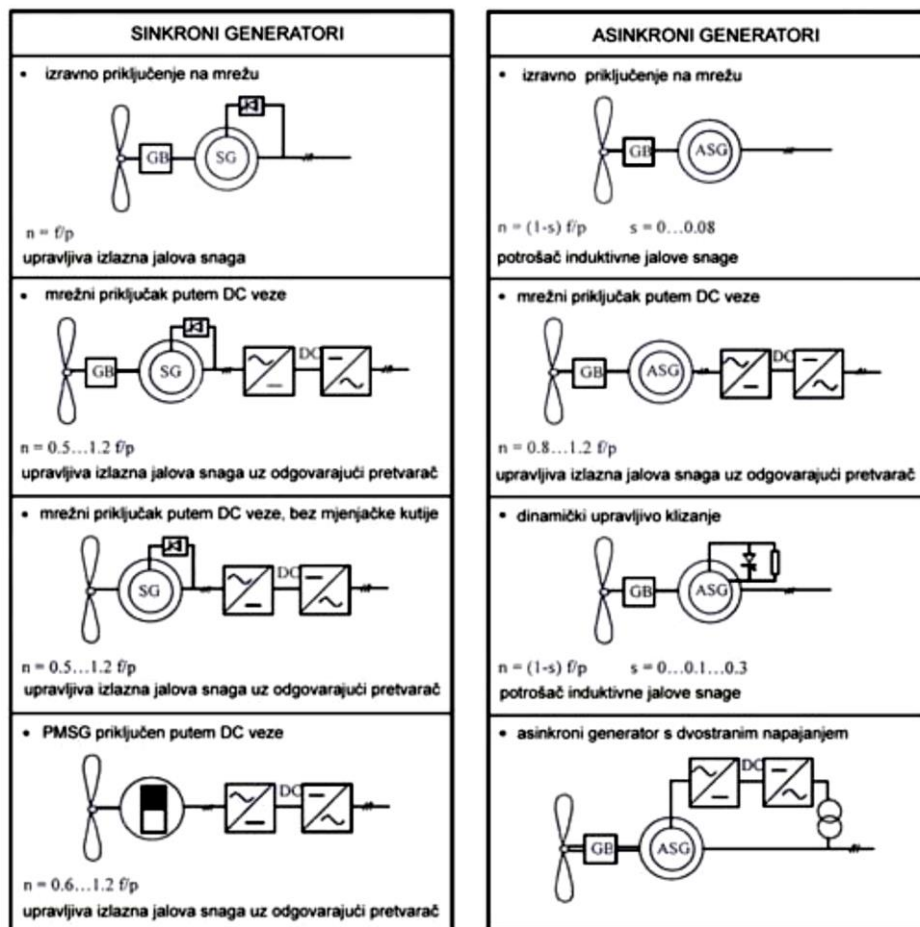
Vjetroagregati se sastoje od lopatica, glavčine, mehaničke kočnice, prijenosnika, sustava za zakretanje lopatica rotora, kućišta, sustava za nadzor i upravljanje, anemometra, generatora, sustava za zakretanje i stupa.



Slika 3.8 Osnovni dijelovi vjetrogeneratora

Lopatice funkcioniraju na principu krila aviona, najčešće izvedene s tri lopatice. Mehanička kočnica je najčešće izvedba u obliku disk kočnice i djeluje prilikom ispada mreže signalizacijom generatora ili uređaja za mjerenje brzine vrtnje generatora. Prijenosnik pak podešava brzinu vrtnje rotora turbine onim višim brzinama rotora generatora. Sustav za zakretanje lopatica rotora promjenama kuta regulira izlaznu snagu generatora tako da mijenja upadni kut vjetra na lopaticama. Kućište štiti generator od okolnih utjecaja, i obratno okolinu od štetnih djelovanja generatora poput buke. Sustav za upravljanje i nadzor je upravljani mikroprocesorima, njegova uloga je upravljanje i nadzor radnih procesa i zaštite, kao i signalizacija kvara i obrada podataka. Anemometar na rubu kućišta mjeri podatke o brzinama vjetrova i prosljeđuje ih sustavu za upravljanje i nadzor. Generator pak služi za pretvorbu mehaničke energije u električnu. Generatori mogu doći u asinkronoj i sinkronoj izvedbi. Sustav za zakretanje zakreće cijeli taj sustav, nalazi se ispod kućišta, zakretanje obavlja motor. Stup može biti izveden u nekoliko izvedbi poput rešetkastog, teleskopskog, konusnog, cjevastog kao najčešćeg.

Generatori mogu biti spojeni indirektno preko prijenosnika ili direktno na osovinu vjetroturbine. Dije se na one sa asinkronim generatorom i one s sinkronim generatorom:



Slika 3.9 Izvedbe asinkronih i sinkronih generatora u vjetroturbinama [11]

Sinkroni generatori su u funkciji izmjenične struje. Brzina u svezi s frekvencijom napona i brojem pari polova. Primjenjuju se pretežno kada su poznati uvjeti rada pogona, kada je brzina vrtnje konstanta. Zahtijevaju sustav uzbude i regulator brzine za održavanje frekvencije i napona. Posjeduju veći stupanj djelovanja i pouzdanost, ali kada se desi poremećaj brzine vrtnje ili poremećaj u mreži kao i fluktuacije brzine vjetra teško ostaju u sinkronizmu. Kod vjetroturbina koje nemaju stalnu brzinu vrtnje se javlja statički pretvarač frekvencije. Tako se zaobilaze naponske nestabilnosti. Sinkroni generatori su također dobri i za proizvodnju jalove snage pogotovo korisno ako su spojeni na naponski slabu mrežu. Rotor vjetroturbine direktno spojen na rotor generatora bez osovine i prijenosnika.

Asinkroni generator je isto stroj izmjenične struje ali različite brzine vrtnje od sinkrone i ovisi o opterećenju. Mehanička energija se s rotora vjetroturbine preko osovine i zupčanika prenosi na rotor generatora. Asinkroni generatori imaju jednostavnu i jeftinu konstrukciju, ali zahtijevaju neku vrstu kondenzatorske baterije kao uređaja za kompenzaciju i uređaj za sinkronizaciju s mrežom. Jednostavniji sustav upravljanja, robusnost i cijena, fleksibilno održavanje.

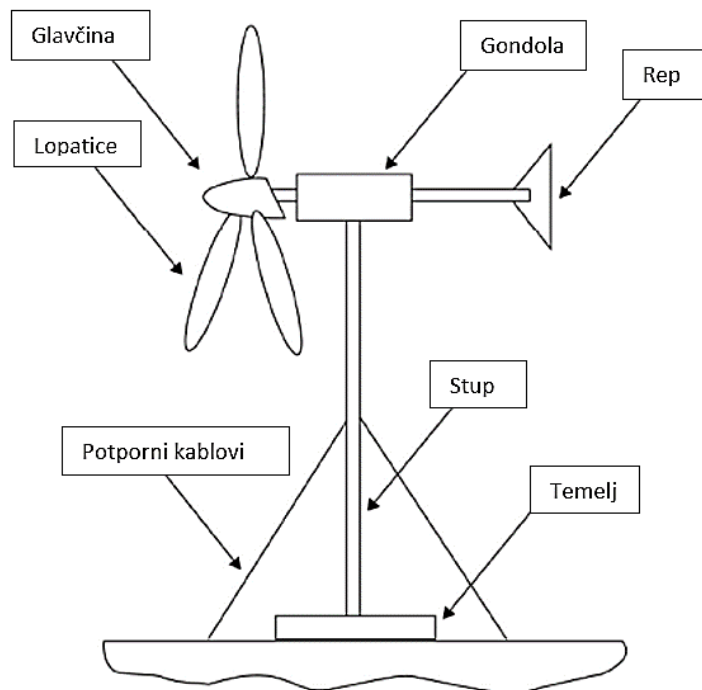
Diodni ispravljač u mosnom spoju za reguliranje djelatnog otpora rotora i promjenu brzine vrtnje/momenta karakteristike asinkronog motora.

3.5 Male vjetroturbine

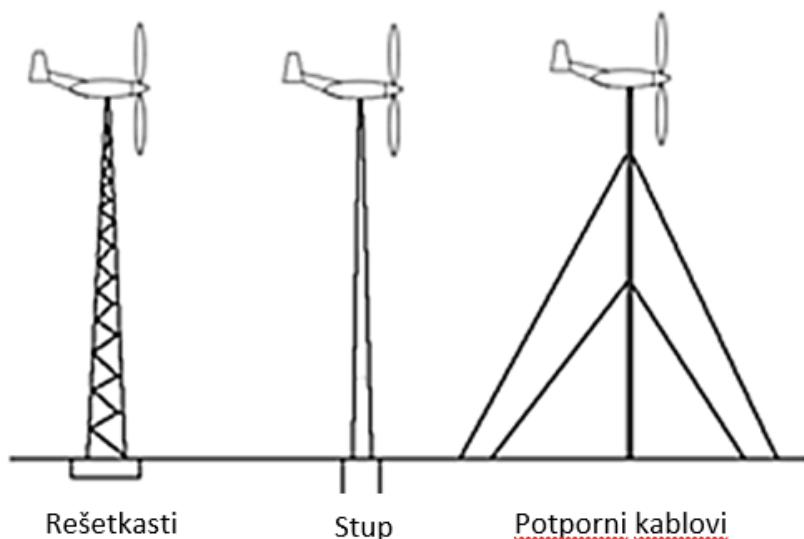
Vjetroturbine se prema snazi dijele na male (do 30 kW), srednje (30-1500 kW) i velike (>1500 kW). Manje izvedbe su dobre za proizvodnju energije za jednu stambenu ustanovu ili manje naselje, vodne crpke, u brodskoj signalizaciji. U malim turbinama se generira istosmjerna struja, te od dodatnog materijala koriste se baterijama, regulatorima punjenja i DC-AC pretvaračima. Iako imaju nešto lošiju učinkovitost i ekonomičnost nego srednje i velike turbine, troškovi instalacije su niži zbog pomanjkanja konstrukcijskih komponenti koji bi inače upotrijebili pri instalaciji velikih turbina, poput dizalica. Osim toga rezultat proizvodnje može se primjenjivati na licu mjesta, utjecaj na okolinu je isto značajno manji. Male vjetroturbine mogu se kombinirati s fotonaponskim ćelijama. Bitan dio je mehanizam za zakretanje lopatica u smjeru vjeta koji može biti pasivan ili aktivan. Pasivni je pak takozvani rep na koji vjetar utječe puhanjem i zakreće glavu odnosno lopaticu, drugi je aktivan gdje u sustavu postoji ugrađen mehanizam koji sam zakreće glavu turbine. Male vjetroturbine moraju imati i sustave za zaštitu od jakih vjetrova. Jedna od takvih zaštita je namotavanje, zakretanje rotora od vjeta. Druga manje upotrebljavana metoda je kočenje i preporučljivo je uvijek ga koristiti u paru s nekom drugom mjerom zaštite. Gotovo sve male vjetroturbine snage do 7 kW koriste generatore s permanentnim magnetom.



Slika 3.10 Generator s permanentnim magnetom [20]



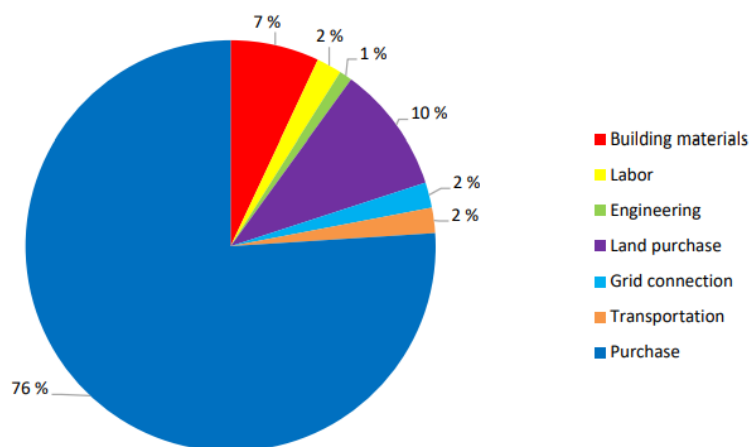
Slika 3.11 Prikaz osnovnih dijelova male vjetroturbine [20]



Slika 3.12 Tri tipa tornjeva samostojećih malih vjetroturbina [24]

Dobra uporaba malih vjetroelektrana je u “kućnoj” uporabi kao:

- Dodatni izvor napajanja uz glavni, iz mreže ili agregata
- Autonomni izvor, uz sustav rezervnog napajanja iz baterije koje puni višak proizveden energije iz vjetroelektrane.



Slika 3.13 Prosječni troškovi instalacije male vjetroelektrane u privatnom vlasništvu (1500-8000 eura/kWh) [20]

Isključivo sa ugrađenim asinkronim generatorom.

Broj a samim time količina instalirane snage malih vjetroelektrana je u padu iz godine u godinu, tokom kraja prošlog desetljeća. Ulaskom u novo desetljeće se u pojedinim državama poput SAD-a i Italije stanje popravlja zbog promjena u sustavu i financiranju, te unosu poticaja i ulaganja dioničara.

Rated power/system	Wind-diesel								Wind mini-farm								
	Wind hybrid								Single wind turbine								
	Wind home system								Build Integrated								
P < 1 kW	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	
1 kW < P < 7 kW	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	
7 kW < P < 50 kW					X	X	X	X	X				X	X	X	X	
50 kW < P < 100 kW								X	X						X	X	
Small wind systems applications	Sailboats	Signalling	Street lamp	Remote houses/dwellings	Farms	Water pumping	Seawater desalination	Village power	Mini-grid	Street lamp	Buildings rooftop	Dwellings	Public centres	Car parking	Industrial	Industrial	Farms
	Off-grid applications								On-grid applications								
Source: CIEMAT																	

Slika 3.14 Mjesta uporabe malih vjetroelektrana različitih snaga [20]

Bitne specifikacije malih vjetroturbina navedene u zahtjevu za ponudu:

- Maksimalna snaga 5-40 kW

25 proizvođača diljem svijeta proizvode male vjetroelektrane snaga 5 do 40 kW po starim podacima, u današnje vrijeme taj broj bi morao biti veći s obzirom na smjer u kojem ide iskorištavanje energetske izvora i njihova dostupnost kao i potražnja i proizvodnja. Otprilike 20 vjetroturbina preko 6 m promjera rotora se proizvodi za crpljenje vode. Prosječna cijena jedne takve vjetroelektrane ovisno o snazi je oko 5000 do 7500 eura po kWh.

- Visoka pouzdanost i manje potrebe za održavanjem

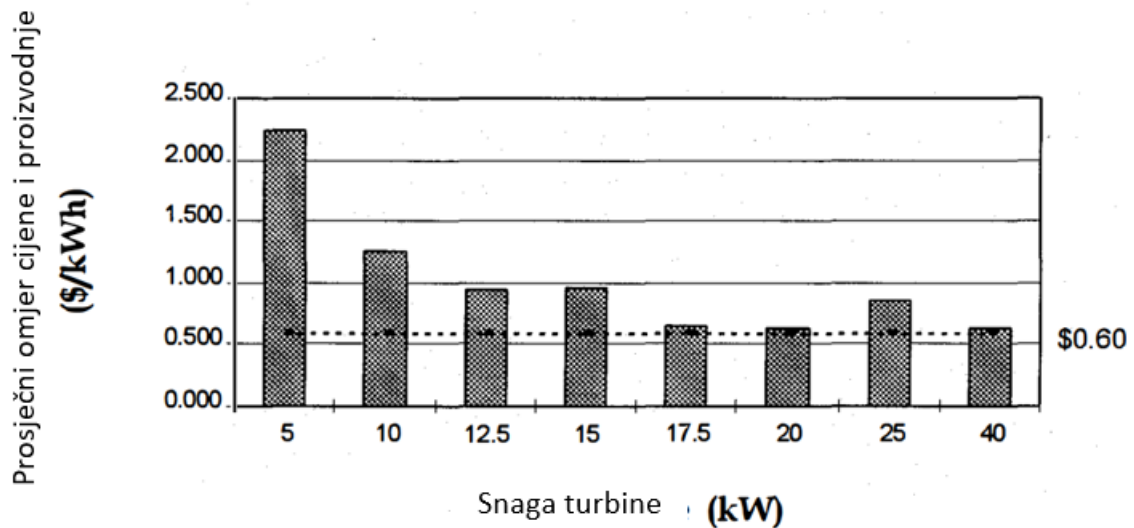
Pretežno zbog potrebe za operativnim sustavima na udaljenim lokacijama ili lokacijama u razvitku. Naspram turbina sa određenim stupnjem korisnosti, ove male se prodaju u malim grupama ili samostalno, time se povećavaju troškovi održavanja. Osjetljivost na pouzdanost i potrebu za održavanjem raste što je veća udaljenost lokacije.

- Jednostavan prijenos i instalacija

Jednostavnost u prijevozu je nužna na međunarodnom tržištu. Zemlje u razvoju sa slabijom infrastrukturom su primarni pokretači tržišta.

- Omjer cijene i učinka

Godišnja vrijednost koja se definira kao trošak turbinskog sustava podijeljen sa neto godišnjom proizvodnjom energije. Ne uzima u obzir troškove životnog ciklusa, bilancu troškova stanice ili troškove rada i održavanja. CPR potiče na smanjenje troškova turbinskog sustava i porast godišnje proizvodnje energije.



Slika 3.15 Podaci o prosječnim troškovima malih vjetroturbina snaga 5-40 kW.[18]

Cijene su se kretale između 0,48 i 2,43 \$/kWh. Kada se podaci usklade sa nazivnom snagom CPR ne ide ispod 0,6 \$/kWh.

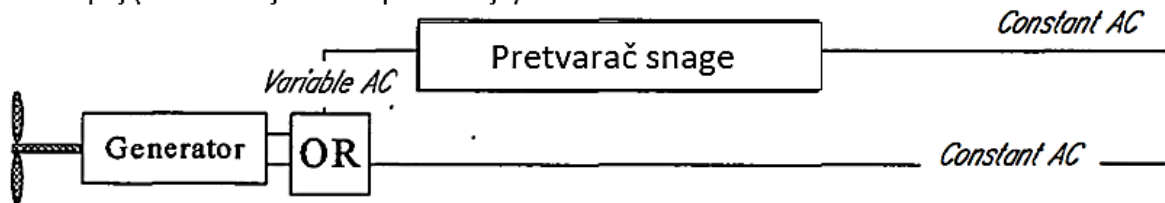
- Smanjeni COE(cost of energy)

Zahtjeva se značajno smanjenje troškova energije. Obračunava se početni kapital, godišnje operacije i troškovi održavanja, kao i gubitci.

COE varira ovisno o primjeni, lokaciji i drugim čimbenicima poput financija.

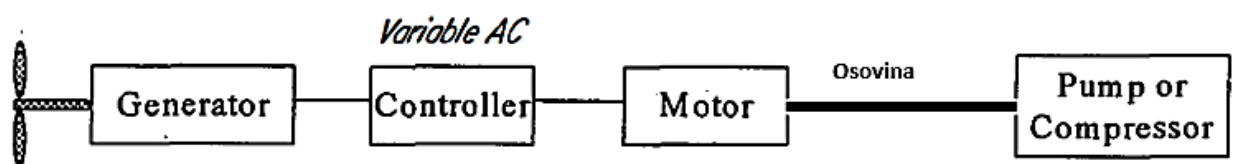
Tri su definirane kategorije spajanja na mrežu prema tržištu:

Mrežni spoj (stalno izmjenično opterećenje)



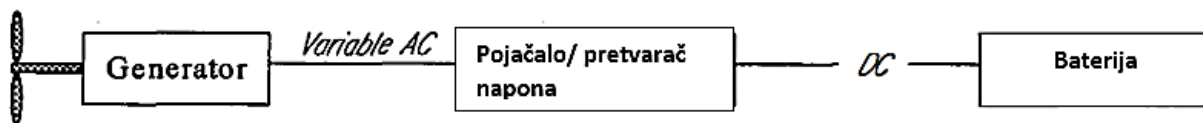
Slika 3.16 Mrežni spoj; stalno AC opterećenje [18]

Elektrifikacija vjetrom (promjenjivo izmjenično opterećenje)



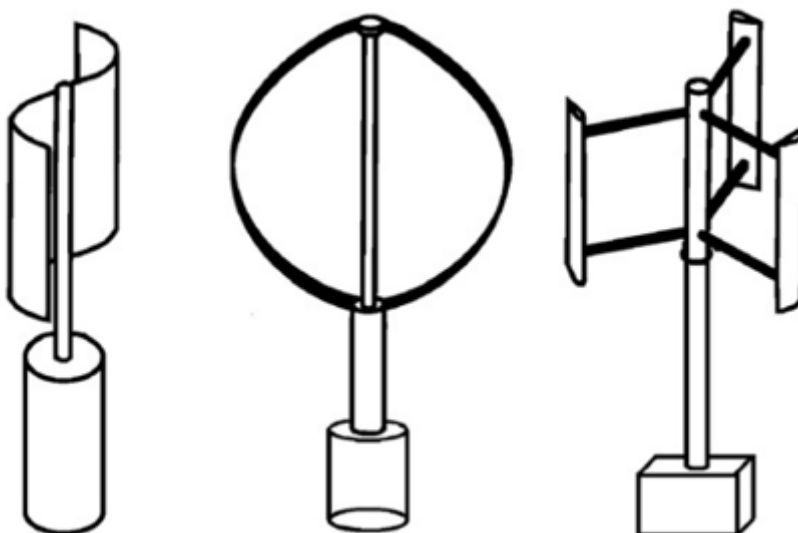
Slika 3.17 Elektrifikacija vjetrom; promjenjivo AC opterećenje [18]

Punjenje baterije (istosmjerno opterećenje)



Slika 3.18 Punjenje baterije; DC opterećenje [18]

Spajanje na mrežu može biti trofazno ili jednofazno a sustav u vlasništvu komunalnih, ruralnih ili udruga za elektrifikaciju, ili pak mini-mreže. Hibridni sustavi kao višestruki izvori energije povezani zajedno u svrhu. Elektrifikacija vjetra se koristi izravno za pokretanje kompresora ili osovina. Sustavi punjenja baterije se koriste u udaljenim aplikacijama sa kontinuiranim napajanjem, poput telekomunikacijskih stanica i društvenih stanica za punjenje baterija.

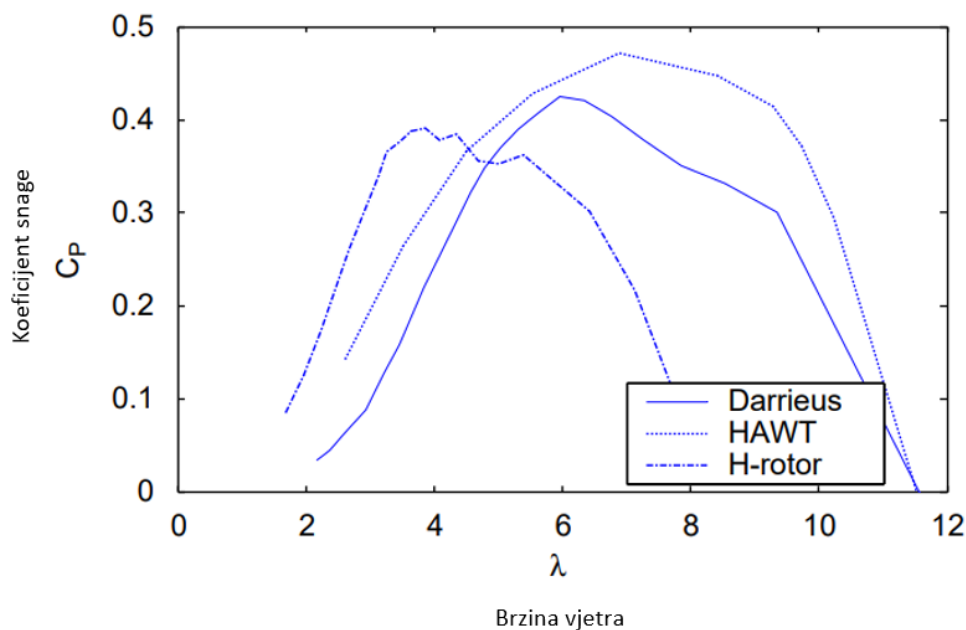


Slika 3.19 Tri glavne izvedbe malih vjetroelektrana; s lijeva na desno:Savoniusova, Darrieusova, H-rotor [22]

Summary of the most important differences between the three turbines

	H-rotor	Darrieus	HAWT
Blade profile	Simple	Complicated	Complicated
Yaw mechanism needed	No	No	Yes
Pitch mechanism possible	Yes	No	Yes
Tower	Yes	No	Yes
Guy wires	Optional	Yes	No
Noise	Low	Moderate	High
Blade area	Moderate	Large	Small
Generator position	On ground	On ground	On top of tower
Blade load	Moderate	Low	High
Self starting	No	No	Yes
Tower interference	Small	Small	Large
Foundation	Moderate	Simple	Extensive
Overall structure	Simple	Simple	Complicated

Tablica 3.1: Razlike između triju tipova malih vjetroturbina [22]



Slika 3.20 Krivulje snage tri vste malih vjetroturbina [22]

Provedbom usporedbi zaključeno je da su VAWT vjetroturbine naprednije od HAWT tipa. Specifično kod VAWT-a je zaključeno da je tip H-rotor napredniji od Darrieusovog, najviše zbog svoje snage i jednostavnije koncepta. VAWT se pokazao boljim od HAWT-a u krovnim instalacijama. VAWT imaju i veće lopatice od HAWT ali to ne mora nužno biti istinito, jer se te lopatice mogu smanjiti dimenzijama u izgradnji ali to opet može ugroziti snagu lopatica.

Neke od izvedbi malih vjetroturbina u aktualnim primjenama i njihove karakteristike:



Slika 3.21 Hyland 920 mali vjetroagregat

Hyland 920

- $P_n=220$ W
- $D=920$ mm
- $W_{god}= 450$ kWh
- $v_{vjetra}= 4.5$ m/s
- $m= 18$ kg



Slika 3.22 Alpha 311 Mk.X vjetroagregat

Alpha 311 je vrlo praktičan za instalaciju zbog unikatnog dizajna. Najpovoljnije lokacije su uz cestu ili željeznicu jer onda koriste strujanja zraka uzrokovana prolascima vozila i tako proizvode energiju i kada nema potrebnog vjetra.



Slika 3.23 Excel 10 vjetroagregat

Excel 10 je zbog svoje velike pouzdanosti i jednostavnog dizajna kao i dugotrajnosti ispostavilo se jedan od najbolji na tržištu. Horizontalna os i snage od 1,6, 7.5 ili 10 kW. Još neke izvedbe malih vjetroturbina su vertikalna City windmills sa snagama od 0.5, 1 i 2 kW, Envergate nazivnih snaga 20 ili 100 kW, visoke učinkovitosti, niskih investicijskih troškova i visoke kvalitete. EOCYCLE 25 je najmodernija mala vjetroturbina s direktnim pogonom od 25 kW.

3.6 Vjetroelektrane u Hrvatskoj

Hrvatska je danas u vlasništvu 25 vjetroelektrane. Prema strategijskim ciljevima do 2030. godine u Hrvatskoj bi trebalo biti instalirano oko 2000 MW vjetroelektrana u snazi. Hrvatska očito kaska sa iznošenjem regulativa i ispunjavanjem propisanih ciljeva kada su obnovljivi izvori u pitanju. Problem u razmišljanju je što se na obnovljive izvore gleda sam kao mjeru za sredstvom i nametnutom dužnošću od strane europske unije, umjesto nečim pozitivnim, sigurnijim za okoliš i ljude, i nadasve efikasnim.

VJETROELEKTRANA	ODOBRENA SNAGA (MW)	SKLOPLJEN UOKM	PRIKLJUČAK NA MREŽU (kW)
VE Ravne	5,95	Prosinac 2006.	10
VE Trlat-Krtolin	11,2	Prosinac 2007.	30
VE Orlice	9,6	Lipanj 2009.	30
VE Vrataruša	42	Srpanj 2009.	110
VE Crno Brdo	10	Ožujak 2011.	10
VE ZD 2	18	Studeni 2011.	110
VE ZD 3	18	Studeni 2011.	110
VE Pometeno Brdo	20	Studeni 2011.	110
VE Ponikve	34	Listopad 2012.	110
VE Jelinak	30	Prosinac 2012.	110
VE ST 1-2 Kamensko	20	Lipanj 2013.	110

VE ST 1-1	20	Lipanj 2013.	110
Voštane			
VE ZD 4 faza I.	9,2	Srpanj 2013.	10
VE Velika	43	Prosinac 2013.	110
Glava, Bubrig i Crni Vrh			
VE Zelengrad – Obrovac	42	Ožujak 2014.	110
VE Ogorje	44	Srpanj 2015.	110
VE Rudine	35	Srpanj 2015.	110
VE Katuni	39	Studeni 2016.	110
VE Glunča	22	Listopad 2016.	110
VE ZD 6P + ZD6	54	Lipanj 2017.	110
VE Lukovac	48	Srpanj 2017.	110
VE Kom-Orjak- Greda	10	Studeni 2018.	35
VE Krš Pađene	142	Srpanj 2019.	220
VE Jasenice	10	Kolovoz 2019.	35
VE Korlat	58	Ožujak 2020.	110
Ukupno		794,95	

Tablica 3.2 Popis vjetroelektrana u pogonu

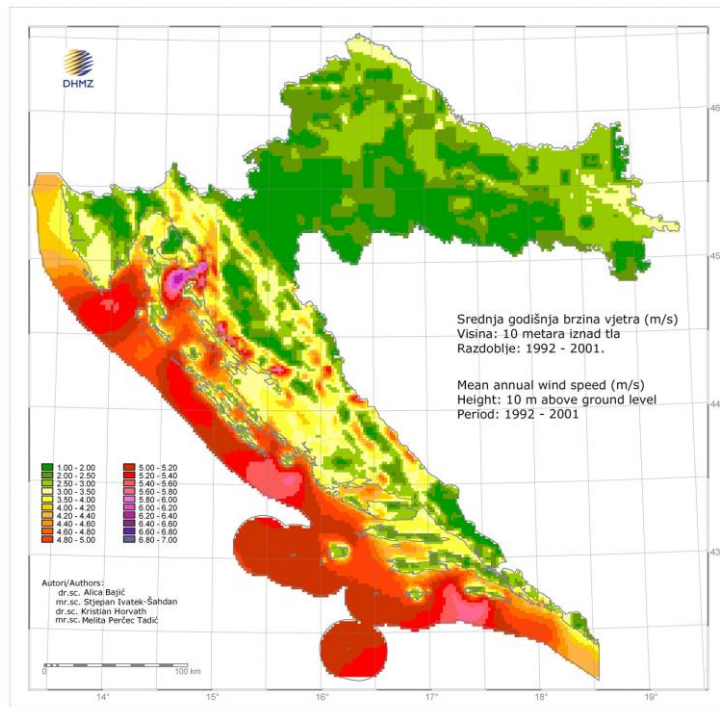
Ukupna instalirana snaga iznosi 801,3 MW, a u pogonu rade 325 vjetrogeneratora. Posljednja u nizu je VE Korlat u Zadarskoj županiji. Puštena je u pogon u travnju 2021.godine. Specifičnost VE u Hrvatskoj je pozicioniranje. Većina ih je smještena unutar 300 km udaljenosti jedna od druge.

Pravilan odabir lokacije je temeljna točka razvijanja projekta vjetroelektrana. Pritom se moraju zadovoljiti neki temeljni uvjeti:

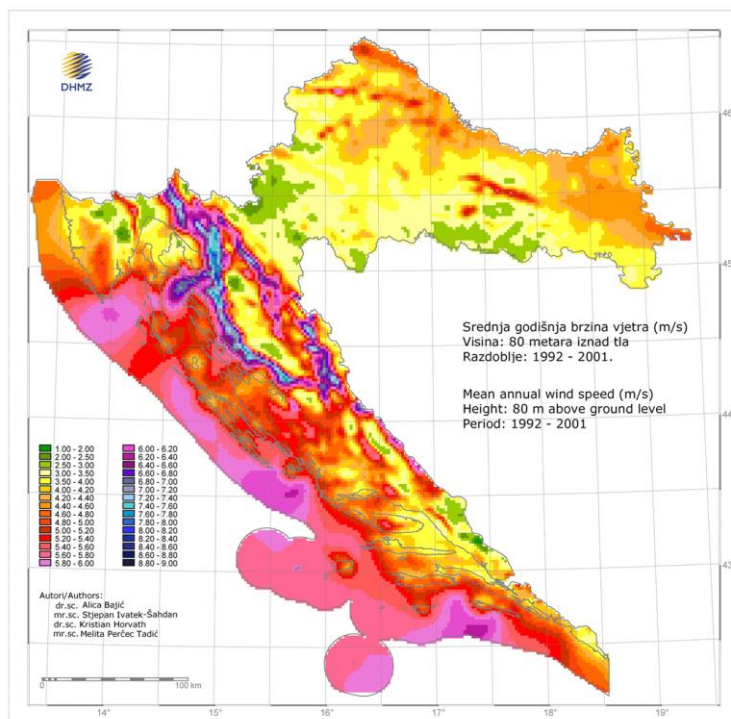
- **Vjetropotencijal**- podaci iz meteo stanica u neposrednoj blizini lokacije. Orijentiranje, mjerenje na godišnjoj razini. Mjerenje pomoću vjetrokaza I anemometra na različitim visinama.
- **Klima**- utjecaj visokih temperature, snažnih vjetrova i padalina. Pri niskim temperaturama se lopatice zaleđuju i dolazi do fizičkih oštećenja konstrukcije. Pri snažnim vjetrovima vjetrogenerator ispada iz ispravnog rada jer se javlja veće opterećenje od njegovog podešenja.
- **Konfiguracija i pokrov terena**- težnja za teren sa minimalnim izobličenjima zbog turbulencija vjetra, ali i same montaže i prijenosa. Proporcionalno vjetropotencijalu, odnosno slabiji vjetropotencijal iziskuje područja koja ne treba krčiti ili ravnati.
- **Priključivanje na EES**- lociranje u blizini prijenosne ili distribucijske mreže.
- **Namjena zemljišta, komunikacija s lokalnom zajednicom**- namjena zemljišta igra bitnu ulogu prije određivanja lokacije

- **Utjecaji na prirodu i okoliš-** potrebno provjeravati, također i naseljena područja, kulturna dobra, prometnice.

Atlas vjetra je bitna sastavnica za procjenu potencijala proizvodnje energije iz vjetra. Istraživanjima, pridržavajući se navedenih uvjeta pokazalo se da su obalna područja Hrvatske mjesta najvećeg vjetropotencijala, i to južnije u Dubrovačko-neretvanskoj županiji, Splitsko-dalmatinskoj, Šibensko-kninskoj.



Slika 3.24 Srednja godišnja brzina vjetra na visini od 10 m iznad tla [6]

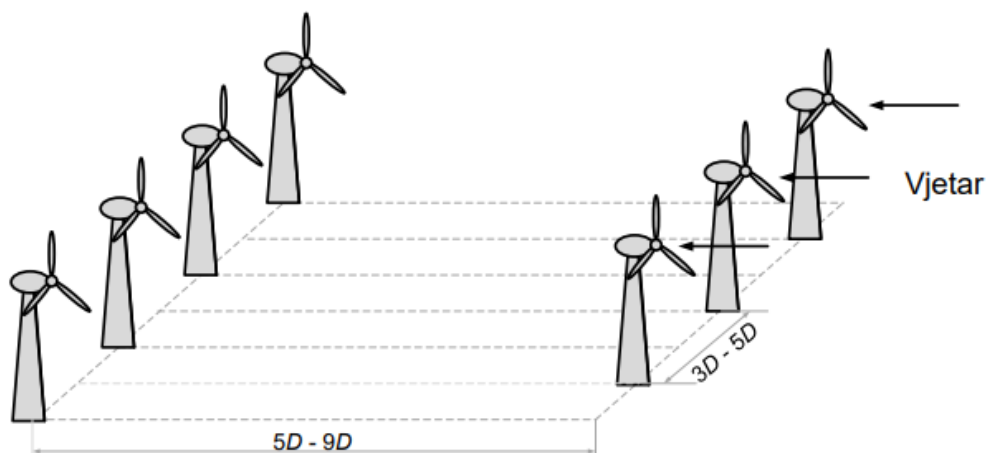


Slika 3.25 Srednja godišnja brzina vjetra na visini od 80 m iznad tla [6]

Ako pak postavljamo više vjetroagregata u nizove, snaga vjetra se smanjuje od prvog niza na koji vjetar dolazi pa do onog posljednjeg. Brzina opada i raste turbulencija na agregatima postavljenim stražnje dijelove niza. Ta pojava se zove efekt zavjetrine. Zavjetrina izaziva gubitke energije vjetra i proizvodnja opada za do 2 do 20%. Efekt zavjetrine može se ublažiti udaljavanjem postavljanja vjetroagregata. No ni to rješenje ne dolazi bez svojih posljedica, stoga se javljaju problem iskorištavanja prostora i viši troškovi korištenja zemljišta i povezivanja na mrežu. Najoptimalniji razmještaj vjetroagregata je dokazano 3 do 5 dužina promjera turbine okomito na smjer vjetra i 5 do 9 dužina promjera turbine u smjeru dolaska vjetra.



Slika 3.26 Efekt zavjetrine, vjetroпарк na pučini [11]



Slika 3.27 Optimalni razmještaj vjetroagregata [11]

3.8 Prednosti i nedostaci vjetroelektrana

Prednosti

Obnovljivi i čisti izvor energije:

- Generiranje bez emisija stakleničkih plinova
- Pri radu ne trebaju sagorijevati fosilna goriva
- Potpuno obnovljiv i nepresušan izvor
- Prirodna pojava, uvijek dostupna za opskrbu, ne ovisi o drugim faktorima

Niski operativni troškovi

- Veliki početni troškovi izgradnje i instalacije, ali znatno niži kada se jednom puste u pogon, ne troše gorivo jer ga uzimaju iz atmosfere prirodnim putem, turbine nije potrebno redovito i učestalo održavati.

Učinkovito korištenje prostora

- Zauzimanje puno manjih površina naspram ostalih postrojenja sličnih kapaciteta.

- Sigurni su prilikom opskrbe, diverzificiraju proizvodnju, proizvodnja je domaća, ne treba se uvoziti tuđa energija zbog prirodnog podrijetla resursa, utječe na razvoj gospodarstva i industrije, stvaraju se nova radna mjesta i doprinosi se tehnološkom napretku.

Nedostaci

Manjak konzistentnosti

- Učinkovitost uvelike ovisna o vremenskim uvjetima, stoga je proizvodnja teško predvidiva. Smanjene brzine vjetra ne uzrokuju zakretanja rotora turbine.

Buka i vizualno zagađenje okoline

- Velike razine buke prilikom rada, uzrokovane mehaničkim radom i vrtlogom vjetra između lopatica koje rotiraju. Zbog svojih tendencija da budu postavljene na otvorenom prostoru i često i na određenim visinama kako bi učinkovito koristile vjetar time zaklanjaju pejzaž.

Negativan utjecaj na okolinu

- Velike lopatice brzo rotiraju i mogu usmrtniti životinje koje se nađu u neposrednoj blizini, ponajprije ptice i ostale letače. Potencijalno uzrokuju i poremećaje staništa lokalnih vrsta.

4. EDUKACIJSKI SIMULATOR I KOMPONENTE U UPORABI POKUSA

Edukacijski simulator je ideja sprovedena u djelo od strane njemačke kompanije Lucas-Nuelle. Iako još nije u Hrvatskoj dosegao toliko široku primjenu da bi ga se primjenjivalo za svoju temeljnu svrhu, kao pomagalo u nastavi posebice na fakultetima jer nije baš lako dostupan niti jeftin, jednoga dana će doseći i tu razinu primjenjivosti. Sam simulator ima nekoliko panela pa i nekoliko različitih varijacija gdje se mogu mjeriti različite komponente. Maketa koja se koristi u ovom radu je maketa simuliranja male vjetroelektrane.



Slika 4.1 Simulator male vjetroelektrane [3] i [4]

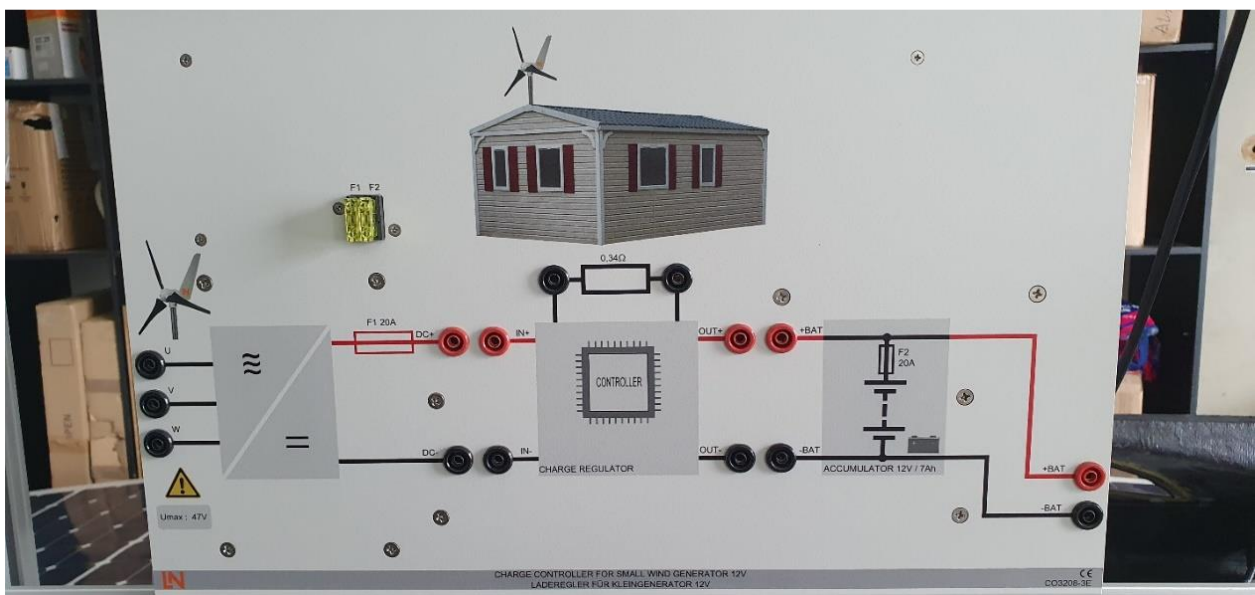
Panel sinkronog generatora, regulatora punjenja baterije, potrošača u vidu žarulja na 12 V istosmjerno i 230 V izmjenično, pretvarač, promjenjivi otpornik, testiranje rada malog servo motora panel za simuliranje modela male vjetroturbine.

4.1 Panel- regulator punjenja baterije 12 V

Regulator punjenja se koristi za rad sustava malih vjetroelektrana. Dozvoljava optimalno punjenje baterije. Osigurava da turbine ne prepune baterije, preostalu energiju konvertira u toplinu preko otpornika opterećenja, također i ograničava brzinu okretanja lopatica

vjetroturbine kada su baterije napunjene ili pri prilikama jakog vjetra. To osigurava da uvijek postoji opterećenje na motoru koji predstavlja model generatora vjetra i sprječava njegovo okretanje nad brzinama. Osim regulatora punjenja panel sadrži priključnice za spajanje male vjetroturbine, ispravljač sa zaštitom, zaštitni otpornik, bateriju i priključak za vanjska opterećenja. Regulator punjenja ima ključnu ulogu pri osiguravanju rada vjetroturbine koja nema već ugrađen sigurnosni sustav. Pri odabiru regulatora punjenja od velike je važnosti odabrati kontroler koji odgovara sustavu. Da bi se to postiglo mora se pridržavati određenih uvjeta:

- Vrsta ulaznog napajanja(3f AC ili 2f AC/DC)
- Maksimalna snaga u Wattima(mora zadovoljiti ili premašuje sposobnost korištene vjetroturbine)
- Podržavanje upotrebene baterije
- Podržavanje napona baterije(12V/24V)



Slika 4.2 Regulator punjenja baterije za mali generator vjetra 12V [3] i [4]

Karakteristike kontrolera punjenja:

- Otpornik opterećenja: $0,34\Omega / 300\text{ W}$
- Struja punjenja;pražnjenja: 20 A
- Kapacitet baterije: 7 Ah
- Napon baterije: 12 V

4.2 Panel- sinkroni generator sa trajnim magnetima 12 V

Sinkroni generator s trajnom pobudom, dizajnom sličan onom koji se upotrebljuje u malim vjetroturbinama. Rad sinkronog generatora se temelji na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije. Generiraju na izlazu trofazni izmjenični napon iz svojih namota statora. Moguća je i jednofazna izvedba. Sinkroni generator se sastoji od magnetskog polja na rotoru koji rotira i stacionarnog statora sa većim brojem namota koji opskrbljuju generiranu

snagu. Uzbuda se postiže permanentnim magnetima montiranim na rotor ili elektromagnetski pod naponom preko izvanjske DC struje u prolasku kroz namote polja rotora. Ta pobuda se vrši preko četkica i kliznih prstenova na osovini generatora. Alternativni praktičniji pristup je korištenje trajnih magneta. Uzbuda se stvara permanentnim magnetima u rotoru, postavljenim na površinu ili u rotoru. Zračni raspored je manji između statora i rotora zbog maksimalne učinkovitosti i manje količine upotrebljenog materijala. Permanentni magneti se koriste uobičajeno kod generatora niskih cijena i manjih snaga.

Jednostavnija i dugotrajnija izvedba ali nema mogućnosti kontroliranja uzbude ili jalove snage. Jedna velika mana je da bez mogućnosti kontrole toka rotora mogu postići vršnu učinkovitost samo pri jednoj unaprijed definiranoj brzini vjetra.



Slika 4.3 Sinkroni generator sa permanentnim magnetom 12 V za male vjetroelektrane [3] i [4]

Karakteristike generatora:

- Nazivna snaga: 0,3 kW
- Nazivna brzina vrtnje: 1000 o/min
- Nazivna struja: 10 A
- Napon bez opterećenja: 19 V

4.3 Panel-Izvanmrežni pretvarač 230 V, 275 VA

Pri radu komercijalno dostupnih uređaja, generirani DC napon se pretvara u AC napon. Na panelu se nalazi inverter koji generira izlazni napon 230 V AC iz ulaznog napona 12 V DC. Inverter sadrži zaštitu za duboko pražnjenje baterije koja se može izravno povezivati na glavnu bateriju. Koristi se u otočnom režimu rada zbog ne mogućnosti spajanja na krutu mrežu.

Izvanmrežni pretvarač se sastoji od sljedećih komponenti:

- Prekidač On/Off
- LED zaslon za rad
- Zvučna signalizacija za poremećaje u radu
- Izlazni napon: 230 V +/- 5%; pri 50 Hz
- Snaga 275 VA
- Efikasnost: 93%

Zaštitne funkcije: Isključivanje prilikom prevelikog napona baterije, kratkospojna zaštita, zaštita od zamjene polariteta polova, zaštita od pregrijavanja i preopterećenja



Slika 4.4 Izvanmrežni pretvarač 230 V, 275 VA [3] i [4]

4.4 Panel-dinamičko ispitivanje servo stroja 0,3 Kw

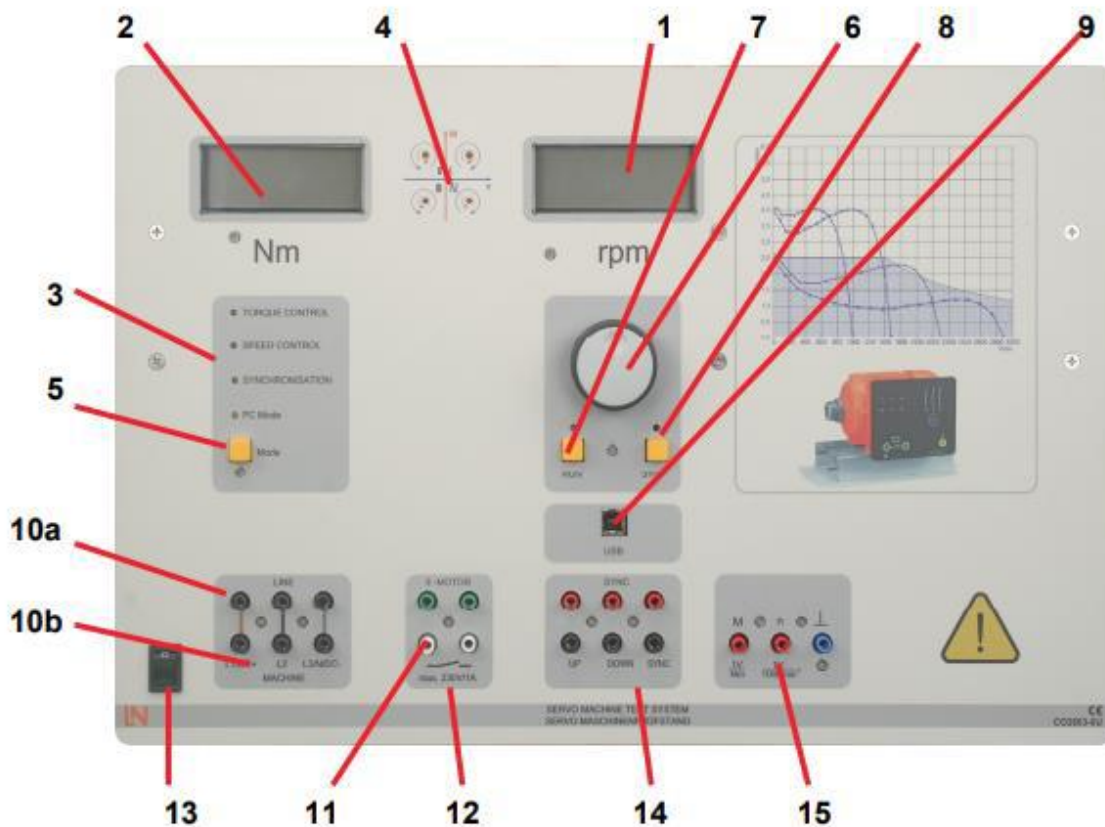
Potpuni ispitni sustav za ispitivanje električnih strojeva i pogona. Dijelovi panela su kočnica digitalni kontroler i softver ActiveServo. Sustav provodi kombinaciju lakog rada i modern tehnologije. Sinkronizacija se može podešavati automatski ili pak ručno.

Preko vratila privodi ispitivanom motoru nekakav teret u vidu servo motora koji je podešen da ovisno o broju okretaja vratila daje otpor odnosno zakretni moment ovisno o vrsti trošila. Mjerenjem električnih i mehaničkih veličina se generira krivulja opterećenja.

Temeljne značajke digitalnog upravljača:

- Rad u sva četiri kvadranta

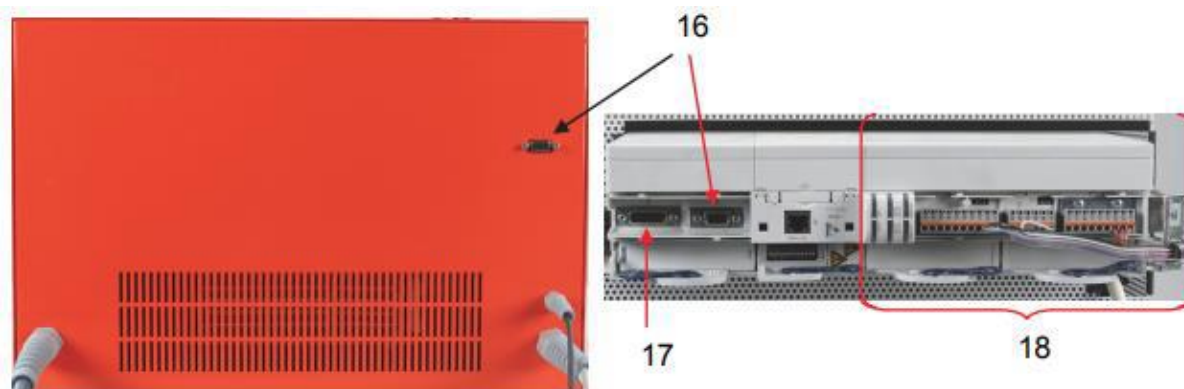
- 13 mogućih načina rada ovisno o modelu terete (brzina, zamašnjak, ventilator, kompresor, pumpa, okretni moment...)
- Provjeravanje postojanja poklopca vratila
- Sučelje za natpisne pločice
- Odsipanje napona napajanja ispitivanog motora kada nedostaje poklopac vratila
- Galvanski izolirano pojačalo za određivanje struje i napona
- Toplinska kontrola stroja
- USB interface
- Napon veze 400 V; 45...65 Hz
- Max. izlazna snaga: 4 kVA



Slika 4.5 Panel za dinamičko ispitivanje servo stroja snage 0,3 kW [3]

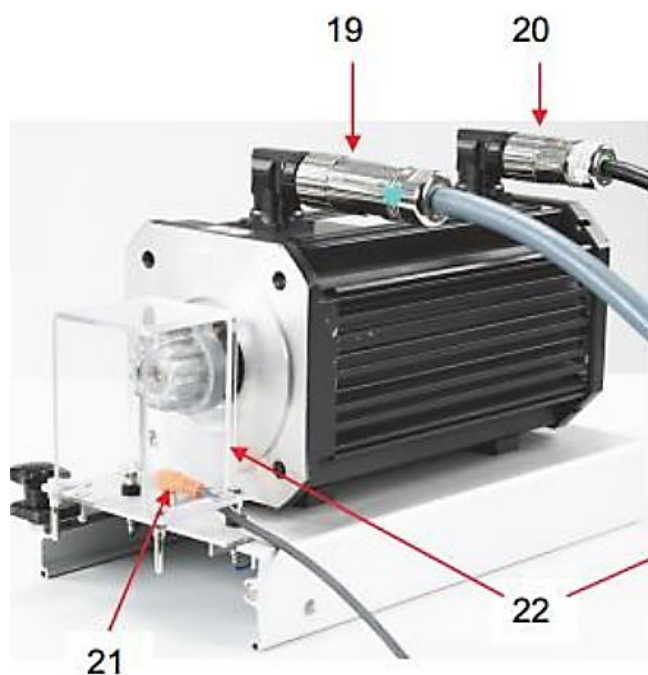
1. Prikaz brzine stroja
2. Prikaz zakretnog momenta stroja
3. Načini rada
4. Kvadranti rada stroja
5. Tipka za biranje načina rada; samo kada je sustav isključen; podešavanje ručno ili automatski preko računala.
6. Podešavanje odabrane vrijednosti ručnim putem
7. Pokretanje sustava u rad; pogon
8. Prekidanje rada sustava

9. USB utor za spajanje sa računalom
10. A) Spajanje izvora napajanja za stroj
- 10.b) spajanje napajanja stroja; mjerenje struje i napona
11. Temperaturni priključak; odvajanje 28erete pri pregrijavanju
12. Kontakt plutajuće sklopke(max opterećenje 230 V; 1 A); isklapanje napona kada poklopac osovine nije na mjestu.
13. Prekidač za paljenje i gašenje panela
14. Ulaz za sinkronizaciju(ručnu ili automatsku)
15. Izlazi analognog napona; brzina/ moment



Slika 4.6 stražnja strana panela [3]

16. Resolver priključak
17. Nije u uporabi
18. Unutarnje ožičenje



Slika 4.7 Spajanje na servo motor 0,3 kW [3]

19. Kabel za napajanje motora
20. resolver kabel; mjerenje brzine motora
21. Prijenos signala za kontakt na poklopac spoja osovine
22. Poklopac spoja osovine s integriranim kodiranjem

Stroj ima ugrađen termički nadzor i skupa sa regulatorom čini sustav za pokretanje i kočenje koji je prethodno kalibriran.

Podaci servo motora:

- najveći moment: 10 Nm
- Najveća brzina vrtnje: 4000 o/min
- Razlučivost rezolucije 65536 impulsa/ okretaju
- Nadzor temperature: PT 1000 senzor

4.5 Dodatne komponente za sigurnosni spoj osovine generatora i motora

Gumena spojnica

Glavna funkcija spajanje dva stroja. Dimenzionirana za strojeve u uporabi ovog rad ana 0,3 kW.



Slika 4.8 Gumena spojnica osovine gneratora i servo motora

Zaštita spojnice sa LED rasvjetom

Pleksiglas zaštitni pokrov koji predstavlja fizičku zaštitu od dodira rotirajućih dijelova spoja između dva stroja. Kutija sadrži zaštitni prekidač koji ne dozvoljava motoru da se pokrene ako zaštita nije pravilno postavljena.

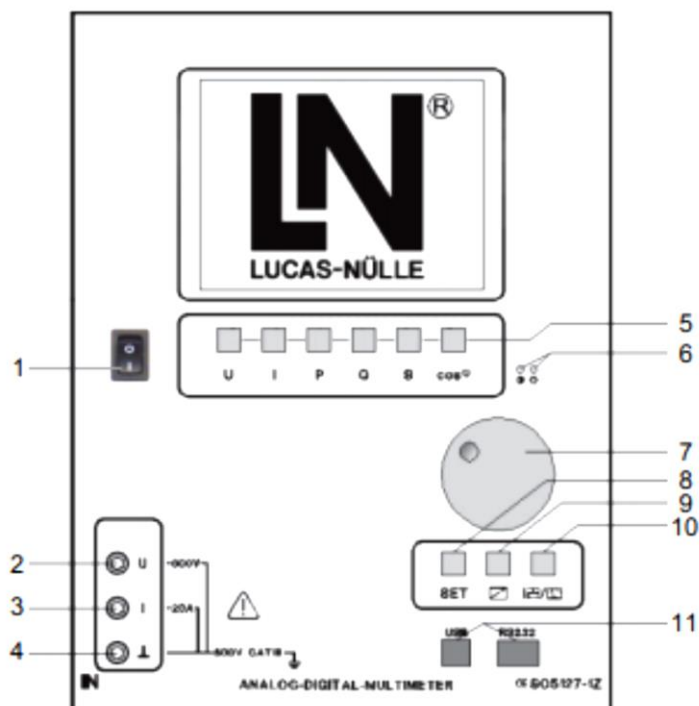


Slika 4.9 Zaštitni pokrov spojnice [4]

4.6 Multimetar

Univerzalni mjerni uređaj dizajniran da zadovolji zahtjeve mjerenih veličina utjecajnih u promatranom pokusu simulatora vjetroelektrane. Istodobno obavlja funkciju voltmetra, ampermetra, te mjerenje radne, jalove i prividne snage, kao i mjerenje faktora snage. Na displeju se grafički prikazuju rezultati mjerenja odabrane veličine.

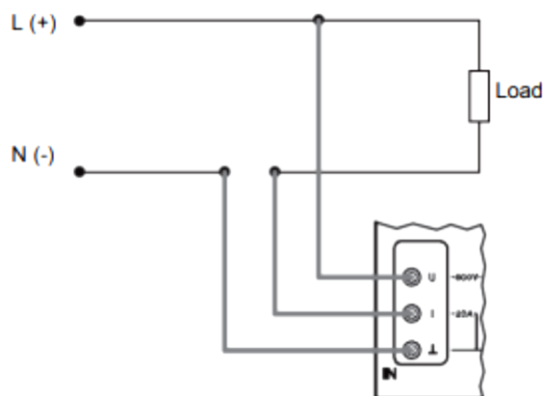
Mogućnost mjerenja napona i struje neovisno o obliku krivulje (max. 600 V; 20 A), mjerenje ukupnih efektivnih vrijednosti i aritmetičke sredine, unutarnji otpor do 10 m Ω za struje i 10 M Ω za napone. Naponi se kreću u rasponu od 30, 300 i 600 V, struje 1, 10 i 20 A. Točnost mjerenja je 2%. Područje mjerenja se može odabrati ručno ili automatski, a radni napon je 230 V pri frekvenciji od 50/60 Hz.



Slika 4.10 Multimetar [3]

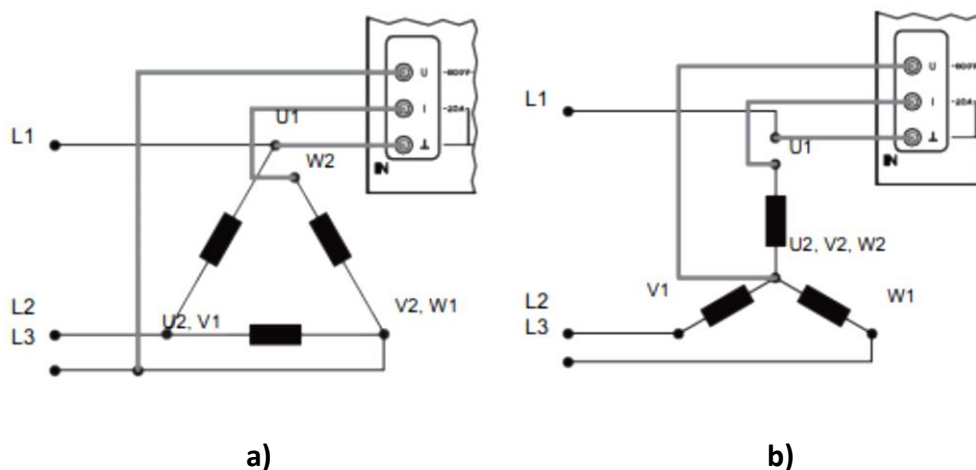
1. Prekidač za uključivanje panela multimetra
2. Ispitni ulaz napona
3. Ispitni ulaz struje
4. Referentna točka mjerenja napona i struje
5. Područje odabiranja mjerene varijable
6. Potencijometri za podešenje prikaza na displeju
7. Regulator mjernog područja
8. SET-podešavanje instrumenta
9. VELIČINA- podešavanje mjernog područja
10. A/D- analogni/digitalni prikaz
11. USB utor
12. Sheme mjerenja multimetrom

a) Opterećenje u AC; DC krugu



Slika 4.11 Shema spajanja multimetra za AC, DC krug [3]

b) Trofazni uređaj(jednofazni za simetrično trošilo)



Slika 4.12 Shema trokut(a) i zvijezda(b) spoja [3]

4.7 Mala vjetroturbina 370 W sa demonstracijskim jarbolom

Ova mala vjetroturbina je prikladna i za laboratorijske demonstracije ali i za korištenje na otvorenom prostoru. Njen ugrađeni permanentni sinkroni generator proizvodi istosmjernu struju, koja se potom pohranjuje preko punjive baterije. Lopatice rotora se podešavaju slično kao što se podešava i nagib na lopaticama velikih vjetroturbina. Iako postoje primjeri izvedbe vjetroturbine na krovovima bitno je spomenuti da one izazivaju vibracije i prenose te vibracije na konstrukcije na koje su instalirane. I to uzrokuje probleme buke unutar objekta. Još je bitno naglasiti da je vjetar na krovovima posljedica povećanih turbulencija, a to potencijalno skraćuje životni vijek turbine i umanjuje proizvodnju energije. Sve te pojedinosti zapravo čine instalacije malih vjetroturbina na krovove manje isplativima nego instalacijama tornjeva spojenih na tlo. Male vjetroturbine snage do 5 kW se u današnje vrijeme koriste za decentralizirano napajanje. Takva postrojenja proizvode DC napon. Energija se pohranjuje u akumulatorskim baterijama preko kontrolera punjenja. Inverteri se koriste za generiranje AC napona za pogonske potrošače koji zahtijevaju standardni napon napajanja električnom energijom. Učinci snage vjetra i mehanički dizajn vjetroelektrane se mogu emulirati do najmanjeg detalja preko ispitnog postolja za servo stroj i softvera WindSim.

Temeljni zadaci provedbe ovakve vježbe:

- Razumijevanje dizajna i rada malih vjetroelektrana
- Istraživanje fizičkih temelja definicije “od vjetra do vala”
- Upoznati se sa različitim konceptima vjetroelektrana
- Spremanje energije i optimizacija sustava
- Istraživanje hibridnih sustava za napajanje izvan mreže preko energije vjetra i fotonaponski sustava.

Glavni dijelovi:

Regulator punjenja za male vjetroturbine 12 V



Slika 4.13 Regulator punjenja malog vjetroagregata 12/24 V

Posebno dizajniran za rad malih vjetroagregata. Osigurava optimalno punjenje baterije. Ako se baterija više ne može puniti višak energije se pretvara pomoću otpornika opterećenja u toplinu. Tako se osigurava da uvijek imamo opterećenje vjetroagregata i sprječava se njegovo okretanje prekomjernim brzinama. Pripadna baterija i otpornici dolaze skupa sa regulatorom u paketu.

Karakteristike regulatora:

- Napon baterije 12/24 V
- Struja punjenja/praznjenja 20 A
- Otpornik opterećenja 0,34 Ω / 300 W
- Kapacitet baterije 7 Ah
- Stezaljke sigurnosne utičnice od 4 mm
- Dimenzije: 297X456X105 mm
- Težina 6,3 kg

Panel sa žaruljama 230 V



Slika 4.14 Panel žarulja 230 V [3] i [4]

Ploča svjetiljke omogućuje proučavanje i uspoređivanje halogenih i LED rasvjetnih tijela. Jednake su svjetline i svaka se može zasebno aktivirati. Tako se javlja različita potrošnja energije.

Karakteristike:

- Halogene žarulje 25 W
- Štedna žarulja 4W
- LED žarulja 4W
- Radni napon 230 V/ 50/60 Hz
- Dimenzije 297x114x210 mm
- Težina 1,8 kg



Slika 4.15 Mala vjetroturbina 370 W [4]

Karakteristike male vjetroturbine:

- Izlazna snaga: 370 W
- Nazivna brzina vjetra: 12,5 m/s
- Promjer rotora 1,2 m
- Upravljanje lopaticama rotora ovisno o brzini vjetra
- Generator sa permanentnim magnetom, trofazni sa ispravljačem
- Izlazni napon 12 V DC (sve do 20 V DC)
- Spajanje preko dvožilnog kabela, promjer ovisan o duljini(nije uključen)
- Demonstracijski jarbol s bazom od čelika V2A
- Visina osovine generatora: 1,5 m
- Težina: 18,3 kg

4.8 Komplet jarbola za instalaciju male vjetroturbine

Komplet dijelova za instalaciju male vjetroturbine na otvorenom prostoru. Tu spadaju produžetak za isporučeni jarbol. Užadi za učvršćivanje i sidrenje za pričvršćivanje za tlo. Uporabom ovog seta podiže se osovina jarbola vjetroturbine na visinu od 3 m.

Dijelovi sadržani u kompletu:

- Produžetak jarbola, 1,5 m s ušicama za pričvršćivanje od VA čelika
- 3 kabelska užeta promjera 3 mm, napravljenih od čelika
- 3 steznika kabela
- 3 prizemna sidra
- Težina: 8,3 kg



Slika 4.16 Komponente za vanjsku instalaciju male vjetroturbine [4]



Slika 4.17 EWG 2 Small wind power plant trainer maketa [4]

5. SOFTVERI KORIŠTENI PRI RAČUNALNOM RADU NA SIMULATORU

Glavne zadaće uporabe softvera za simulacije jesu:

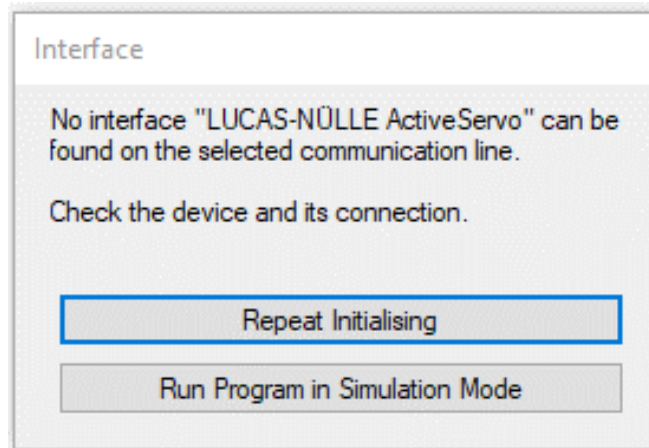
- Razumijevanje dizajna i funkcioniranja modernih malih vjetroturbin
- Istraživanje fizičkih principa prikazanih u “od vjetra do okna”
- Upoznavanje sa različitim konceptima za vjetroelektrane
- Projektiranje i početni rad malog vjetrogeneratora turbine
- Rad s različitim silama vjetra pri skladištenju
- Skladištenje energije, optimizacija sustava
- Projektiranje samostalnog sustava za proizvodnju 230 V AC
- Upoznavanje sa hibridnim sustavima za samodostatno napajanje preko energije vjetra i fotonaponske energije

5.1 Interaktivni asistent simulacija za male vjetroelektrane LabSoft

Softverski program koji ima ugrađene u svojem kodu već pripremljene vježbe za pobliže upoznavanje njegovih korisnika sa procesom na koji taj program funkcionira. Edukacijski simulator je kompatibilan sa svom virtualnom opremom koja se koristi za mjerenje u realnom vremenu ili za generiranje izlaznog signala. Početni prozor programa je podijeljen na lijevi dio gdje vidimo takozvani “Sadržaj”. Popis tekstova odnosno biblioteka Knjiga i stranica koje pobliže govore bilo o opremi povezanog simulatora ili pak daju teorijsku podlogu o vjetru kao izvoru energije i vjetroelektranama kroz povijest, kao i njihovu primjenu u današnje vrijeme.

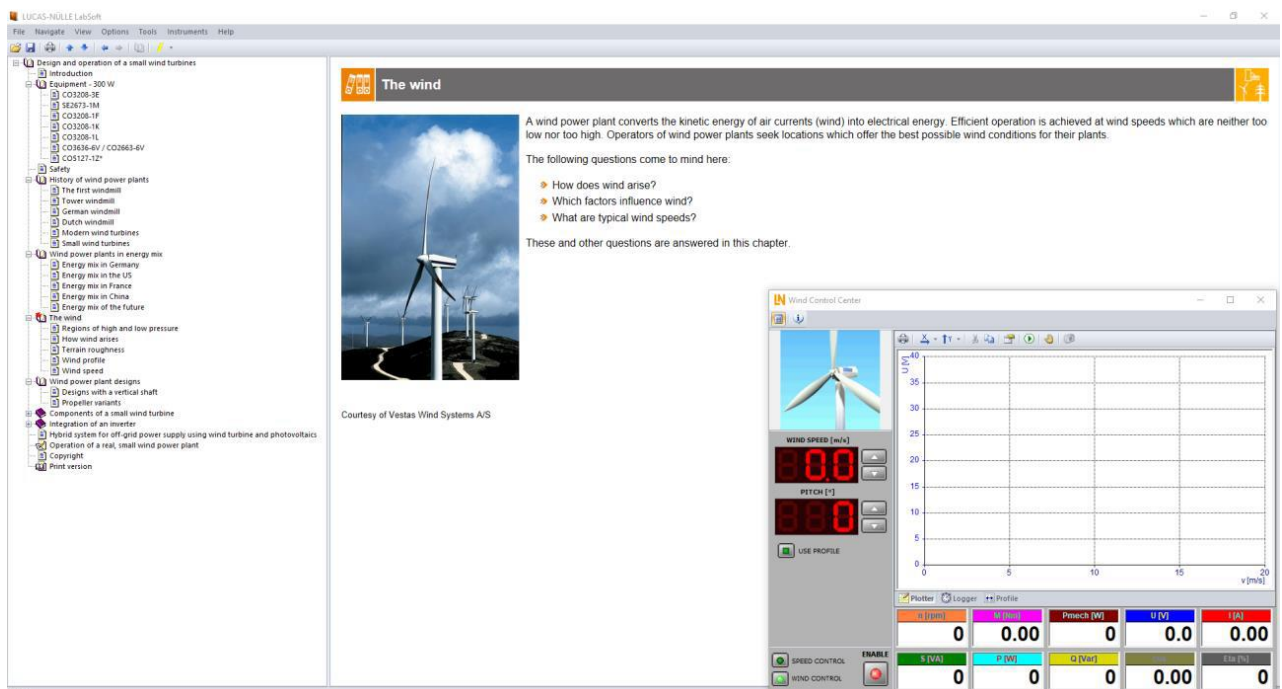


Slika 5.1 Programsko sučelje LabSoft softvera



Slika 5.2 Skočni prozor kada simulator nije povezan na računalo

Ponekad će se pojaviti skočni prozor(vidi slika 5.2), u tom slučaju nas softver upozorava da simulator nije povezan sa računalom. No to se može zaobići odabirom rada u simulacijskom radu. Taj odabir za posljedicu ima ne mogućnost rada sa virtualnim instrumentima.



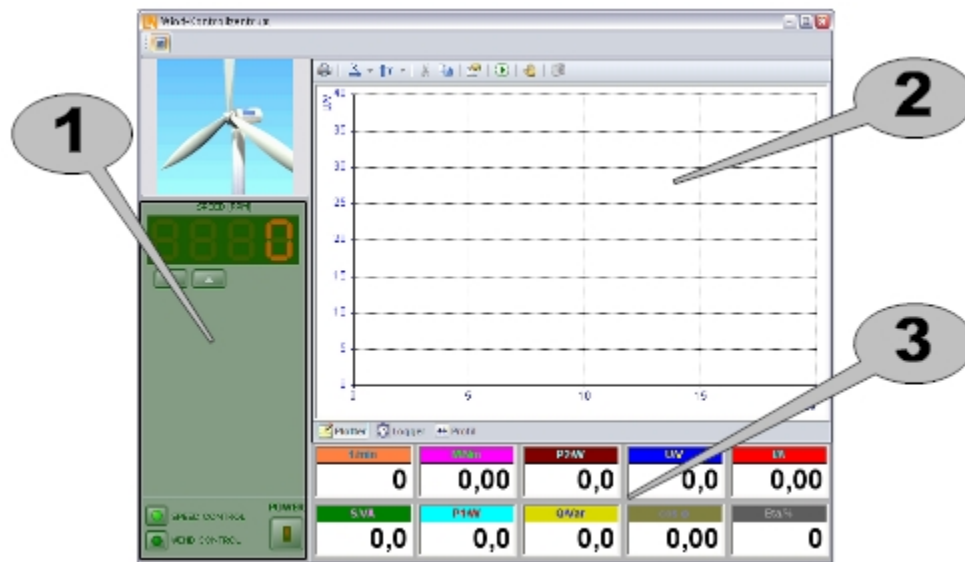
Slika 5.3 Otvaranje virtualnih instrumenata za provedbu rada

Bitne stavke programa:

- Postavljanje i provedba eksperimenata
- Jednostavan način za spremanje rezultata na traku sadržaja
- Lak pristup virtualnim instrumentima
- Postavljena pitanja u priručniku radi jednostavnijeg razumijevanja procesa koji se odvijaju u pokusima.

- Lak ispis rezultata eksperimenata

U suštini LabSoft predstavlja zbirku elektroničkih zadataka pitanja i mjernih vježbi za UniTrain. Preko LabSoft Test Creatora se ta pitanja i vježbe sastavljaju u neku vrstu elektroničkih testova koji se mogu provoditi u LabSoftu. Postoji otprilike 200 pitanja i vježbi mjerenja za UniTrain tečajeve za teme obnovljivih izvora energije. 25% od sveukupnih vježbi otpada na praktične vježbe za ispitivanje rukovanja uređajima i praktične sposobnosti Modulom za kontrolu vjetra se u cijeli process uključuje i servo motor, i njegova funkcija je simuliranje rada male vjetroturbine.



Slika 5.4 Interface Modula za kontrolu vjetra

1. Upravljanje servo motorom
2. Prostor za grafikone
3. Displej mjerenih veličina

Dva su moguća načina rada, i prebacuje se sa jednog na drugi način na oknu ekrana 1. Prvi način je kontroliranje brzine. Servo motor se vrti konstantnom brzinom vrtnje koja se može adekvatno podešavati tasterom. U ovom modu se provjerava ovisnost izlaznog napona generatora o brzini vrtnje.

Drugi način rada je kontrola vjetra. Servo motor odrađuje ulogu vjetroturbine. Podešavaju se brzina vjetra i kut nagiba. Neke bitne stavke koje vrijedi poznavati prilikom rada odnosno crtanja u LabSoftu su da se sve vrijednosti bilježe pri radu neovisno da li su zadane za prikaz ili ne, tako da im se uvijek može pristupiti iz skočnog izbornika. Taster nije moguće koristiti ako je sustav podešen na automatska mjerenja računalom. Kada vrijeme na osi X prijeđe zadane granice, grafikon se sam skalira prikladno intenzitetu promjena.

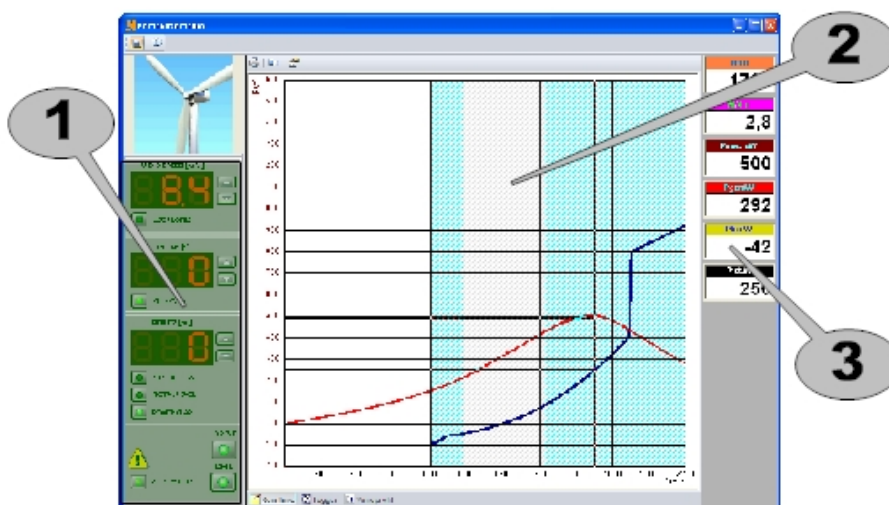
Izbornik omogućava odabiranje profila vjetra čija se brzina mijenja vremenski. Profili vjetra mogu se uvesti i iz vanjskih izvora, poput uvođenja unaprijed stvorene Excel tablice podataka o mjerenjima. Uvezene vrijednosti moraju poštivati uvjet od rasponu brzine vjetra od 0 do 25 m/s.



Slika 5.5 Regulator brzine

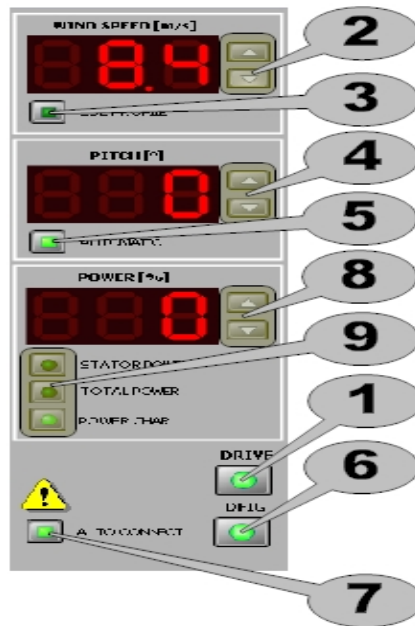
1. Tipke za podešavanje brzine vrtnje
2. Zaslون koji prikazuje trenutne vrijednosti brzine vrtnje
3. Led signalizacija koja označava da li je aktiviran sustav za mjerenje.

Preko modula za kontrolu vjetra se servo motor koristi za oponašanje vjetroturbine. Instrument aktivira servo motor i njegovu upravljačku jedinicu. Mogu se pratiti i bilježiti I električne i mehaničke varijable.



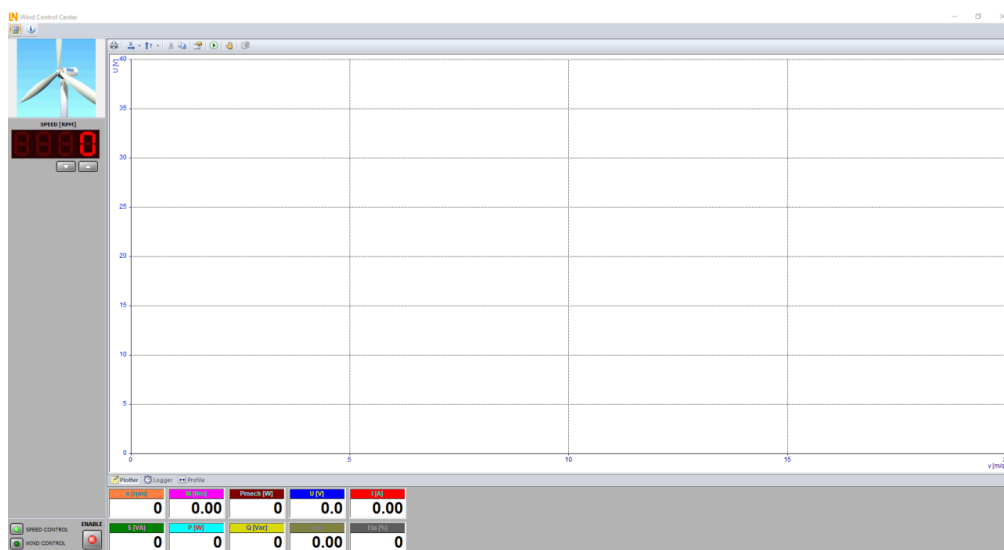
Slika 5.6 Control centre prozor

1. Upravljanje servo motorom I DFIG kontrolerom
2. Grafikon
3. Rezultati mjerenja



Slika 5.7 Kontrolna ploča

1. Pogon se pokreće na tipku POWER, i radi neovisno o upravljačkoj jedinici.
2. Tipke za podešavanje brzine vrtnje/vjetra
3. Ako svijetli zeleno brzina vjetra se podešava automatski
4. Tipke za podešavanje kuta nagiba
5. Ako svijetli zeleno kut nagiba se podešava automatski
6. Automatsko spajanje generatora na mrežu ako je on unutar dopuštenog intervala brzina
7. Automatsko spajanje generatora na mrežu pri dostizanju dopuštenog intervala brzina, u suprotnom isključuje rad.
8. Podešavanje snage napajanja; samo kada je generator spojen na mrežu
9. Odabiranje načina rada (tri su moguća načina-Snaga statora, ukupna snaga i snaga rotora); način rada moguće je mijenjati samo kada je upravljačka jedinica ugašena.



Slika 5.8 Zaslon za crtanje grafikona

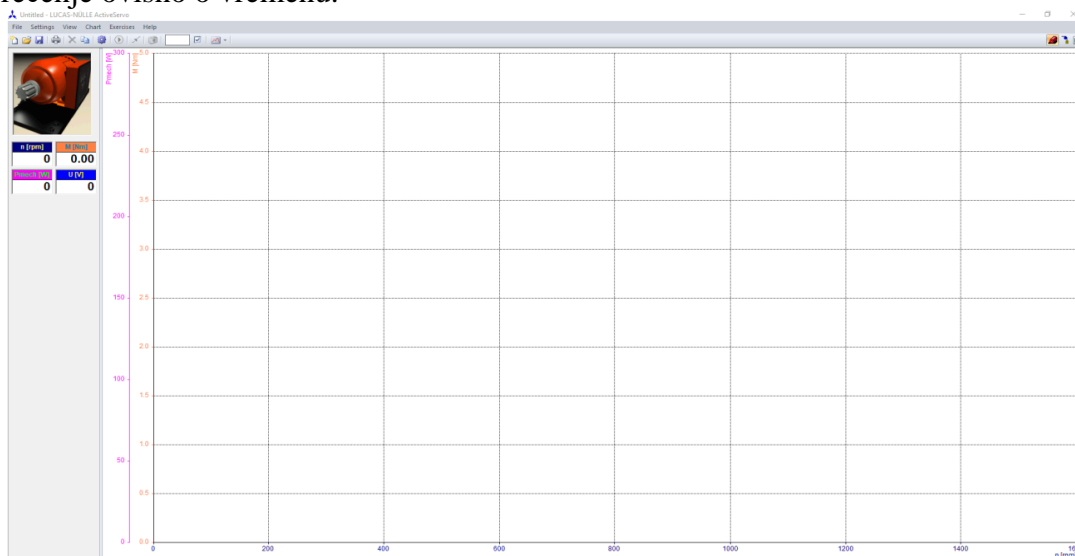
5.2 Active Servo

Koristi se za bilježenje karakteristika strojeva i određivanje dinamičkih i statičkih radnih točaka. Moguće je simulirati osam različitih vrsta opterećenja (zamašnjak, ventilator, pumpa, kalander, kompresor, namotaj, podizni pogon, proizvoljno podesivo opterećenje ovisno o vremenu)

Bitne stavke:

- Mjerenja, izračuni i zapis mehaničkih i električnih varijabli
- Određivanje brzine, zakretnog momenta, struje, napona, prividne, jalove i aktivne snage, faktor snage, učinkovitost...
- Usporedni prikaz izmjerenih i računanih vrijednosti.
- Mjerenje struje i napona
- Rad koji se kontrolira brzinom ili okretnim momentum
- Snimanje varijabli
- Rad u sva četiri kvadrant
- Podešavanje graničnih vrijednosti
- Izvoz grafika i mjerenja
- Prikazivanje različitih karakteristika radi stjecanja boljeg dojma utjecaja promjena parametara

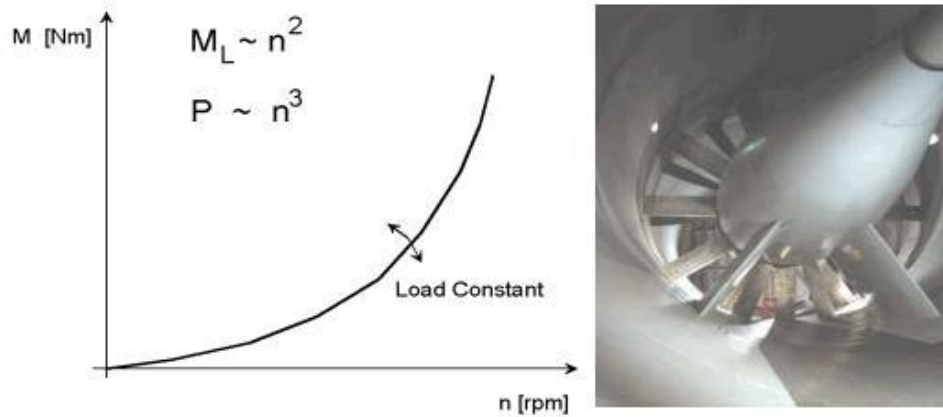
Nekoliko je postojećih modela strojeva na kojima se može raditi: Pumpa/ ventilator, pogon dizalice, inercijski kotač, kompresor, stroj za namatanje, valjak/ kalendar, korisnički zadano opterećenje ovisno o vremenu.



Slika 5.9 Sučelje softvera ActiveServo

U ventilatorskom ili pumpnom načinu rada, kočnica daje odziv momenta koji raste s kvadratom kako se povećava brzina vrtnje. Trenje i tromost su zanemareni.

Strmina krivulje zakretnog momenta podešava se preko promjera rotora. Pri negativnoj brzini vrtnje, i moment je negativan.



Slika 5.10 Momentna karakteristika ventilatora [3]

ActiveServo dozvoljava rad i sa računalno emuliranim radnim strojevima koji sadrže aktivnu kočnicu, i pritom podržavaju sljedeće funkcije:

- Snimanje i prikazivanje izmjerenih vrijednosti
- Podešavanje parametara radnih strojeva i prikazivanje karakteristika
- Određivanje i grafički prikaz radnih točaka
- Mjerenje i prikazivanje rampe s podesivom opcijom okidača
- Jedinstveni user-defined izbornici
- Velika softverska podrška

Kao i kod LabSofta dva su moguća načina rada: Kontrola okretnog momenta gdje se primjenjuje konstantni zakretni moment u cijelom spektru brzina, dobra za mjerenje karakteristika DC ili sinkronih strojeva. Moment može biti i pozitivan i negativan. Te kontrola brzine gdje se bilježe karakteristike električnih strojeva sa momentum izvlačenja. Motor je moguće testirati u sva četiri kvadranta. Posebno povoljan za asinkrone strojeve. Kada se uključi pogonsko pojačalo, servo motor sinkronizira brzinu vrtnje sa brzinom ispitnog motora.

5.3 Softver VI starter

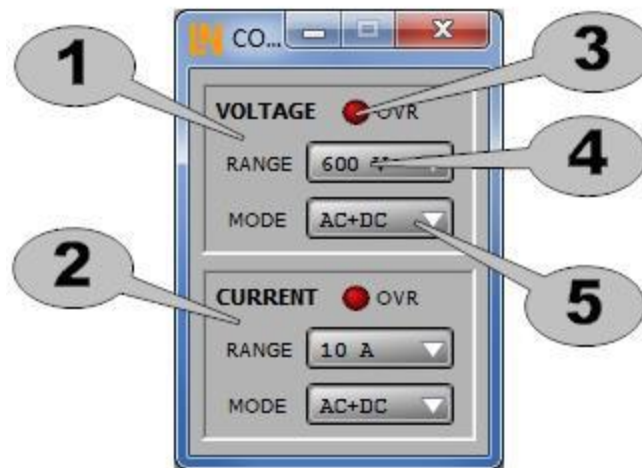
Program koji omogućuje prikaz svih mjerenja na računalu. Koristi se za pozivanje virtualnih instrumenata. Dobro zamjenjuje LabSoft u tim ulogama pozivanja virtualnih instrumenata.

Opcije:

- Istodobno stvaranje i do 17 različitih zaslona

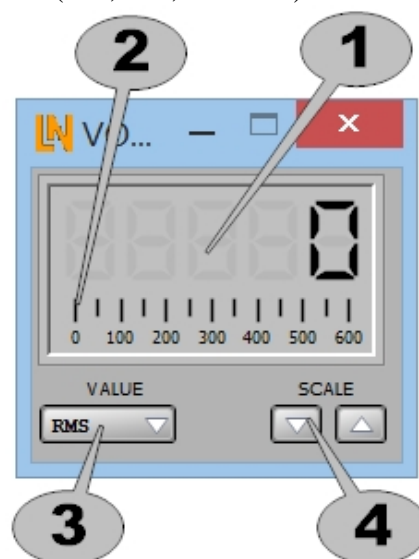
- Prikazi osciloskopa napona, snage i struje
- Mjerenje potrošnje radi prikaza potrošene i izlazne snage
- Dnevnik podataka za do 14 različitih varijabli
- Izvoz podataka za pohranu

Snimačem LabVIEW i upravljačkim programom se lako provode mjerenja i eksperimenti. Mjerni instrumenti koji se koriste moraju biti povezani USB sučeljem na računalo, u protivnom softver ne može funkcionirati.



Slika 5.11 Konfiguriranje parametara mjerenja

1. Podešavanje napona
2. Podešavanje struje
3. LED oznaka za signalizaciju pogrešaka (crvena lampica)
4. Opseg mjerenja veličine; stvarni napon 1,5 puta veći od efektivne vrijednosti koja je ponuđena u padajućem izborniku
5. Vrsta mjerene vrijednosti (AC; DC; AC+DC)



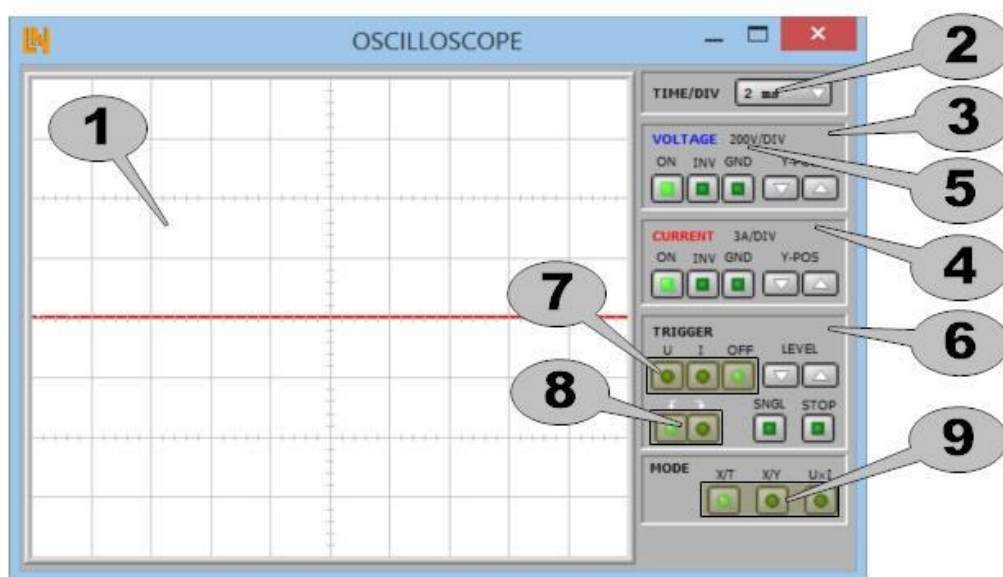
Slika 5.12 Mjerač struje i napona

1. Digitalni zapis rezultata mjerenja
2. Analogni zapis na skali rezultata mjerenja
3. Padajući izbornik za odabir varijable koja se mjeri
4. Podešavanje raspona prikaza; ne utječe na mjerno područje

Moguće je mjeriti RMS, srednju vrijednost, prosječnu ispravljenu vrijednost, vršnu vrijednost i vrijednost od vrha do vrha.

Za vatmetar se koristi isti digitalni prikazi i sve komponente su identične. Moguća mjerenja su prividne, aktivne, reaktivne snage i faktora snage.

Osciloskopom se pak prate vremenske promjene struje i napona.



Slika 5.13 Prikaz digitalnog osciloskopa

1. Grafikon za prikaz rezultata mjerenja
2. Podešavanje vodoravne vremenske baze(X osi); ukupna pokrivenost zaslona $10 \cdot \text{TIME/DIV}$; ne utječe na druge vrijednosti
3. Prikaz napona
4. Prikaz struje
5. Vertikalna razlučivost zaslona za napon/struju
6. Postavljanje uvjeta za osvježavanje zaslona
7. Odabir kanala okidača (U; I; OFF)
8. Odabir drugog stanja okidača
9. Odabir načina prikaza(X/T; X/Y; U*I)

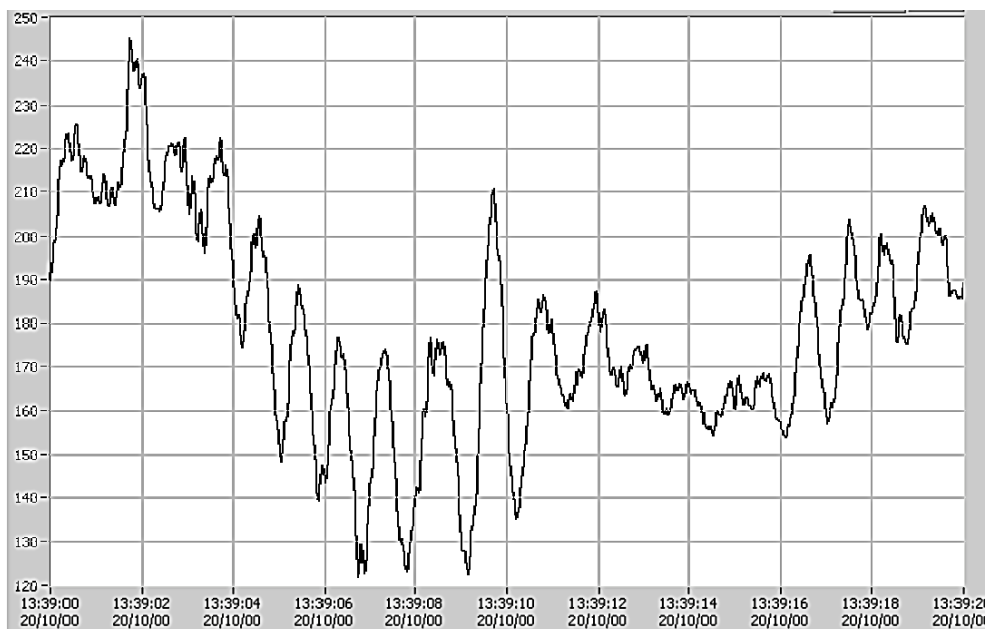
6. MOGUĆNOSTI APLIKACIJA TRENAŽERA MALIH VJETROELEKTRANA

6.1. Emisija flikera vjetroelektrana tokom kontinuiranog rada

Emisija flikera vjetroelektrane u kontinuiranom radu ima tri glavna izvora: turbulencija vjetra, sjena tornja te osciliranje generatora ili frekvencijskog pretvarača snage pri frekvencijama oko 8,8 Hz. Fliker emisija vjetroelektrane se može izvesti iz izlaza jedne vjetroturbine jer brze fluktuacije imaju male korelacije između turbina. Modeli su testirani sa podacima iz nekoliko farmi vjetrova. Kod onih sa indukcijskim generatorima i malim kavezima ili pak rotorima promjenjivog otpora turbulencija vjetrova je imala najveći utjecaj na treperenje jer je spojka bila dovoljno meka da priguši oscilacije generatora i varijacije momenta ovisne o kutu rotora. Dok je kod vjetroelektrana sa dvostruko napajanim indukcijskim generatorom glavni izvor treperenja inducirani šum pri onim maksimalnim frekvencijama osjetljivosti na treperenje pretvarača snage. Razina flikera je u promatranim slučajevima bila vrlo niska zbog visoke snage mreže na spojnom mjestu.

Brze fluktuacije turbina imaju nisku prostornu korelaciju, udari vjetra pak imaju niske frekvencije s niskim osjetljivostima na treperenje. Koherencija za klasične dimenzije vjetroelektrana je niska kod frekvencija većih od 1 mHz. Dokazano je istraživanjima da je pak nužan vrlo stabilan vjetar, jednoliko rasprostranjen kao i slaba električna mreža da bi se postigla sinkronizacija potaknuta padovima napona.

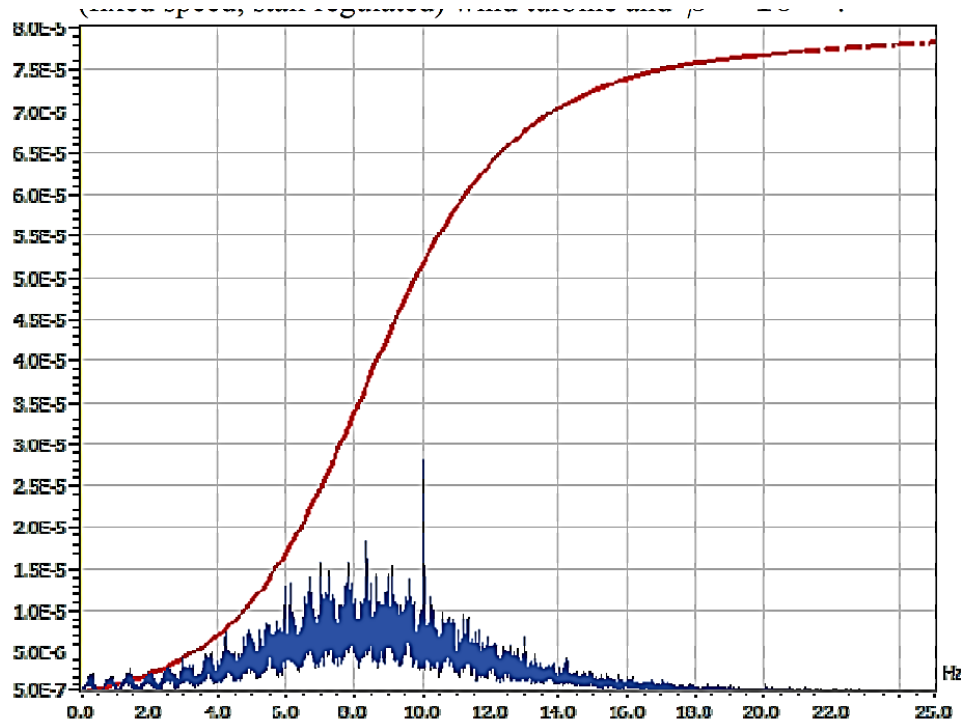
Fluktuacije sjene tornja ovisne su o položaju lopatice turbina. Kako nije definirano točno vremensko podrijetlo, fluktuacije se mogu pojaviti u bilo kojem trenutku sa jednakom vjerojatnošću pojave.



Slika 6.1. Aktivna snaga vjetroturbine NTM 750 kW pri brzinama vjetra oko 6,5 m/s [17]

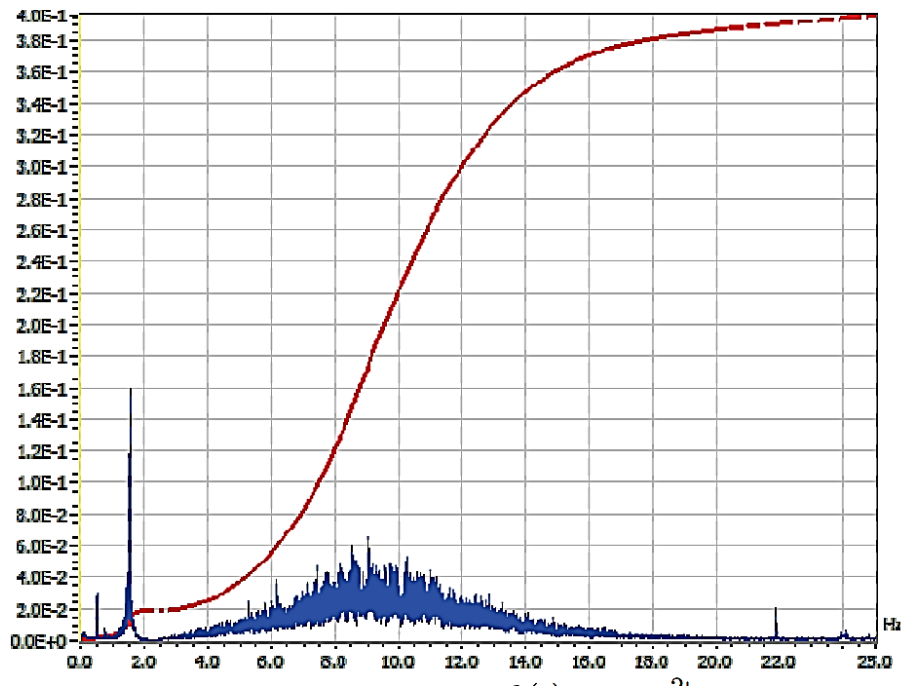
Slika 6.1 zapravo prikazuje tipično ponašanje vjetroturbine od 750 kW(induktivni generator sa malim kavezom i regulacijom kočenja), pri brzinama vjetra oko 6,5 m/s.

Pri fiksnim brzinama, turbinama reguliranim zastoju na treperenje najviše utječu sjene tornja. Doprinos frekvencija od 5 do 8 Hz je po ispod prikazanoj slici negdje četvrt sjene tornja.



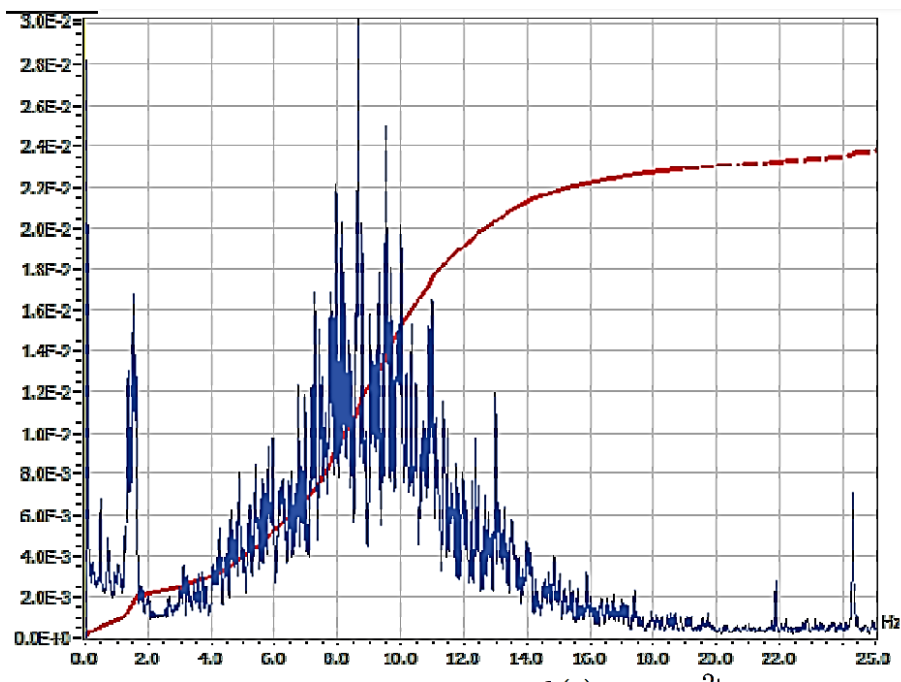
Slika 6.2 PSD (spektralna gustoća snage) naponskih varijacija vjetra pri zasjenjivanju tornja; VRIG vjetroturbina, stalna brzina i ustaljena regulacija [17]

Kod jačih turbina sa ugrađenim indukcijskim generatorom s promjenjivim otpornikom s kontrolom uspona sjene tornja imaju zanemariv utjecaj. Razine treperenja su najniže, pretežno zbog frekvencijskog raspona od 4 do 12 Hz.



Slika 6.3 PSD(spektralna gustoća snage) naponskih varijacija vjetra pri zasjenjivanju tornja; Remolinos vjetroturbina [17]

Kod dvostruko napajanih induktivnih generatora, regulirane turbine, utjecaj sjene tornja je mal. Treperenje je uzrokovano frekvencijskim spektrom od 4 do 14 Hz.



Slika 6.4 PSD(spektralna gustoća snage) naponskih varijacija vjetra pri zasjenjivanju tornja; DFIG, varijabilna brzina [17]

Zaključak je da oscilacije snage ovise o relativnom položaju lopatice turbine i turbulencije vjetra. Rotor može imati bilo koji kut sa približno jednakom vjerojatnošću, što govori da ne

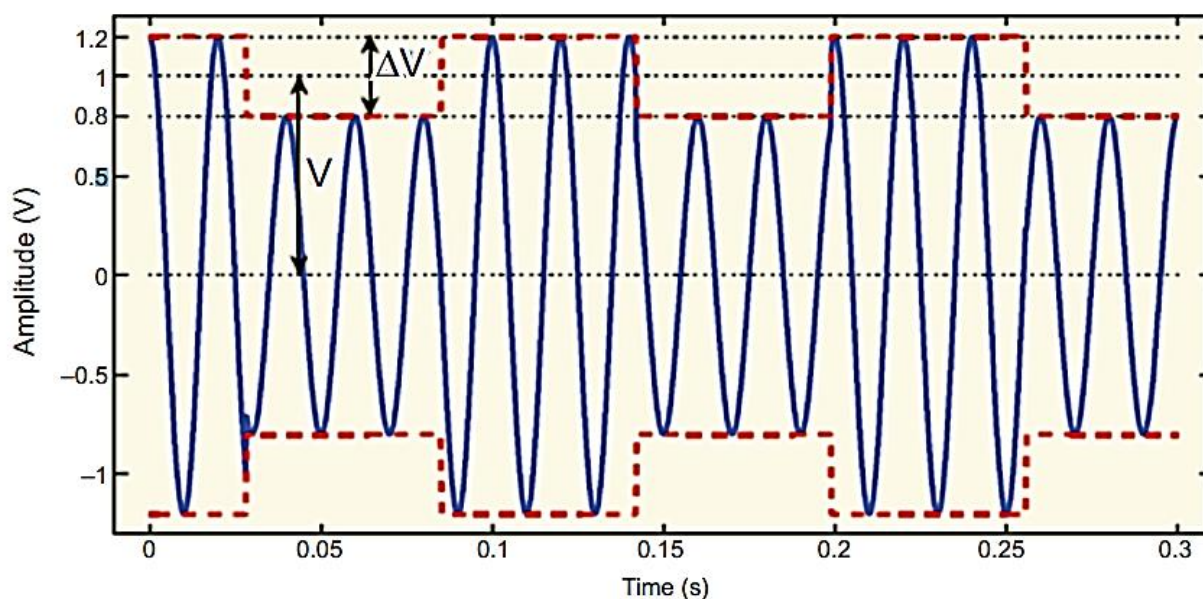
ovisi o kutu rotora toliko Koliko o ostalim parametrima. Ukupni rad velikog broja vjetroelektrana se može iskazati kroz rad samo jedne.

6.2 Šum treperenja napona u izlazu vjetroturbine

Svjetlost žarulje varira zbog treperenja napona. Treperenje napona se može iz perspektive ljudskih osjetila usporediti sa intenzitetom svjetla žarulje. Taj intenzitet svjetlosti je rezultat varijacija napona. Frekvencija tih alternacija ide do 25 Hz. Male varijacije napona mogu dovesti do velikih poremećaja. Odstupanje napona se kreće u rasponu od 90% do 110% od nazivnog napona.

Walid SE Abdel Latif je izračunao treperenja napona u vjetroturbinama podešene brzine vrtnje. Te vjetroturbine su proizvodile varijacije u naponu. Razmatrao je indukcijske generatore za vjetroturbine. Promatrao je i utjecaj lokacije na varijacije napona. Pritom se koristio statičkim sinkronim kompenzatorom kako bi smanjio treperenje napona.

Treperenje napona može se definirati na različite načine a jednu dobru definiciju je dao Tao Sun rekavši da je "treperenje osjećaj nestabilnosti u izlaznoj svjetlosti. Promjena svjetline s vremenom". Jens Schoene je pak treperenje napona nazvao promjenom amplitude napona. Glavni signal je bio nosivi signal a treperenje napona kao varirajući signal. Sankaran s druge strane govori da je "treperenje napona promjena napona u trajanju u kojem ljudsko oko može promatrati promjenu intenziteta svjetlosti".



Slika 6.5 Valni oblik napona treperenja sa pravokutnom varijacijom [17]

Sankaran tvrdi da se treperenje napona iskazuje u postotku. Ako je normalan napon 120 V, i on se promijeni na 124 V, zatim padne na 116 V u postotku se to iskazuje kao

$$P_{st} = P_{lt} = 100 \times \frac{124-116}{120} = 6,667\% \quad (6.1)$$

Treperenje napona nema dimenzija. Može si izračunati kao omjer promjene napona i prosječnog napona $\frac{\Delta V}{V}$. Kratki period promatranja flikera bi bio 10 minuta a dugi period 120 minuta.

Na slici 6.5 prikazana je pravokutna fluktuacija napona. Frekvencija varijacije je 8,8 Hz. Glavni signal ima frekvenciju od 50 Hz. Varijacije treperenja napona se ne moraju nužno ponavljati, ali i mogu. U drugoj od dvije varijacije poprima oblik kvadrata ili sinusa.

Flikeri napona na izlazu vjetroturbine ograničeni su na $P_{st} \leq 0,3$. Turbine spojene na distribucijsku mrežu imaju $P_{st} \leq 0,35$. Zbog treperenja napona javljaju se i svjetlosna treperenja. Za takvo nešto potreban je naponski fliker u rasponu od 0,5% i frekvencija treperenja 6 do 8 Hz. Treperenje napona se dešava u intervalu od 0,1% do 7% nazivnog napona dok je frekvencija titranja 25 do 30 Hz.

Treperenje napona javlja se zbog elektroničkih komponenti u sustavu, ali i zbog elektroničkih uređaja spojenih na sustav. Varijacije napona se javljaju zbog promjene u posebno jalovoj snazi potrošača. I prebacivanja velikih opterećenja prouzrokuju istu pojavu, kao i električna peć, strojevi za zavarivanje, baterije kondenzatora, električni kotlovi...

Treperenje napona ima i štetne posljedice, prije svega treperenja žarulja sa žarnom niti, utjecaj na proizvodno okruženje, kvarovi na električnoj opremi i uređajima, pa i iritacije na ljude poput povraćanja, smetnji u radu i koncentraciji, čak i epileptički napadaj.

6.3 Proizvodnja male vjetroelektrane korištenjem automobilskeg alternatora

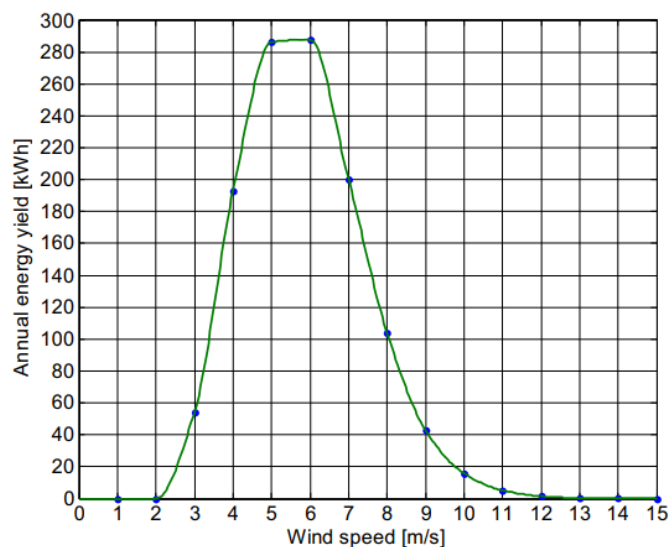
Zbog problema oko troškova i cijena ponajprije generatora sa permanentnim magnetom pri instalaciji u malim vjetroturbinama jedno predloženo rješenje je bilo u vidu automobilskeg alternatora takozvanim kavezom u obliku kandži kao jeftina alternativa zbog velike proizvodnje u automobilskeg industriji, zbog dostupnosti te zbog lakog održavanja jer imaju veliku robusnost. Dizajnirani su tako da generiraju specifično energiju za punjenje baterija. Izlazna izvedba alternatora je određena mjerenjima. Da bi se poboljšao energetskeg prinos alternatora integriranog u turbinu taj izmjereni izlaz alternatora mora odgovarati izlaznim karakteristikama turbine.



Slika 6.6 Standardni dijelovi automobilskeg alternatora sa kandža kavezom na rotoru; (a) i (b) stator sa zubcima i utorima, (c) rotor, (d) energetskeg elektronika [21]

Na slici 6.6 su prikazani glavni dijelovi klasičnog alternatora u uporabi za male vjetroturbine. Jezgra statora je jednoliko laminirana s namotima u utorima. Trofazni namoti AC struje povezani u zvijezdu ili trokut. Rotor se sastoji od kandži izrađenih od željeza koje okružuju prstenaste namote. Snaga se prenosi na namote DC uzbuđnog polja na rotoru preko bakrenih kliznih prstenova i četkica.

Kao i u većini slučajeva i kod alternatora se u radu javljaju gubici, pa tako dolazi do gubitaka u rotorskom polju, bakreni i željezni gubici statora, željezni gubici u rotoru na stupovima kandža, mehanički gubici.

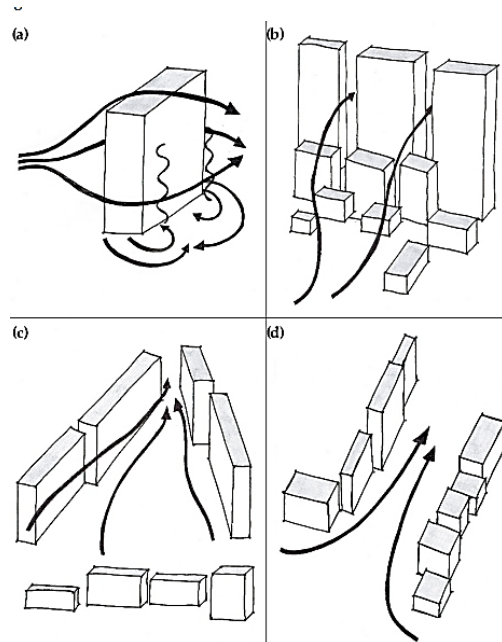


Slika 6.7 Godišnji energetska prinos sustava sa alternatorom na prosječnoj brzini vjetra od 3,7 m/s [21]

Dijagram na slici 6,7 dobiven je množenjem rezultata snaga na određenoj brzini vjetra Weibullovom raspodjelom vjetra za period od godinu dana. Bitna stavka je brzina vjetra, jer ako je alternator smješten u područje niske brzine vjetra prinos energije je nizak zbog učestalih start-stop sekvenci. Poželjnije je područje sa višim brzinama vjetra.

6.4 Energetska učinkovitost malih vjetroturbinu u urbanim prostorima

Sve se više pažnje posvećuje korištenju energije vjetra u urbanim sredinama, gdje je potencijal vjetra niži nego na otvorenom prostoru i teren je viši i nepogodniji. U takvim pričama će se prije upotrebljavati VAWT turbina zbog relativno niske razine buke manje od 80 dB. Pogodni uvjeti za ulaganje u energiju vjetra se postižu pri prosječnim godišnjim brzinama od preko 6 m/s. I to obuhvaća uglavnom obalna i priobalna područja. Dok je za središnje prostore prosjek od nekih 4 m/s. Procijenjeno je da preko 60% godišnje energije se generira kroz vjetar tokom sezone grijanja odnosno od studenog do ožujka. Redukcija brzina vjetra je na primjer najniža na površinama otvorenog tipa velikog obujma poput vodenih površina, a najveća u razvijenim urbanim sredinama. Učinci vjetra utječu na aspekte gradnje stambenih prostora poput ventilacija zgrada, pročišćavanja zraka, prijenosa topline kroz zidove i otjecanje kiše na fasadama izloženim vjetrovima. Glavni kriterij kojim se vode graditelji u gradnji urbanih prostora prema kriteriju vjetra je udobnost stanara.



Slika 6.8 Protoci zraka kroz urbani prostor: (a) stvaranje vrtloga, (b) učinak zaštite od vjetra, (c) Venturijev efekt, (d) stvaranje kanala [23]

Da bi se odredila vjetrovitost za energetske potrebe na specifičnoj lokaciji u gradu, uzima se u obzir pojedinačno godišnje mjerenje brzine vjetra na određenoj lokaciji i visini na kojoj se planira graditi vjetroturbina.

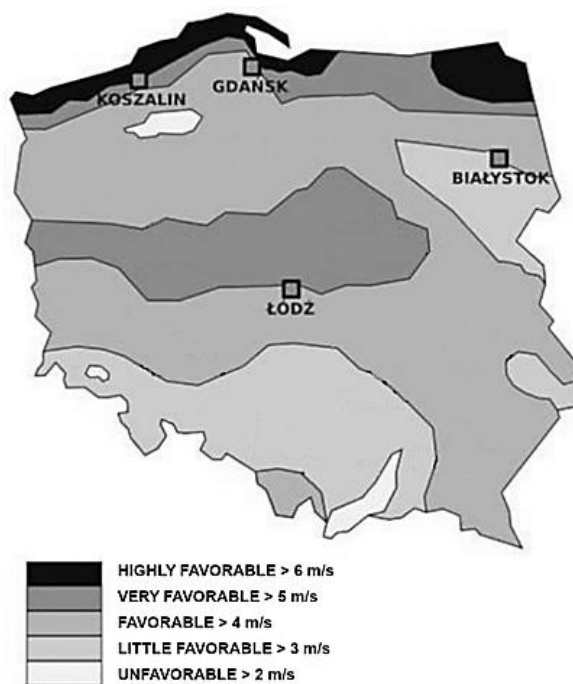
Snaga brzine vjetra određuje se Weibullove formule

$$p(v) = \left(\frac{k}{A}\right)\left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (6.2)$$

Gdje su v , k , $A > 0$

k je bezdimenzionalni faktor koji određuje oblik krivulje, zove se još faktor oblika. A parametar je skalarni parametar. Distribucija ovisi o vrijednostima parametara k i A .

Za promatrani primjer uzet je rad proveden u Poljskoj, jer nije postojao primjer takvog tipa za Hrvatsku a mjerenja nisu mogla biti izvršena adekvatno zbog nedostatka nužne opreme. Na primjeru mape Poljske moguće je primijetiti pet zona vjetrova.



Slika 6.9 Zone prosječnih brzina vjetrova u Poljskoj [23]

Za mjerenje podataka brzine vjetra na godišnjoj razini uzete su 4 lokacije iz različitih zona: Koszalin(vrlo pogodna), Lodz(pogodna), Bialystok(blago pogodna) i Gdansk(pogodna). Pri provedbi pokusa koristila se instalirana Vawt malo vjetroturbine snage 3 kW.

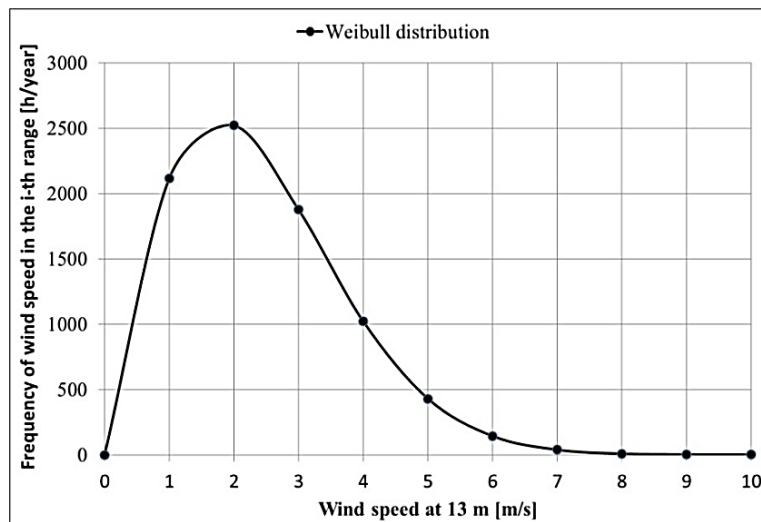
Koszalin pokriva 98,3 km², Lodz 293,3 km², Bialystok 102,1 km² i Gdansk 262 km². Mjerenja su se provodila na jednogodišnjoj bazi.

1. Koszalin

Za mjerenje je upotrebljena teleskopska cjevasta osovina, visine 13,6 metara. Na stup su instalirana dva anemometra visine 13 m i 8,8 m iznad razine tla. Mjerenje se provodilo konstantno u period od 1.8.2019 do 31.7.2020. Rezultati su pokazali da je vjetar najčešće puhao iz smjera jug-jugozapad (više od 8% godišnje). Puhao je prosječnom brzinom od 2-4 m/s. Slabiji vjetar dolazio je iz smjera sjever-sjeverozapad sa brzinama od 1-2 m/s.



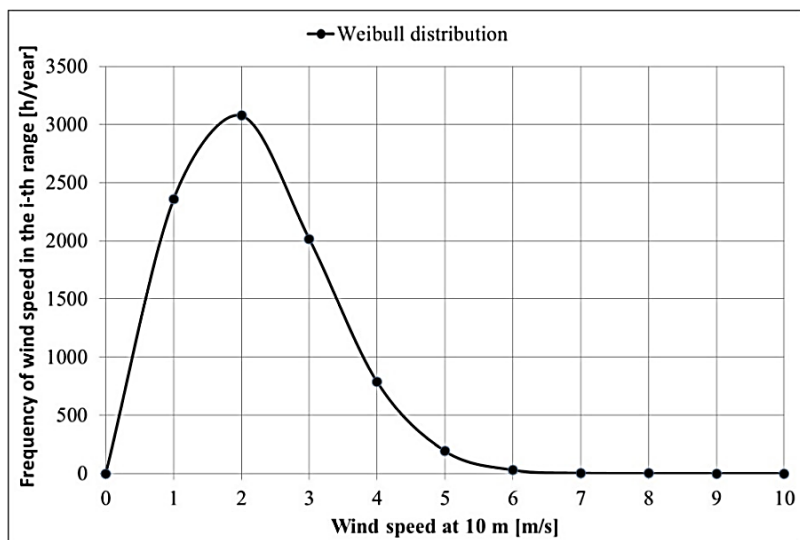
Slika 6.10 Mjerni stup u Koszalinu [23]



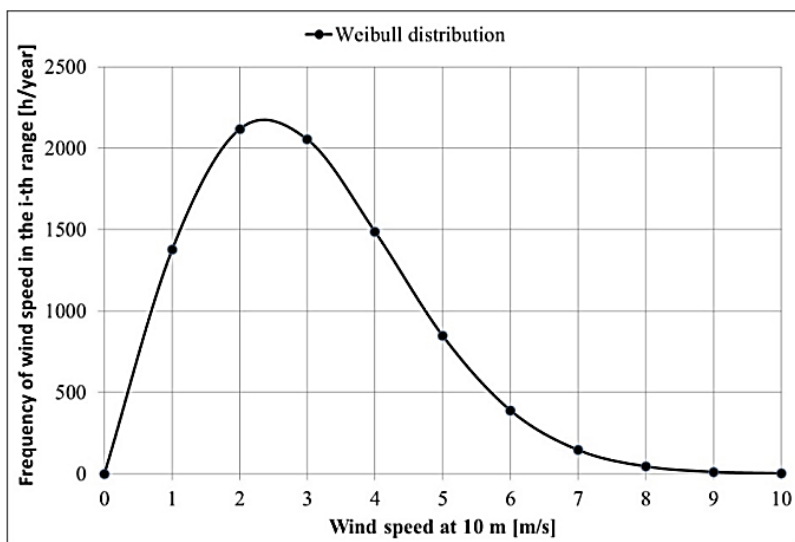
Slika 6.11 Weibullova razdioba na visini od 13 m; lokacija Koszalin [23]

2. Lodz

Na ovoj lokaciji je za usporedbu obavljeno mjerenja na dva različita mjesta, u centru grada i na otvorenom prostoru aerodroma. Prosječna brzina vjetra na aerodromu je bila 3,2 m/s dok je na trgu u centru grada ona iznosila 2,1 m/s. Prosječna brzina vjetra na godišnjoj osnovi je bila za 35% niža u centru naspram otvorenog prostora. Mjerenja su obavljena na visini od 10 metara od tla.



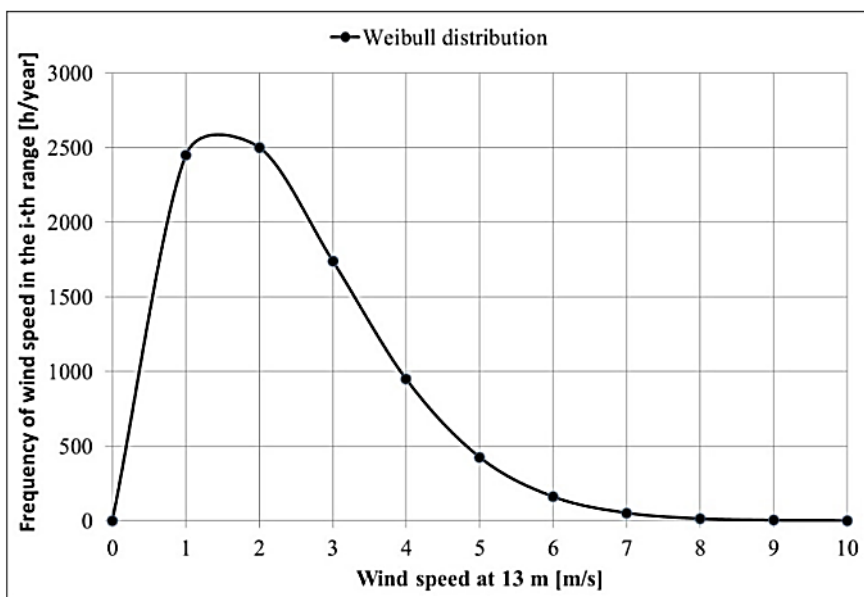
Slika 6.12 Weibullova razdioba na visini od 10 m; lokacija Lodz; centar [23]



Slika 6.13 Weibullova razdioba na visini od 10 m; lokacija Lodz; aerodrom [23]

3. Bialystok

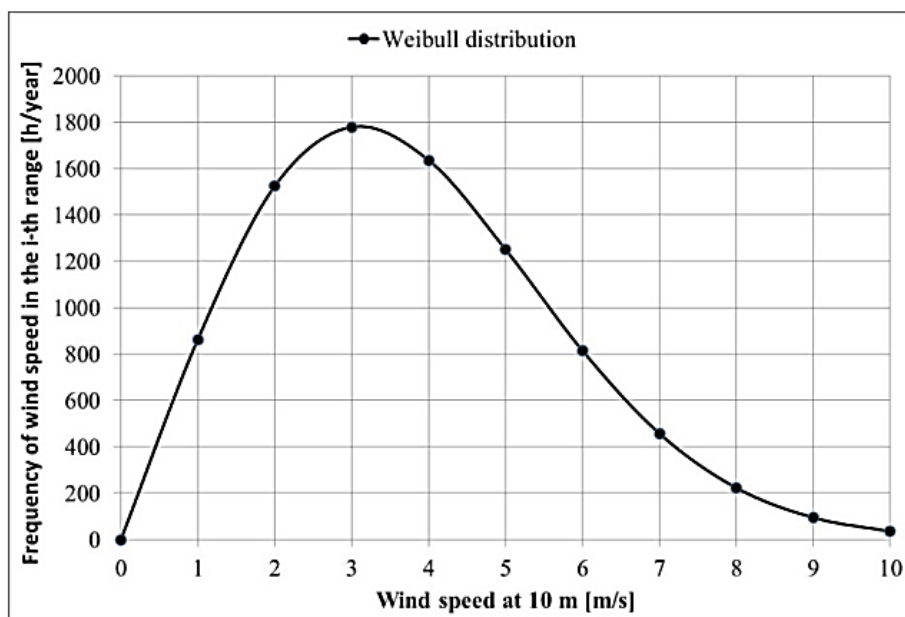
Mjerenje je izvršeno na visini od 13 metara od tla na krovu zgrade sveučilišta. Provođenje mjernog postupka kontinuirano u periodima od 10 minuta tokom cijele godine. Prosječna brzina vjetra na ovoj lokaciji iznosila je 1 m/s, vjerojatnost pojave brzina vjetrova od 5 m/s je procijenjena na 4%.



Slika 6.14 Weibullova razdioba na visini od 13 m; lokacija Bialystok; krov sveučilišta [23]

4. Gdansk

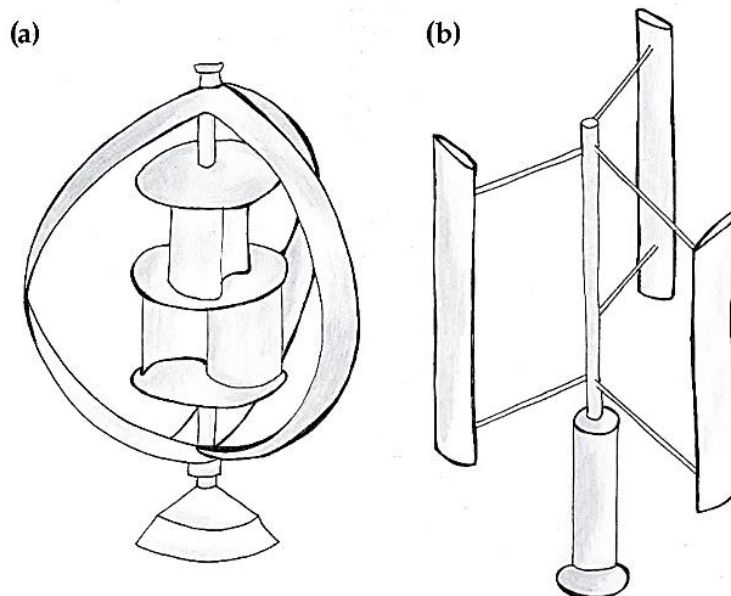
Promatrani period mjerenja je 5 godina na visini 10 metara od tla.



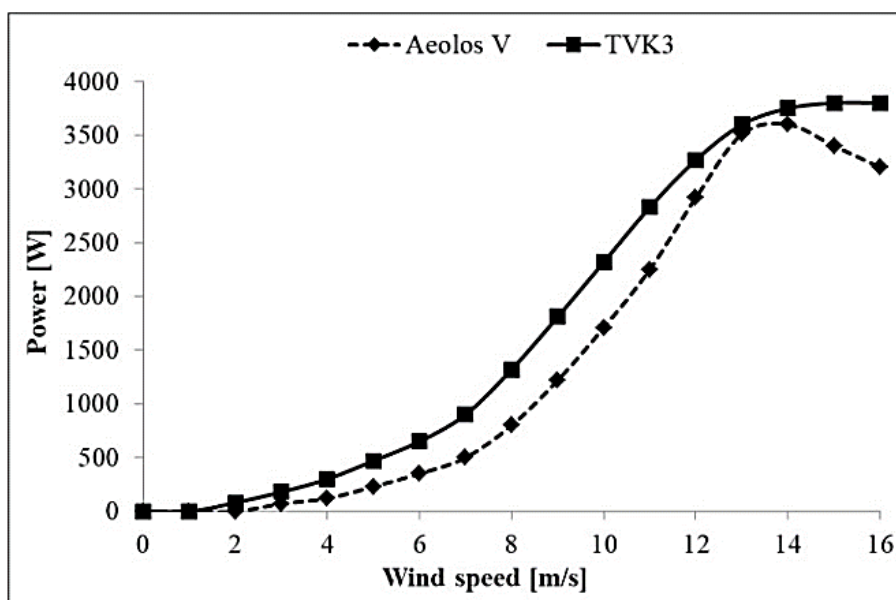
Slika 6.15 Weibullova razdioba na visini od 10 m; lokacija Gdansk [23]

Najbolje prosječne brzine vjetra se javljaju u travnju sa prosjekom od 3,51 m/s a najlošije u kolovozu sa prosjekom od 2,38 m/s.

Dvije turbine snage 3 kW tipa VAWT su instalirane na promatranima lokacijama kako bi se utvrdila njihova isplativost. Prvi tip dvo-rotorna turbina, kombinacija Savoniusove i Darrieusove (TKV3 model). Druga je bila H-Darrieusova (Aeolos V model).



Slika 6.16 Dva modela malih vjetroturbin za provedbu isplativosti: (a) TKV3, (b) Aeolos V [23]



Slika 6.17 krivulje snage dvaju analiziranih turbina [23]

Performance	Wind Turbine WT1	Wind Turbine WT2
	TVK3	AEOLOS V
Rated Power	3000 W	3000 W
Max Output Power	3800 W	3600 W
Cut In Wind Speed	1.5 m/s	2.5 m/s
Rated Wind Speed	13 m/s	12 m/s
Survival Wind Speed	60 m/s	55 m/s

Tablica 6.1 Tehnički podaci dvaju instaliranih vjetroturbin [23]

Iz krivulja na slici 6.18 vidi se da dvije vjetroturbine imaju različite krivulje snage i različite uzlazne brzine odnosno brzine zaleta.

Proizvedena energija se određuje preko izraza

$$E_{we_i} = P_{we_i} \times t_i = P_{we_i} \times f_i \times T_Y \quad (6.3)$$

T_Y - period promatranja od godinu dana ili 8760 sati

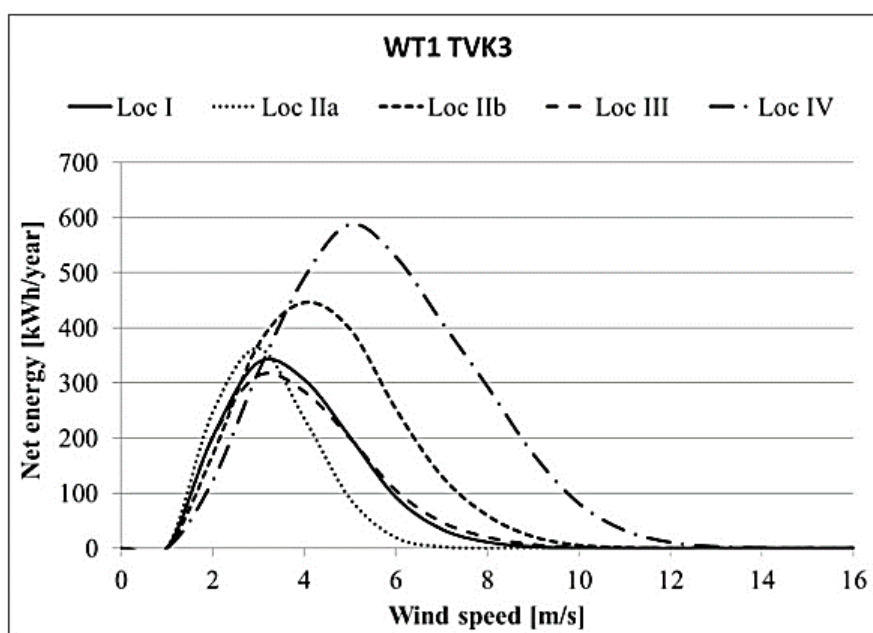
f_i - frekvencija brzine vjetra

E_{we_i} – energija vjetra generirana u vjetroelektrani

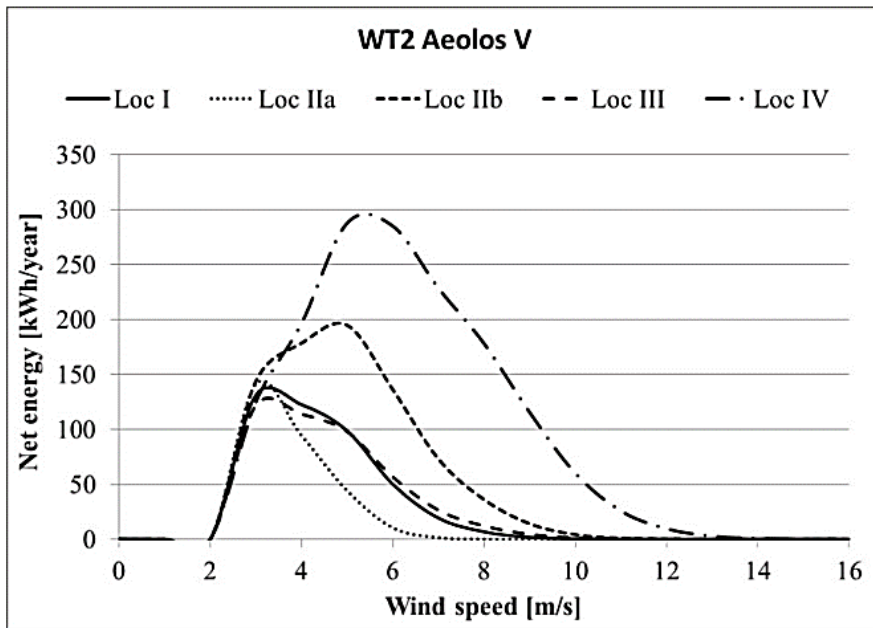
P_{we_i} – generirana snaga vjetra

Ukupni rezultat zbroja energija vjetra u svim promatranim periodima se određuje preko izraza:

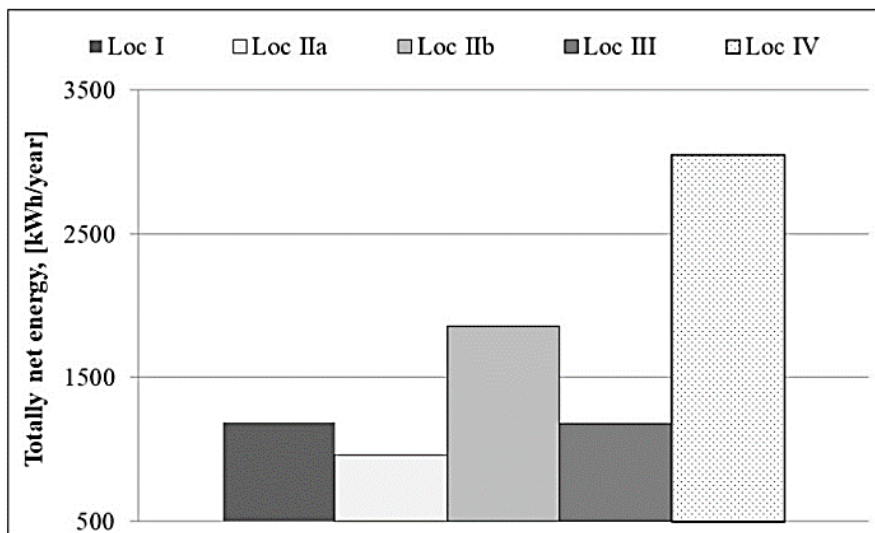
$$E_{we} = \sum_{i=1}^k E_{we_i} \quad (6.4)$$



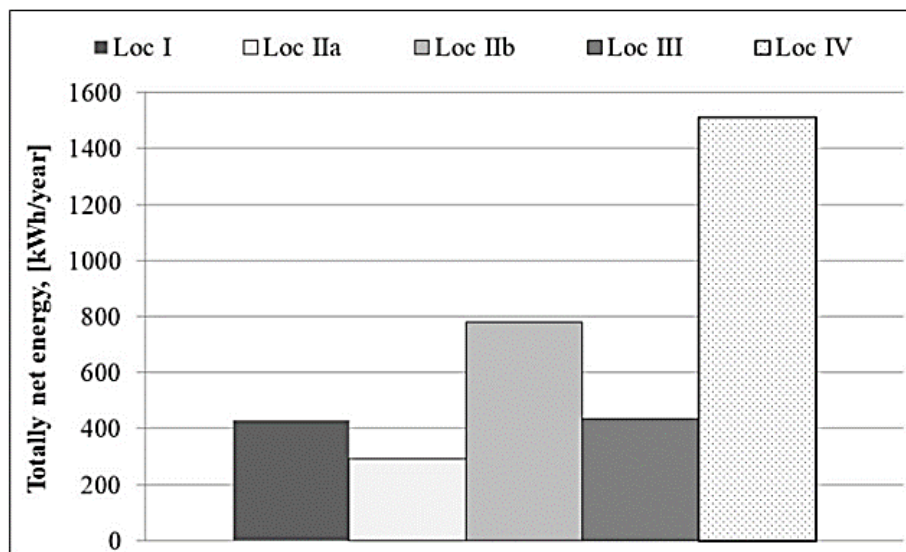
Slika 6.18 Energija dostavljena u mrežu na prvoj vjetroturbini sa 4 promatrane lokacije [23]



Slika 6.19 Energija dostavljena u mrežu na drugoj vjetroturbinu sa 4 promatrane lokacije [23]



Slika 6.20 Količina proizvedene energije dostavljene u mrežu na prvoj vjetroturbinu [23]



Slika 6.21 Količina proizvedene energije dostavljene u mrežu na drugoj vjetroturbini [23]

Model WT	Total Net Energy, [kWh/Year]				
	Loc I	Loc IIa	Loc IIb	Loc III	Loc IV
WT1	1189	957	1855	1180	3054
WT2	431	292	782	435	1514

Tablica 6.2 Godišnja neto vrijednost energije dostavljenje u mrežu preko vjetroturbina [23]

Prva vjetroturbina proizvodi i dvostruko više od druge na svakoj od promatranih lokacija. Glavni kriterij za odabir adekvatne turbine je maksimalna produktivnost uređaja sa lokalnim uvjetima vjetra. Distribucija brzine vjetra na danj lokaciji i krivulja snage odabrane turbine određuje količinu energije generiranu za mrežu. Na temelju ranije priloženih dijagrama rezultata mjerenja, zaključeno je da ni jedna ni druga turbina ne dosežu svoje nazivne snage. Uočljive su značajne razlike u proizvedenoj energiji na dvama modelima. Najveća produktivnost u središtu lokacije 4 se vjerojatno postigla zbog odabrane lokacije provedbe mjerenja. Produktivnost na prve tri lokacije je pokazala se približno sličnom. Na lokaciji dva gdje se mjerilo na dva različita prostora dokazano je da će produktivnosti biti veća na otvorenom nego zatvorenom urbanom prostoru. Raspodjela brzina vjetrova pokazuje i iznad 75% vjetrova sporijih od 3 m/s, i ispod brzine starta većine proizvodnih vjetro turbina.

Model WT	Annual Profit, [EUR/year]				
	Loc I	Loc IIa	Loc IIb	Loc III	Loc IV
WT1	190	153	297	189	489

Tablica 6.3 Godišnja zarada prve vjetroturbine na promatranim lokacijama [23]

Kako bi se pokrili troškovi instalacije koji približno iznose 30 000 EUR, turbina bi morala raditi ovisno o lokacijama preko 60 pa čak i preko 190 godina u pogonu. Životni vijek jedne vjetroturbine je u prosjeku 25 godina.

ZAKLJUČAK

Pregledom podataka danih u proučenim radovima i tekstovima može se zaključiti da na brzine vjetrova i nadasve na učinkovitost malih vjetroturbina utječe nekolicina faktora. Prvo, javljaju se emisije flikera izazivajući fluktuacije u vibracijama vjetra pri prolasku kroz turbine, bitan faktor u svemu je i geolokacija, pravilno određivanje položaja instalacije nosi velik dio odgovornosti, stoga se moraju provesti brojne analize brzina vjetrova u godišnjem period i procijeniti potencijale vjetra na promatranom području. Bitno je utvrditi utjecaje okolnih konstrukcija na parametre vjetra, prije odabiranja lokacije turbine. U zatvorenim prostorima brzine vjetrova su i duplo niže nego na otvorenom prostoru zbog brojnih deformacija strujanja vjetra. Promatrane lokacije nisu opravdale potencijal za izgradnju malih vjetroturbina zbog nepovoljnih uvjeta i nižih razina vjetrova nego što je to poželjno bilo. Pri dizajniranju vjetroelektrane sa više turbina tipa HAWT kapaciteta većih i od 3 MW na otvorenom prostoru, dovoljni su podaci od samo jednog ili dva stupa za cijeli projekt. Također je moguće i uzevši u obzir složenost terena pretvoriti prikupljene rezultate u one na drugačijoj visini promatranja. Usporedbom HAWT i VAWT turbina pokazano je veća kvaliteta VAWT turbina. Specifično H- rotor turbina ima više prednosti od Darrieusove. Jednostavnija, manja potreba za održavanjem. VAWT se pokazala učinkovitijom pri radu u lošijim klimatskim uvjetima od HAWT, poput krovova.

Optimizacijom performansi alternatora odabirom pravilnih parametara turbine I dimenzijama zupčanika se postiže dobra kombinacija za alternativno rješenje. Glavna prednost korištenja alternatora je nižim troškovima od klasičnih solucija stoga i automatski dostupnija područjima gdje je energija vjetra visoko zastupljena ali to njeno pohranjivanje teže izvedivo zbog skupoće opreme, što alternator čini pogodnim rješenjem za neke od problema malih vjetroturbina.

SAŽETAK

Uvodni dio daje uvid u temu diplomskog rada i detaljan pregled korištene literature. U trećem poglavlju se opisuje vjetar kao obnovljivi izvor energije. Govori se o potencijalnoj potrebi generiranja vjetra, o snagama vjetrova, opisuju se vjetroturbine u punom smislu kao i male vjetroturbine sa svojim obilježjima. Opisano je stanje vjetra u Hrvatskoj te su navedene temeljne prednosti i nedostaci vjetroturbina. Četvrto poglavlje pobliže daje uvid u opremu kojom se barata pri korištenju u radu pa i učenju na edukacijskoj maketi za simulacije Lucas-Nuelle, kao i računalni softveri korišteni za projiciranje rezultata u digitalnom zapisu koji su detaljno opisani u poglavlju pet. U posljednjem šestom poglavlju navedeni su neki od mogućih scenarija koji se mogu javiti pri radu turbina poput flikera i šumova, navedeno je jedno moguće rješenje ekonomičnosti u sustavu u vidu automobilskog alternatora i za kraj je predstavljen primjer utjecaja vjetrova u urbanim sredinama i dani su podaci mjerenja za nekoliko različitih lokacija kako bi se dobio dojam o snazi i brzinama vjetra na temelju položaja vjetroturbina i lokacije promatranja.

Ključne riječi: vjetar, vjetroturbina, urbane sredine, brzina vjetra, Lucas-Nuelle simulator, LabSoft.

ABSTRACT

The introductory part provides an insight into the topic of the thesis and a detailed overview of the used literature. The third chapter describes wind as a renewable energy source. Talking about the potential need for wind speed generation, about wind power, describing wind turbines in the full sense of word as well as small wind turbines with their own characteristics. The state of wind in Croatia is described, as advantages and disadvantages of wind turbines. The fourth chapter provides a closer look at the equipment used in work and learning on the educational simulator Lucas-Nuelle, as well as the computer software's used to project the results in a digital display, which are described in detail in chapter five. In the last sixth chapter, some of the possible scenarios that can occur during the operation of turbine, such as flickering and noises. One possible economic solution in the system in the form of automotive alternator, and finally an example of the influence of winds in urban environments with appropriate measured data are given for several different locations to get a feel for wind power and speed based on the locations of the wind turbines and observing points.

Key words: wind, wind turbine, urban environments, wind speed, Lucas-Nuelle simulator, Lab Soft

LITERATURA

1. Energija vjetra, internetski članak, dostupno na: <https://sites.google.com/site/energijavjetrapag/povijest-koristenja-energije-vjetra> (pristupljeno 20.06.2022.)
2. I. Zečević, Određivanje energetskog potencijala na temelju mjerenja brzine vjetra, završni rad, Ferit Osijek 2019, dostupno na: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A2247/datastream/PDF/view> (pristupljeno 20.06.2022.)
3. M. Lukić, Dizajn laboratorijskog priručnika interaktivnog simulatora vjetroelektrana, diplomski rad, Ferit Osijek 2021, dostupno na: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A3374/datastream/PDF/view> (pristupljeno 21.06.2022.)
4. Lucas-Nuelle, EWG-2-Small-wind-power-plant-trainer, web stranica, dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.com/316/apg/15966/EWG-2-Small-wind-power-plant-trainer.htm> (pristupljeno 21.06.2022.)
5. G. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2nd Edition, Wiley-IEEE Press 201. (pristupljeno 21.06.2022.)
6. Energetski institute Hrvoje Požar, Energija u Hrvatskoj godišnji energetski pregled, Zagreb 2020, dostupno na: https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika_EIHP_Energija_2020.pdf (pristupljeno 22.06.2022.)
7. T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden 2005, dostupno na: https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/wind_power_in_power_systems.pdf (pristupljeno 22.06.2022.)
8. A. Sumper, A. Baggini, Electrical Efficiency: Technologies and Applications 1st edition, Wiley 2012. (pristupljeno 22.06.2022.)
9. V. Bukarica, D. Dović, Ž. Borković, V. Soldo, B. Sučić, S. Švaić, V. Zanki, Priručnik za energetske savjetnike, Program Ujedinjenih Naroda za razvoj u Hrvatskoj, Zagreb 2008, dostupno na: <https://www.enu.hr/wp-content/uploads/2016/03/Priru%C4%8Dnik-za-energetske-savjetnike.pdf> (pristupljeno 22.06.2022.)
10. B. Capehart, W. Turner, W. Kennedy, Guide to Energy Management 7th edition, The Fairmont Press, USA 2012, dostupno na: <http://behineh-sazan.ir/wp-content/uploads/2017/01/Wayne-C-Turner-and-William-J-Kennedy-Barney-L-Capehart-Guide-to-Energy-Management-7th-Edition-Distributed-by-Taylor-Francis-Fairmont-Press-2012r.pdf> (pristupljeno 23.06.2022.)

11. D.Šljivac, D.Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku , FERIT Osijek 2018 (pristupljeno 23.06.2022.)
12. P. Kulišić, Novi izvori energije II dio: Sunčana energija i energija vjetra, Zagreb: Školska knjiga, 1991 (pristupljeno 23.06.2022.)
13. Alternative Energy Tutorials, Synchronous Generator as a Wind Power Generator, dostupno na: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/synchronous-generator.html> (pristupljeno 24.06.2022)
14. D. Schwartz, Beginners Guide to Wind Turbine Charge Controllers, dostupno na: https://offgridpermaculture.com/Off_Grid_Energy/Beginners_Guide_to_Wind_Turbine_Charge_Controllers.html (pristupljeno 24.06.2022)
15. WINDEXchange, Small Wind Guidebook, Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, dostupno na: <https://windexchange.energy.gov/small-wind-guidebook> (pristupljeno 05.09.2022.)
16. Lucas-Nuelle, Learning management software- LabSoft Classroom Manager (pristupljeno 05.09.2022)
17. J. Mur-Amada, A. Bayod-Rujula, Flicker emission of wind farms during continuous operation, Zarazgoza University, Department of Electrical Engineering, dostupno na: https://www.windygrid.org/2008_Wind_Flicker_Frequency.pdf (pristupljeno 06.09.2022.)
18. T. Forsyth, An Introduction to the Small Wind Turbine Project, NREL, Austin, Texas 1997, dostupno na: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/23158.pdf> (pristupljeno 06.09.2022.)
19. S. Datta, J. Sankpal, V. Saahil, A. Singh, Voltage Flicker Noise in Wind Turbine Output vol 10, International Journal of Control Theory and Applications, India 2017, dostupno na: https://serialsjournals.com/abstract/90074_1.pdf (pristupljeno 07.09.2022.)
20. P. Leppanen, Small-Scale Wind Power in the Arctic Region, Oulu University of Applied Sciences, Finland 2016, dostupno na: <https://core.ac.uk/download/pdf/80987165.pdf> (pristupljeno 07.09.2022.)
21. S. Ani, H. Polinder, J. Ferreira, Small wind power generation using automotive alternator, Delft University of Technology, Netherlands 2013 (pristupljeno 07.09.2022.)
22. S. Eriksson, H. Bernhoff, M. Leijon, Evaluation of different turbine concepts for wind power, Uppsala, Sweden 2006 (pristupljeno 08.09.2022)

23. A. Zagubien, K. Wolniewicz, Energy Efficiency of Small Wind Turbines in an Urbanized Area-Case Studies, Koszalin University, Poland 2022, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/362184063_Energy_Efficiency_of_Small_Wind_Turbines_in_an_Urbanized_Area-Case_Studies (pristupljeno 08.09.2022.)
24. V. Kadek, Small Wind Power Plants Feasibility Study, Tecnico Lisboa, Portugal 2017 (pristupljeno 09.09.2022.)

ŽIVOTOPIS

Marko Lekšan rođen je u Osijeku 2. svibnja 1997. godine. Živi u Osijeku, gdje je pohađao osnovnu školu Jagode Truhelke. Nakon osnovne škole upisuje Isusovačku klasičnu gimnaziju s pravom javnosti u Osijeku. Nakon srednjoškolskog obrazovanja, 2016. godine upisuje nekadašnji Elektrotehnički fakultet u Osijeku, sada Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera. Na drugoj godini preddiplomskog studija opredjeljuje se za smjer Elektroenergetika. Nakon završenog preddiplomskog studija, upisuje diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika.

Potpis autora