

# Istraživanje mogućnosti korištenja hibridnih sustava vjetra i solara za stabilniju proizvodnju električne energije

---

**Kovačić, Zvonimir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:200:817742>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Preddiplomski studij**

**ISTRAŽIVANJE MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA**  
**HIBRIDNIH SUSTAVA VJETRA I SOLARA ZA**  
**STABILNIJU PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Završni rad

Zvonimir Kovačić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Zvonimir Kovačić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4833, 29.07.2020.
<b>JMBAG:</b>	0165087426
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Marinko Stojkov
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	dr. sc. Mario Mišić
<b>Naslov završnog rada:</b>	Istraživanje mogućnosti korištenja hibridnih sustava vjetra i solara za stabilniju proizvodnju električne energije
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Analiza potrebe za stabilnom proizvodnjom el. energije uz istraživanje uloge hibridnih sustava vjetra i solara kao potencijalnog rješenja za tu potrebu. Opis karakteristika i prednosti korištenja energije vjetra i solara te pojedinačnih mogućnosti proizvodnje električne energije. Analiza kombinacije vjetroelektrana i solarnih sustava za postizanje stabilnije proizvodnje električne energije. Uključiti tehničke, ekonomske i ekološke aspekte ovakvih hibridnih sustava. Različiti modeli kombinacija sustava proizvodnje iz VE i SE u praksi. Tema rezervirana za Zvonimira Kovačića. Komentor dr. sc. Mario Mišić.
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	22.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	30.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	30.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 30.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Zvonimir Kovačić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4833, 29.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Istraživanje mogućnosti korištenja hibridnih sustava vjetra i solara za stabilniju proizvodnju električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Marinko Stojkov

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
1.2. Pregled područja tema .....	2
2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE SOLARA I VJETRA .....	3
2.1. Energija vjetra.....	3
2.2. Sunčeva energija.....	5
3. VJETROELEKTRANE .....	7
3.1. Osnove rada vjetroelektrana.....	7
3.2. Projektiranje vjetroelektrana.....	8
3.3. Osnovni dijelovi vjetroelektrane.....	12
4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE .....	14
4.1. Osnove rada fotonaponskih elektrana .....	14
4.2. Projektiranje fotonaponske elektrane.....	14
4.3. Osnovni dijelovi fotonaponske elektrane .....	15
5. HIBRIDNI SUSTAVI .....	17
5.1. Princip rada.....	17
5.2. Podjela hibridnih sustava.....	20
6. STABILNIJA PROIZVODNJA POMOĆU HIBRIDNIH SUSTAVA.....	21
6.1. Primjeri uspješnih hibridnih sustava.....	30
7. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
SAŽETAK.....	34

# 1. UVOD

Napredak u tehnologiji obnovljivih izvora energije otvara vrata novim inovacijama i pristupima u proizvodnji električne energije. U skladu s globalnim naporima za smanjenje emisija stakleničkih plinova i prelazak na održivije izvore energije, hibridne elektrane postaju sve primamljivija opcija. Hibridne elektrane kombiniraju snagu više obnovljivih izvora energije kako bi stvorile stabilniji i pouzdaniji izvor električne energije.

U ovom kontekstu, kombinacija solarne elektrane i vjetroelektrane predstavlja inovativan pristup koji objedinjuje prednosti oba sustava. Solarne elektrane koriste energiju Sunca za proizvodnju električne energije, dok vjetroelektrane koriste energiju vjetra. Integrirajući ova dva sustava, hibridne elektrane mogu optimizirati proizvodnju energije kako bi se smanjile varijacije u proizvodnji uzrokovane promjenjivim uvjetima Sunca i vjetra. Za solarnu energiju, proizvodnja može varirati 0% tijekom noći do 100% kapaciteta tijekom sredine dana. Što se tiče energije vjetra oscilacije tokom dana u normalnim uvjetima iznose u prosjeku od 20 do 60%.

Sezonske varijacije mogu iznositi i do 50% ljeti i zimi za solarnu energiju, dok kod energije vjetra iznosi oko 30-40% između različitih godišnjih doba.

Unatoč nedostacima, hibridne elektrane nude obećavajuću perspektivu za budućnost proizvodnje električne energije. Njihova sposobnost kombiniranja prednosti različitih obnovljivih izvora energije pruža održivo rješenje za energetske potrebe današnjice, dok istovremeno doprinosi globalnim naporima za smanjenje emisija stakleničkih plinova i borbu protiv klimatskih promjena. Trenutno je u RH u uporabi oko 1160 MW snage u vjetroelektranama i oko 510 MW u solarnim elektranama. U sljedećim poglavljima, istražiti ćemo detaljnije prednosti, nedostatke i primjene hibridnih elektrana, te njihovu ulogu u budućnosti energetskog sektora.

## ZADATAK

Analiza potrebe za stabilnom proizvodnjom električne energije uz istraživanje uloge hibridnih sustava vjetra i solara kao potencijalnog rješenja za tu potrebu. Opis karakteristika i prednosti korištenja energije vjetra i solara te pojedinačnih mogućnosti proizvodnje električne energije. Analiza kombinacije vjetroelektrana i solarnih sustava za postizanje stabilnije proizvodnja električne energije. Uključiti tehničke, ekonomske i ekološke aspekte ovakvih hibridnih sustava.

## 1.2. Pregled područja tema

U ovom poglavlju prikazujemo ključne izvore korištene u ovom završnom radu. Obuhvaćeni izvori sastoje se od studija, znanstvenih radova, te izvještaja međunarodnih agencija, u kojima su opisani hibridni sustavi, obnovljivi izvori energije, vjetroelektrane i fotonaponske elektrane.

U poglavlju 2. Obnovljivi izvori energije solara i vjetra, ključne reference bave se tehničkim aspektima korištenja solarne i vjetro energije. Rad pod nazivom "A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions" [1] pruža sveobuhvatan pregled solarnih i vjetroenergetskih sustava te izazova s kojima se susreću. Studija "Solar energy status in the world: A comprehensive review" [2] analizira trenutni status solarne energije, s naglaskom na tehnološke inovacije u solarnoj industriji. Konačno, globalni izvještaj o energiji vjetra "Global Wind Report 2023" [3] daje uvid u trenutačno stanje i buduće projekcije u proizvodnji energije iz vjetroelektrana.

Poglavlje 3. Vjetroelektrane oslanja se na izvore koji detaljno opisuju tehnologiju vjetroelektrana, uključujući održavanje i tehničke karakteristike vjetroturbina. Znanstveni rad Wind Energy Technologies: A Complete review of the Wind energy technologies [4] u potpunosti opisuje energiju vjetra, vjetroelektrane, te vjetroturbine. "Types of wind turbine generators and their functions" [5] istražuje različite vrste turbina te kako one funkcioniraju unutar većih sustava za proizvodnju energije. "Global wind report 2023" [6] analizira trenutni kapacitet instaliranih vjetroturbina širom svijeta.

U poglavlju 4. Fotonaponske elektrane, koriste se izvori koji pokrivaju rad i tehničke aspekte solarnih elektrana. Rad "Solar Power Generation" [7] donosi detaljan pregled tehnologije solarnih panela i njihovog rada, dok "Design and Simulation Studies of Hybrid Power Systems" [8] opisuje kako dizajnirati hibridne sustave s naglaskom na solarnu komponentu. Referenca "Renewable Power Generation Costs in 2022" [9] naglašava ekonomske aspekte korištenja solarne energije, s usporedbama troškova proizvodnje u različitim dijelovima svijeta.

Poglavlje 5. Hibridni sustavi koristi radove koji istražuju kako kombinacija različitih obnovljivih izvora može rezultirati stabilnijom proizvodnjom energije. Rad "Control of a Solar PV/Wind Hybrid Energy" [10] bavi se tehničkim rješenjima i načinima upravljanja ovakvim sustavima, dok "A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar" [11] analizira najnovije trendove u razvoju hibridnih sustava, fokusirajući se na kombinaciju vjetra i solarne energije. Konačno, rad "An optimisation of the hybrid renewable energy systems" [12] istražuje kako optimizirati takve sustave kako bi se maksimizirala njihova efikasnost i smanjile fluktuacije u proizvodnji.

## 2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE SOLARA I VJETRA

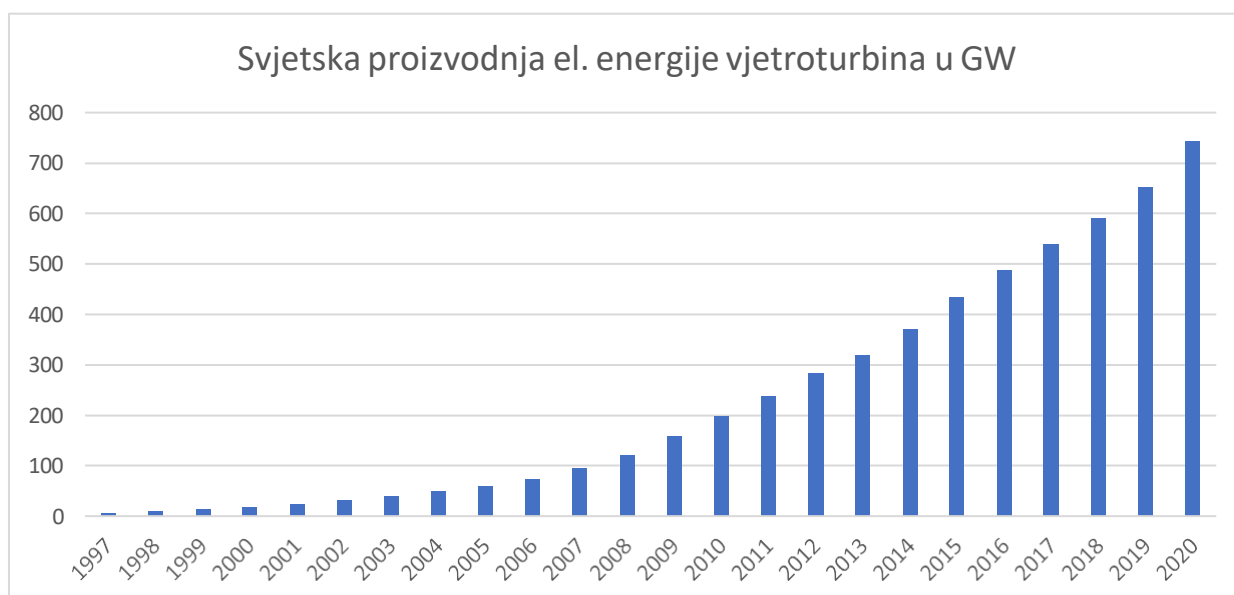
Kako bismo razumjeli hibridne sustave proizvodnje električne energije potrebno je prvo opisati njihova 2 glavna izvora energije.

### 2.2. Energija vjetra

Energija vjetra, nastala prirodnim kretanjem zraka, kao čist, održiv i obilan resurs, ima ključnu ulogu u globalnoj tranziciji prema zelenijim energetske rješenjima i borbi protiv klimatskih promjena. Inovacije u dizajnu i materijalima turbina povećavaju učinkovitost i isplativost vjetroturbina. Primjerice, veće turbine s duljim lopaticama mogu zahvatiti više zraka, te proizvesti više energije, dok napredak u materijalima poboljšava trajnost i performanse komponenti.

Količina električne energije proizvedene u vjetroelektranama u zadnjih 30ak godina rasla je eksponencijalno. U tablici je prikazana ukupna svjetska proizvodnja za razdoblje do 2020. godine. Samo u 2023. godine instalirano je oko 117 GW kapaciteta vjetroelektrana u svijetu.





*Slika 2.1. Svjetska proizvodnja električne energije vjetroturbina u GW [24]*

### Prednosti Energije Vjetra

Brojne su prednosti energije vjetra, počevši od ekoloških dobrobiti. Vjetar nastaje iz temperaturnih oscilacija koje uzrokuju razlike u tlaku. Energija vjetra je čist izvor energije jer ne proizvodi emisije stakleničkih plinova tijekom rada. Ovo treba promatrati u kontrastu s energijom iz fosilnih goriva, koja ispušta velike količine ugljičnog dioksida i drugih zagađivača, pridonoseći klimatskim promjenama i zdravstvenim problemima.

### Nedostatci Energije Vjetra

Unatoč mnogim prednostima, energija vjetra se suočava s nekoliko izazova. Jedan od glavnih problema je nepredvidljivost. Vjetar nije konstantan i može varirati tijekom kratkih razdoblja, što dovodi do fluktuacija u proizvodnji energije. Ova nepredvidljivost zahtijeva komplementarne sustave poput skladištenja energije ili pomoćnih elektrana kako bi se osigurala pouzdana opskrba energijom.

### Ekonomski aspekti energije vjetra

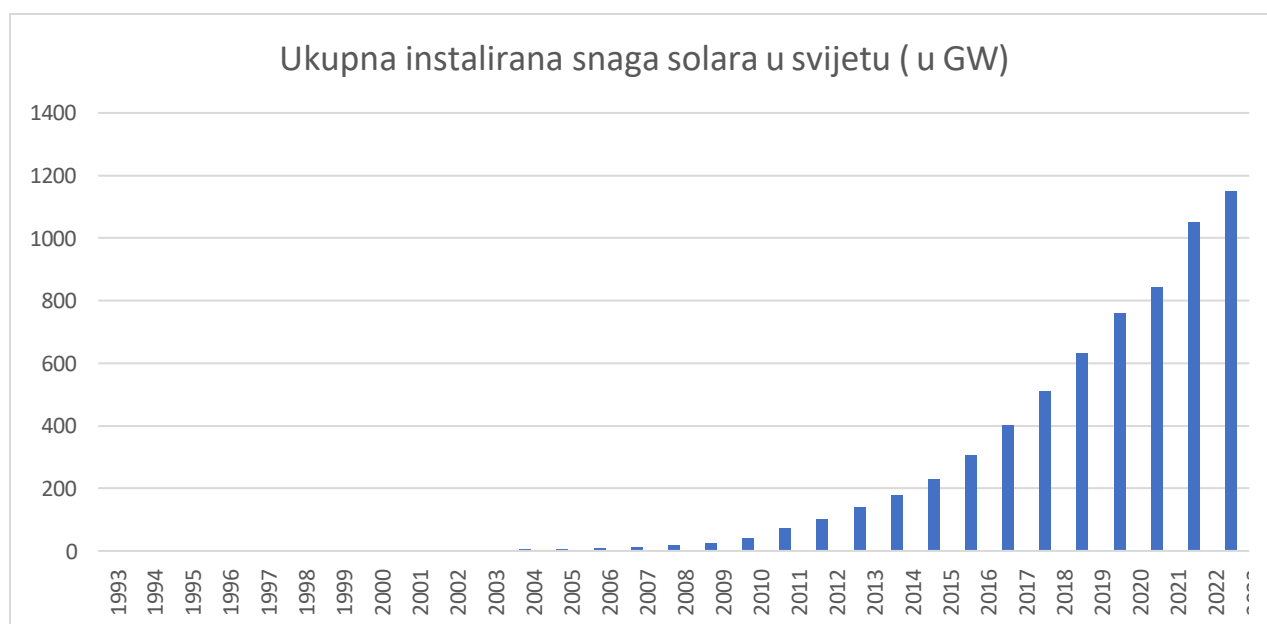
Ekonomski gledano, energija vjetra doprinosi otvaranju radnih mjesta i gospodarskom razvoju. Industrija vjetra zapošljava stotine tisuća ljudi širom svijeta, u raznim sektorima

poput proizvodnje, instalacije, održavanja i rada. Nadalje, vjetroelektrane mogu osigurati dodatni prihod vlasnicima zemljišta putem ugovora o zakupu, posebno u ruralnim područjima gdje su ekonomske mogućnosti ograničene.

## 2.2 Sunčeva energija

### Uvod u solarnu energiju

Solarna energija, dobivena iz sunčevog zračenja svjetlosti i topline, predstavlja ključni element modernog energetskeg okruženja obnovljive energije. Kao čist, obilan i održiv izvor energije, solarna energija igra važnu ulogu u smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima, ublažavanju klimatskih promjena i promicanju energetske sigurnosti. Osnove solarne energije, njezine prednosti i izazove, tehnološke inovacije te perspektive za budućnost. Trenutno je u svijetu instalirano oko 1300 GW solarne energije.



*Slika 2.2 Ukupna instalirana snaga solara u svijetu [25]*

### Integracija tehnologije i pametnih mreža

Spajanje solarnih sustava s naprednim tehnologijama pametnih mreža donosi značajne mogućnosti za poboljšanje upravljanja i distribucije energije. Pametne mreže koriste sofisticirane sustave komunikacija i automatizacije kako bi usklađivale proizvodnju i

potražnju, integrirale distribuirane energetske resurse te povećale stabilnost mreže. Integracija solarnih sustava s pametnim mrežama može rezultirati održivijim, pouzdanijim i učinkovitijim energetske sustavom.

#### Prednosti solarne energije

Solarna energija predstavlja jedan od 3 glavna obnovljiva izvora energije. Sunce za 1 sat proizvede energije više nego se u svijetu potroši kroz cijelu godinu. Za razliku od energije vjetra i vode, solarna energija je dostupna po čitavom svijetu, te je postavljanje njenih elektrana poprilično lakše od ostala 2 tipa. Niži ulazni troškovi su također jedan od glavnih čimbenika, za razliku od vjetra i vode, elektrane za solarnu energiju projektiraju se i u jako malim veličinama u odnosu na preostala 2 tipa, od mogućnosti korištenja u malim i urbanim sredinama, za kućnu uporabu, pa sve do velikih solarnih elektrana kojima snaga prelazi i nekoliko stotina megavata.

#### Nedostaci solarne energije

Iako ima puno prednosti, solarna energija ima i neke nedostatke, proteklih 20-ak godina solarnim panelima učinkovitost je jako porasla, ali u odnosu na ostale izvore ta učinkovitost koja je u rasponu od 15 – 25% i dalje je relativno niska. Stabilnost mreže napajane isključivo od solarnih panela isto tako igra značajnu ulogu, pošto se napaja od strane Sunca, solarna elektrana tijekom noći nema ulaznu snagu, tako da se preko noći mora koristiti električna energija pohranjena u baterijama ili nekim drugim oblicima pohrane.

#### Ekonomski aspekti energije solara

Kako cijene solarne energije nastavljaju padati, postizanje pariteta mreže - gdje troškovi proizvodnje solarnog električnog napajanja postaju jednaki ili niži od tradicionalnih izvora energije - postaje realnost u mnogim regijama. Prosječna cijena solarne energije u svijetu za 2022. godinu je iznosila oko USD 0.049/kWh. Ova ekonomska konkurentnost potiče brzi rast tržišta i širenje solarnih tehnologija, stvarajući temelje za dominantnu ulogu solarnih sustava u globalnoj energetskej strukturi. Solarna energija dugoročno predstavlja značajnu uštedu. Viša inicijalna ulaganja često su ublažena državnim poticajima u mnogim državama. Time se postiže da se solarni sustavi isplate već kroz 10 godina, te nakon toga predstavljaju neto uštedu, pošto je životni vijek većine panela oko 25 do 30 godina, uz to panelima efikasnost ne opada drastično, kroz 30 godina rada panelima će učinkovitost opasti ukupno oko 15 – 20%.

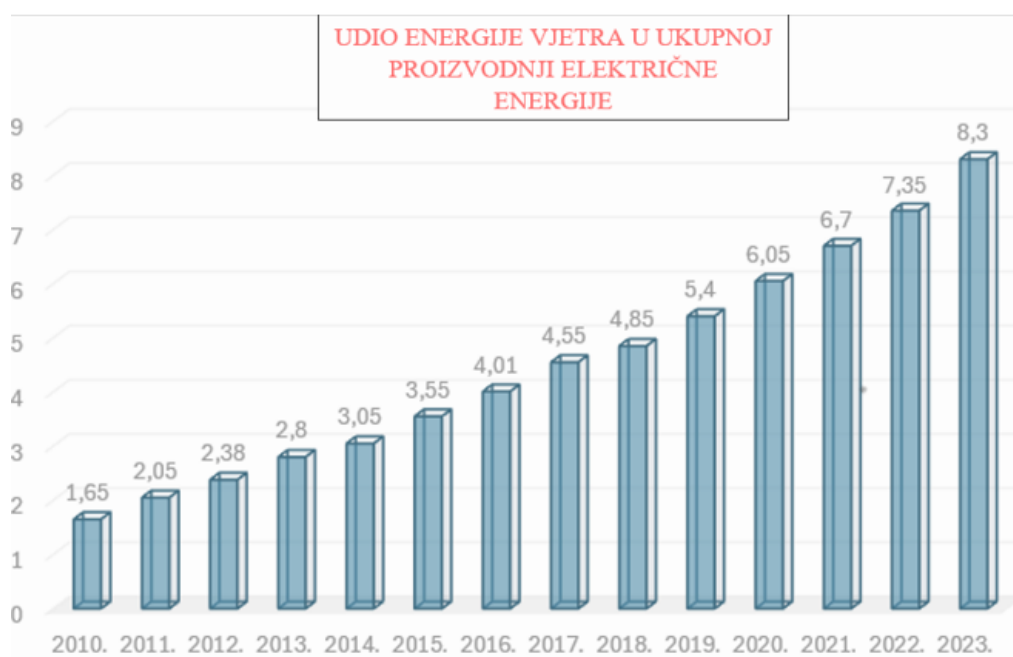
### 3. VJETROELEKTRANE

#### 3.2. Osnove rada vjetroelektrana:

Vjetroelektrane su elektromehanička postrojenja koja kinetičku energiju vjetra pretvaraju u električnu energiju. Prvi oblici vjetroturbina pojavili su se u mlinovima, rotacijska energija lopatica se prenosila na zupčanike koji su okretali kamenje te tako mljeli zrna. Prvi vjetrogeneratori koji proizvode električnu energiju pojavili su se krajem 19-og stoljeća. Tek zadnjih 30-ak godina kreće masovna uporaba vjetroturbina za proizvodnju električne energije.

Energija vjetra pokreće lopatice turbine koje nadalje zakreću prvo sporo vratilo, koje prenosi silu na brzo vratilo te se prijenosnikom (multiplikatorom brzine) povećava broj okretaja osovine kako bi odgovaralo potrebama generatora. Generator mehaničku energiju pretvara u električnu elektromagnetskom indukcijom.

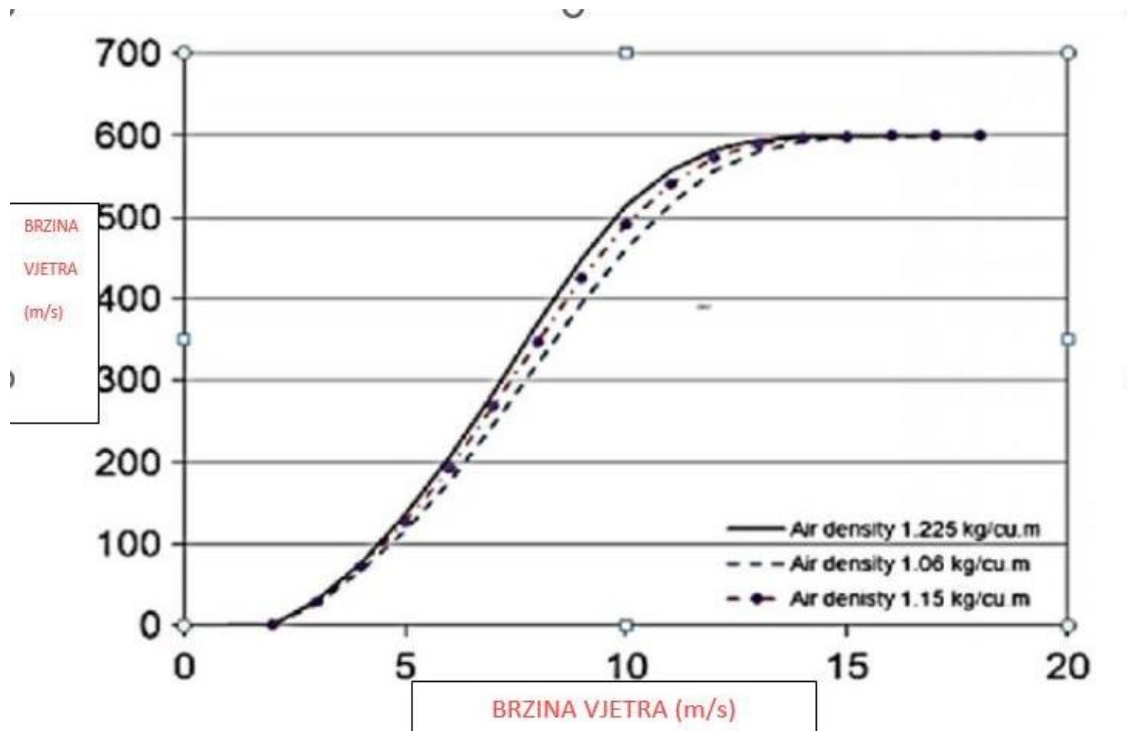
Utjecaj vjetroelektrana: Najveći utjecaj vjetroelektrana se očituje u buci koju proizvode, narušavanjem krajolika, prostora koji zauzimaju te utjecaj na ptice koje nastradaju u sudaru sa lopaticama vjetroturbine. Ipak, vjetroelektrane su jedne od najneutralnijih elektrana po okoliš.



Slika 3.1 Udio energije vjetra [26]

### 3.3. Projektiranje vjetroelektrana:

Projektiranje vjetroelektrana je složen i višefazni proces koji mora obuhvaćati sve aspekte, tehnološke, tehničke, društvene i ekološke. Može potrajati i do nekoliko godina. Prije svega potrebno je analizirati potencijal energije vjetra na odabranom području. Područje mora imati dostatno prostora za vjetroturbine, prilazne puteve, te pomoćne objekte. Za odabrano područje bi bilo najbolje da ima minimalna ograničenja po pitanju okoliša, teren ne smije biti velikog nagiba, tlo ne bi trebalo biti pjeskovito i područje bi trebalo biti lako dostupno. Minimalna brzina vjetra na mjestu turbine bi trebala biti 5 (m/s). Podaci se prikupljaju kroz vremenski period od najmanje godinu dana na različitim visinama. Prikupljaju se i putem karti vjetrova, meteorološkim stanicama, te računalnim modelima. Izrađuje se krivulja snage vjetra, te se računa faktor kapaciteta, koji predstavlja stvarni učinak turbine u odnosu na njenu maksimalnu izlaznu snagu.



Slika 3.2 Krivulja snage vjetra [27]

Nakon procjene potencijala energije vjetra potrebne su studije utjecaja elektrane na lokalni okoliš, na ptice i ostale životinje kako bi se minimizirao negativan utjecaj na okoliš.

Nakon preliminarnih koraka potrebno je odabrati odgovarajući tip vjetroturbine za odabranu lokaciju, te rasporediti turbine maksimizirajući proizvodnju električne energije. Potrebno je ishoditi sve potrebne dozvole, građevinske dozvole, ugovore s lokalnim distributerom električne energije i sl. Završetkom pripremnih koraka kreće se u građevinske radove, izgradnja temelja i pristupnih puteva, elektroenergetske infrastrukture i ostalih instalacija.

Izvedbe vjetroelektrana

Offshore vjetroelektrane su vjetroelektrane instalirane na površini mora. Pučinski vjetrovi su izdašniji i često jači i stabilniji od kopnenih vjetrova. Iako je izgradnja i održavanje offshore vjetroelektrana skuplje, njihov potencijal da osiguraju značajan dio globalnih energetske potreba je velik. Zemlje poput Ujedinjenog Kraljevstva, Njemačke i Kine predvode u razvoju ovih projekata, s velikim vjetroelektranama koje su već operativne ili u fazi izgradnje.

Prednosti offshore elektrana:

- Offshore vjetroturbine su učinkovitije,
- Smanjen ekološki utjecaj,
- Više prostora za planiranje i izgradnju.

Nedostaci offshore elektrana:

- veći ulazni troškovi,
- zahtjevnije održavanje i popravci.

Onshore vjetroelektrane su postrojenja za proizvodnju električne energije koja su instalirana na kopnu. Sastoje se od visokih vjetroagregata koji se okreću pod utjecajem vjetra, a generiraju električnu energiju putem turbina. Postavljaju se često na otvorenim prostorima kao što su brda ili ravnice, kako bi maksimalno iskoristile vjetar koji prolazi kroz područje.

Prednosti onshore elektrana:

- jeftinije su od offshore elektrana,
- lakše održavanje i jednostavniji popravci.

Nedostaci onshore elektrana:

- Oduzimanje obradive površine,
- buka,
- narušavanje krajolika.

### Mehanizmi Energije Vjetra

Energija vjetra se generira pomoću vjetroturbina koje kinetičku energiju vjetra pretvaraju u električnu energiju. Tipična vjetroturbina sastoji se od rotora s lopaticama, osovine, mjenjača i generatora. Kada vjetar prolazi preko lopatica, uzrokuje njihovo okretanje. Ta rotacija okreće osovину spojenu na mjenjač koji povećava brzinu rotacije prikladnu za generator. Generator zatim pretvara mehaničku energiju u električnu.

Tipovi vjetroturbina:

- **VJETROTURBINE SA HORIZONTALNOM OSI** – lopatice turbine se okreću okomito na smjer vjetra. Mehaničke komponente nalaze se u kućištu. Vjetroturbine sa horizontalnom osovinom su generalno učinkovitije od turbina sa okomitom osovinom, iz razloga što se lopatice nalaze na većoj visini gdje su vjetrovi brži.



*Slika 3.3 Vjetroturbina sa horizontalnom osi [28]*

- **VJETROTURBINE SA OKOMITOM OSI** – lopatice turbine se okreću paralelno sa tlom. Manje su učinkovite, za oko 70% više energije generiraju turbine sa horizontalnom osi, ali imaju prednost u specifičnim situacijama, mogu generirati električnu energiju pri dosta nižim brzinama vjetra u usporedbi sa turbinama sa horizontalnom osi. Praktičnija im je uporaba u urbanim sredinama, niz autoputeve i prometnice s gustim prometom poput onih koje se nalaze u Njemačkoj, Italiji itd.



*Slika 3.4 Vjetroturbina sa okomitom osi [29]*

Također vjetroturbine se razlikuju i po orijentaciji u odnosu na smjer vjetra. Vjetroturbine koje su smještene u smjeru vjetra potencijalno mogu uhvatiti više vjetra u odnosu na turbine koje imaju usmjerenje niz vjetar. Ovakve turbine zahtijevaju i mehanizam zakretanja lopatica kako bi zakretale lopatice što okomitije vjetru što povećava trošak, kompleksnost, te zahtjeva dodatno održavanje.

Vjetroturbine koje su orijentirane niz vjetar ne zahtijevaju mehanizam za zakretanje pošto ih vjetar automatski zakreće. Na ovakvim vjetroturbinama mogu se javiti gubici koji se



pojavljaju zbog tornja koji je prvi na udaru vjetra. Prosječne offshore vjetroturbine snage su do 7 MW, dok su onshore vjetroturbine snage oko 3 MW.

### **3.4. Dijelovi vjetroelektrane:**

#### 1. Rotor i lopatice

Rotor pretvara kinetičku energiju vjetra te ju pretvara u mehaničku, u središtu rotora se nalazi glavčina, na glavčinu su pričvršćene lopatice kojih najčešće ima tri. Najčešće su lopatice izrađene od kompozitnih materijala, stakloplastike, karbonskih vlakana i epoksidne smole. Prilikom odabira lopatica, njihove dimenzije igraju ulogu u količini energije koju uhvate, duže lopatice proizvode više energije vjetra, ali se pri tome povećava naprezanje (stres) na sve komponente turbine.

Lopatice su pokretane kinetičkom energijom vjetra te prijenose silu na rotor. Obojane su bijelom bojom zbog vidljivosti, te im duljina varira od 30 do 80 metara.

#### 2. Gondola

Gondola je kućište koje sadrži bitne komponente vjetroturbine, te uključuje glavno vratilo, generator, prijenosnik odnosno multiplikator te kontrolni sustav.

Glavno vratilo prenosi mehaničku energiju postignutu vrtnjom rotora na multiplikator brzine koji prilagođava brzinu vrtnje vratila kako bi odgovarala generatoru. Nadalje se mehanička energija sa prijenosnika pretvara u električnu energiju.

3. Multiplikator brzine (mjenjač brzine) povećava rotacijsku brzinu rotora turbine. Primarna funkcija je da sporo okretanje rotora (otprilike 10-20 okretaja po minuti) povisi na brzinu koju zahtjeva generator (otprilike 1500-1800 rpm ovisno o frekvenciji mreže)

#### 4. Toranj

Na vrhu tornja su smješteni gondola i rotor, toranj se najčešće izrađuje od čelika ili betona, te je visine od 50-ak metara naviše.

#### 5. Temelj

Temelj je najčešće izrađen od armiranog betona, te može biti površinski ili dubinski.

#### 6. Električni sustav

Sastoji se od invertera koji istosmjernu električnu energiju sa generatora pretvara u stabilnu izmjeničnu struju. Nakon konverzije transformator prilagođava napon za prijenos elektroenergetskom mrežom.

## 7. Generator

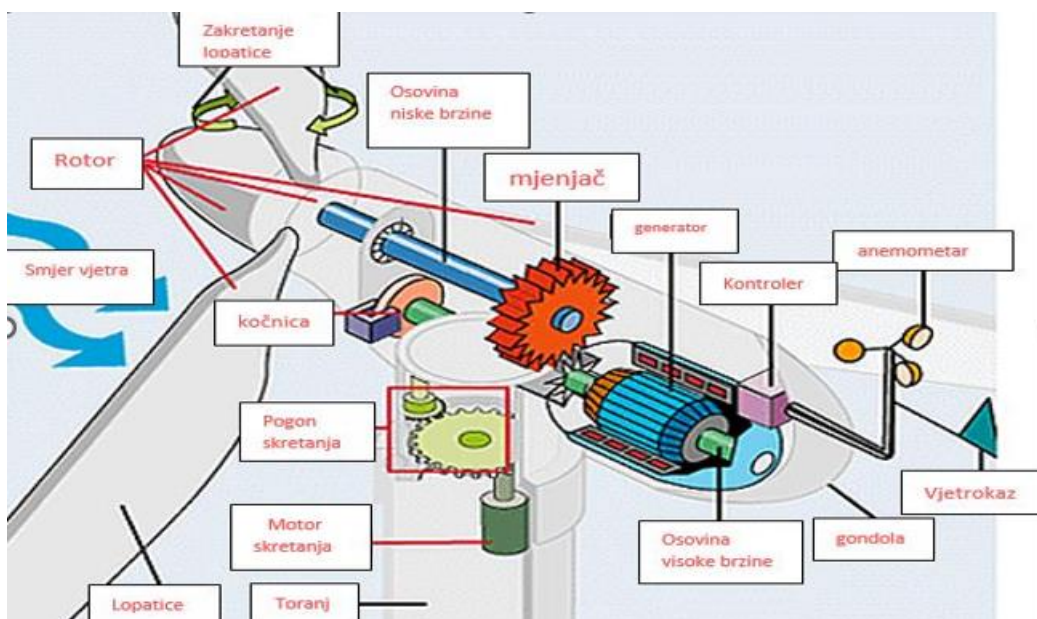
Postoje 4 tipa generatora koji se koriste u vjetroturbinama, DC (istosmjerni) generator, AC (izmjenični) asinkroni generator, AC sinkroni generator, te generatori preklapne otpornosti.

## 8. Sustav za kontrolu i nadzor

Upravlja radom te omogućuje praćenje performansi i stanja sustava u realnom vremenu, sastoji se od SCADA sustava koji omogućuje daljinsko praćenje i upravljanje radom vjetroelektrane te senzora koji mjeri sve parametre.

9. Mehanička kočnica služe za zaustavljanje okretanja lopatica turbine prilikom oluje ili vjetrova jake brzine. Postavljaju se direktno na visokobrzinsku osovinu niskog okretnog momenta za brzo zaustavljanje.

10. Step-up transformator – izlazni napon sa generatora turbine je relativno nizak, u rasponu od 400 do 700 volta, što zahtjeva da se povisi s obzirom da je generator direktno povezan na visokonaponsku mrežu. U zadnjih nekoliko godina u sredjenaponskim mrežama pokušava se izbjeći korištenje step up transformatora kako bi se smanjili troškovi te izbjegli gubici prilikom podizanja napona.



**Slika 3.5** Dijelovi vjetroturbine [30]

## 4. FOTONAPONSKE ELEKTRANE

### 4.2. Osnove rada fotonaponskih elektrana :

Fotonaponske elektrane koriste PV ćelije za pretvaranje sunčeve energije u električnu. Proces je baziran na fotonaponskom efektu, određeni materijali pod utjecajem sunčeve svjetlosti proizvode električnu energiju. Otkriven je 1839. godine od strane francuskog fizičara Edmonda Becquerela. Fotoni pogađaju površinu solarne ćelije, koje su zapravo p-n spojevi te energija fotona prelazi na atom, točnije na elektrone, elektroni prelaze u vodljivi pojas što ostavlja „rupu“ u valentnom pojasu te se stvara nabijeni par. Zbog električnog polja koje postoji kao rezultat p-n spoja, elektroni i šupljine kreću se u suprotnom smjeru od očekivanog. Umjesto da bude privučen na p-stranu, oslobođeni elektron nastoji se pomaknuti na n-stranu. Ovo gibanje elektrona stvara električnu struju u ćeliji. Nakon što se elektron pomakne, ostaje "rupa". Ova rupa se također može pomicati, ali u suprotnom smjeru od p-strane. To je proces koji stvara električnu energiju. Kako bi se struja mogla koristiti i slati u elektroenergetsku mrežu, potrebno je pretvoriti ju u izmjeničnu struju. To se ostvaruje inverterom.

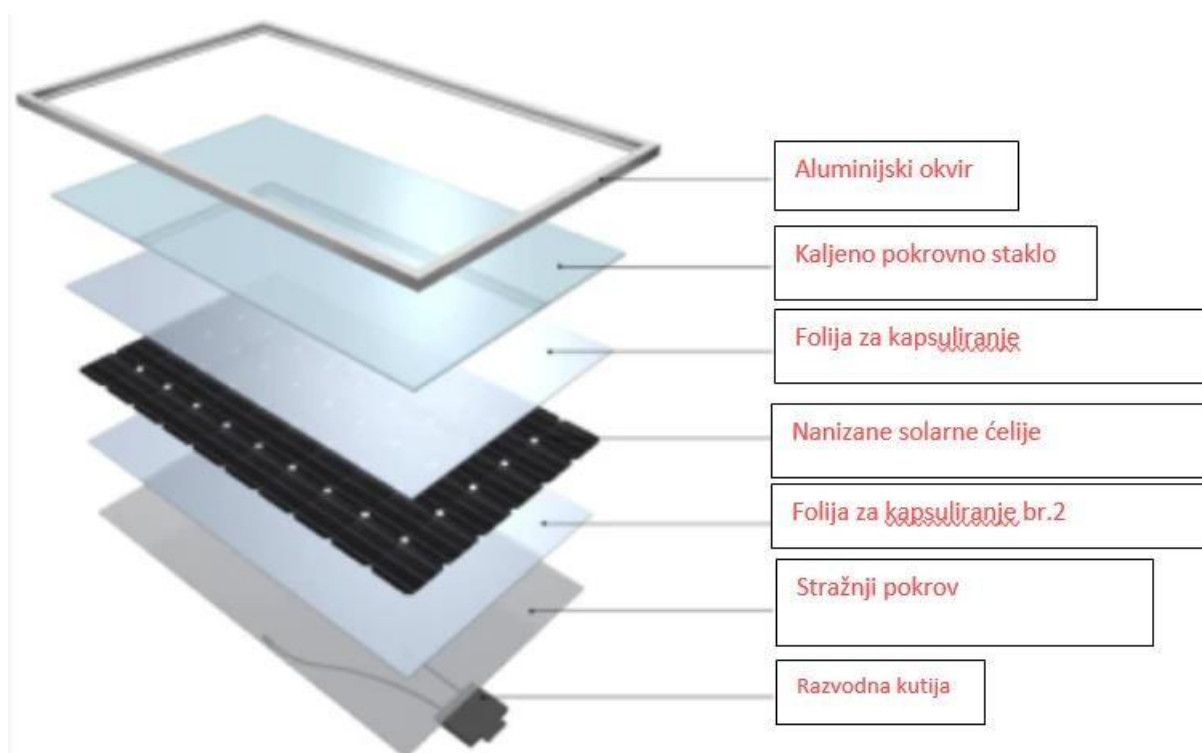
### 4.3. Projektiranje fotonaponskih elektrana:

Fotonaponske elektrane dolaze u rasponu veličina, od mini elektrana za kućanstvo koje su najčešće u rasponu od 5 kW do 20 kW, do elektrana veličine nekoliko stotina megavata. Projektiranje elektrana se u ovom završnom radu radi pomoću softvera PV SyS te PV\*SOL.

Za razliku od vjetroelektrana, solarne elektrane imaju puno veće područje na kojima ih se može postavljati. Za početak je potrebno analizirati potrebe odabranog područja za električnom energijom. Nakon toga se prikupljaju podaci o insolaciji, dnevnoj i godišnjoj kako bi se odredio potencijal proizvodnje energije. Insolacija se mjeri pomoću heliografa, određuju se dimenzije sustava, te se zatim odlučuje kakva će struktura sustava biti, krovna ili montaža na tlu te optimizacija nagiba i orijentacije panela prema Suncu za maksimalnu učinkovitost.

#### 4.4. Dijelovi fotonaponske elektrane:

1. Fotonaponski (PV) paneli – ćelije koje pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju, najčešća izvedba PV panela je izrađena od silicija. Postoje ćelije od monokristalnog silicija koje su učinkovitije i imaju produljeni životni vijek, ali su skuplje od polikristalnih ćelija koje su jeftinije uz nižu učinkovitost. U manjoj količini se još koriste i tankoslojni materijali. Najpoznatiji proizvođači PV panela u svijetu su TW – Solar, AIKO, LONGi, itd.

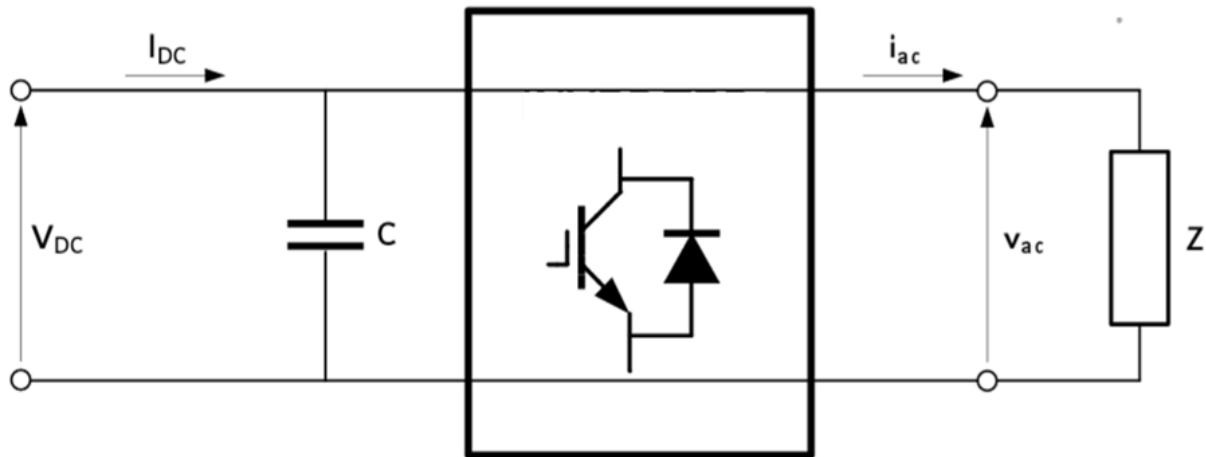


*Slika 4.1 Dijelovi solarnog panela [31]*

2. Inverter – Pretvara istosmjernu struju dobivenu u panelima u izmjeničnu struju kako bi se mogla koristiti za slanje u elektroenergetsku mrežu. U ovisnosti o povezanosti sa mrežom, postoje off-grid i on-grid inverteri. Sastoji se od MOSFET i IGBT transformatora koji pretvaraju istosmjerni napon u izmjenični. Inverteri mogu biti monofazni ili trofazni. Hibridni inverteri kombiniraju funkcije on-grid invertera, te baterijskog invertera. Inverter prebacuje istosmjernu struju sa panela u izmjeničnu za potrošače, dok u isto vrijeme izmjeničnu struju prebacuje u istosmjernu za punjenje baterija iz kojih crpi snagu za vrijeme kad je sustav odspojen sa mreže ili za vrijeme visokih opterećenja. Bitna funkcija kod

hibridnih invertera je ta da mogu isporučivati višak energije u sustav, te tako ostvarivati i zaradu. U slučajevima kada je proizvodnja nedostatna za potrebe, mogu crpiti snagu iz mreže.

Off-grid inverteri funkcioniraju odvojeno od ostatka mreže, gdje se višak energije skladišti u baterije, koje kasnije isporučuju energiju kada postoji manjak proizvodnje. Nedostatak kod off-grid invertera je taj što korisnici moraju motriti razinu energije koje imaju, te prilagoditi potrošnju sukladno tome.



*Slika 4.2 Pojednostavljena shema invertera [32]*

3. Konstrukcija za montažu – paneli se slažu i pričvršćuju na konstrukciju, mogu biti fiksni ili pokretni koji prate kretanju Sunca. Najpoznatiji proizvođač konstrukcija je K2 Systems

4. Električne instalacije i sklopovi – kabeli i ostali spojni uređaju koji povezuju sve komponente. Najčešće korišteni tipovi kabela su PV1-F, a u slučaju konektora najčešći su MC4 konektori.

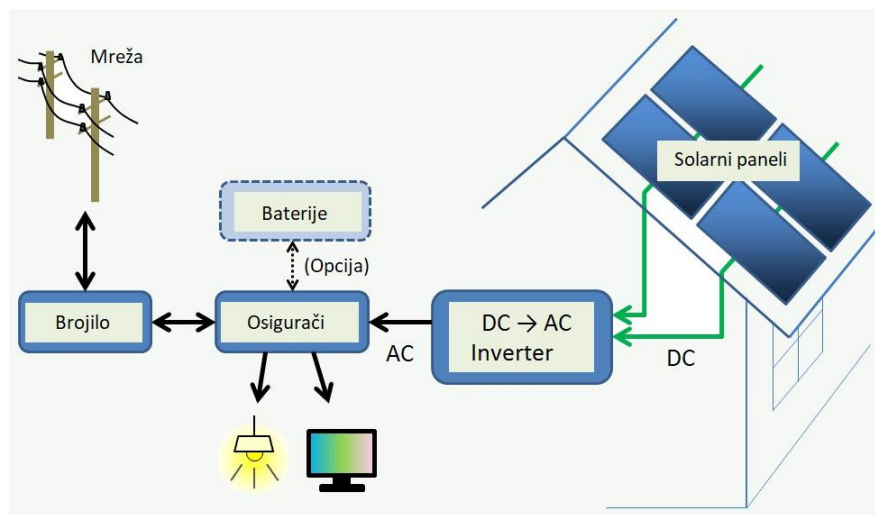
5. Sustav za skladištenje energije (baterije) – koriste se za pohranu viška proizvedene energije koja se koriste kada je potrebno. Trenutno se u industriji koristi nekoliko tipova baterija:

- Lithium-ion –nekoliko ćelija Li-ion povezane serijski ili paralelno, baterije dugog životnog vijeka, minimalno 10 godina , nemaju memorijski učinak, ne moraju se potpuno isprazniti prije punjenja
- LiFePO4 – najbolje baterije za solarne sustave. Imaju visoku energetska gustoću – mogu pohraniti velike količine energije u malim dimenzijama, otporne su na visoke i niske temperature, te im performanse ne opadaju zbog toga.

- Nikl – Kadmij – najbolje za ekstremne temperaturne uvijete, imaju visoku stopu pražnjena, mogu brzo predati velike količine energije u mrežu, izvrsno za potrebe velikih opterećenja, te dugo drže punjenje kada se ne koriste

6. Sustav za nadzor i upravljanje – mjere proizvodnju te su najčešće sastoje od brojila, različitih senzora te softverskog sučelja (aplikacije) za jednostavan pregled stanja.

7. Zaštitni uređaji – osigurači – za prosječne panele jačine 300-400 W koriste se osigurači snage 35/40A , FID sklopke – najčešće od 30 A do 70 A te 500 V do 1500 V, prenaponske zaštite, te AC i DC isklonici – AC isklonici napona 120/240 V, 120/208 V, za stambenu uporabu, te 277/480 V za komercijalnu/industrijsku uporabu, dok kod DC isklonika ide do 600 V u stambenoj uporabi, te 1000/1500 V za komercijalnu/industrijsku uporabu.

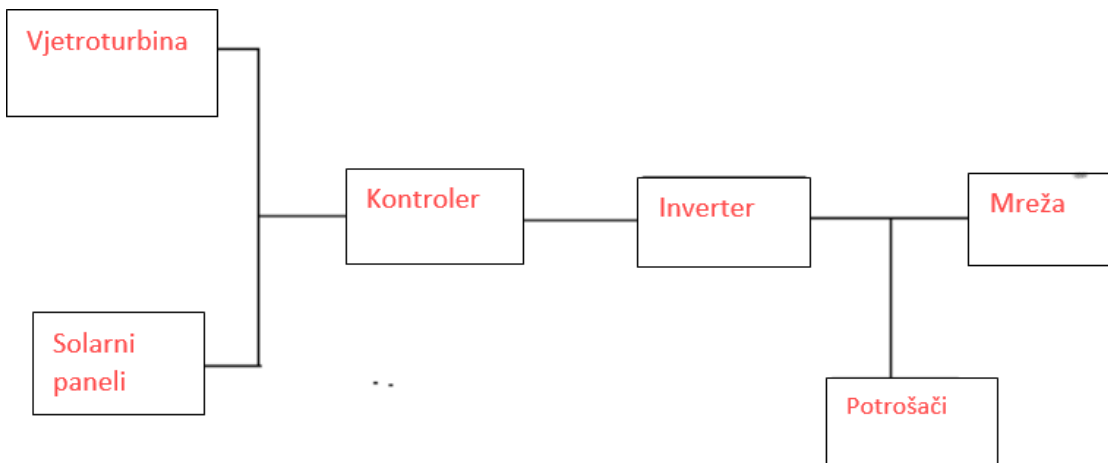


*Slika 4.3 Glavni dijelovi solarnog sustava [33]*

## 5. HIBRIDNI SUSTAVI – PRINCIP DJELOVANJA

### 5.2. Princip rada

Potreba za hibridnim sustavima solara i vjetra nastaje iz ograničenja pojedinačnih obnovljivih izvora. Hibridni sustavi poboljšavaju stabilnost i povećavaju pouzdanost tako što se ostvaruje konstantnija i stabilnija isporuka struje, smanjuje se rizik od slabije opskrbljenosti energijom tijekom perioda smanjenje sunčeve svjetlosti ili vjetra. Solarni dio isporučuje više snage tijekom dana, te za vrijeme ljetnih mjeseci, dok vjetroelektrane isporučuju više energije tokom noći, te za vrijeme zimskih mjeseci. Isto tako hibridni sustavi poboljšavaju stabilnost cjelokupne elektroenergetske mreže, pošto su najčešće opremljeni baterijskim sustavima, hibridni sustavi mogu služiti kao stabilizatori mreže tijekom vršnih opterećenja.



*Slika 5.1 Blok dijagram hibridnog sustava*

### 5.3. Podjela hibridnih sustava

Ovi sustavi dijele se najčešće na osnovu njihove povezanosti sa postojećom elektroenergetskom mrežom: on-grid sustavi, u ovom slučaju sustav je izravno spojen na postojeću mrežu, ovakav sustav je jednostavnije implementirati u postojeću infrastrukturu, međutim poprilično ovisi o postojećoj stabilnosti mreže i može biti pogođen kvarovima na mreži.

Sljedeći sustav je off-grid. Ovi sustavi funkcioniraju samostalno i najčešće se koriste u ruralnim sredinama gdje povezanost sa postojećom elektroenergetskom mrežom nije moguća. Kako je konfiguracija ovih sustava takva da su odvojeni od mreže nužno je da imaju neki sustav skladištenja energije, najčešće se radi o baterijama.

Posljednja izvedba hibridnog sustava su u izvedbi mikromreže. Mikromreže najčešće koriste obnovljive izvore energije u kombinaciji sa konvencionalnim izvorima energije na fosilna goriva. Također pružaju i fleksibilnost operativnosti u kombinaciji sa postojećom elektroenergetskom mrežom te pružaju otpornost na kvarove mreža. To se posebno dobro pokazalo u slučaju ustanova koje moraju biti konstantno opskrbljene električnom energijom, bolnice, javne ustanove, banke, serveri, vojne baze i slično.

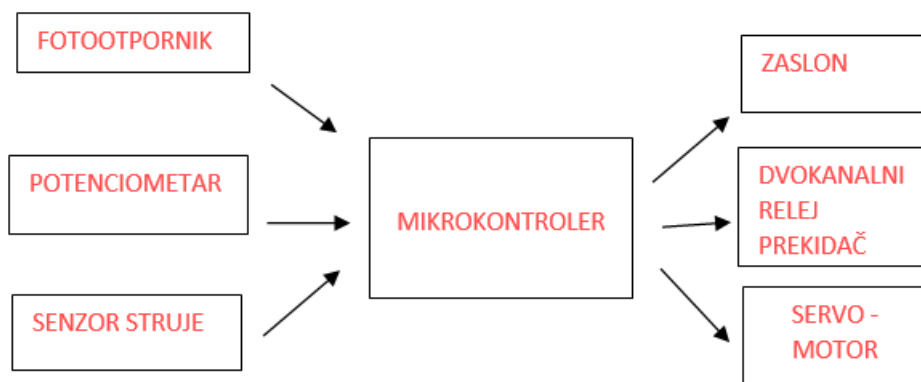
Hibridni sustavi koriste više načina skladištenja energije. Baterije su najčešći tip skladištenja energije, Li-ion baterije su najčešće izvedbe baterija koje se koriste.

Vodikove gorivne ćelije – Vodik se može proizvoditi iz viška energije i kasnije koristiti u gorivnim ćelijama. Gorivne ćelije se u međuvremenu mogu pretvoriti u električnu energiju.

Superkondenzatori – vrsta kondenzatora koja može skladištiti puno veću energiju od običnih kondenzatora. Mogu se koristiti kao zamjena za baterije, tijekom vremena naglog opterećenja.

Zamašnjaci – vrtjom visokom brzinom kinetičku energiju pohranjuje u rotor, kada je potreba za električnom energijom rotor otpušta kinetičku energiju turbinama koje generiraju električnu energiju.

#### POJEDNOSTAVLJENI SUSTAV UPRAVLJANJA



*Slika 5.2 Prikaz pojednostavljenog sustava upravljanja*

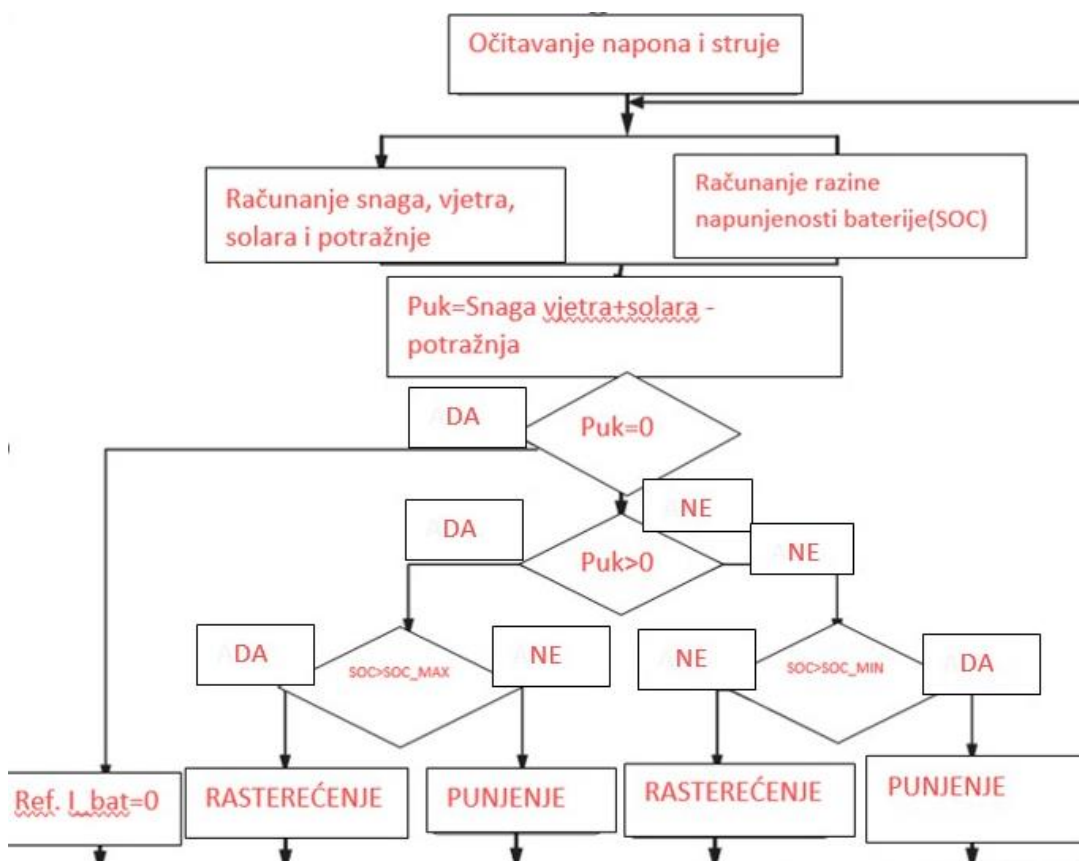
Na slici je prikazan pojednostavljeni, te umanjeni sustav upravljanja hibridnog sustava.

1. Fotoopornik – komponenta čiji otpornik ovisi o razini osvjetljenosti, napravljena od poluprovodljivih materijala visokog otpora.
2. Potencijometar – promjenjivi otpornik koji mijenja svoju vrijednost pomakom gumba
3. Senzor struje – detektira i pretvara električnu struju u izlazni napon kojeg možemo mjeriti, koji je proporcionalan struji. Prolaskom struje kroz njegov kondenzator javlja se pad napona, te se generira okolno magnetsko polje. Postoje 2 načina na koji senzor može raditi, direktno i indirektno. Direktno koje se osniva na Ohmovom zakonu mjeri



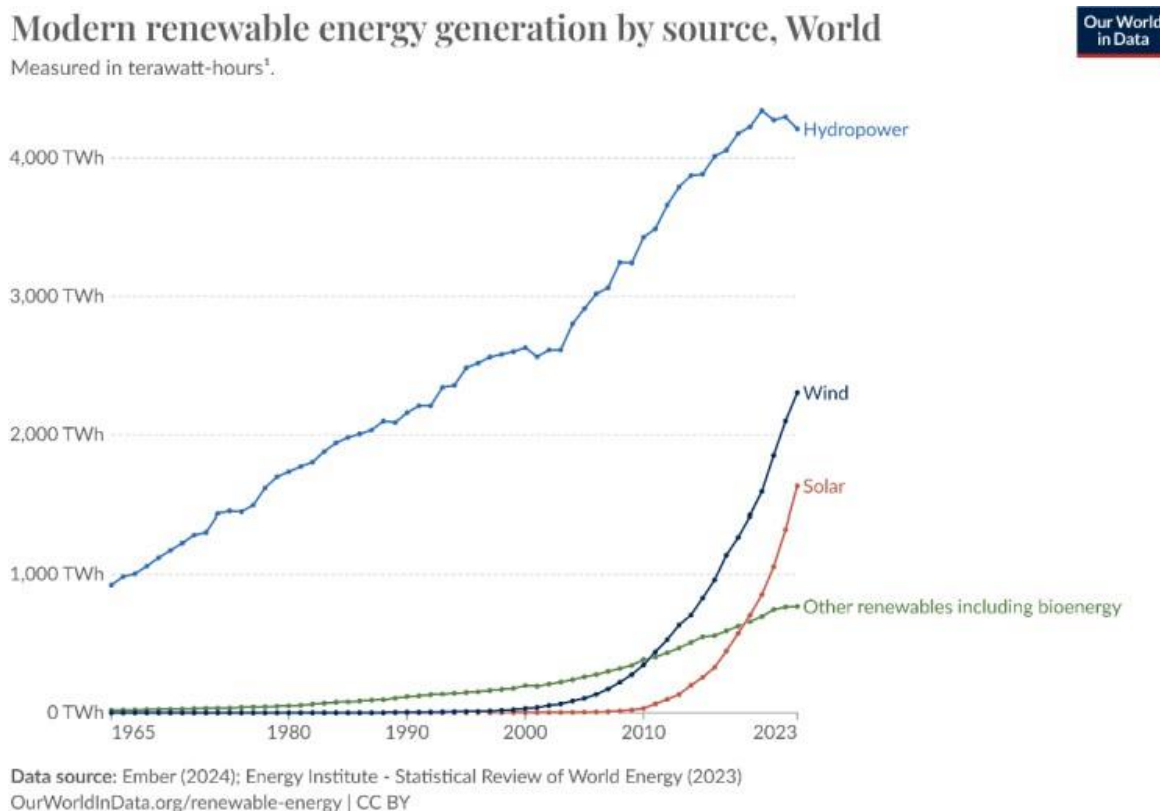
pad napona koji se javlja na pasivnim električnim komponentama te određuje struju. Indirektno se bazira na Faradayevom zakonu, te Amperovim zakonima za određivanje struje pomoću magnetskih polja.

4. Mikrokontroler – kompaktni integrirani krug odgovoran za upravljanje i izvršavanje softverom, nadzire ulazne parametre, kontrolira periferne jedinice itd.
5. Zaslون – prikazuje bitne parametre cijelog sustava.
6. Dvokanalni relej prekidač – funkcioniра na principu elektromagnetske indukcije. Prolaskom struje kroz elektromagnet stvara se magnetsko polje. Sadrži više kontakata, normalno otvoren, normalno zatvoren i zajednički. Releј se može aktivirati istosmjernom ili izmјeničnom strujom. U releјima koji rade na izmјeničnoј struji, zavojnica se odmagnetizira svakim prolaskom struje kroz nulu.
7. Servomotor – sadrži kontrolnu јединicu koja daje povrtnu informaciju o poziciji osovine motora, kako bi omogućila motoru da ima precizno kretanje.



Slika 5.3 Prikaz algoritma upravljanja hibridnog sustava [34]

## 6.1. STABILNIJA PROIZVODNJA POMOĆU HIBRIDNIH SUSTAVA



*Slika 6.1* Obnovljivi izvori energije u svijetu [35]

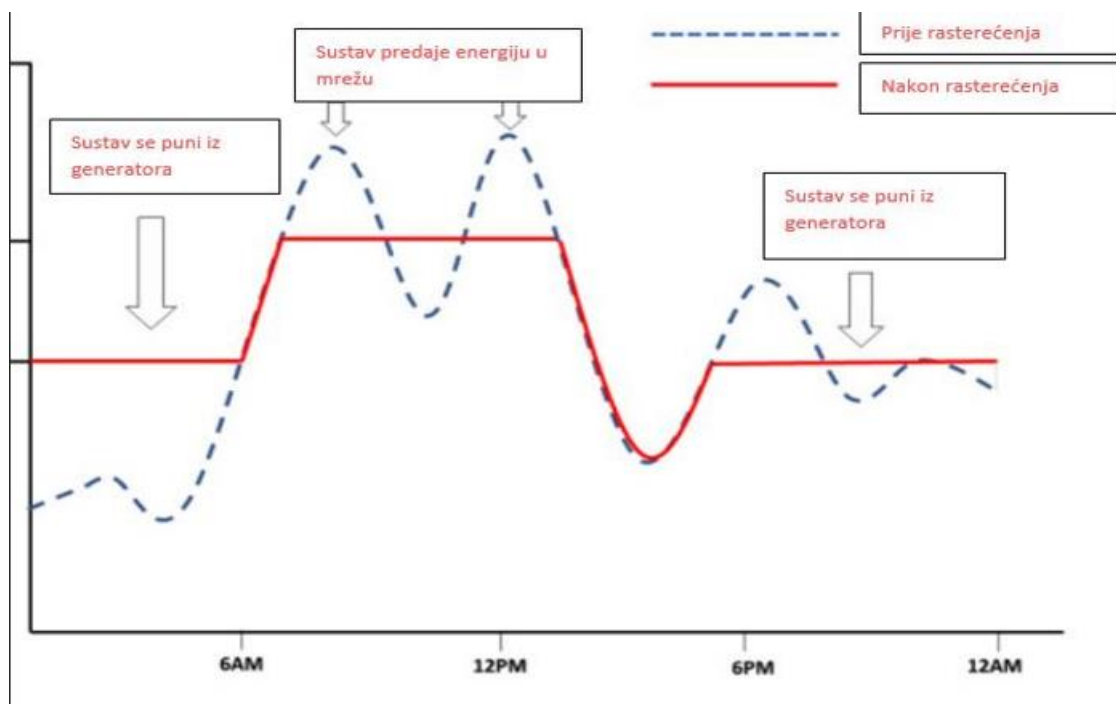
Iako je korištenje obnovljivih izvora energije svijetla budućnost za prelazak s neobnovljivih izvora energije, trebala bi postojati optimalna rješenja za smanjenje problema fluktuacije snage krajnjih korisnika. Fluktuacija se uglavnom događa zbog svoje ovisnosti o vremenskim uvjetima kao što su brzina vjetra i sunčevo zračenje. Zbog napretka energetske elektronike, danas je većina tipova industrijskih opterećenja, kao što su industrija proizvodnje poluvodiča i kemijska industrija, osjetljivi na bilo kakve fluktuacije snage i elektroenergetske tvrtke i kupci trebali bi osigurati da oscilacije u isporuci snage ostanu unutar zadanog raspona. Korištenjem prilagođenih uređaja za napajanje koji će biti spojeni u seriju, paralelu (shunt) ili kombinacijom ta dva na strani osjetljivog opterećenja osiguravamo stabilnu isporuku energije.

Prilagođeni uređaji za napajanje se koriste za ublažavanje problema s kvalitetom električne energije koji proizlaze iz pada napona, valnih oblika, prekida, harmonika i treperenja koji čine više od 80% problema s kvalitetom električne energije, štiteći kritična opterećenja potrošača.

Među njima, pad napona je najčešći poremećaj napona koji je obično uzrokovan kvarom na udaljenoj sabirnici, prebacivanjem velikih opterećenja, pokretanjem velikih motora i uključivanjem transformatora. To je popraćeno skokom faznog kuta. U slučaju hibridnog energetskog sustava, uz gore navedene uzroke, pad se može dogoditi zbog oscilacije u količini sunčeve osvjetljenosti, te količine vjetra.

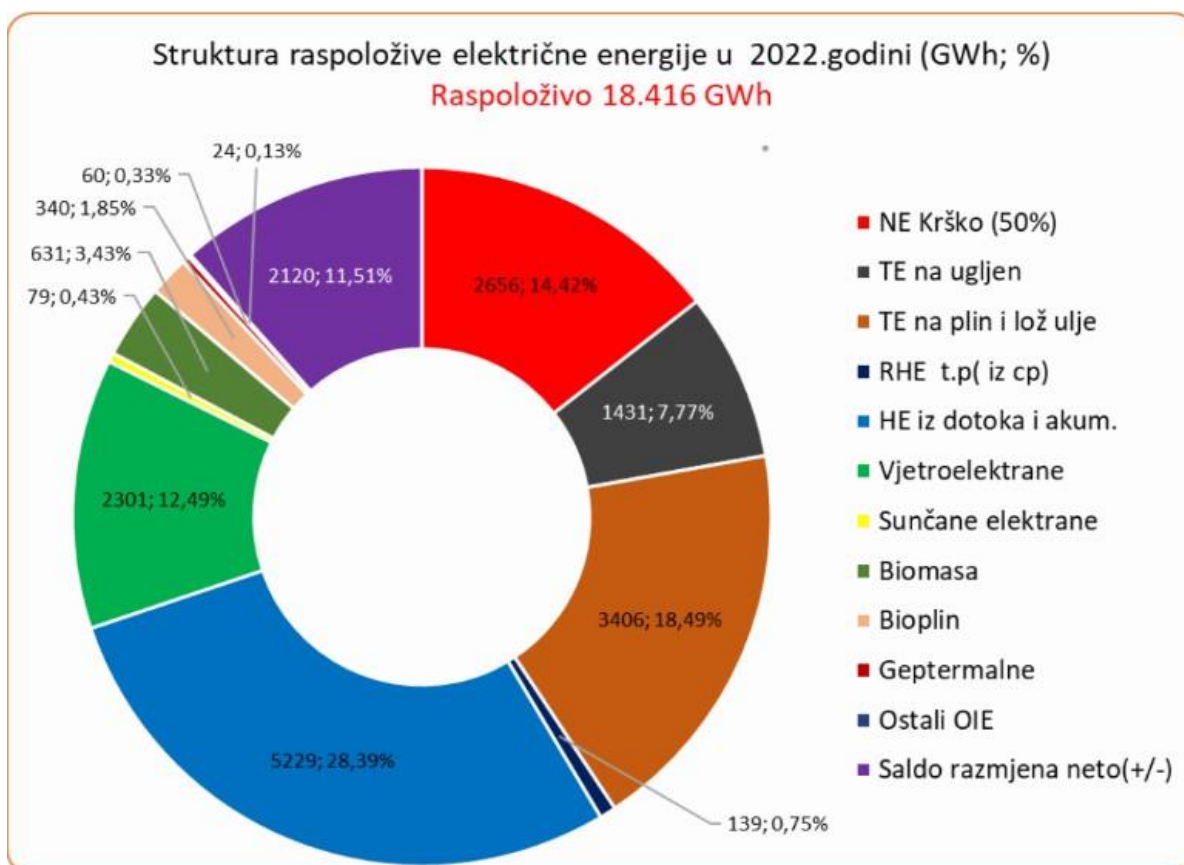
## VRŠNO RASTEREĆENJE SUSTAVA POMOĆU HIBRIDNIH SUSTAVA SOLARA I VJETRA

Hibridni sustavi sa baterijama pokazuju se kao odličan način za vršno rasterećenje sustava. Kako bi to bilo moguće opskrba i potražnja za električnom energijom moraju biti dobro analizirane tijekom vršnih razdoblja. Hibridni sustav koji koristi baterije za pohranu energije skladišti energiju tijekom razdoblja kada proizvodnja premašuje potražnju. Pohranjenu energiju zatim oslobađamo u mrežu kako bi se smanjila opterećenost, te stabilizirala mreža. Zahvaljujući integraciji tehnologije unutar hibridnog sustava, mrežni operator može maksimizirati opskrbu mreže energijom iz baterijskih sustava te kao rezultat mreža funkcionira stabilnije, te se koristi manje električne energije iz tradicionalnih izvora tijekom vršnih sati.



*Slika 6.2 Prikaz vršnog rasterećenja [36]*

Prosječna mjesečna potrošnja električne energije u Hrvatskoj za 2022. godinu iznosi oko 1600 GWh. Ukupna potrošnja energije proizvedenih iz termalnih elektrana na ugljen i plin godišnje iznosi oko 4800 GWh.



*Slika 6.3 Raspoloživa električna energija u RH [37]*

Kako bi izračunali koliko GWh solarne energije i energije vjetra je potrebno instalirati, moramo koristiti formulu:

$$Instalirana\ snaga(MW) = \frac{potrošnja(MWh)}{Broj\ sati\ godišnje \times učinkovitost}$$

Pretvaramo GWh u MWh : 4800 GWh= 4 800 000 MWh. Uz pretpostavku da je učinkovitost sustava oko 27,5%.

$$\text{Instalirana snaga(MW)} = \frac{4\,800\,000 \text{ MWh}}{8760 \text{ h} \times 0,275} = 1990 \text{ MW}$$

Kako bi zamijenili proizvodnju termalnih elektrana na fosilna goriva potrebno je instalirati oko 1990 MW hibridnih sustava uz pretpostavku konstantne proizvodnje energije iz OIE.

Proteklih godina cijena vjetroturbina dosta je porasla, samo u 2022. godini oko 10%. Prosječna cijena jedne vjetroturbine iznosi 2,5-3,5 milijuna eura, odnosno oko milijun eura po MW nazivne snage, cijena se odnosi na onshore turbine koje su dosta manje od offshore turbina. Samo cijena pojedine lopatice turbine iznosi oko 150 000 €, cijena rotora i lopatica iznosi oko 500 000 €.

Preostale komponente u kućištu koštaju oko 30-35% ukupne cijene vjetroturbine, toranj prosječne turbine košta oko 200,000 €. Najveća turbina proizvođača MingYang Smart Energy, model MySE 16.0-242 snage je 16 MW, visine 264 m, lopatice su dužine 118 metara, rotor je promjera 242 metra. Turbina godišnje može generirati oko 80 000 MWh električne energije, što je dostatno za opskrbljivanje više od 20 000 kućanstava. Učinak ove vjetroturbine na okoliš je također vrlo značajan. Kroz 25 godina koliko je predviđen njen životni vijek, turbina će umanjiti proizvodnju CO<sub>2</sub> za više od 1,5 milijuna tona.

Prosječna cijena solarnih elektrana po MW iznosi oko 900 000 eura.

Kako bi zamjenili potrošnju iz termalnih elektrana na ugljen i plin u Republici Hrvatskoj bilo bi potrebno instalirati oko 1000 MW solarnih elektrana, te oko 1000 MW vjetroturbina. Uz baterijske sustave, te cijenu hibridnog sustava oko 1 100 000 € ukupni trošak zamjene termalnih elektrana na ugljen i plin iznosio bi oko 4 200 000 000 €.

Elektrane na ugljen u Republici Hrvatskoj imaju nazivnu snagu oko 1430 MW. Kako bismo izračunali koliko elektrane na ugljen potroše goriva potrebno je izračunati sljedeće:

Elektrane na ugljen proizvode 1430 MW uz učinkovitost oko 35%. Moramo izračunati potrebnu energiju iz ugljena za proizvodnju električne energije.

$$\text{Potrebna energija} = \frac{\text{Proizvedena energija}}{\text{Učinkovitost}}$$

$$Potrebna\ energija = \frac{1430\ MWh}{0,35} = 4085\ MWh$$

Kalorijska vrijednost ugljena prosječno iznosi oko 7 MWh po toni ugljena. Uzevši u obzir prosječnu kalorijsku vrijednost ugljena, potrebna količina ugljena računa se na sljedeći način.

$$Količina\ ugljena(t) = \frac{Potrebna\ energija\ iz\ ugljena}{Kalorijska\ vrijednost\ ugljena} =$$

$$Količina\ ugljena(t) = \frac{4085\ MWh}{6\ MWh/t} = 675,8\ t$$

Uz prosječnu cijenu ugljena oko 105 € po toni, trošak elektrana na ugljen iznosi oko 1,700,000 € dnevno ili 620 milijuna € godišnje. Uzevši u obzir trošak instalacije 2000 MW hibridnih sustava od 4,200,000,000 €, hibridni sustavi bi se isplatili kroz 8 godina.

Model sustava potrošnje i proizvodnje električne energije iz TE i OIE.

Potrošnja našeg modela sustava iznosi 2000 GWh godišnje. Uzimajući uz obzir da termoelektrana ne radi cijelo vrijeme maksimalnom snagom, potrebnu instaliranu snagu TE izračunati ćemo formulom:

$$P_{te} = \frac{E_{te}}{CF_{te} \times 8760} =$$

Gdje je:

- $P_{TE}$  – instalirana snaga termoelektrane,
- $E_{TE}$  – godišnja proizvodnja el. energije u MWh
- $CF_{TE}$  – Udjel vremena kada termoelektrana radi s punim kapacitetom

$$P_{te} = \frac{2000000}{0,8 \times 8760} = 284\ MW$$

Kako bi zadovoljila potrošnju sustava od 2000 GWh godišnje, instalirana snaga termoelektrane trebala bi iznositi 284 MW.

Trošak pogona elektrane ovisi o više faktora:

- Učinkovitosti,
- Operativnim troškovima i održavanju,
- Trošak pogonskog goriva.

Učinkovitost termoelektrane računa se pomoću specifične potrošnje topline. Toplinski omjer za većinu termoelektrana iznosi između 8500 – 13500 kJ/kWh. Kako bi izračunali godišnji trošak goriva elektrane računamo po formuli:

$$\text{Trošak (€)} = \text{Toplinski omjer} \times \text{Snaga elektrane} \times \text{cijena goriva} \times CF_{te} \times 8760 =$$

Za toplinski omjer pretpostavit ćemo 10000 kJ/kWh

Snaga elektrane : 284 MW

Udjel vremena kada termoelektrana radi s punim kapacitetom : 0,8

Trošak goriva (pretpostavljamo 2,5 €/GJ)

$$\text{Trošak goriva} = 0,01 \times 284000 \times 2,5 \times 0,8 \times 8760 = 50\,009\,088 \text{ €}$$

Trošak izgradnje, te projektiranja termoelektrane iznosi oko 1300 €/kW instalirane snage.

Izgradnja i puštanje elektrane koštalo bi: 285440 kW × 1300 €/kW = 371 072 000 €.

Kako bi izračunali emisiju CO<sub>2</sub> termoelektrane koristimo faktor za ugljen koji ima emisiju otprilike 840kg CO<sub>2</sub> po MWh proizvedene energije. Naša elektrana proizvede 10000 MWh energije godišnje.

$$\text{Emisija CO}_2 \text{ (ugljen)} = 2000000 \text{ MWh} \times 840 \text{ CO}_2 = 1\,680\,000\,000 \text{ kg CO}_2/\text{god.}$$

Naša termoelektrana snage 244 MW godišnje emitira 1 680 000 000kg CO<sub>2</sub>

Kako bi smanjili značajnu količinu emisije CO<sub>2</sub>, u našem modelu 50% proizvodnje el. energije bit će proizvedeno iz hibridnih sustava solara i vjetra.

Potrošnja našeg sustava iznosi 2000 GWh godišnje. Polovica energije će biti proizvedeno iz OIE, što znači 1000 GWh godišnje.

Moramo izračunati potrebnu snagu sustava.

Ukupna godišnja potrošnja iz OIE treba iznositi :

$E_{OIE} = 0,5 \times E_{TE} = 0,5 \times 2000 \text{ GWh} = 1000 \text{ GWh}$ . Od toga pretpostavljamo da 50% dolazi iz vjetroelektrane (VE), a 50% iz fotonaponske elektrane (FNE).

Podjela:

$$FNE = E_{FNE} = 0,5 \times 1000 = 500 \text{ GWh}$$

$$VE = E_{VE} = 0,5 \times 1000 = 500 \text{ GWh}$$

Potom je potrebno izračunati potrebne snage VE, te FNE.

Emisija CO<sub>2</sub> iz preostale proizvodnje TE:

Emisija CO<sub>2</sub> (ugljen) = 1000000 × 840 = 840 000 000kg CO<sub>2</sub>/god.

Kako bi uzeli u obzir promjenjivost proizvodnje iz vjetra i sunca, FNE i VE potrebno je projektirati s obzirom na promjenjivost kroz godinu. Kako bi se zadovoljila stabilna opskrba el. energije. Korištenje kapaciteta (CF) za vjetroelektrane i fotonaponske elektrane ne mora biti konstantno tijekom godine. Za fotonaponsku energiju uzet ćemo u obzir promjenjivost zbog doba dana i godine, dok će proizvodnja vjetroelektrane ovisiti o sezonskim i dnevnim fluktuacijama vjetra. Varijabilna priroda proizvodnje iz OIE znači da je potrebno povećati instaliranu snagu ili koristiti baterije za pohranu energije kako bi se osigurala stabilna opskrba tijekom razdoblja niske proizvodnje.

Proizvodnja iz vjetroelektrana varira s obzirom na snagu i trajanje vjetra. Pretpostavit ćemo da tijekom godine postoji određena sezonska i dnevna fluktuacija, s prosječnim kapacitetom iskorištenja od 30% (CF), ali će proizvodnja varirati oko tog prosjeka.

- Promjena proizvodnje tijekom godine:
  - Zima i jesen: viši prosječni CF (oko 40%) zbog jačih vjetrova.
  - Proljeće i ljeto: niži prosječni CF (oko 20-25%) zbog slabijih vjetrova.

Prosječno godišnje iskorištenje je 30%, ali varira između 20% i 40%.

Varijabilnost proizvodnje iz fotonaponskih elektrana (FNE):

Fotonaponske elektrane ovise o suncu, koje je najjače ljeti i najniže zimi, što znači da će njihova proizvodnja varirati ovisno o dobu godine.

Promjena proizvodnje tijekom godine:

- Ljeto: visoka proizvodnja (CF oko 20%).
- Zima: niska proizvodnja (CF oko 10%).

Prosječno godišnje iskorištenje je 15%, ali varira između 10% i 20%.

Izračun varijabilnosti godišnje proizvodnje:



Kako bismo osigurali stabilnih 1000 GWh godišnje iz OIE, varijabilnost u proizvodnji znači da ćemo morati povećati instaliranu snagu vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana kako bi u trenucima nižeg CF-a sustav mogao zadovoljiti potražnju.

a) Snaga vjetroelektrane uz varijabilnost:

Ako uzmemo u obzir varijabilnost CF-a, moramo povećati instaliranu snagu kako bi sustav mogao proizvoditi dovoljno energije čak i tijekom razdoblja niskog CF-a.

Prosječni godišnji CF je 30%, ali tijekom najslabijeg razdoblja (proljeće, ljeto) može pasti na 20%.

Kako bi sustav osigurao minimalnu potrebnu proizvodnju tijekom perioda niskog CF-a, izračunavamo potrebnu snagu:

Za potrebu proizvodnje 500 GWh godišnje, potrebna instalirana snaga VE uz prosječni CF od 30% iznosi:

$$P_{ve} = \frac{E_{ve}}{CF \times 8760} =$$

$$P_{ve} = \frac{500\,000}{0,3 \times 8760} = 190,26 \text{ MW}$$

Fotonaponske elektrane imaju prosječni kapacitet iskorištenja (CF) od oko 15%, uz fluktuacije između 10% i 20%.

Za potrebnu proizvodnju od 50 GWh godišnje, potrebna instalirana snaga fotonaponskih elektrana uz prosječni CF od 15% je:

$$P_{fne} = \frac{E_{fne}}{CF \times 8760} =$$

$$P_{fne} = \frac{500\,000}{0,15 \times 8760} = 380,5 \text{ MW}$$

Trošak investicija:

Pretpostavljeni trošak instalirane snage VE iznosi 1500 €/kW.

Trošak elektrane iznosio bi:  $190\,260 \times 1500 = 285\,390\,000$  €

Pretpostavljeni trošak instalirane snage FNE iznosi 1000 €/kW.

Trošak elektrane iznosio bi:  $380\,500 \times 1000 = 380\,500\,000 \text{ €}$

Ukupni trošak ovog hibridnog sustava iznosio bi:  $285\,390\,000 + 380\,500\,000 = 665\,890\,000 \text{ €}$

Analiza isplativosti:

Pretpostaviti ćemo da se proizvedena energija iz VE i FNE prodaje na tržište po prosječnoj cijeni od  $100 \text{ €/MWh}$ .

Ukupna godišnja proizvodnja iznosi  $5275 \text{ MWh}$ .

Prihod =  $1\,000\,000 \text{ MWh} \times 100 \text{ €/MWh} = 100\,000\,000 \text{ €}$ .

Uštede u emisijama  $\text{CO}_2$

Glavna prednost prelaska na OIE je smanjenje emisija  $\text{CO}_2$ .

Ukupna proizvodnja hibridnog sustava iznosila bi  $1000 \text{ MWh}$ . Ukupna emisija iz TE na ugljen za tu proizvodnju iznosila bi:  $1\,000\,000 \times 0.84 \text{ t CO}_2/\text{MWh} = 840\,000 \text{ tona CO}_2$ .

Cijenu emisijskih jedinica (ETS) ćemo pretpostaviti na  $65 \text{ €}$  po toni  $\text{CO}_2$ .

Ušteda na emisijama iznosila bi:  $840\,000 \times 65 = 54\,600\,000 \text{ €}$

Vrijeme povrata investicije računamo po formuli

$$\text{Vrijeme povrata} = \frac{\text{Ukupni investicijski trošak}}{\text{godišnji prihod} + \text{ušteta na emisijama}} =$$

Godišnji prihod + ušteta na emisijama =  $100\,000\,000 \text{ €} + 54\,600\,000 \text{ €} = 154\,600\,000 \text{ €}$

$$\text{Vrijeme povrata} = \frac{665\,890\,000 \text{ €}}{154\,600\,000 \text{ €/god.}} = 4,3 \text{ god.}$$

## 6.2. PRIMJERI USPJEŠNIH HIBRIDNIH SUSTAVA

Otok King, Australija: ovaj udaljeni otok često se navodi kao uspješna priča za hibridne sustave. Udaljen 120 km od kopna, otok do 1990-ih nije imao povezanost sa električnom mrežom, te se proizvodnja električne energije oslanjala isključivo na dizelske generatore. Koristeći mješavinu vjetra, sunca i baterijske pohrane viška električne energije, otok uspijeva proizvesti oko 65 % svoje električne energije iz obnovljivih izvora. Proteklih 10 godina uštedeno je oko 2 100 000 litara dizela, te se emisija CO<sub>2</sub> ukupno smanjila za 57 000 tona.

2023. godine u sustav je dodana solarna elektrana nazivne snage 1,5 MW, što predstavlja dodatnu uštedu od 300 000 litara dizela, te 800 tona emisije CO<sub>2</sub> manje.

Projekt integracije obnovljivih izvora energije otoka King bila je inicijativa Hydro Tasmanije, uz pomoć Australijske agencije za obnovljivu energiju za razvoj vodećeg svjetskog hibridnog sustava napajanja izvan mreže za opskrbu 65% energetske potrebe otoka King. Sustav je sposoban za 100% obnovljivi rad, prvi izvanmrežni sustav megavatske klase s ovom sposobnošću u svijetu. Hibridni sustav uključuje bateriju od 3 MW/1,5 MWh, dva zamašnjaka od 1 MVA koji značajno pridonose sigurnosti i stabilnosti sustava, dinamički otpornik od 1,5 MW za upravljanje viškom obnovljive energije i brzodjelujući sustav za odgovor na potražnju kupaca za pružanje dodatnih rezervi .

Kopenhagen, Danska: Koristi kombinaciju vjetra, solara i biomase kako bi postigao svoje ambiciozne ciljeve obnovljive energije. Uspjeh se ovdje često pripisuje snažnoj vladinoj potpori i progresivnoj energetskej politici, uključujući znatne subvencije za projekte obnovljive energije.

## ZAKLJUČAK

Potreba za električnom energijom svake godine je sve veća, elektroenergetska mreža je svakim danom sve više opterećena. Obzirom na klimatske promjene potrebna za obnovljivim i čistim izvorima energije sve je veća. Hibridni sustavi solara i vjetra predstavljaju pouzdano rješenje za stabilnu i pouzdanu opskrbu sustava energijom. Pojedinačnom analizom karakteristika energija vjetra i solara vidimo kako oba izvora imaju svoje prednosti i ograničenja. Solarna energija postiže svoj maksimum tijekom dana, te ljetnih mjeseci, dok energija vjetra postiže maksimum tijekom noći, te u zimskim mjesecima. Kombinacijom ovih sustava nadomještamo oscilacije oba izvora što doprinosi stabilnijoj i pouzdanijoj proizvodnji.

Tehničkom analizom zaključujemo kako hibridni sustavi smanjuju korištenje fosilnih goriva što naravno povoljno utječe na okoliš, te naravno klimatske promjene koje su svakodnevno sve osjetnije. Hibridni sustavi mogu poslužiti i kao opcija za stabilizaciju mreže pomoću baterijskih sustava iz kojih se može preuzimati energija za vrijeme vršnih opterećenja.

Ekonomskom analizom pokazujemo da su inicijalna ulaganja visoka, ali i kroz godine isplativa, te se smanjuje ovisnost o tržištu fosilnih goriva.

Hibridni sustavi predstavljaju tehnički izvedivo, ekonomski isplativo, te održivo rješenje za stabilnu proizvodnju električne energije. Implementacijom ovih sustava u postojeću elektroenergetsku mrežu doprinosimo stabilnoj proizvodnji električne energije, smanjenju emisija CO<sub>2</sub>, te stabilnijoj mreži.

## 7. LITERATURA

- [1] A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8199> (pristup: 25.6.2024.)
- [2] Solar energy status in the world: A comprehensive review  
Dostupno na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723014579>
- [3] <https://gwec.net/globalwindreport2023/> (28.6.2024.)
- [4] Wind Energy Technologies: A Complete review of the Wind energy technologies:  
[https://www.researchgate.net/publication/382706341\\_Wind\\_Energy\\_Technologies\\_A\\_Complete\\_review\\_of\\_the\\_Wind\\_energy\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/382706341_Wind_Energy_Technologies_A_Complete_review_of_the_Wind_energy_technologies)
- [5] <https://www.solarfeeds.com/mag/types-of-wind-turbine-generators-and-their-functions/> (28.6.2024.)
- [6] <https://gwec.net/globalwindreport2023/> (28.6.2024.)
- [7] Solar Power Generation Dostupno na  
[https://www.researchgate.net/publication/258400998\\_Solar\\_Power\\_Generation](https://www.researchgate.net/publication/258400998_Solar_Power_Generation)(26.7.2024.)
- [8] "Design and Simulation Studies of Hybrid Power Systems"  
[https://www.researchgate.net/publication/371489282\\_Design\\_and\\_Simulation\\_Studies\\_of\\_Hybrid\\_Power\\_Systems\\_Based\\_on\\_Photovoltaic\\_Wind\\_Electrolyzer\\_and\\_PEM\\_Fuel\\_Cells/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/371489282_Design_and_Simulation_Studies_of_Hybrid_Power_Systems_Based_on_Photovoltaic_Wind_Electrolyzer_and_PEM_Fuel_Cells/figures?lo=1)
- [9] Renewable Power Generation Costs in 2022 Dostupno na:  
<https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>  
(25.7.2024.)
- [10] Control of a Solar PV/wind Hybrid Energy  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216306671> (28.7.2024.)
- [11] A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review Dostupno na  
[https://www.researchgate.net/publication/227421197\\_A\\_current\\_and\\_future\\_state\\_of\\_art\\_development\\_of\\_hybrid\\_energy\\_system\\_using\\_wind\\_and\\_PV-solar\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/227421197_A_current_and_future_state_of_art_development_of_hybrid_energy_system_using_wind_and_PV-solar_A_review) (2.8.2024)
- [12] An optimisation of the hybrid renewable energy systems [online] Dostupno na  
[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=An%20optimisation%20of%20the%20hybrid%20re](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=An%20optimisation%20of%20the%20hybrid%20re)

[newable%20energy%20systems&publication\\_year=2019&author=M.%20Jaszczur&author=Q.%20Hasan&author=P.%20Palej](#) (26.6.2024.)

[13] Optimal Power Dispatch and Reliability Analysis of Hybrid CHP-PV-Wind Systems in Farming Applications Dostupno na <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8199> (28.6.2024.)

[14] Voltage Sag Enhancement of Grid Connected Hybrid PV-Wind Power System Using Battery and SMES Based Dynamic Voltage Restorer Dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9141268> (22.7.2024)

[16] <https://www.statista.com/statistics/1031138/wind-energy-production-globally/> (25.7.2024.)

[17] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8489810>(26.7.2024)

[18] <https://oie.hr/elektroenergetska-kretanja-u-hrvatskoj-u-2022/>(28.7.2024.)

[19] <https://oie.hr/elektroenergetska-kretanja-u-hrvatskoj-u-2022/> (29.7.2024)

[20] A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review Dostupno na [https://www.researchgate.net/publication/227421197\\_A\\_current\\_and\\_future\\_state\\_of\\_art\\_development\\_of\\_hybrid\\_energy\\_system\\_using\\_wind\\_and\\_PV-solar\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/227421197_A_current_and_future_state_of_art_development_of_hybrid_energy_system_using_wind_and_PV-solar_A_review) (2.8.2024)

[21] <https://www.sungoldsolar.us/solar-panel-fuse/>(2.8.2024)

[22] <https://blog.gogreensolar.com/ac-vs-dc-breakers>(2.8.2024)

[23] Fault Diagnosis for Wind Turbine Systems Dostupno na [https://www.researchgate.net/publication/322823102\\_Fault\\_Diagnosis\\_for\\_Wind\\_Turbine\\_Systems/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/322823102_Fault_Diagnosis_for_Wind_Turbine_Systems/figures?lo=1) (29.8.2024)

[24] <https://gwec.net/globalwindreport2023/>

[25] <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>

[26] <https://gwec.net/globalwindreport2023/>

[27] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10708-020-10137-z>

[28] <https://rural-interfaces.eu/news-or-events/rural-renewable-energy/>

[29] <https://energytheory.com/what-is-vertical-axis-wind-turbine-vawt/>

[30] [https://wiki.seg.org/wiki/Wind\\_energy](https://wiki.seg.org/wiki/Wind_energy)

[31] <https://ecotality.com/solar-panel-weights/>

- [32] [https://www.researchgate.net/publication/371489282\\_Design\\_and\\_Simulation\\_Studies\\_of\\_Hybrid\\_Power\\_Systems\\_Based\\_on\\_Photovoltaic\\_Wind\\_Electrolyzer\\_and\\_PEM\\_Fuel\\_Cells/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/371489282_Design_and_Simulation_Studies_of_Hybrid_Power_Systems_Based_on_Photovoltaic_Wind_Electrolyzer_and_PEM_Fuel_Cells/figures?lo=1)
- [33] <https://svalar.hr/>
- [34] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923015349>
- [35] <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7695>
- [36] [https://www.researchgate.net/publication/371928411\\_Peak\\_Shaving\\_Mechanism\\_Employing\\_a\\_Battery\\_Storage\\_System\\_BSS\\_and\\_Solar\\_Forecasting/figures?lo=1&utm\\_source=google&utm\\_medium=organic](https://www.researchgate.net/publication/371928411_Peak_Shaving_Mechanism_Employing_a_Battery_Storage_System_BSS_and_Solar_Forecasting/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic)
- [37] <https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Nova23.png>

## SAŽETAK

U ovom završnom radu istražene su mogućnosti korištenja hibridnih sustava vjetra i solara za stabilniju proizvodnju električne energije. U prvom dijelu pojedinačno su opisani obnovljivi izvori energije hibridnog sustava. U drugom dijelu detaljnije su opisane vjetroelektrane, te fotonaponske elektrane, njihove osnove rada, dijelovi i projektiranje istih. U završnom dijelu rada opisana je njihova kombinacija u vidu hibridnog sustava, te je sustav tehnički, ekonomski i ekološki analiziran. Također opisan je i model jednog sustava proizvodnje i potrošnje iz TE, te je odrađen izračun da se 50% energije dobije iz hibridnog sustava OIE. Izračunate su investicije, količina proizvedene energije, emisije, uštede te period isplativosti.

Ključne riječi: Hibridni sustavi, fotonaponske elektrane, vjetroelektrane, obnovljivi izvori energije, energija vjetra, energija solara

## ABSTRACT

In this final paper, the possibilities of using hybrid wind and solar systems for more stable electricity production were analysed. In the first part, the renewable energy sources of the hybrid system are described individually. In the second part, wind power plants and

photovoltaic power plants their basic of operation, parts and their design are described in more detail. In the final part of the paper, their combination in the form of a hybrid system is described, and the system is technically, economically and ecologically analyzed. A model of a production and consumption system from thermal power plant is also described, and a calculation was made that 50% of the energy is obtained from a hybrid RES system. Investments, amount of energy produced, emissions, savings and payback period were calculated.

Keywords: Hybrid systems, photovoltaic power plants, wind power plants, renewable energy sources, wind energy, solar energy